

Évaluation des ressources en eau des Corbières

Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales

Rapport final

BRGM/RP-52920-FR
février 2004



Évaluation des ressources en eau des Corbières

Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales

Volume 3 - Interprétation de l'essai de
pompage de Cases de Pène

Rapport final

BRGM/RP-52920-FR

février 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Recherche du BRGM 2004-EAU-01

N. Courtois, B. Ladouche, N. Dörfliger, P. Lachassagne, V. Petit

Avec la collaboration de

J.L. Izac, J. Cubizolles, P. Thomson

Contrôle Qualité : P. Lachassagne & M. Bakalowicz



Mots clés : Corbières, Cases de Pène, Pyrénées-Orientales, Essai de pompage par paliers, Essai de pompage de longue durée, Aquifère karstique, Ressources en eau.

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

Courtois N., Ladouche B., Dörfliker N., Lachassagne P., Petit V., avec la collaboration de Izac J.L., Cubizolles J., Thomson P. (2004) - Évaluation des ressources en eau des Corbières. Phase I - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales. Rapport final. Volume 3 - Interprétation de l'essai de pompage de Cases de Pène. Rap. BRGM/RP-52920-FR., 84 p., 57 ill.

Synthèse

Dans le cadre du projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières » initié au cours du premier trimestre 2001, projet cofinancé par les conseils généraux des Pyrénées-Orientales et de l'Aude, par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et le BRGM, cinq systèmes karstiques ont fait l'objet d'une première caractérisation au cours de la première phase du projet (2001-2003).

Au terme de la phase I (2001-2003), quatre rapports et un volume de synthèse constituent le rendu et l'interprétation des principaux résultats concernant la caractérisation des systèmes karstiques suivants :

- système karstique des Corbières d'Opoul – Synclinal du Bas-Agly ;
- système karstique de la Mouillère ;
- système karstique de la Tirounère ;
- système karstique du Verdoble ;
- système karstique des Adoux – las Bordes.

Le présent rapport (vol. 3) concerne l'interprétation finale de l'essai de pompage du forage de Cases de Pène. Le forage de Cases de Pène a fait l'objet d'un essai de pompage de longue durée au cours de l'été 2001, - débit de 300 m³/h -, au début de la phase I du projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes karstiques des Corbières orientales ». Cet essai avait pour objet de tester les capacités réelles du système karstique mis en jeu en terme de productivité, de déterminer le débit et les conditions d'exploitation pour une éventuelle exploitation future du système pour l'alimentation en eau potable de Cases de Pène et d'autres collectivités du département des Pyrénées-Orientales.

Les premières interprétations ont été replacées dans un contexte hydrologique plus général, afin de caractériser le comportement du forage vis-à-vis de la recharge. Les variations du niveau d'eau du forage de Cases de Pène sont influencées par la capacité d'absorption des pertes de l'Agly notamment, fonction des lâchers de barrage de Caramany, comme le montre le tarissement de l'aquifère. Les niveaux d'eau ont été reconstitués à l'aide de deux modèles, TEMPO et GARDENIA ; les résultats de ces modèles mettent en évidence la contribution importante des pertes pour expliquer les variations des niveaux d'eau, plus de 75 % de contribution. Les pluies efficaces participent peu aux variations du niveau d'eau. La contribution des pertes est importante, le transfert de pression est rapide, alors que le transfert de masse est de l'ordre de trois mois. Ceci est confirmé par l'interprétation des analyses hydrochimiques : l'eau du forage de Cases de Pène a une signature proche de celle des pertes, mais qui a évolué au contact avec la matrice rocheuse de l'aquifère.

Le forage de Cases de Pène peut être exploité de façon raisonnable à des débits entre 300 et 500 m³/h ; pour des débits supérieurs, au vu de l'appartenance du forage au système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, des essais en grand sur un nouvel ouvrage plus profond recoupant des karstifications devraient permettre de caractériser l'effet potentiel sur les débits des deux sources principales. Au vu du comportement hydraulique du forage de Cases de Pène et du piézomètre de l'aven de Baixas, le flanc sud ne constitue pas une cible pour l'implantation de nouveaux ouvrages pour intercepter la ressource. Le flanc nord du synclinal du Bas-Agly quant à lui constitue une cible intéressante pour implanter de nouveaux ouvrages de reconnaissance en vue de tester la ressource. Des perspectives à mettre en œuvre dans le cadre de la phase II du projet, sont ainsi proposées.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. SITUATION ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU FORAGE DE CASES DE PÈNE	11
1.1.1. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques locales.....	11
1.1.2. Caractéristiques du forage	13
1.2. RAPPEL DES OBJECTIFS ET DU DÉROULEMENT DE L'ESSAI DE POMPAGE.....	14
1.2.1. Objectifs.....	14
1.2.2. Déroulement de l'essai de pompage	14
2. Comportement hydraulique de l'aquifère de Cases de Pène	21
2.1. SUIVI DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES	21
2.1.1. Données antérieures, en 1970 et 1971	21
2.1.2. Données antérieures, de 1992 à 1999	22
2.1.3. Suivi du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène depuis l'essai de pompage (période 2001-2003)	23
2.2. CLIMATOLOGIE	25
2.2.1. Données climatologiques disponibles	25
2.2.2. Alimentation par les pluies efficaces	28
2.3. LÂCHERS DU BARRAGE DE CARAMANY	31
2.3.1. Fonctionnement du barrage	31
2.3.2. Influence des lâchers sur les pertes de l'Agly	31

2.4. INFLUENCE DU TARISSEMENT NATUREL (DONNÉES ANTÉRIEURES ET ACTUELLES).....	33
2.4.1. Données antérieures.....	33
2.4.2. Données actuelles (2001-2003).....	35
2.4.3. Conclusions.....	38
3. Reconstitution des variations de niveau d'eau de l'aquifère de Cases de Pène.....	39
3.1. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE : TRAITEMENT DU SIGNAL, FONCTIONS DE TRANSFERT.....	39
3.1.1. Principe de la modélisation inverse.....	39
3.1.2. Problèmes envisagés et données utilisées.....	41
3.1.3. Résultats des simulations.....	43
3.1.4. Effet barométrique.....	54
3.1.5. Conséquences sur la connaissance du système.....	55
3.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GLOBALE (GARDENIA).....	56
3.2.1. Présentation du logiciel.....	56
3.2.2. Données utilisées.....	58
3.2.3. Résultats des simulations.....	59
3.2.4. Conséquences sur la connaissance du système.....	63
4. Fonctionnement de l'aquifère de Cases de Pène et exploitabilité.....	67
4.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES.....	67
4.1.1. Au cours de l'essai de pompage de longue durée.....	67
4.1.2. Analyses réalisées depuis 2001.....	68
4.2. INTERPRÉTATION DES RELATIONS POTENTIELLES AVEC L'AGLY ET LE VERDOUBLE.....	69

4.3. RESSOURCES ET DÉBIT D'EXPLOITATION	70
4.3.1. Synthèse des connaissances sur le système karstique « Opoul - Synclinal du Bas-Agly »	70
4.3.2. Caractéristiques hydrauliques du forage de Cases de Pène et débit maximal exploitable à court terme sur le site	73
4.3.3. Évaluation du stock d'eau souterraine disponible sur le site de Cases de Pène	74
5. Conclusions et perspectives	79
6. Principales références bibliographiques	83

Liste des illustrations

Illustration 1 - Extrait de la carte géologique de Rivesaltes (Fonteilles <i>et al.</i> , 1993).....	12
Illustration 2 - Coupe schématique du synclinal du Bas-Agly (carte géologique de Rivesaltes, Fonteilles <i>et al.</i> , 1993).....	12
Illustration 3 - Caractéristiques du forage Sainte-Colombe à Cases de Pène.....	13
Illustration 4 - Localisation géographique du forage Sainte-Colombe, à Cases de Pène.....	13
Illustration 5 - Dates clés de l'essai de pompage sur le forage de Cases de Pène.....	15
Illustration 6 - Types de mesures au niveau du site de pompage.....	16
Illustration 7 - Implantation du réseau d'observation de l'essai de pompage.....	17
Illustration 8 - Localisation des prélèvements d'eau réalisés par les plongeurs de l'ARFE, lors de leur camp de plongée de juillet 2001.....	20
Illustration 9 - Limnigramme de l'aven de Cases de Pène, extrait de la thèse de Faillat, 1972.....	22
Illustration 10 - Situation hydrologique des mesures ponctuelles de niveau d'eau de Cases de Pène de 1992 à 1999.....	23
Illustration 11 - Suivi du niveau d'eau de l'aquifère de Cases de Pène, de 1992 à 2003.....	24
Illustration 12 - Suivi du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène.....	25
Illustration 13 - Pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1967-2002.....	26
Illustration 14 - Pluviométrie mensuelle moyenne sur la période 1967-2002.....	27
Illustration 15 - ETP moyenne mensuelle à Perpignan sur la période 1969-2002.....	28
Illustration 16 - Répartition de la pluie efficace en ruissellement et infiltration.....	29
Illustration 17 - Réserves utiles moyennes (données INRA, éch. 1/2 000 000).....	30
Illustration 18 - Pluie efficace moyenne annuelle calculée sur la période 1965-1994 (Daum, 1996).....	30
Illustration 19 - Carte de localisation du réseau hydrographique Agly-Verdoble.....	32
Illustration 20 - Chronique de débit journalier sortant du barrage de Caramany.....	33
Illustration 21 - Ajustement exponentiel sur le tarissement de mars/avril 1970.....	34
Illustration 22 - Ajustement exponentiel sur le tarissement de l'automne 1970.....	34
Illustration 23 - Calcul de coefficients de variation des niveaux d'eau mesurés ponctuellement à Cases de Pène, de 1992 à 1999.....	35
Illustration 24 - Résultats des ajustements exponentiels sur les courbes de tarissement.....	36
Illustration 25 - Calcul de coefficients de tarissement, d'avril 2001 à avril 2002.....	37

Illustration 26 - Calcul de coefficients de tarissement, de juin 2002 à octobre 2003.....	37
Illustration 27 - Organigramme d'un modèle de transfert non linéaire à deux réponses impulsionnelles (d'après Pinault, 2001).	40
Illustration 28 - Modélisations inverses déterminées avec le logiciel TEMPO.....	41
Illustration 29 - Corrélogramme croisé du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène et de la pluie pondérée 0,24 x Perpignan + 0,76 x Tautavel.	43
Illustration 30 - Ajustement retenu (pluie efficace seule, niveau de base à 26 m NGF).....	44
Illustration 31 - Influence du niveau de base sur les simulations.....	45
Illustration 32 - Représentation des réponses impulsionnelles rapide et lente.....	45
Illustration 33 - Simulation (Nb = 26 m NGF) : représentation des différentes composantes. ...	46
Illustration 34 - Simulation (Nb = 26 m NGF) : pluie efficace, Oméga (seuil de pluie efficace), et Alpha (contribution à la composante rapide).	47
Illustration 35 - Pluie efficace moyenne mensuelle simulée (2001-2003).	47
Illustration 36 - Niveaux piézométriques simulés en prenant en compte les pertes de l'Agly et du Verdoble.	48
Illustration 37 - Réponses impulsionnelles des pluies et des débits des pertes.	49
Illustration 38 - Représentation des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly ».	50
Illustration 39 - Représentation des contributions relatives des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly ».	50
Illustration 40 - Représentation des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly et du Verdoble ».	51
Illustration 41 - Représentation des contributions relatives des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly et du Verdoble ».	51
Illustration 42 - Pluie efficace et seuil de pluie efficace simulés avec prise en compte des pertes cumulées de l'Agly et du Verdoble.....	52
Illustration 43 - Pluie efficace et seuil de pluie efficace simulés avec prise en compte des pertes de l'Agly seule.	53
Illustration 44 - Pluie efficace mensuelle simulée (avec prise en compte des pertes de l'Agly).....	53
Illustration 45 - Pluie efficace mensuelle simulée (avec prise en compte des pertes de l'Agly et du Verdoble).	54
Illustration 46 - Schéma de principe du modèle global à réservoir GARDENIA.	57
Illustration 47 - Valeurs initiale et ajustée des paramètres du modèle.	60
Illustration 48 - Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés pour l'ajustement retenu avec GARDENIA.....	60
Illustration 49 - Niveau aquifère simulé pour la période 1969-1972.	61

Illustration 50 - Pluie efficace annuelle simulée avec GARDENIA.....	62
Illustration 51 - Pluie efficace mensuelle simulée avec GARDENIA (période 2001-2003).	62
Illustration 52 - Sensibilité des simulations au paramètre « niveau de base » de l'aquifère.....	63
Illustration 53 - Comparaison du niveau simulé et du débit sortant de Caramany.....	64
Illustration 54 - Comparaison du niveau simulé et du débit estimé des pertes de l'Agly (x 10 dans l'illustration).	65
Illustration 55 - Estimation du bilan en eau (en moyenne interannuelle) du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.....	73
Illustration 56 - Scénarios d'exploitation du forage de Cases de Pène.....	74
Illustration 57 - Estimation des volumes d'eau souterraine mobilisables.....	76

1. Introduction

Le forage Sainte-Colombe (indice BSS :1090-3X-0026), situé sur la commune de Cases de Pène (département des Pyrénées-Orientales), a fait l'objet d'un essai de pompage de longue durée (81 j), à un débit de 300 m³/h, en 2001, dans le cadre de la phase 1 du projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières ». Le présent rapport, qui fait suite à un rapport intermédiaire édité en février 2002 (Petit *et al.*, 2002), présente l'interprétation finale de l'essai ainsi que les résultats qui en sont déduits en terme d'exploitabilité de la ressource en eau d'origine karstique.

La détermination du débit exploitable à long terme à ce forage requiert de faire appel à l'état actuel des connaissances sur l'ensemble du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, auquel il appartient.

1.1. SITUATION ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU FORAGE DE CASES DE PÈNE

1.1.1. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques locales

Le massif des Corbières est une nappe de charriage appartenant à la partie septentrionale des Pyrénées, dominant la vallée de l'Aude entre Carcassonne et Narbonne et s'appuyant au sud contre le massif cristallin de l'Agly. Cette nappe a été mise en place lors de la formation des Pyrénées à l'Éocène ; d'épaisses formations calcaro-marneuses ont été décollées de leur substratum suite aux contraintes tectoniques et déplacées du sud-est vers le nord-ouest (ill. 1).

Les événements tectoniques (plis et failles) et paléoclimatiques (érosion, transport et dépôts) qui ont précédé et suivi la mise en place des Corbières font de cette entité une zone complexe aussi bien du point de vue géologique et structural que du point de vue hydrogéologique (organisation des écoulements, individualisation de systèmes et limites).

Le forage de Cases de Pène (55 m NGF environ) se situe dans la vallée de l'Agly, en rive droite et à 100 m environ du cours d'eau qui, dans ce secteur, coule à une altitude d'environ 42 m NGF. À sa proximité existe une émergence temporaire. Le forage de Cases de Pène appartient au système karstique d'« Opoul et du synclinal du Bas-Agly », qui fait l'objet de travaux de compréhension de sa structure et de son fonctionnement dans le cadre du projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières ». L'aquifère est principalement composé des formations calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur, structurées au sein du synclinal de l'Agly et karstifiées principalement lors des périodes de bas niveaux marins du Messinien. Cet ensemble forme le système aquifère n° 145a, dit des « Corbières occidentales », classé dans les domaines à grands systèmes aquifères à nappes essentiellement libres.

Cet aquifère est alimenté principalement par les précipitations, les pertes de l'Agly et les pertes du Verdoble, situées respectivement à 7 km environ du forage de Cases de Pène et à 24 et 22 km environ (en ligne droite) des sources de Font Dame et Font Estramar (ill. 1). Ses principaux exutoires sont les sources de Font Dame et Font Estramar, situées à plus de 17 km du forage. En très hautes eaux, des émergences temporaires apparaissent aux alentours du forage ainsi qu'au niveau de l'aven de Baixas, situé à 3,5 km à l'est du forage, au sein du même ensemble calcaire.

Le forage de Cases de Pène et l'aven de Baixas se situent sur le flanc sud du synclinal du Bas-Agly. Les sources de Font Dame et Font Estramar se trouvent sur le flanc nord de ce même synclinal. Les pertes du Verdoble et de l'Agly se situent dans la zone d'affleurement de la charnière synclinale (ill. 2).

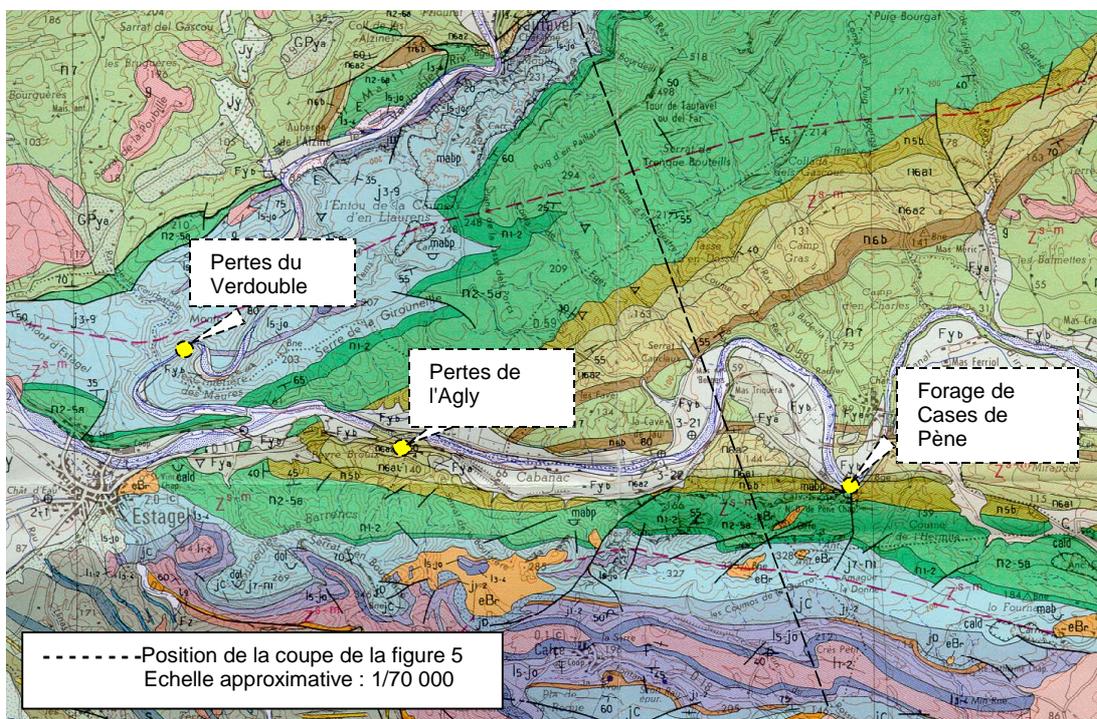


Illustration 1 - Extrait de la carte géologique de Rivesaltes (Fonteilles et al., 1993).

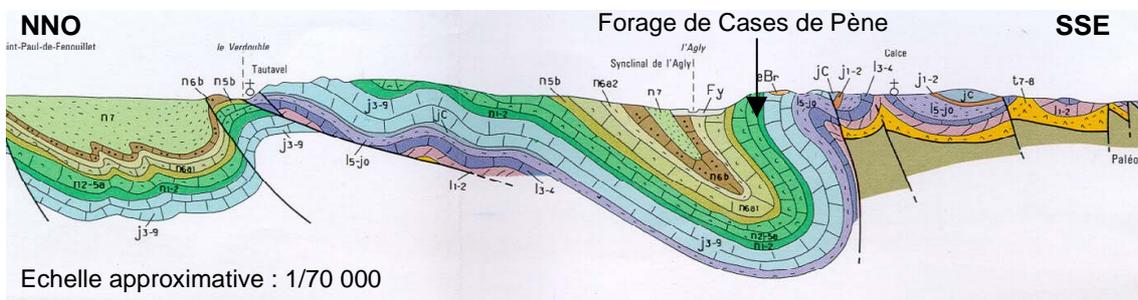


Illustration 2 - Coupe schématique du synclinal du Bas-Agly (carte géologique de Rivesaltes, Fonteilles et al., 1993).

1.1.2. Caractéristiques du forage

Le forage Sainte-Colombe à Cases de Pène est présenté par ses caractéristiques (ill. 3) et sa localisation géographique (ill. 4).

Indice BSS	1090-3X-0026
Département	Pyrénées-Orientales
Commune	041 - Cases de Pène
Lieu-dit	Notre-Dame-de-Pène
Profondeur	90,50 m
Date de fin de travaux	12/09/1989
Coordonnées (zone Lambert 3)	
X	636,690 km
Y	52,520 km
Altitude	55 m NGF environ

Illustration 3 - Caractéristiques du forage Sainte-Colombe à Cases de Pène.

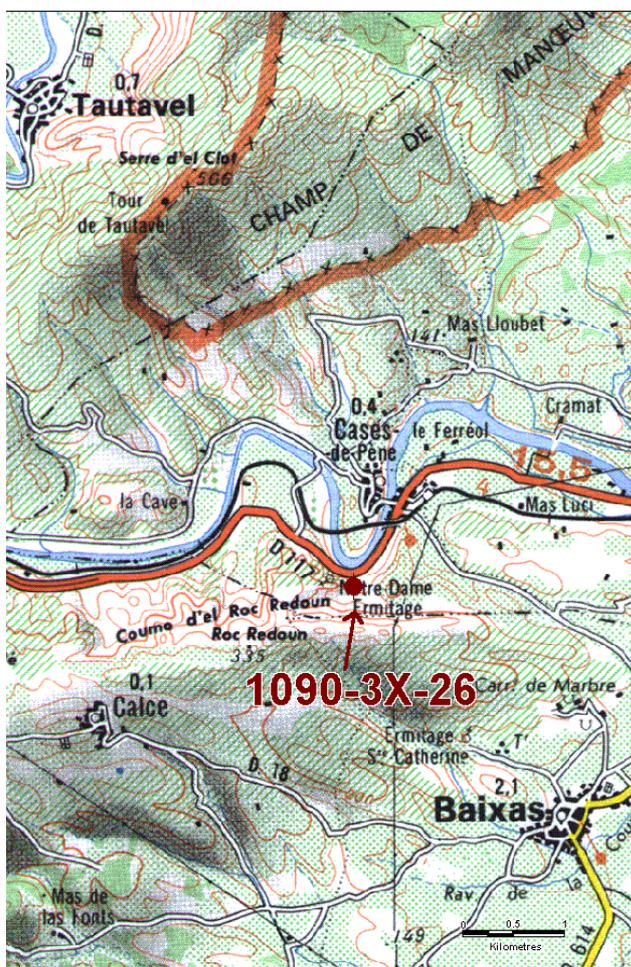


Illustration 4 - Localisation géographique du forage Sainte-Colombe, à Cases de Pène.

D'une profondeur de 90,5 m, le forage est tubé (PVC diam. 355 x 321 mm) et cimenté jusqu'à 65 m de profondeur, et en trou nu (diam. 6''1/2) au-delà (cf. coupe géologique et technique en annexe du rapport Petit *et al.*, 2002, BRGM/RP-51394-FR).

Il a été foré au sein des formations calcaires du flanc sud du synclinal de l'Agly. Les principales zones perméables recoupées se situent entre 74 m de profondeur et le fond du puits, avec une venue d'eau majeure (près des deux tiers du débit lors de l'essai au micro-moulinet) vers 90 m de profondeur.

Le site de Cases de Pène comprend également un piézomètre situé à 18 m à l'ouest du forage. L'aven de Baixas et le piézomètre, ainsi que des forages et sources plus éloignés, ont fait l'objet d'un suivi piézométrique lors des essais.

1.2. RAPPEL DES OBJECTIFS ET DU DÉROULEMENT DE L'ESSAI DE POMPAGE

1.2.1. Objectifs

Les objectifs de cet essai de pompage étaient triples :

- tester les capacités réelles du système karstique sollicité en terme de productivité, suite aux réserves émises par M. Perrissol quant à l'exploitation du forage à 350 m³/h (avis pour le Conseil général des Pyrénées-Orientales, septembre 1999) ;
- déterminer le débit et les conditions d'exploitation pour une éventuelle exploitation future du système pour l'alimentation en eau potable de Cases de Pène et autres collectivités des Pyrénées-Orientales, sur la base des résultats obtenus sur le forage existant de Cases de Pène ;
- enfin, améliorer la connaissance de cet aquifère d'intérêt patrimonial.

1.2.2. Déroulement de l'essai de pompage

Le BRGM, en concertation avec le comité de pilotage de cette opération, a conçu le programme de cet essai de pompage et en a assuré la mise en œuvre, le suivi et l'interprétation des résultats.

a) Essais de puits et essai de nappe

Deux types d'essais de pompage ont été mis en œuvre, entre mai et septembre 2001 (cette période se situant plutôt en contexte de hautes à moyennes eaux, au vu des mesures disponibles) (ill. 5) :

- des essais de pompage de courte durée (une heure), successifs (séparés d'une heure environ de remontée), et par paliers de débits croissants. Cet essai de puits a pour objectif de déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage, en quantifiant principalement les pertes de charge quadratiques ;

- un essai de pompage de longue durée (1 948 h, soit 81 j) à un débit constant de 300 m³/h. L'objectif de cet essai est de permettre d'estimer la productivité de la formation aquifère en la sollicitant à plus grande échelle (essai de nappe).

29 mai 2001	Pompage aux paliers de débit n°1 et 2 (75 et 150 m ³ /h)
5 juin 2001	Pompage aux paliers de débit n°3 et 4 (225 et 320 m ³ /h)
7 juin - 27 août 2001	Essai de pompage de longue durée à 300 m ³ /h (81 j)
à partir du 27 août 2001	Suivi de la remontée

Illustration 5 - Dates clés de l'essai de pompage sur le forage de Cases de Pène.

b) Dispositif de pompage dans le forage

L'installation du matériel de pompage a été réalisée par la société TOUAT de Sète (34) sous-traitante du bureau d'études ANTEA de Montpellier. Le matériel de pompage et d'exhaure a été installé les 28 et 29 mai 2001. Le matériel mis en place pour réaliser l'essai de pompage a été le suivant :

- une pompe immergée de 10" (marque et modèle : Jet Pompe SG10C/3D avec un moteur 8P90 de 66KW-400V) mise en place à 60 m de profondeur et fournissant un débit théorique de 300 m³/h à 55 m de HMT (cf. courbe caractéristique en annexe 2 du rapport Petit *et al.*, 2002) ;
- un câble électrique d'alimentation type 4G35 de 90 m ;
- un jeu d'électrodes pour la protection contre le manque d'eau autorisant un rabattement jusqu'à 55 m de profondeur ;
- une colonne d'exhaure en tubes acier raccordés par brides (diamètre 150 mm, diamètre brides 290 mm) ;
- deux tubes guides en PVC (diamètre 25 mm) pour la sonde de niveau par bullage (dispositif automatique de mesure) et les mesures manuelles.

L'alimentation électrique a été fournie par le réseau EDF, via un transformateur de 100 kVA, un poste de comptage de chantier et une armoire de commande.

c) Dispositif d'exhaure

À partir de la tête de puits, les eaux d'exhaure ont été rejetées dans l'Agly, distant de 150 m, via une canalisation en acier (tubes irrigation type Anfor) de 250 mm de diamètre.

À une dizaine de mètres de la tête de puits, une lyre de mesure de diamètre 150 mm a été intercalée sur la conduite d'exhaure afin de permettre des mesures de débit et de physico-chimie en continu sur l'eau d'exhaure. Ce dispositif a été inclus dans un conteneur métallique destiné à protéger les équipements de mesure et l'armoire de commande des actes de vandalisme. Cette lyre de mesure comporte les équipements suivants :

- un débitmètre électromagnétique KRHONE monté en siphon entre longueurs droites normalisées : cet appareil dispose d'un affichage et d'une sortie analogique 4-20 mA ;

- un piquage pour les prélèvements ;
- un piquage destiné à alimenter un bac dans lequel sont immergées les sondes pour les mesures de conductivité et de température ;
- une vanne de régulation de débit.

À la sortie du conteneur, la canalisation d'exhaure suit le talweg, passe sous le pont en béton de la RD 117 et se jette dans l'Agly en bordure de rivière.

d) Mesures in situ au niveau du site de pompage

Le site de Cases de Pène comprend le forage, ainsi qu'un piézomètre distant de 18 m environ vers l'ouest. La différence de hauteur entre les deux repères de mesure de la profondeur du niveau d'eau est de 0,522 m (le repère du piézomètre étant le plus bas). L'altitude du site est d'environ 55 m NGF.

Le réseau d'observation mis en place sur le site est présenté ci-dessous (ill. 6) :

Point	Paramètre mesuré	Appareillage	Type d'acquisition
Forage	Niveau d'eau	Capteur de pression par bullage Nimbus	En continu, toutes les 15 mn
		Sonde électrique manuelle	Mesures ponctuelles de contrôle
Piézomètre	Niveau d'eau	Mesure par bullage, station OTT type Orphimède	En continu, toutes les 15 mn
		Sonde électrique manuelle	Mesures ponctuelles de contrôle
Eaux d'exhaure	Débit	Débitmètre électromagnétique KRHONE, couplé à une centrale d'acquisition NAPAC (avec précision de $\pm 0,5$ % selon le constructeur)	En continu
	Conductivité et température	Station Hydrosens de OTT	En continu, toutes les 15 mn
	pH, température, oxygène dissous et turbidité	Sonde multiparamètre, couplée à une station AVANTEC	En continu
	Conductivité, température et pH		Mesures ponctuelles de contrôle

Illustration 6 - Types de mesures au niveau du site de pompage.

e) Mesures in situ sur le réseau d'observation

Le réseau d'observation de l'essai de pompage se compose de trois ouvrages existants implantés dans le même système aquifère que le forage de Cases de Pène, et des sources de Font Estramar et de Font Dame (ill. 7).

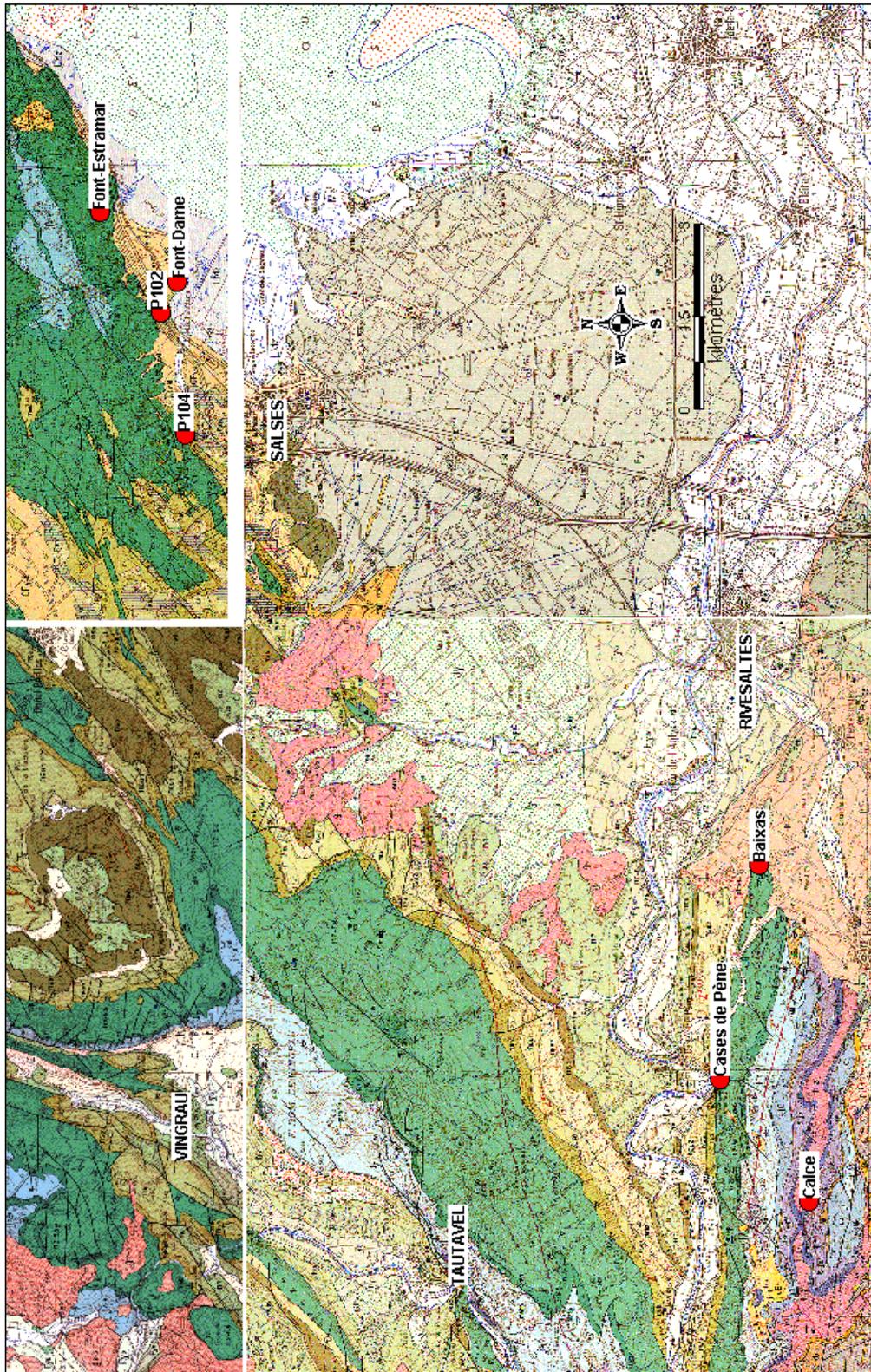


Illustration 7 - Implantation du réseau d'observation de l'essai de pompage.

Les niveaux d'eau ont été suivis en continu, à l'aide d'enregistreurs automatiques (sonde de pression et bullage) sur les points suivants :

- le forage Calce est un forage AEP, abandonné en 1995 à cause de sa faible productivité. Il capte les calcaires du Lias inférieur (Hettangien) bordés par les marnes du Lias supérieur (Carixien). Il est situé à 2,5 km du forage de Cases de Pène ;
- l'aven de Baixas est situé à l'extrémité est du chaînon calcaire constituant le synclinal du Bas-Agly. Il ne présente habituellement aucun écoulement en surface, mais il peut débiter temporairement plusieurs centaines de litres par secondes en hautes eaux. La mise en place du flexible et de la cloche de mesure de la station OTT Orphimède a nécessité l'élargissement à l'explosif de deux passages étroits afin d'accéder au plan d'eau situé au fond de l'aven. Il est situé à 3,5 km du forage de Cases de Pène (ill. 7) ;
- le piézomètre 104 pénètre dans les calcaires du Crétacé inférieur au contact karst des Corbières/plaine du Roussillon. La mesure des niveaux est assurée par la DDAF depuis 1970. Des mesures manuelles de contrôle ont été réalisées par le BRGM à l'occasion des tournées de mesure. Il est situé à 14 km du forage de Cases de Pène.

Les niveaux d'eau, le pH, la conductivité et la température ont également été suivis en continu aux sources de Font Dame et Font Estramar, les deux principaux exutoires du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.

Enfin, le pH, la conductivité et la température ont été suivis sur les eaux de l'Agly au niveau du radier d'Estagel.

f) Prélèvements d'eau pour analyses chimiques et isotopiques

Au total, 83 échantillons d'eau de l'aquifère de Cases de Pène ont été prélevés au niveau de l'exhaure du forage au cours de l'essai de pompage de longue durée :

- en plus des mesures in situ (pH, conductivité, température), ces 83 échantillons ont fait l'objet de dosages en laboratoire (pH, TAC, TH et teneur en HCO_3) ;
- 17 de ces 83 échantillons ont été sélectionnés en vue d'une analyse plus complète en éléments majeurs (HCO_3 , Ca, Mg, SO_4 , Cl, K, Na, NO_3 , NH_4 et SiO_2) et en traces (B, Sr et Br). Ils ont également fait l'objet de mesures de deux isotopes stables de l'eau : oxygène 18 et deutérium (^{18}O et ^2H). La sélection de ces 17 échantillons a été effectuée sur la base des résultats du suivi en continu de la conductivité de l'eau pompée ;
- en complément au suivi chimique, la qualité bactériologique a été évaluée à l'aide de deux prélèvements.

Les eaux de Font Dame et Font Estramar, dont les paramètres physico-chimiques ont été suivis in situ, n'ont pas fait l'objet de prélèvements pour analyses. Néanmoins,

nous disposons pour Font Estramar de trois échantillons prélevés dans la résurgence par les plongeurs de l'ARFE¹ au cours de leur camp de plongée de juillet 2001. Ces trois échantillons concernent le puits d'entrée, la galerie chaude, et le boulevard froid (ill. 8). Ces trois échantillons ont fait l'objet d'analyses chimiques et isotopiques telles que décrites ci-dessus.

Deux échantillons ont été prélevés dans l'Agly (au niveau du radier d'Estagel), ainsi qu'un échantillon dans le Verdoble (au niveau du seuil où a été réalisée l'injection lors de l'essai de traçage de juillet 2001). Ces trois échantillons ont fait l'objet d'analyses chimiques et isotopiques telles que décrites ci-dessus, afin de compléter la base de données disponibles pour l'interprétation de cet essai de pompage.

Le laboratoire d'Hydrogéologie de l'université d'Avignon a réalisé les mesures en ¹⁸O des échantillons du forage de Cases de Pène.

Le laboratoire du BRGM à Orléans a assuré toutes les analyses chimiques, ainsi que les mesures en ²H des échantillons de Cases de Pène, et les mesures en ¹⁸O et ²H des autres échantillons.

¹ Association de Recherches de Font Estramar, correspondant Cyril Brandt.

2. Comportement hydraulique de l'aquifère de Cases de Pène

Cette partie est consacrée à la description du comportement hydraulique de l'aquifère concerné par le forage de Cases de Pène, au vu des données disponibles, incluant les données spécifiques à l'essai de pompage. Il s'agit de considérer l'ensemble des paramètres qui peuvent avoir une influence sur les niveaux d'eau et de replacer l'essai de pompage dans un contexte temporel plus large.

2.1. SUIVI DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

2.1.1. Données antérieures, en 1970 et 1971

Des mesures piézométriques ont été réalisées au cours de l'année 1970 et au début de l'année 1971 dans l'aven de Cases de Pène. Elles sont présentées dans la thèse de Faillat (1972).

a) Données disponibles dans la thèse de Faillat (1972)

Les données de niveau piézométrique dans l'aven de Cases de Pène sont présentées graphiquement (ill. 9) et sont constituées :

- de 64 mesures piézométriques ponctuelles de mi-janvier à mi-juillet 1970 ;
- d'un limnigramme de mi-octobre 1970 à mars 1971, avec des interruptions de mesures.

Sur cette illustration, sont en outre présentés les limnigrammes de l'Agly et de Font Estramar en 1970, ainsi que la pluviométrie à Tautavel de janvier 1970 à mars 1971.

b) Piézométrie à Cases de Pène

La piézométrie est présentée graphiquement dans la thèse. Les différentes courbes ont été scannées puis numérisées. Par conséquent, les calculs sont réalisés sur des valeurs pouvant présenter de légères différences avec les valeurs d'origine.

L'illustration 9 montre que les niveaux piézométriques évoluent entre 33 et 50 m NGF environ, ce qui est dans la plage des mesures enregistrées à partir de 1992. La comparaison ne peut être plus précise pour plusieurs raisons :

- l'altitude de l'origine des mesures par rapport au niveau de la surface du sol n'est pas indiquée précisément ;
- la mesure des niveaux dans l'aven n'est plus possible au-delà de 33,4 m de profondeur ;

- l'aven présente un seuil de débordement pour la cote 50 m NGF. L'illustration 9 semble indiquer que ce seuil a été atteint lors de crues en août 1970 et mars 1971.

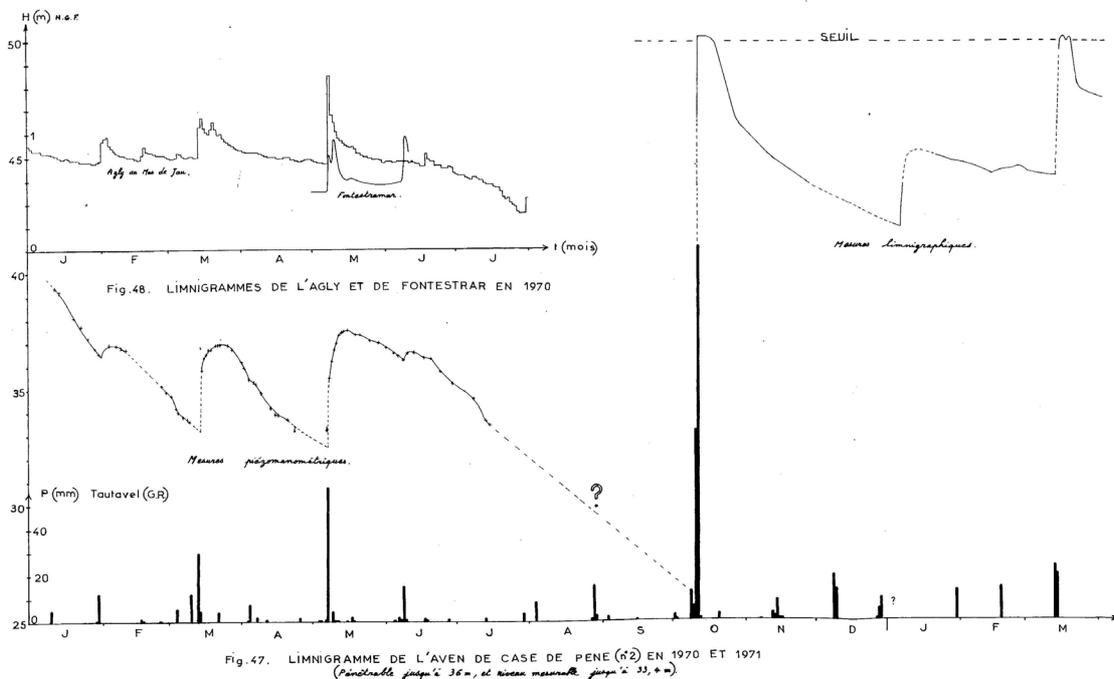


Illustration 9 - Limnigramme de l'aven de Cases de Pène, extrait de la thèse de Faillat, 1972.

Quelques éléments peuvent être donnés quant au contexte climatique de cette période, sur la base des données disponibles sur la période 1967-2003 (cf. § 2.2.) :

- l'année 1969 a été relativement pluvieuse (688 mm à Perpignan et 1 051 mm à Tautavel) ;
- l'année 1970 est légèrement plus sèche que la moyenne interannuelle calculée sur la période 1967-2002 (390 mm à Perpignan, et 560 mm à Tautavel). Elle est marquée par un fort épisode de pluie en octobre (pour ce seul mois, 176 mm à Perpignan et 271 mm à Tautavel) ;
- l'année 1971 est très humide également, avec 927 mm à Perpignan et 873 mm à Tautavel.

2.1.2. Données antérieures, de 1992 à 1999

Nous disposons sur le forage de Cases de Pène, en plus du suivi en continu qui a démarré fin mars 2001, de 19 mesures de niveau d'eau ponctuelles entre juillet 1992 et janvier 1999 (ill. 10). La mesure la plus basse est celle en date du 11 novembre 1995, avec un niveau d'eau de 22,02 m NGF.

À cette période, les pertes de l'Agly sont totales à Mas de Jau depuis la fin août 1995. Avec 609 mm, l'année 1995 est dans la moyenne interannuelle (cf. § 2.2.1.). Elle est

néanmoins marquée par une pluviométrie très asymétrique, les pluies étant concentrées sur la toute fin d'année : 244 mm de janvier à octobre, 94 mm en novembre et 271 mm en décembre. Cette asymétrie pourrait expliquer le bas niveau d'eau dans le forage. Cependant, en l'absence de plus de données, nous ne pouvons pas affirmer que ce niveau de 22,02 m NGF soit le réel niveau de base et qu'un niveau inférieur n'a pas été (ou ne sera pas) atteint.

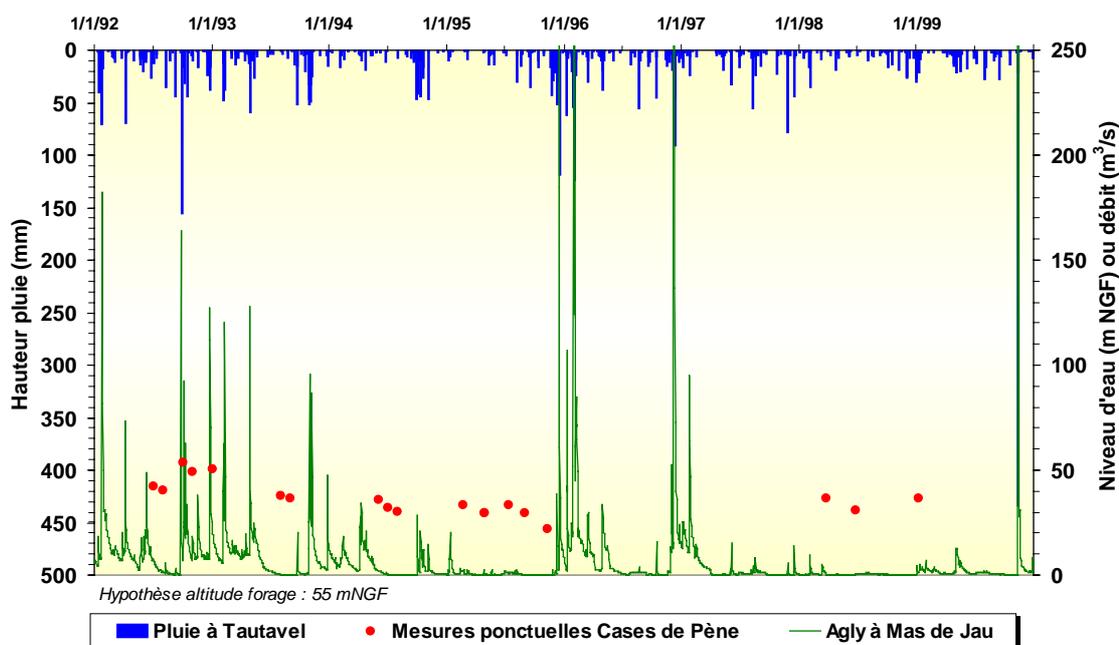


Illustration 10 - Situation hydrologique des mesures ponctuelles de niveau d'eau de Cases de Pène de 1992 à 1999.

L'illustration 11 replace le suivi du niveau d'eau de Cases de Pène dans son contexte hydrologique.

2.1.3. Suivi du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène depuis l'essai de pompage (période 2001-2003)

Depuis l'essai de pompage de 2001, l'aquifère de Cases de Pène fait l'objet d'un suivi en continu, au niveau de différents points de contrôle (cf. vol. 1, Dörfli *et al.*, 2004).

Le piézomètre d'observation à Cases de Pène a fait l'objet d'un suivi :

- avec un appareil de type Orphimède, du 27 mars 2001 au 29 mai 2001 ;
- avec un appareil de type Madofil (installé le 15 juin 2001 en remplacement), du 4 juillet 2001 au 28 février 2003, date à laquelle il a été retiré.

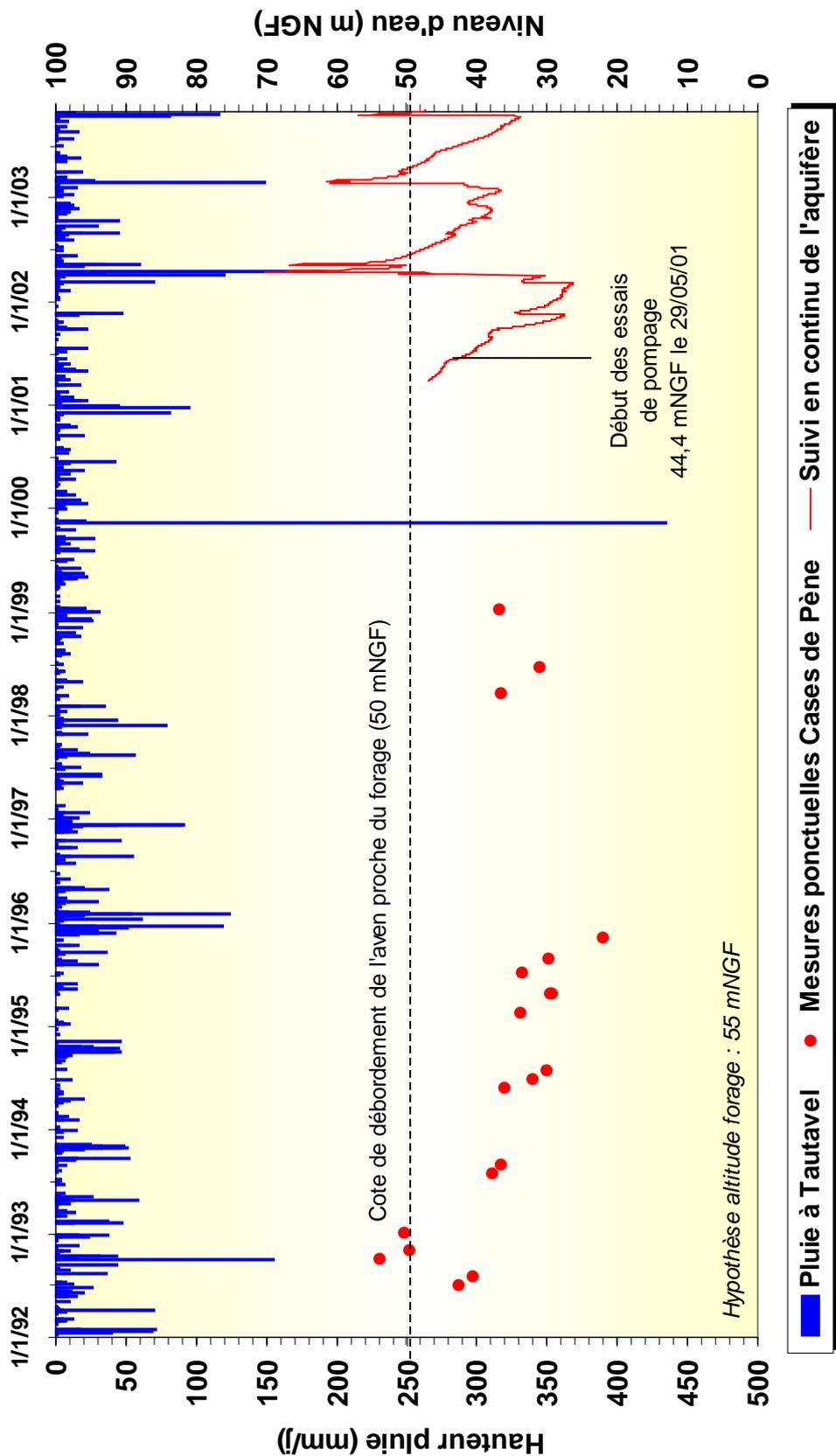


Illustration 11 - Suivi du niveau d'eau de l'aquifère de Cases de Pène, de 1992 à 2003.

Il a été décidé d'arrêter le suivi du piézomètre d'observation de Cases de Pène, car il apparaît redondant avec celui qui est mené sur l'aven de Baixas (ill. 12). Les courbes montrent de façon évidente que les niveaux piézométriques varient de la même façon et sont donc représentatifs du même aquifère. Le nivellement des deux ouvrages sera effectué au début de la phase II du projet et permettra en fonction de la précision de confirmer ou d'infirmer le fait que les deux ouvrages sont situés sur un même drain.

- un appareil de type Orphimède a été installé le 4 juillet 2001 dans l'aven et dont le capteur s'est retrouvé hors d'eau durant la période du 4 août 2001 au 4 avril 2002 ;
- un appareil de type MadoSolo V2 5 bars a été installé le 12 juin 2002 en remplacement. Il permet d'atteindre des profondeurs plus importantes.

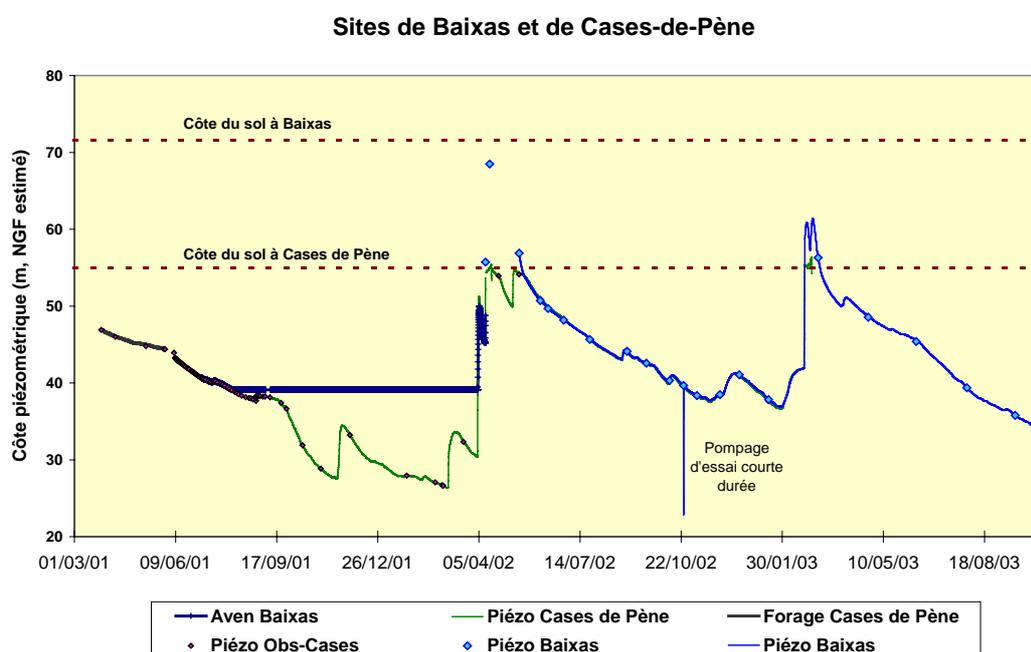


Illustration 12 - Suivi du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène.

2.2. CLIMATOLOGIE

2.2.1. Données climatologiques disponibles

a) Pluviométrie

La pluviométrie sera prise en compte au travers des deux stations météorologiques de Tautavel et de Perpignan. Les données d'autres stations sont également disponibles, mais l'analyse corrélatoire effectuée avec le logiciel TEMPO (cf. § 3.1.), entre les niveaux d'eau dans le forage de Cases de Pène et diverses stations pluviométriques a montré que les deux stations de Tautavel et de Perpignan expliquent à elles seules la majeure partie de la réponse de l'aquifère aux pluies.

Des chroniques de pluie journalière sont disponibles (données Météo France) :

- sur Perpignan, du 1^{er} janvier 1961 au 31 octobre 2003, soit près de 43 ans de mesures ;
- sur Tautavel, du 1^{er} janvier 1967 au 31 octobre 2003, soit près de 37 ans de mesures.

La pluviométrie annuelle moyenne sur la période commune de 1967 à 2002 (2003 n'est pas prise en compte, car les séries de données n'étaient pas complètes au moment de la rédaction de ce rapport) est de 520 mm à Perpignan, et de 616 mm à Tautavel (avec des écarts types respectifs de 179 et 219 mm).

De forts écarts existent entre les différentes années (ill. 13). Les années 1992 et 1996 sont les plus pluvieuses respectivement pour Perpignan (1 009 mm) et Tautavel (1 082 mm).

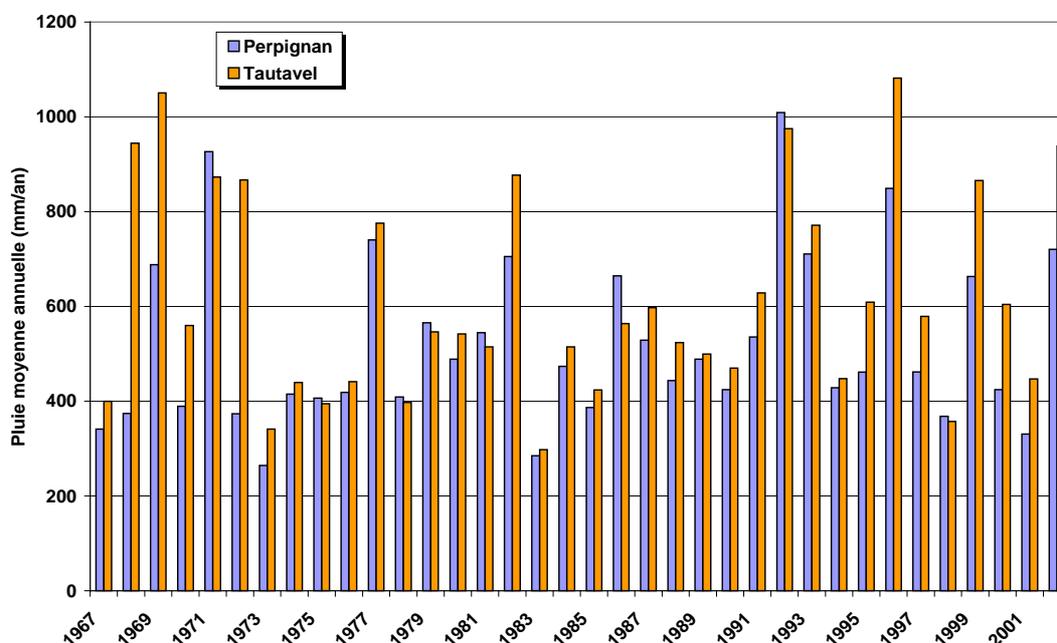


Illustration 13 - Pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1967-2002.

Avec 331 mm à Perpignan et 447 mm à Tautavel, l'année 2001 de l'essai de pompage est parmi les plus sèches de la période 1967-2002.

La répartition de la pluviométrie moyenne mensuelle sur la période 1967-2002 est donnée ci-après, avec pour comparaison l'année 2001 (ill. 14). En 2001, la pluviométrie des mois de juin et d'août est inférieure à la moyenne, alors que celle du mois de juillet lui est supérieure, due en grande partie à l'épisode de pluie du 14 juillet 2001 : il est tombé ce jour 19 mm à Perpignan et 22 mm à Tautavel.

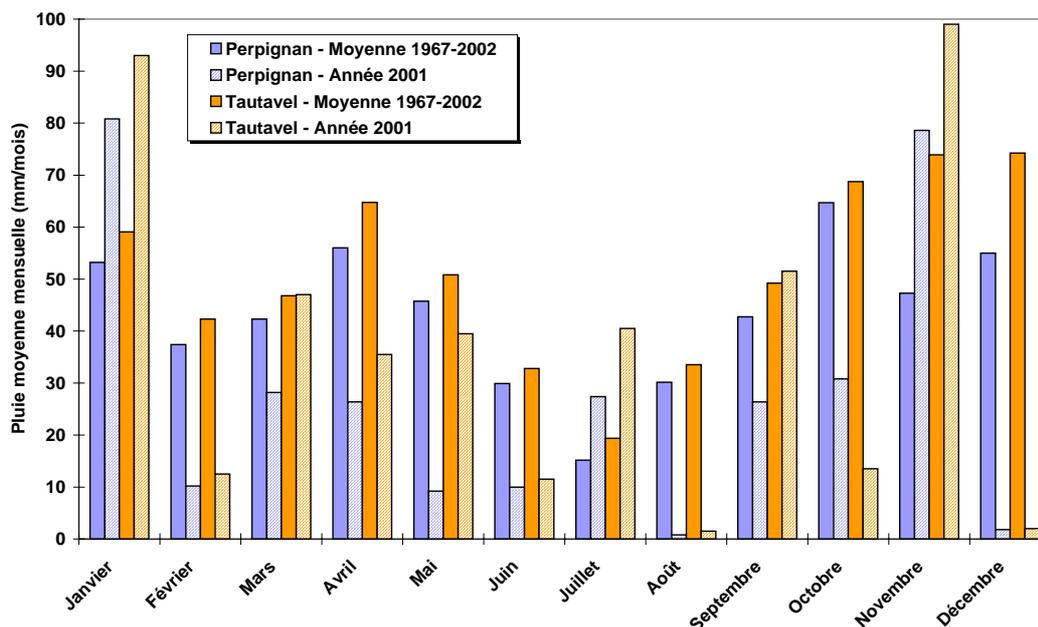


Illustration 14 - Pluviométrie mensuelle moyenne sur la période 1967-2002.

b) Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité d'eau maximum qui peut être évapotranspirée par un couvert végétal, si l'eau est toujours disponible en quantité suffisante.

Plusieurs chroniques d'évapotranspiration potentielle (ETP), calculées par la méthode de Penman à la station météorologique de Perpignan, sont disponibles (données Météo France). Il s'agit :

- d'une chronique d'ETP journalière, qui couvre la période du 1^{er} mai 1997 au 31 octobre 2003, soit près de 7 ans de mesures ;
- d'une chronique d'ETP décadaire, qui couvre la période du 10 janvier 1969 au 31 mai 2003, soit près de 35 ans de mesures.

Sur la période 1969-2002, l'ETP en moyenne interannuelle est de 1 290 mm/an (avec un écart type de 105 mm/an). Pour comparaison, l'ETP calculée pour l'année 2001 de l'essai de pompage est de 1 554 mm/an.

Le graphique ci-après (ill. 15) montre les ETP moyennes mensuelles calculées sur la période 1969-2002, avec l'année 2001 pour comparaison.

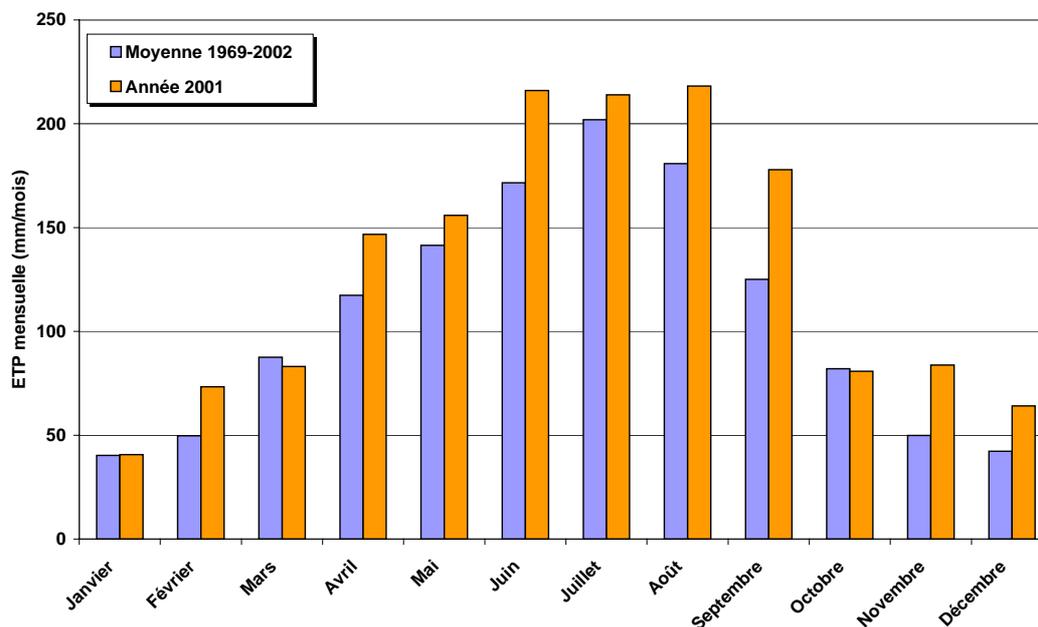


Illustration 15 - ETP moyenne mensuelle à Perpignan sur la période 1969-2002.

2.2.2. Alimentation par les pluies efficaces

a) Définition de la pluie efficace

La pluie efficace est le solde de la pluie totale une fois retirées :

- la part reprise par l'évaporation directe et par la transpiration foliaire (évapotranspiration) ;
- la part reprise par le sol pour reconstituer sa réserve en eau (variation de stock).

La pluie efficace se traduit par un écoulement d'eau, que l'on répartit schématiquement en deux composantes (ill. 16) :

- un ruissellement de surface ;
- une infiltration dans le sous-sol (recharge des aquifères).

L'estimation des pluies efficaces passe par celle de l'évapotranspiration réelle (ETR), paramètre qui dépend :

- de l'évapotranspiration potentielle (ETP), valeur maximale théorique de l'ETR ;
- de la réserve en eau du sol. La valeur maximale théorique de la réserve en eau du sol est assimilée par commodité à la Réserve Facilement Utilisable (RFU) définie par les agronomes. Cette réserve facilement utilisable est égale à la quantité d'eau du sol qui est facilement extractible par les racines sur une profondeur utile, c'est-à-dire sur la profondeur atteinte par l'enracinement. Les plantes iront puiser dans la réserve en eau du sol si l'apport d'eau par les pluies ne suffit pas.

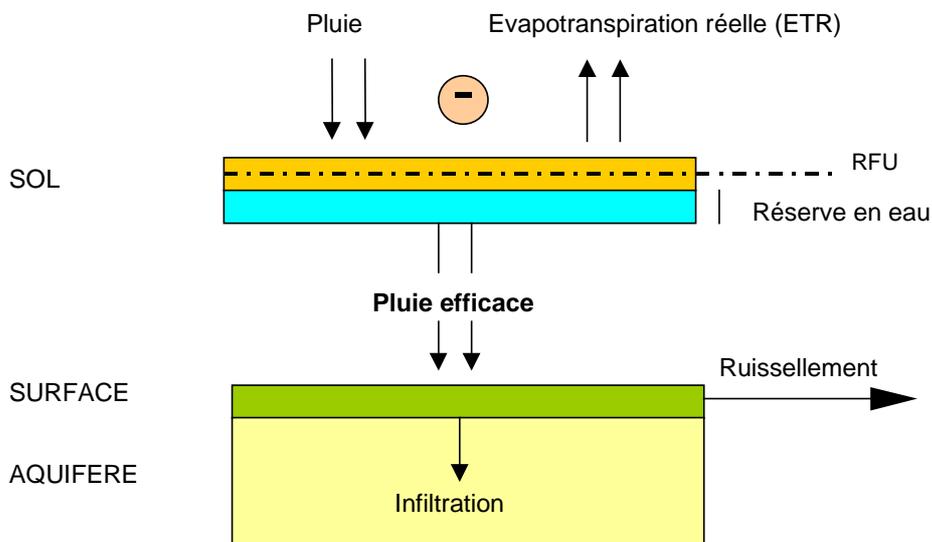


Illustration 16 - Répartition de la pluie efficace en ruissellement et infiltration.

Les valeurs de réserve facilement utilisable (RFU) des sols sont très variables en fonction du type de sol. Elles peuvent varier de moins de 30 mm pour les sols fins, à plus de 300 mm pour les sols profonds rétenteurs d'eau. Les classes de réserves, facilement utilisables des sols de la France à l'échelle 1/2 000 000 définies par l'Institut National de la Recherche Agronomique (Mori, 1982), illustrent cette variabilité (ill. 17).

b) Quelques ordres de grandeur

Le BRGM (Daum, 1996) a effectué en 1996 une étude sur les précipitations efficaces moyennes annuelles en France pour la période 1965-1994, à partir des classes de réserves en eau des sols données par l'INRA et en utilisant le logiciel GARDENIA (cf. § 3.2.). Les précipitations efficaces moyennes annuelles calculées pour la région des Corbières se situent dans les fourchettes 100-250 mm/an vers la côte, et 250-500 mm/an en allant vers l'intérieur des terres. Les résultats obtenus pour quelques stations météorologiques du Languedoc-Roussillon et des Pyrénées, en considérant trois hypothèses de réserves facilement utilisables (basse, moyenne et haute), sont présentés ci-après (ill. 18).

À Perpignan, la pluie efficace calculée varie entre 195 et 257 mm/an suivant les hypothèses de RFU utilisées, ce qui représente entre 22 et 32 % de la pluie totale sur la même période. À Saint-Girons, la pluie efficace représente entre 45 et 50 % de la pluie totale. Ce pourcentage est de 47 à 62 % à Montpellier.

Dans le cas particulier des milieux karstiques tels que les Corbières et notamment au niveau du flanc sud du synclinal du Bas-Agry, les sols sont souvent secs et peu épais, donc *a priori* présentent une faible réserve utile. D'autre part, le ruissellement de surface est peu représenté, au profit de l'infiltration. Certains auteurs assimilent d'ailleurs la pluie efficace à l'infiltration (cité « infiltration efficace », dans Faillat, 1972).

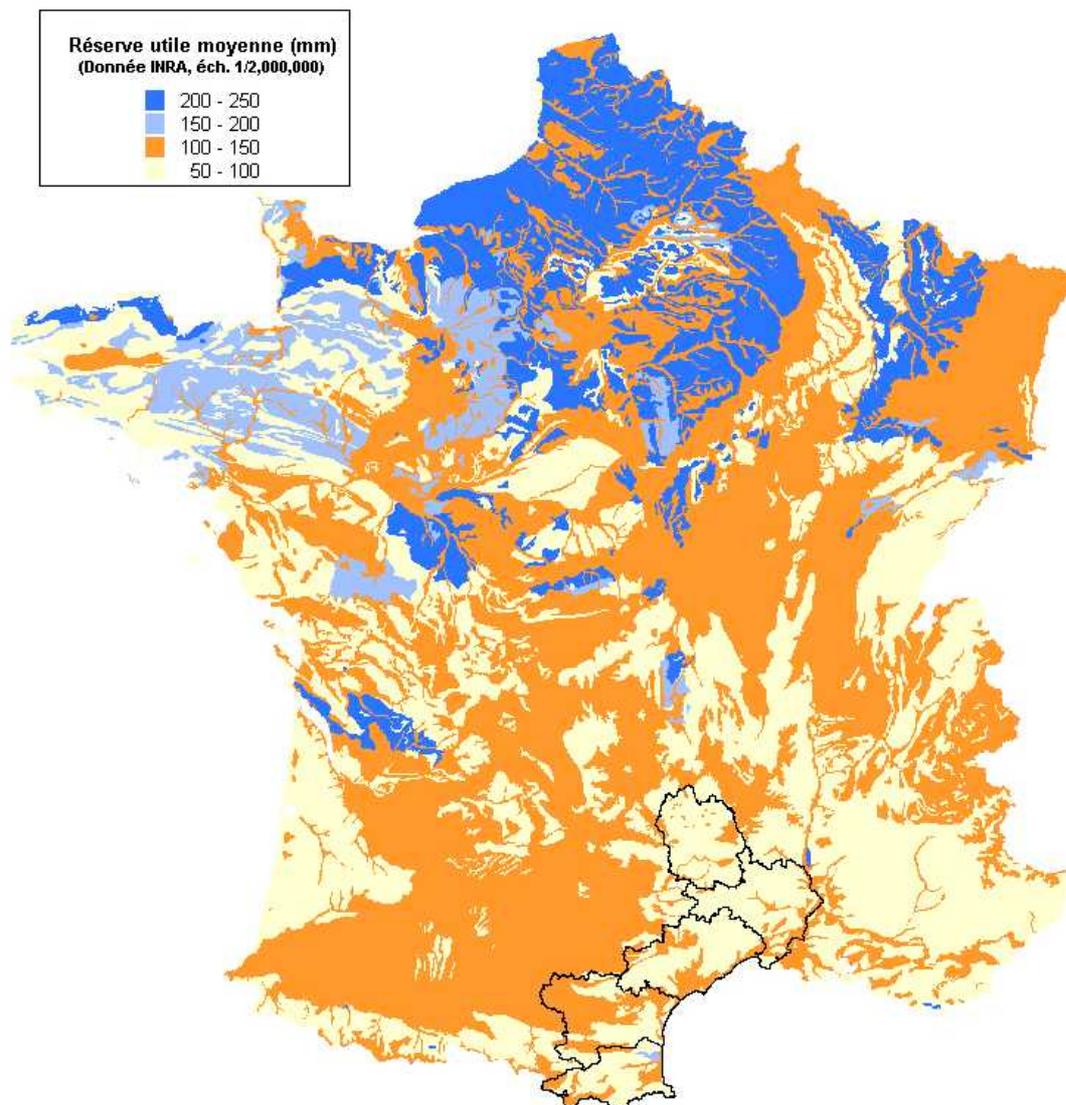


Illustration 17 - Réserves utiles moyennes (données INRA, éch. 1/2 000 000).

Station	Pluie totale	RFU basse	Pluie efficace		RFU moyenne	Pluie efficace		RFU haute	Pluie efficace	
	mm	mm	mm	% de la pluie totale	mm	mm	% de la pluie totale	mm	mm	% de la pluie totale
Montpellier	414	50	257	62 %	70	221	53 %	90	195	47 %
Perpignan	578	50	187	32 %	70	154	27 %	90	130	22 %
Saint-Girons	1 024	50	508	50 %	70	483	47 %	90	461	45 %

Illustration 18 - Pluie efficace moyenne annuelle calculée sur la période 1965-1994 (Daum, 1996).

Dans sa thèse, Faillat établit un bilan hydrologique sommaire pour Estagel (p. 120), et donne les ordres de grandeur suivants :

- pluie moyenne de 550 mm/an ;
- une « infiltration efficace » de 40 %, soit 220 mm/an.

2.3. LÂCHERS DU BARRAGE DE CARAMANY

2.3.1. Fonctionnement du barrage

Le barrage de Caramany est situé sur l'Agly, en amont d'Estagel (ill. 19). Il cumule deux fonctions : écrêteur des crues de l'Agly du 1er octobre au 31 mars, à laquelle s'ajoute du 1er avril au 30 septembre une fonction de stockage/déstockage de l'eau nécessaire à la satisfaction des besoins estivaux à l'aval, notamment les besoins en eau pour l'irrigation.

Il a été mis en eau entre 1994 et 1996 et nous disposons des données de bilan hydraulique au pas de temps journalier (notamment le débit total sortant du barrage) à partir de 1997 (données BRL) (ill. 20).

2.3.2. Influence des lâchers sur les pertes de l'Agly

Dans la traversée des calcaires aptiens (cf. ill. 1), l'Agly subit des pertes, que des études menées conjointement de 1980 à 1986 par la DDAF66 et BRL (DDAF66, 1986) avaient situées principalement entre la coopérative viticole d'Estagel et le trou de la Pastère, en amont de la station hydrométrique de Mas de Jau, pour un débit maximal estimé à 1 m³/s (ill. 19).

Les études récentes menées par le BRGM dans le cadre du projet « Corbières » ont permis d'affiner l'estimation quantitative des pertes de l'Agly, en proposant une méthode de reconstitution des débits décrite dans le volume 2 (Ladouche *et al.*, 2004). Avec cette méthode (dans laquelle l'hypothèse a été faite que la capacité maximale d'absorption du karst au niveau des pertes est de 3 000 l/s), le débit moyen des pertes de l'Agly pour la période du 1^{er} février 1997 au 19 août 2003 est de 810 l/s.

Par son rôle de soutien d'étiage de l'Agly, le barrage de Caramany contribue au soutien du débit des pertes, qui contribuent elles-mêmes à la recharge de l'aquifère de Cases de Pène. L'estimation quantitative de cette recharge induite est importante pour la connaissance du système aquifère et de son fonctionnement, notamment dans la perspective de son exploitation et du dimensionnement optimal de celle-ci, qui soit respectueuse de la ressource à court et long termes.

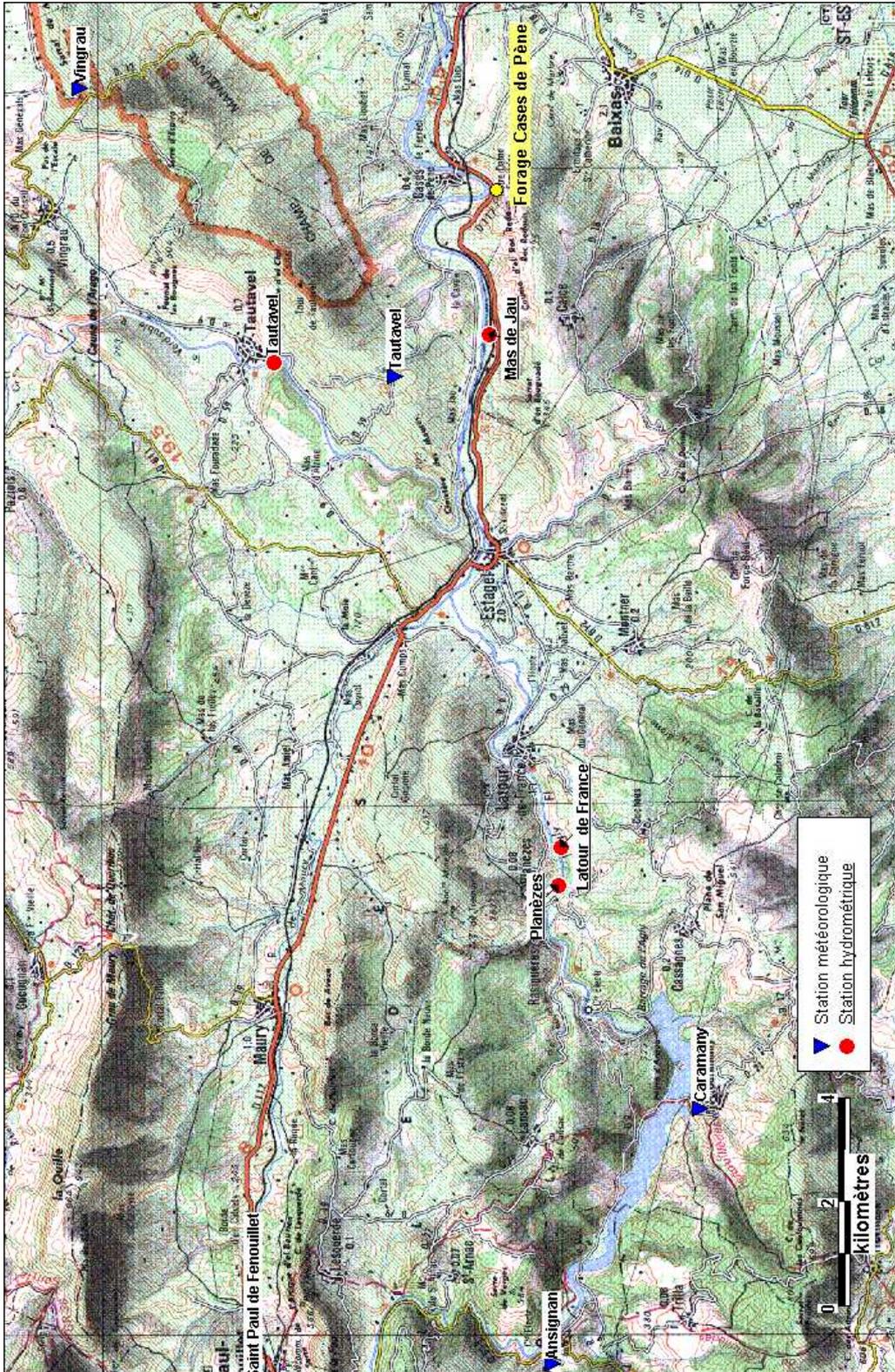


Illustration 19 - Carte de localisation du réseau hydrographique Agly-Verdoble.

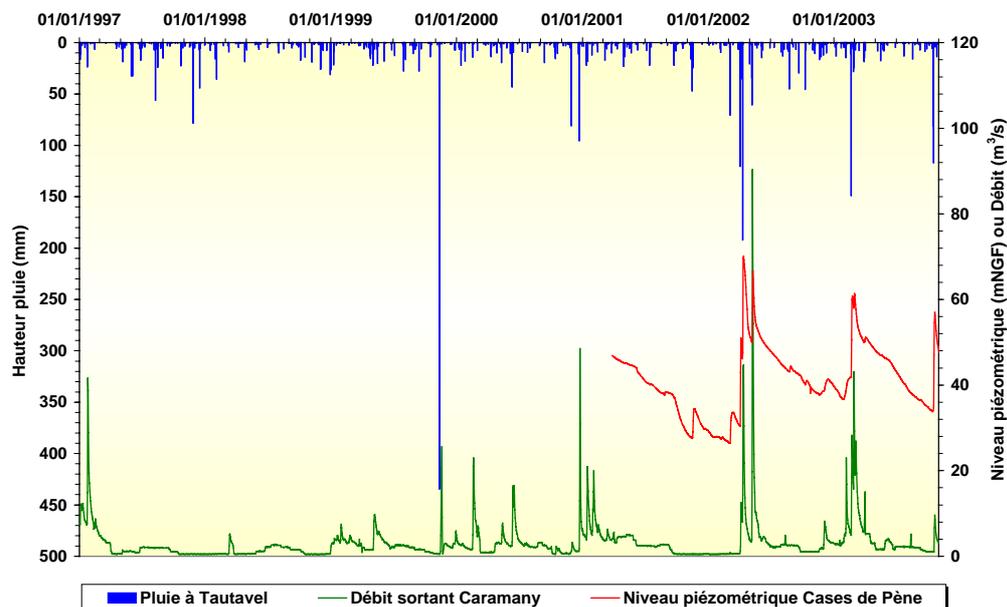


Illustration 20 - Chronique de débit journalier sortant du barrage de Caramany.

2.4. INFLUENCE DU TARISSEMENT NATUREL (DONNÉES ANTÉRIEURES ET ACTUELLES)

2.4.1. Données antérieures

a) Données de 1970 et 1971, thèse de Faillat (1972)

Deux périodes de tarissement ont fait l'objet d'un calcul : en mars-avril et en automne 1970.

L'ajustement recherché est classique, de type exponentiel :

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

avec t et τ en jours, h et h_0 en m NGF.

Cet ajustement est préféré à celui comprenant $e^{-t\tau}$ classiquement utilisé pour les hydrogrammes de sources, afin de tester l'influence du pompage sur le tarissement.

Sur les mesures ponctuelles, seule la décrue de mars-avril 1970 ne subit pas de recharge significative à partir de la pluie. Elle suit une loi exponentielle où $\tau = 1/0,0039 = 256$ j (ill. 21). Elle présente peu de différences avec le calcul mené sur le tarissement de l'automne 2001 où τ a été estimé à $1/0,0046 = 217$ j.

Sur le tarissement de l'automne 1970, le même calcul a été réalisé (ill. 22). Le tarissement s'est produit après de fortes pluies pendant la première moitié du mois d'octobre (246 mm à Tautavel sur les seuls 10 et 11 octobre). Les résultats sont moins précis ($R^2 = 0,9108$), mais restent peu différents pour le coefficient $\tau = 1/0,003 = 333$ j.

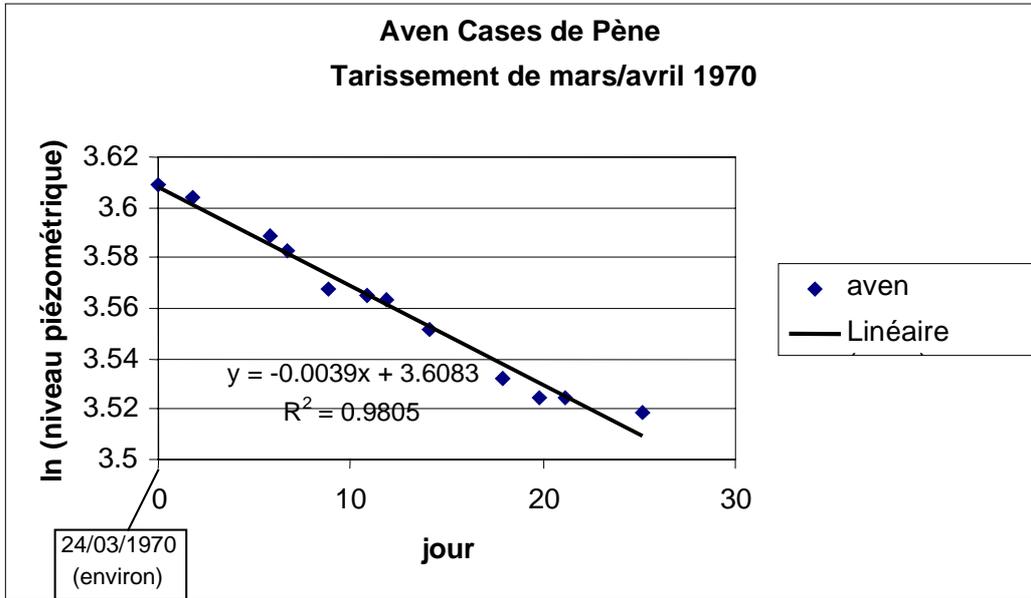


Illustration 21 - Ajustement exponentiel sur le tarissement de mars/avril 1970.

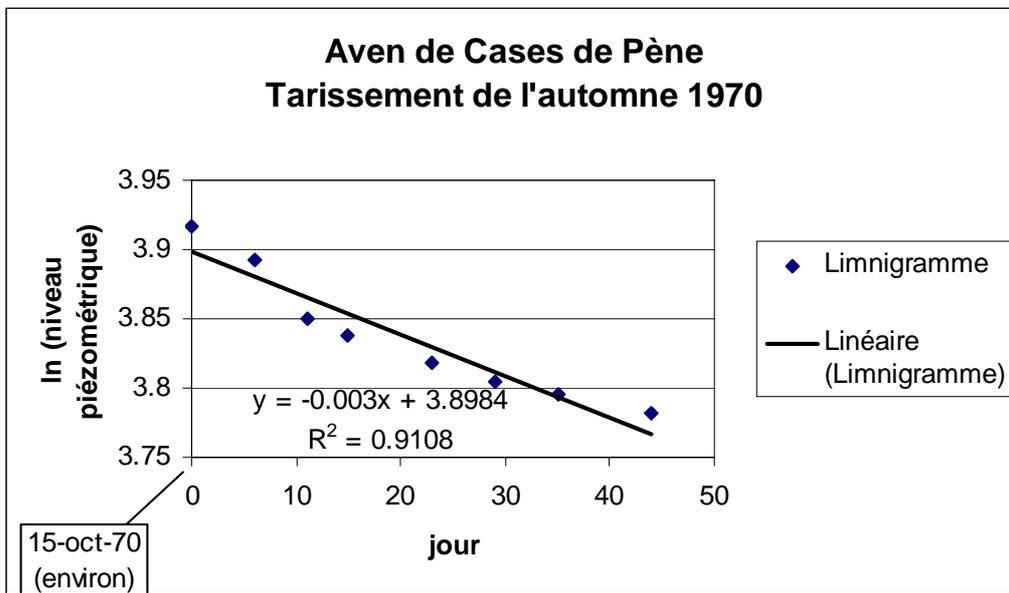


Illustration 22 - Ajustement exponentiel sur le tarissement de l'automne 1970.

b) Données ponctuelles de 1992 à 1999

Le forage de Cases de Pène avait fait l'objet d'un suivi ponctuel des niveaux d'eau, avec 19 mesures entre juillet 1992 et janvier 1999, dont 6 pour la seule année 1995 (cf. ill. 11). Il n'est pas possible de calculer de coefficient de tarissement sur la seule base de ces valeurs ponctuelles. Un simple calcul de pentes peut être fait entre des couples de valeurs, qui donnent des valeurs très approximatives des variations de niveau d'eau (ill. 23).

Date	Niveau (m NGF)	Gradient (cm/j)
01/07/1992	42,63	
01/08/1992	40,66	- 6
01/10/1992	53,78	22
01/11/1992	49,62	- 13
01/01/1993	50,41	1
01/08/1993	37,77	- 6
01/09/1993	36,5	- 4
01/06/1994	36,11	0
01/07/1994	32,01	- 14
01/08/1994	30,09	- 6
18/02/1995	33,83	2
28/04/1995	29,45	- 6
29/04/1995	29,65	20
12/07/1995	33,51	5
31/08/1995	29,86	- 7
11/11/1995	22,02	- 11
24/03/1998	36,5	2
24/06/1998	31,08	- 6
08/07/1999	36,94	3

Illustration 23 - Calcul de coefficients de variation des niveaux d'eau mesurés ponctuellement à Cases de Pène, de 1992 à 1999.

Les ordres de grandeur des variations (de 4 à 13 cm/j) sont habituels dans ce type d'aquifère.

2.4.2. Données actuelles (2001-2003)

Le niveau d'eau du forage de Cases de Pène est suivi en continu depuis le 28 mars 2001 et l'essai de pompage de longue durée a eu lieu du 7 juin au 27 août 2001. À la fin 2003, nous disposons donc de plusieurs chroniques de suivi du niveau d'eau non influencées par les essais de pompage :

- de mars à mai 2001, avant les essais de pompage ;
- de septembre 2001 à début novembre 2003, après les essais de pompage.

Les ajustements effectués sont de type exponentiel. Les résultats synthétiques de ces ajustements sont présentés dans l'illustration 24.

Début série	Fin série	Nb. jours série	Pluie équivalente sur la période (mm)	Débit sortant de Caramany	$1/\tau$ (1/j)	τ (j)	τ (mois)	Coeff. Corrél. ajustement R2
28/03/01	28/05/01	61	66,8	fort, 4,4 m ³ /s	0,0008	1250	41,7	0,973
07/06/01	27/08/01	81	48,3	de l'ordre de 2,3 m ³ /s	0,0016	625	20,8	0,980
30/09/01	16/11/01	47	89,0	faible, 0,46 m ³ /s	0,0054	185	6,2	0,958
20/12/01	05/02/02	47	13,0	faible, 0,46 m ³ /s	0,0018	556	18,5	0,886
17/03/02	03/04/02	17	46,1	faible, 0,55 m ³ /s	0,0053	189	6,3	0,984
07/06/02	10/08/02	64	46,4	de l'ordre de 2 m ³ /s	0,002	500	16,7	0,999
18/12/02	30/01/03	43	39,0	de l'ordre de 3 m ³ /s	0,0029	345	11,5	0,990
08/04/03	09/06/03	62	56,1	décroissant, de 5 à 2,3 m ³ /s	0,0016	625	20,8	0,971
17/06/03	13/10/03	118	73,5	décroissant, de 2 à 1 m ³ /s	0,0023	435	14,5	0,986

Illustration 24 - Résultats des ajustements exponentiels sur les courbes de tarissement.

a) Avant les essais de pompage, de mars à mai 2001

L'ajustement ne peut se faire qu'à partir de mars-avril 2001, début de l'acquisition de données sur Cases de Pène. Le tarissement est commencé depuis la fin décembre 2000, date des dernières fortes pluies. Ceci peut expliquer la forte constante de temps τ de $1/0,0008 = 1\ 250$ j.

b) Pendant l'essai de pompage de longue durée, de juin à août 2001

L'ajustement sur cette période donne une constante de temps $\tau = 1/0,0016 = 625$ j, soit une augmentation de pente qui peut être attribuée au pompage, mais également à la diminution concomitante du débit de Caramany, qui passe de plus de 4 à 2,3 m³/s, donc du débit absorbé par les pertes.

c) Après les essais de pompage, à partir de septembre 2001

L'ajustement effectué à partir de fin septembre 2001 montre une constante de temps τ de $1/0,0054 = 185$ j. La pente plus forte trouve peut-être son explication dans la diminution du débit sortant de Caramany, qui passe de 2,58 m³/s en août à 0,46 m³/s en septembre (ill. 25).

L'ajustement effectué à partir de décembre 2001 montre une constante de temps τ de $1/0,0018 = 556$ j, constante forte qui peut être due à la position de fin de tarissement. L'ajustement est médiocre ($R2 < 0,9$).

La forte pente de l'ajustement effectué à partir de mars 2002 est significative du début de vidange après l'épisode de pluie de début mars : τ de $1/0,0053 = 189$ j.

À partir de juin 2002, les ajustements sont effectués sur des débuts de courbes de tarissement, les épisodes de pluies étant globalement plus fréquents (ill. 26). Les constantes de temps varient entre $1/0,0029 = 345$ j, et $1/0,0016 = 625$ j.

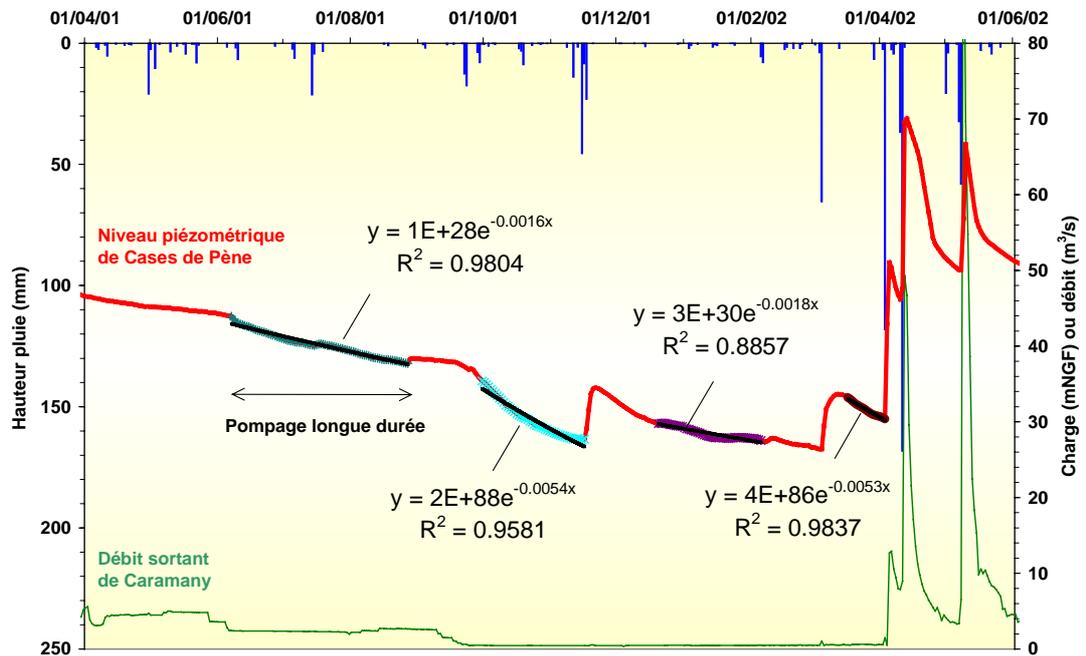


Illustration 25 - Calcul de coefficients de tarissement, d'avril 2001 à avril 2002.

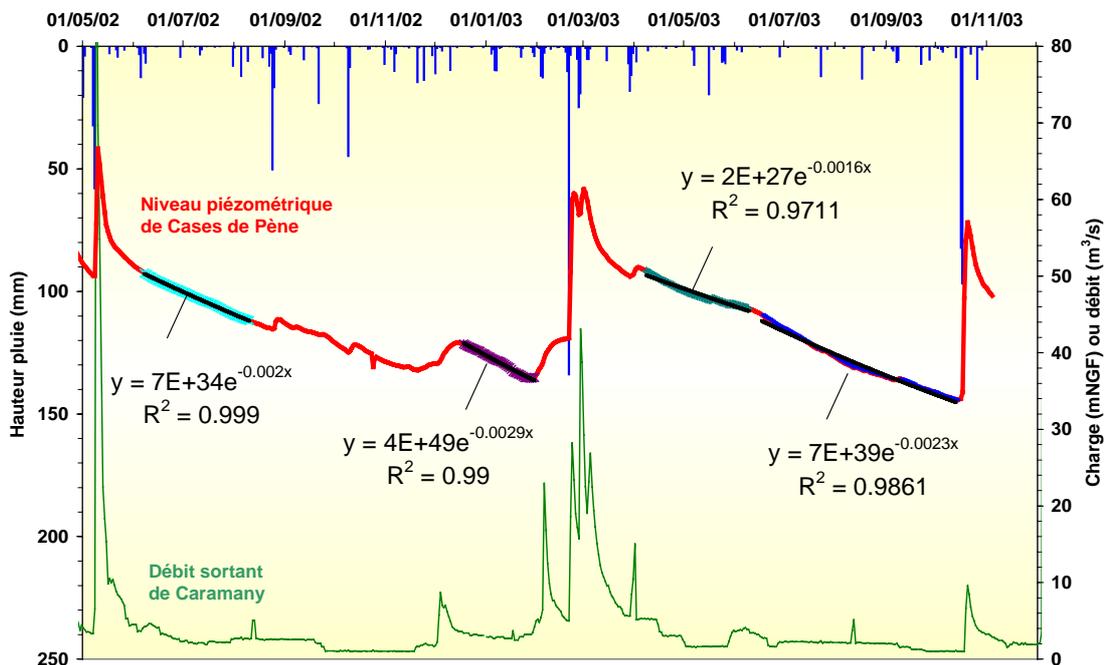


Illustration 26 - Calcul de coefficients de tarissement, de juin 2002 à octobre 2003.

Les pentes sont légèrement plus faibles que pour les tarissements de 1970, une partie de l'explication pouvant se trouver dans le soutien de débit des pertes de l'Agly par le barrage de Caramany, dont le débit sortant est significatif sur toute la période.

Cependant, les interprétations sont à faire avec précautions, les conditions hydrologiques/hydrauliques étant difficiles à comparer.

2.4.3. Conclusions

Au vu de ces résultats, il semble que l'influence des lâchers du barrage de Caramany, et en conséquence du débit des pertes de l'Agly, se fasse sentir sur les courbes de tarissement de l'aquifère de Cases de Pène, en induisant une diminution de la pente.

Toutefois, cette analyse reste à affiner puisque plusieurs facteurs peuvent intervenir qui induisent les mêmes effets : augmentation des lâchers du barrage au moment des épisodes de pluies par exemple, il conviendra de séparer les effets de la recharge par les pertes de l'Agly de celle, directe, par les pluies.

3. Reconstitution des variations de niveau d'eau de l'aquifère de Cases de Pène

Dans cette partie sont décrites les différentes méthodologies utilisées pour reconstituer les variations de niveaux d'eau de l'aquifère de Cases de Pène, en essayant de prendre en compte, et de quantifier, les paramètres influençant ces variations, ainsi que leur contribution relative.

3.1. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE : TRAITEMENT DU SIGNAL, FONCTIONS DE TRANSFERT

3.1.1. Principe de la modélisation inverse

La première approche méthodologique a consisté en une modélisation inverse, avec le logiciel de traitement du signal TEMPO, développé par le BRGM (Pinault, 2001).

Le principe de la modélisation inverse a été présenté en détail dans le volume 1 (Dörfliger *et al.*, 2004). Ne seront rappelés ici que les principes de base utilisés.

L'objectif principal est de caractériser les processus qui contrôlent les variations des niveaux piézométriques de l'aquifère de Cases de Pène.

a) Modélisation inverse

La modélisation inverse des écoulements consiste à rechercher, par l'analyse des données, une relation explicative (modèle de transfert) entre la sortie de l'hydrosystème (débit à l'exutoire d'un bassin, niveau piézométrique), et une (ou plusieurs) entrée(s) : pluie efficace, débit d'un cours d'eau mesuré en amont, niveau piézométrique d'une nappe alimentant un aquifère...

b) Réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle I d'un phénomène temporel S à une sollicitation en entrée E est solution de l'équation :

$$S(t) = I(t) * E(t) + a.t + b$$

où * représente le produit de convolution discret $(f * g)(k) = \sum_{i=l_0, l_1} f(i).g(k-i)$,

t le temps,

$S(t)$ la sortie de l'hydrosystème,

$E(t)$ l'entrée, le terme $a.t+b$ la tendance.

Lorsqu'il y a plusieurs entrées, le modèle de transfert recherché est une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles associées à chaque entrée :

$$S(t) = I_1(t) * E_1(t) + I_2(t) * E_2(t) + \dots + I_n(t) * E_n(t) + a.t + b \quad , \quad n \leq 4$$

c) Réponses impulsionnelles rapide et lente

Les processus de transfert intervenant à l'échelle de bassins font généralement intervenir plusieurs réponses impulsionnelles, utilisées simultanément (ill. 27) :

- une réponse impulsionnelle dite « rapide », Γ_r , destinée généralement à caractériser les processus à court terme : ruissellement de surface d'un bassin versant, vidange gravitaire d'une nappe par « effet de chasse » ;
- une réponse impulsionnelle dite « lente », Γ_l , nécessairement plus longue que la précédente, destinée généralement à caractériser les processus à plus long terme : infiltration, tarissement d'une nappe.

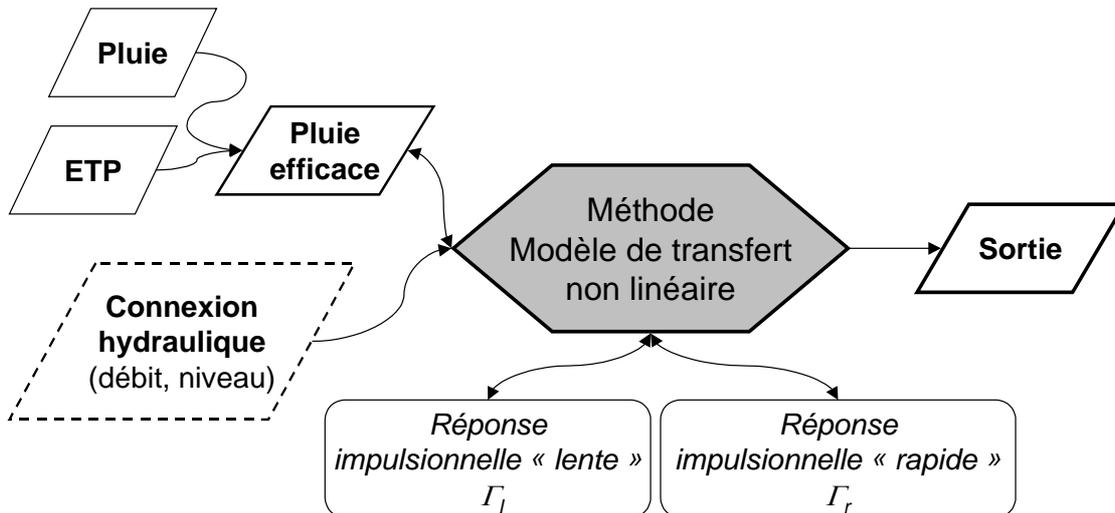


Illustration 27 - Organigramme d'un modèle de transfert non linéaire à deux réponses impulsionnelles (d'après Pinault, 2001).

d) Définition de la plume efficace

La plume efficace est la hauteur de pluie minimale permettant d'engendrer un débit à l'exutoire d'un bassin versant ou encore l'augmentation d'un niveau piézométrique. Le modèle inverse peut calculer la plume efficace à partir de séquences concomitantes de pluie et d'ETP (ou de la température).

Elle est calculée à partir d'un seuil $\Omega(t)$ représentant la réserve utile des sols de telle sorte que :

$$P_{eff} = Pluie - \Omega(t) \quad \text{si } Pluie > \Omega(t)$$

$$P_{eff} = 0 \quad \text{si } Pluie \leq \Omega(t)$$

La pluie efficace est décomposée en une composante rapide (P_r) et une composante lente (P_l) : $P_{eff} = P_r + P_l$, chacune de ces composantes étant transférée à l'exutoire ou dans la nappe au moyen de la réponse impulsionnelle correspondante.

La contribution de la pluie efficace au transfert rapide est décrite au moyen de la fonction $\alpha(t)$, dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

$$\alpha(t) = \frac{P_r}{P_r + P_l} = \Gamma_{P_{eff}} * P_{eff} = \Gamma_{P_{eff}} * (P_r + P_l)$$

3.1.2. Problèmes envisagés et données utilisées

a) Modélisations inverses envisagées

Trois types de modélisations inverses ont été réalisés avec TEMPO (ill. 28) :

- la première en ne considérant que la pluie efficace en variable explicative ;
- la seconde en considérant deux variables explicatives : la pluie efficace et le débit des pertes de l'Agly ;
- la troisième en considérant deux variables explicatives : la pluie efficace, et la somme des débits des pertes de l'Agly et du Verdoble.

3 2 1

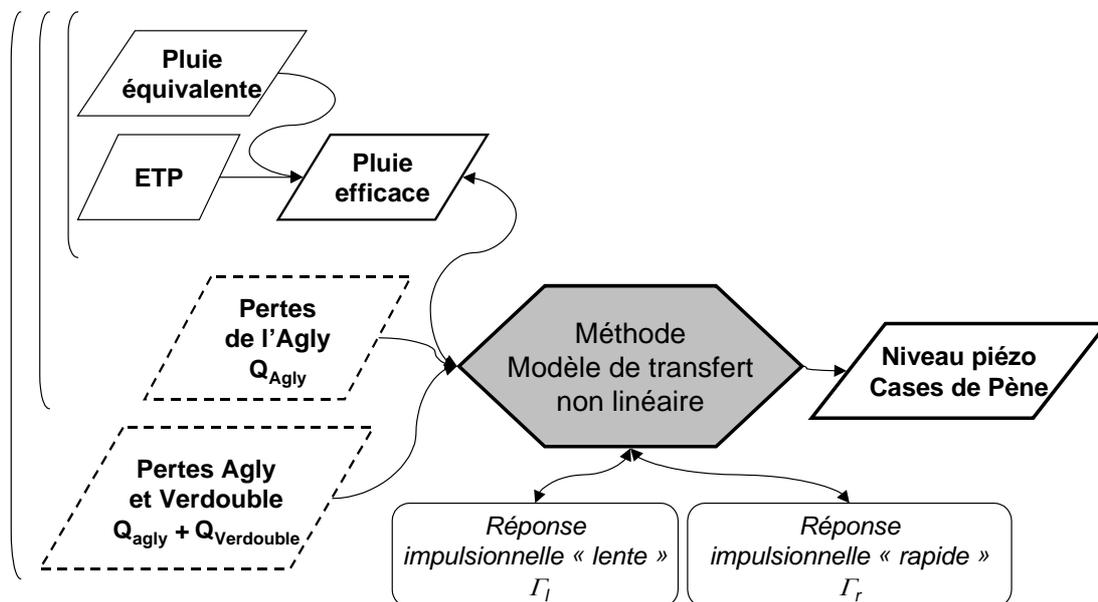


Illustration 28 - Modélisations inverses déterminées avec le logiciel TEMPO.

b) Suivi piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène

La chronique de niveaux piézométriques prise en compte dans les analyses temporelles couvre la période du 28 mars 2001 au 31 octobre 2003, au pas de temps journalier (cf. § 2.1.3.).

Les données ponctuelles de 1992 à 1999 n'ont pas été prises en compte pour déterminer les réponses impulsionnelles. Elles ne sont utilisées qu'à fin de contrôle, *a posteriori*, entre les niveaux piézométriques observés et simulés.

c) Données pluviométriques, détermination de la pluie pondérée équivalente

La pluviométrie peut être spatialisée puisque nous disposons de données sur différentes stations pluviométriques. Cependant, dans l'analyse effectuée avec TEMPO (et ensuite avec GARDENIA, § 3.2.), nous ferons l'hypothèse d'une pluie équivalente répartie uniformément sur le bassin d'alimentation.

Cette pluie équivalente est déterminée avec TEMPO par la méthode de pondération des chroniques de pluies : il s'agit de déterminer quelle combinaison linéaire des différentes chroniques de pluies permet d'expliquer au mieux (du point de vue de la corrélation statistique) le niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène.

Pour cela, les poids associés aux différentes chroniques de pluies sont calculés de telle sorte que le corrélogramme croisé non centré (Pluie pondérée/Niveau piézométrique) ait une surface maximale pour un décalage appartenant au segment (0 ; T), T étant le temps de régulation du système. Les poids sont positifs et leur somme est égale à 1.

La pondération des chroniques de pluies a été effectuée sur la période de juin 2001 à septembre 2003, au pas de temps journalier, et en prenant en compte six stations pluviométriques : Latour-de-France, Opoul, Opoul-Périllos, Perpignan, Tautavel et Vingrau.

Le corrélogramme croisé obtenu a une surface maximale pour une pondération des chroniques de pluies qui ne prend en compte que les deux stations de Perpignan et de Tautavel, avec des poids respectifs de 24 et 76 % (ill. 29). Cette pluie pondérée sera considérée comme la pluie équivalente prise en compte dans les analyses ultérieures présentées dans ce rapport.

La chronique de pluie équivalente disponible couvre la période du 1er janvier 1969 au 31 octobre 2003, au pas de temps journalier. La chronique prise en compte pour la détermination des réponses impulsionnelles couvre la seule période du 28 mars 2001 au 31 octobre 2003, période pour laquelle le suivi piézométrique de Cases de Pène est assuré en continu.

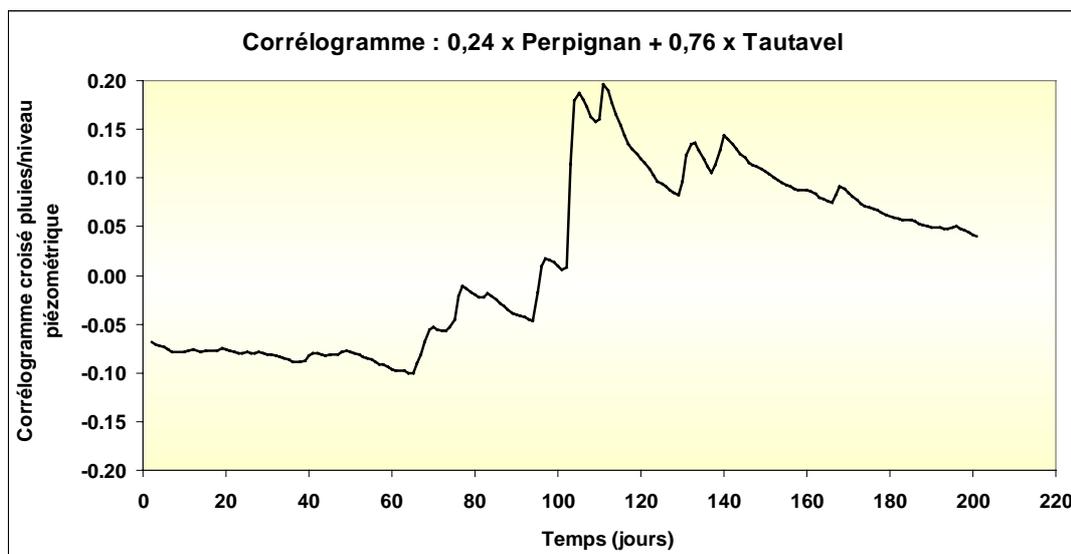


Illustration 29 - Corrélogramme croisé du niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène et de la pluie pondérée 0,24 x Perpignan + 0,76 x Tautavel.

d) Données d'évapotranspiration potentielle

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont celles de la station météorologique de Perpignan. La chronique disponible couvre la période du 1^{er} janvier 1969 au 31 octobre 2003, au pas de temps journalier. Comme pour les pluies, la chronique prise en compte pour la détermination des réponses impulsionnelles couvre la seule période du 28 mars 2001 au 31 octobre 2003.

e) Débits des pertes de l'Agly et du Verdoube

Nous avons utilisé pour la détermination des réponses impulsionnelles, les débits des pertes de l'Agly et du Verdoube, estimés selon la méthode présentée dans le volume 2 (Ladouche *et al.*, 2004), au pas de temps journalier, et sur la période du 28 mars 2001 au 31 octobre 2003.

3.1.3. Résultats des simulations

a) Avec la pluie efficace seule en donnée d'entrée

La première série de simulations est effectuée en ne prenant en compte que la pluie efficace comme variable explicative des variations piézométriques.

Dans TEMPO, dans le cas d'un suivi piézométrique, la hauteur d'eau est exprimée par rapport à un niveau de référence (niveau de base), de telle sorte que cette hauteur tende vers 0 en l'absence de recharge et de prélèvement (à l'échelle d'un cycle hydrologique). Ce niveau de référence est généralement le niveau piézométrique minimum sur la fenêtre d'observation.

Dans TEMPO, ce niveau de base est imposé. Il contraint donc les résultats puisque les niveaux simulés ne pourront descendre en deçà de ce niveau minimum.

L'illustration 30 présente les résultats du meilleur ajustement retenu pour la période mars 2001-octobre 2003. Le niveau de base imposé est de 26 m NGF (qui correspond au niveau minimum observé sur la période).

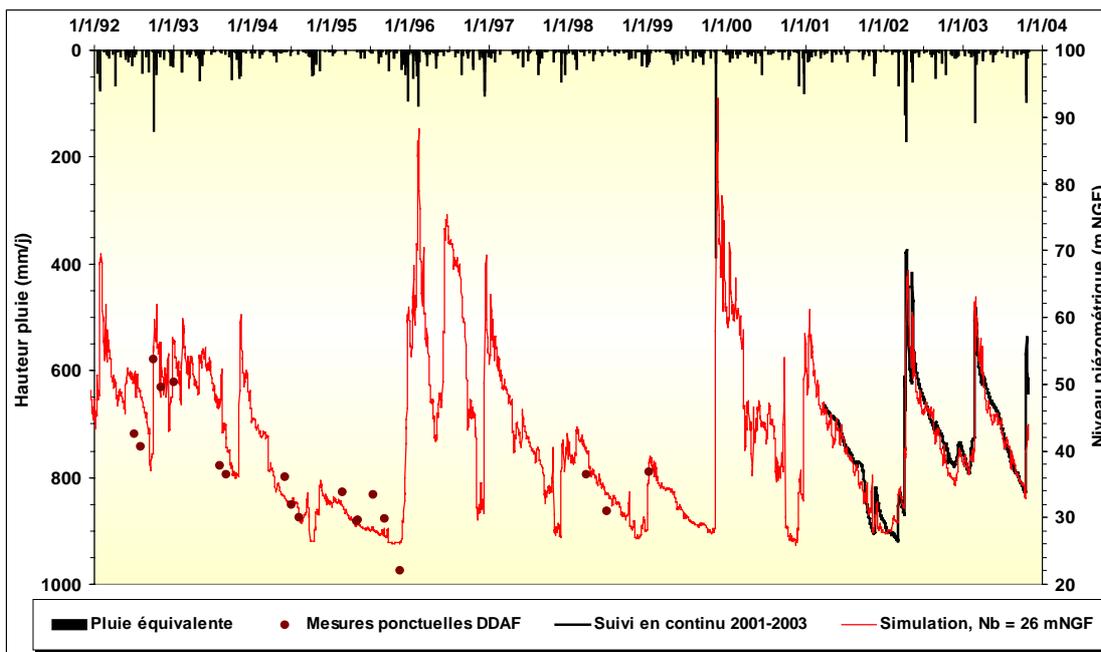


Illustration 30 - Ajustement retenu (pluie efficace seule, niveau de base à 26 m NGF).

En termes de reconstitution des variations des niveaux piézométriques, la simulation avec TEMPO donne des résultats relativement satisfaisants, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,955$ (95 % de la variance expliquée) et un coefficient de Nash $N = 0,90$. Les amplitudes des pics de crue sont bien rendues, ainsi que les tarissements. Les valeurs ponctuelles de 1992 et 1999 s'inscrivent relativement bien dans la courbe simulée, à l'exception des valeurs haute (33,51 m NGF) et basse (22,02 m NGF) respectivement de juillet et de novembre 1995.

Des tests ont été effectués avec différents niveaux de base (20, 22, et 24 m NGF). Les résultats montrent qu'avec des niveaux de base inférieurs à 26 m NGF, la simulation ne s'améliore que très peu pour les données ponctuelles de 1992 à 1999, et qu'en revanche elle se dégrade pour la période 2001-2003 (ill. 31). Le niveau bas de 22 m NGF observé en novembre 1995 n'est restitué qu'avec le niveau de base de 20 m NGF, mais la qualité de la simulation est alors très dégradée pour le reste de la période.

Le modèle de transfert correspondant à la simulation retenue (avec le niveau de base $N_b = 26$ m NGF) se décompose en deux réponses impulsionnelles rapide (Γ_r) et lente (Γ_l), présentées ci-après (ill. 32).

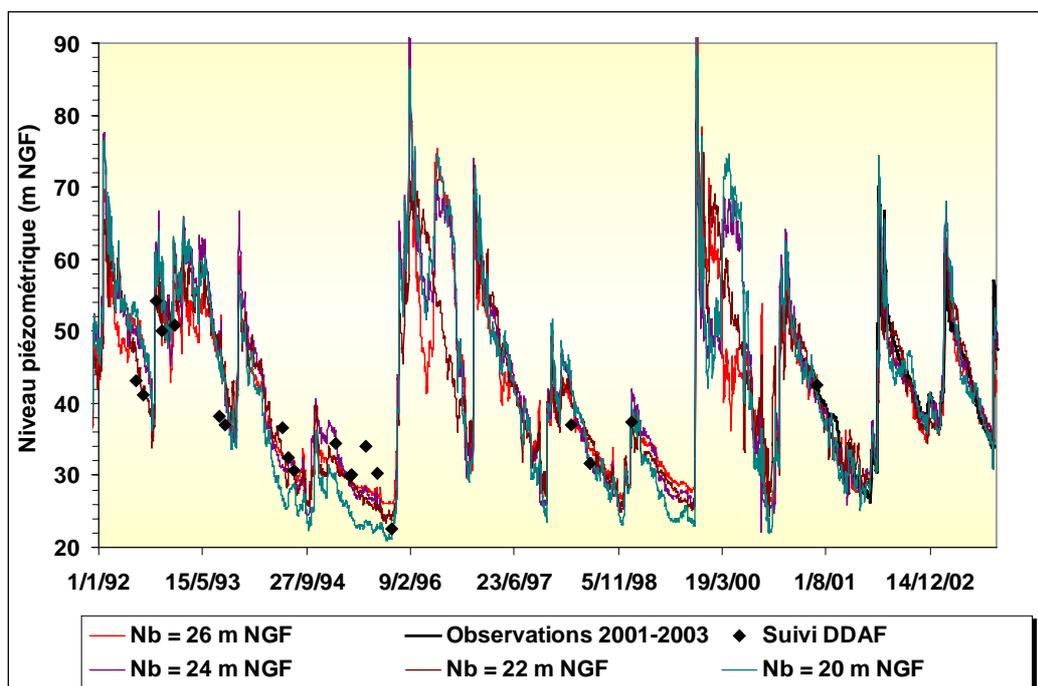


Illustration 31 - Influence du niveau de base sur les simulations.

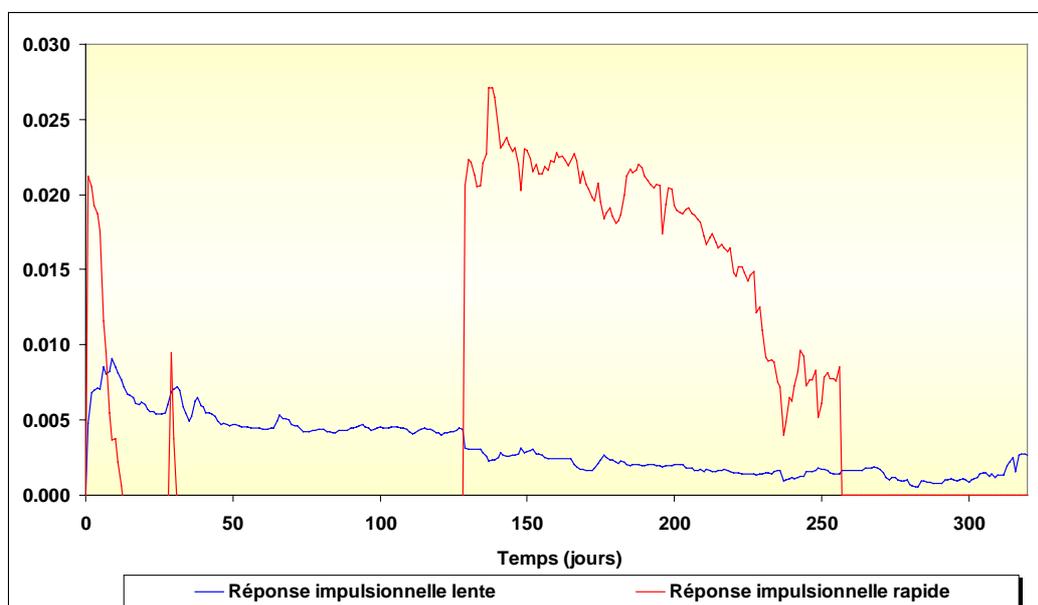


Illustration 32 - Représentation des réponses impulsionnelles rapide et lente.

La réponse impulsionnelle « rapide » fait apparaître un caractère bi-modal caractéristique d'une réponse non linéaire :

- un premier pic court et marqué à 1 jour, qui pourrait être interprété par deux phénomènes : (1) comme « l'effet de chasse », réponse rapide du système

karstique aux épisodes de pluie efficace (écoulement turbulent entre la zone d'infiltration des pluies efficaces -épikarst- et la zone noyée de l'aquifère), (2) l'effet d'onde de pression qui se produit lors des crues des cours d'eau de l'Agly et du Verdoble, dans des conduits en charge ;

- une deuxième partie de courbe qui n'apparaît qu'après un délai de 130 jours environ (soit un peu plus de 4 mois) après un épisode de pluie efficace, et est sensible sur une durée de 126 j environ (soit 4 mois). Cette seconde partie pourrait s'interpréter comme l'effet à long terme de la recharge de l'aquifère, notamment l'effet de son alimentation par les pertes.

La réponse impulsionnelle « lente » caractéristique d'une réponse linéaire présente un pic de faible amplitude quelques jours après un épisode de pluie efficace, puis décroît régulièrement de manière exponentielle. Ce comportement évoque la recharge puis la vidange d'un réservoir.

L'illustration 33 donne la représentation des deux composantes « rapide » et « lente » résultantes, calculées comme la convolution de la réponse impulsionnelle par l'entrée, soit ici la pluie efficace :

$$H_{\text{simulée}} = H_{\text{rapide}} + H_{\text{lente}} = \Gamma_r * P_r + \Gamma_l * P_l \quad \text{en m NGF}$$

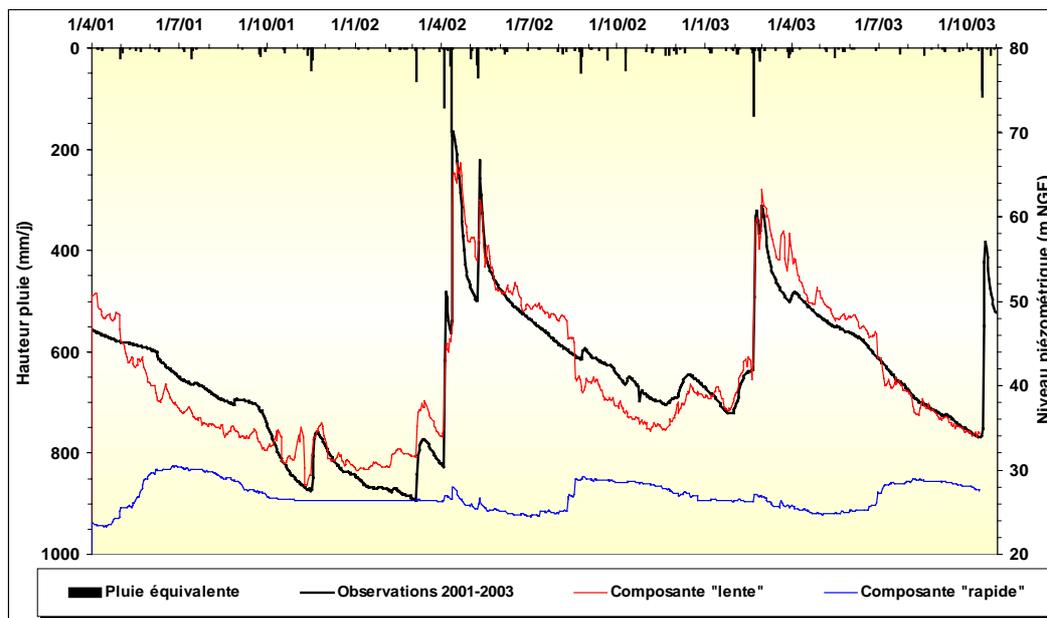


Illustration 33 - Simulation (Nb = 26 m NGF) : représentation des différentes composantes.

Ces résultats font apparaître que la composante « rapide » est prépondérante lors des épisodes de crue et que sa part relative diminue fortement au profit de la composante « lente » en période d'étiage prononcé. La composante « lente » est comparativement à la composante « rapide », peu sensible aux épisodes de pluies, et peut s'interpréter comme le tarissement de l'aquifère.

La pluie efficace simulée, ainsi que sa contribution à la composante « rapide » exprimée par le paramètre Alpha, sont représentées ci-dessous (ill. 34 et 35). Dans cette simulation, la pluie efficace représente au maximum 13 % de la composante « rapide », ce qui est relativement peu. Le seuil de pluie efficace est relativement élevé, ce qui limite en durée les épisodes de pluie efficace aux crues et aux périodes hivernales.

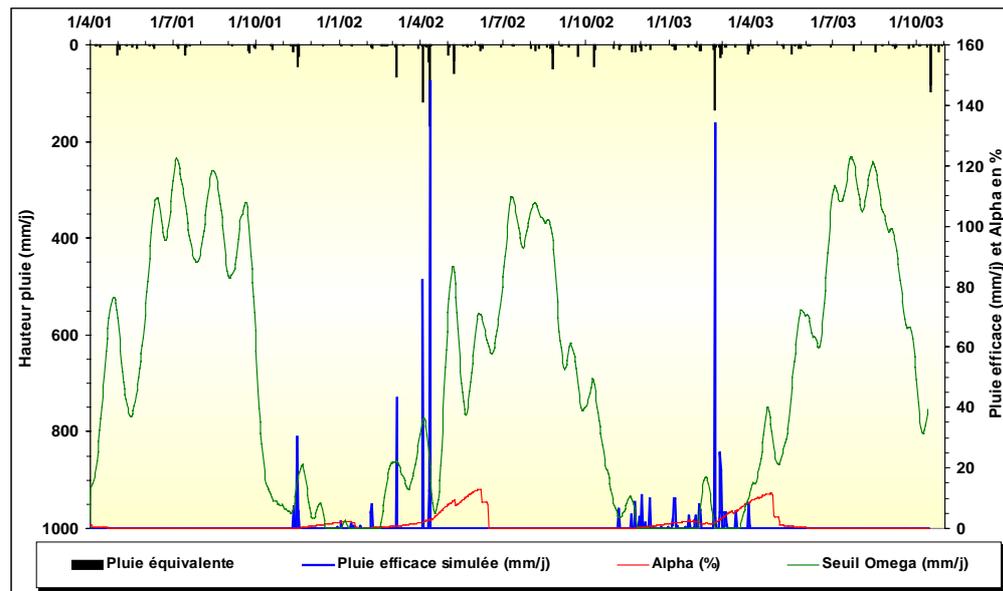


Illustration 34 - Simulation (Nb = 26 m NGF) : pluie efficace, Oméga (seuil de pluie efficace), et Alpha (contribution à la composante rapide).

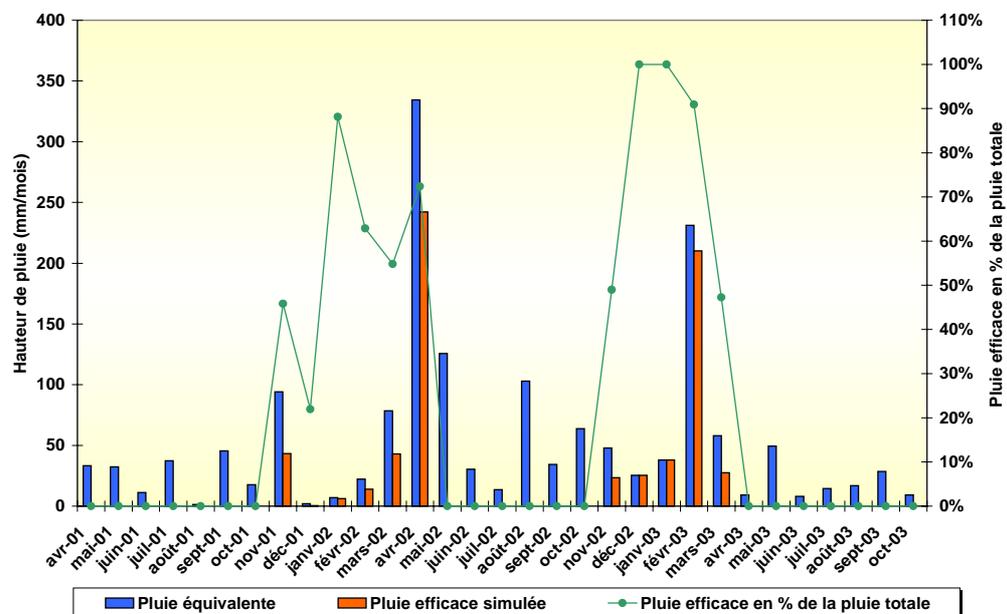


Illustration 35 - Pluie efficace moyenne mensuelle simulée (2001-2003).

b) Prise en compte des pertes de l'Agly et du Verdoble

Deux autres séries de simulations ont été réalisées en prenant en compte, en plus de la pluie efficace, une autre variable explicative : (i) les pertes de l'Agly seules, et (ii) les pertes cumulées de l'Agly et du Verdoble. Dans ces simulations, le niveau de base est imposé à 26 m NGF. Les niveaux piézométriques simulés permettent globalement de reproduire les évolutions observées (93 % de la variance mesurée expliquée), l'ajustement est légèrement moins satisfaisant en prenant en compte les pertes cumulées Agly et Verdoble (ill. 36).

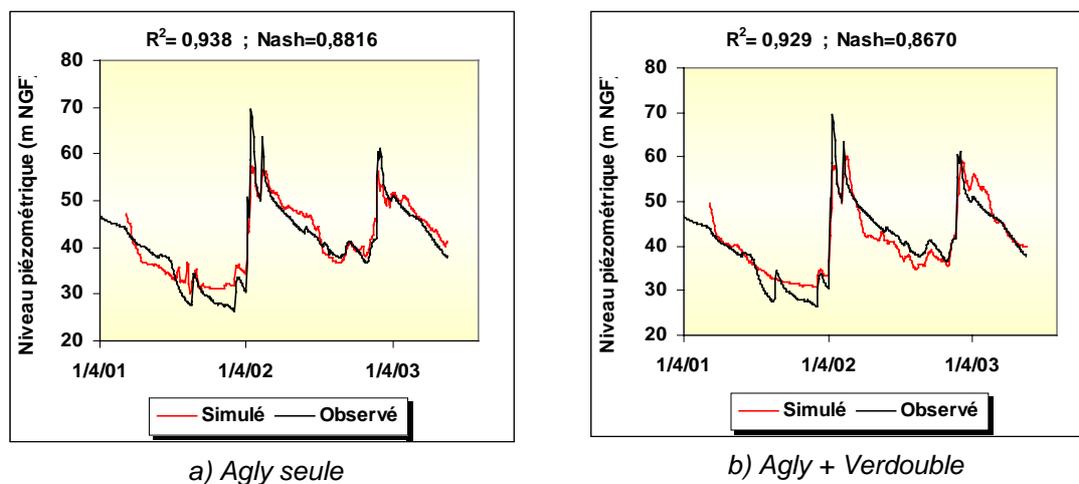


Illustration 36 - Niveaux piézométriques simulés en prenant en compte les pertes de l'Agly et du Verdoble.

L'importance relative des deux réponses impulsionnelles varie beaucoup en fonction de la prise en compte des pertes de l'Agly seules, ou des pertes cumulées Agly et Verdoble (ill. 37). Lorsque l'on considère les données des pertes de l'Agly, la part relative des deux réponses est similaire à court terme (50 % environ pour les faibles décalages) tandis que la part de la réponse impulsionnelle des pertes devient majoritaire lorsque que l'on considère en entrée la somme des pertes de l'Agly et du Verdoble. Les différences suivantes sont également mises en évidence :

- **Pertes de l'Agly seules**

- La réponse impulsionnelle correspondant aux pertes est pluri-modale, avec un premier maximum à 2 jours, un second moins marqué à 28 jours (soit un mois environ), et deux autres pics d'amplitude insignifiante aux environs de 300 jours. Cette réponse impulsionnelle est significative sur une durée de 46 jours environ (soit 1,5 mois).
- La réponse impulsionnelle correspondant aux pluies efficaces est de faible amplitude, et décroît régulièrement.

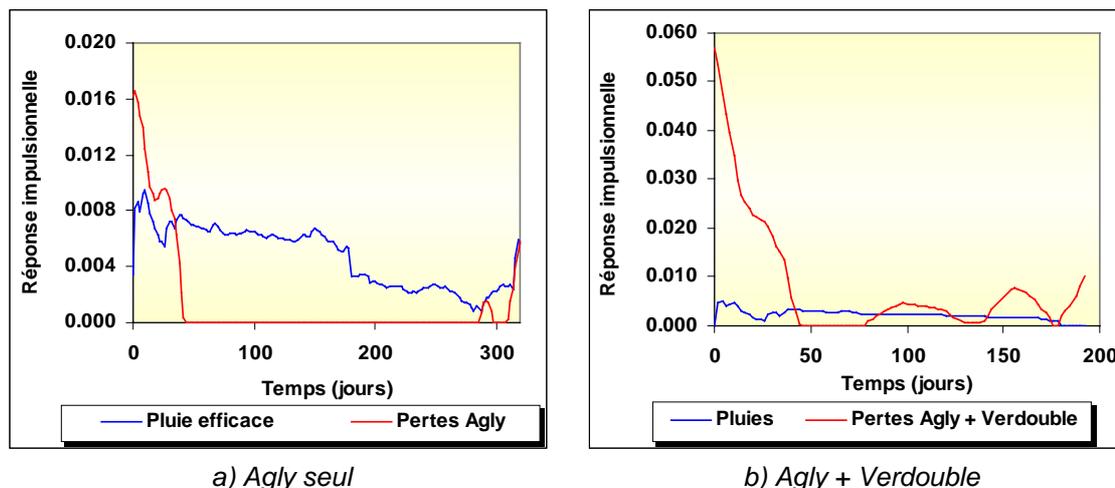


Illustration 37 - Réponses impulsionnelles des pluies et des débits des pertes.

• Pertes cumulées Agly et Verdoble

Les réponses impulsionnelles sont globalement plus courtes que dans le cas précédent.

- La réponse impulsionnelle correspondant aux pertes apparaît plus clairement bimodale, avec un premier pic instantané (décalage = 0 j) et de forte amplitude, qui s'étend sur 48 j (soit 1,5 mois environ), suivi de deux autres vers 100 j (3 mois) et 160 j (5 mois). Cette réponse pourrait s'interpréter de la manière suivante :
 - l'infiltration des pertes dans l'aquifère en charge de Cases de Pène conduit à un transfert instantané de pression, qui est traduit par le premier pic de la réponse impulsionnelle ;
 - le coefficient d'emménagement de l'aquifère étant relativement faible (de l'ordre de 1 % d'après l'essai de pompage), le transfert effectif de la masse d'eau infiltrée est plus lent, et ne se fait sentir qu'au bout de 3 mois environ (deuxième pic).
- La réponse impulsionnelle correspondant aux pluies est peu marquée, et reste quasiment constante en fonction du temps, ce qui traduit une faible recharge par les épisodes de pluies efficaces. La vidange du réservoir se produit faiblement et lentement au cours du tarissement et interviendrait pendant 180 jours (6 mois) au maximum.

Les représentations des composantes « pluies » et « pertes », ainsi que leur contribution relative au niveau piézométrique simulé, sont présentées sur les illustrations ci-après (ill. 38, 39, 40 et 41).

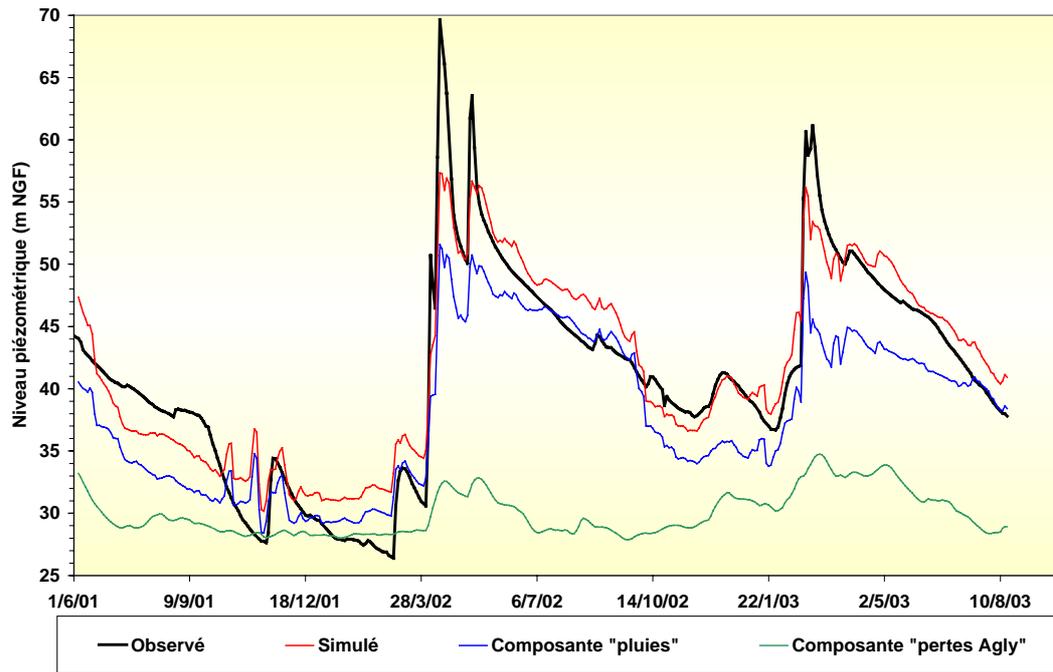


Illustration 38 - Représentation des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly ».

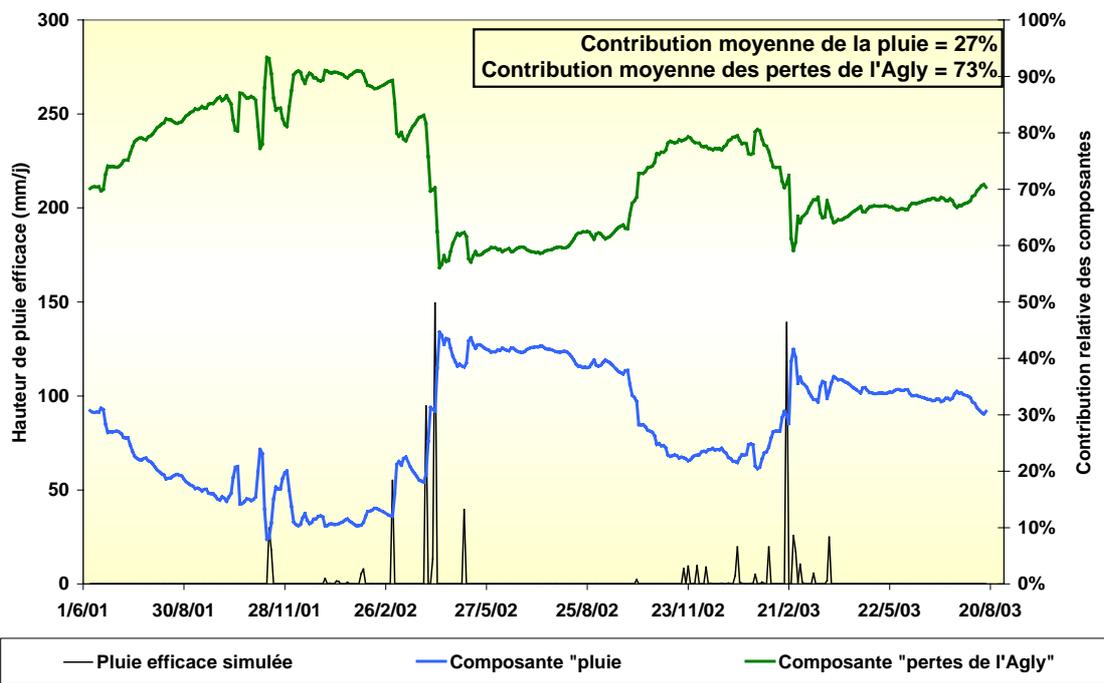


Illustration 39 - Représentation des contributions relatives des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly ».

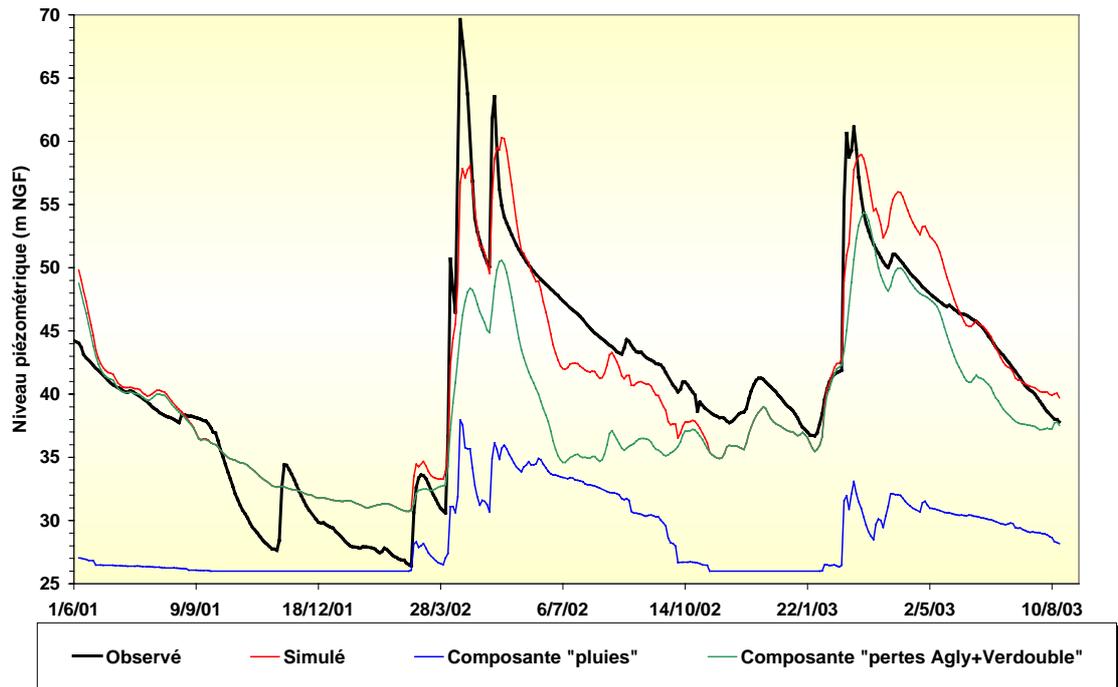


Illustration 40 - Représentation des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly et du Verdoble ».

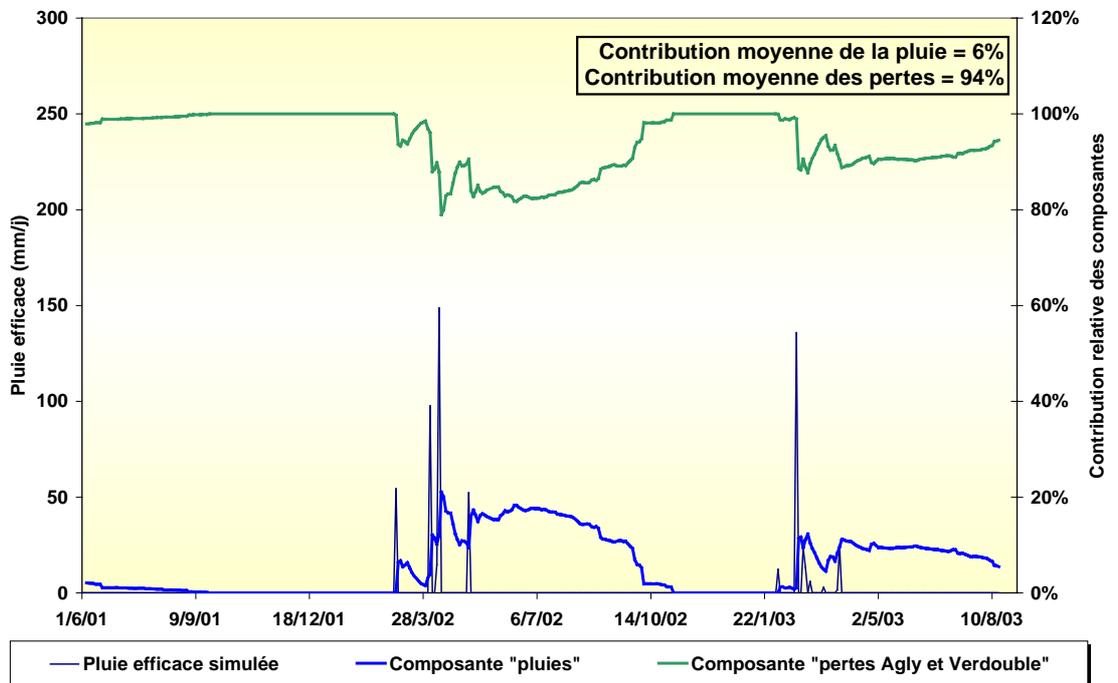


Illustration 41 - Représentation des contributions relatives des composantes « pluies » et « pertes de l'Agly et du Verdoble ».

- **Pertes de l'Agly seules**

La composante « pluies » assure les variations rapides de niveaux piézométriques, la composante « pertes » est plus lissée. La contribution relative de la composante « pertes » au niveau piézométrique simulé est de 73 % en moyenne sur la période, avec un maximum de l'ordre de 90 % en périodes de basses eaux. La composante « pluies » est importante juste après les épisodes de pluie efficace.

- **Pertes cumulées Agly et Verdoble**

De même que précédemment, la composante « pluies » assure les variations rapides de niveaux piézométriques, la composante « pertes » est plus lissée. Avec la prise en compte des pertes du Verdoble, la contribution relative de la composante « pertes » au niveau piézométrique simulé augmente : elle est en moyenne de 94 % sur la période, et atteint 100 % en période de basses eaux. Ceci pourrait être une traduction du soutien d'étiage de l'Agly par le barrage de Caramany, donc du soutien des pertes en période de basses eaux.

La contribution de la composante « pluie » n'est sensible qu'après les épisodes de pluie efficace, plus courts dans ce cas. Ce fonctionnement est la traduction de la forme de la réponse impulsionnelle « pluie », qui traduit une faible recharge par les épisodes de pluies efficaces.

Les pluies efficaces simulées sont légèrement moins importantes si les pertes de l'Agly et du Verdoble sont cumulées : le seuil de pluie efficace est plus important avec les pertes cumulées Agly et Verdoble (ill. 42), qu'avec l'Agly seul (ill. 43).

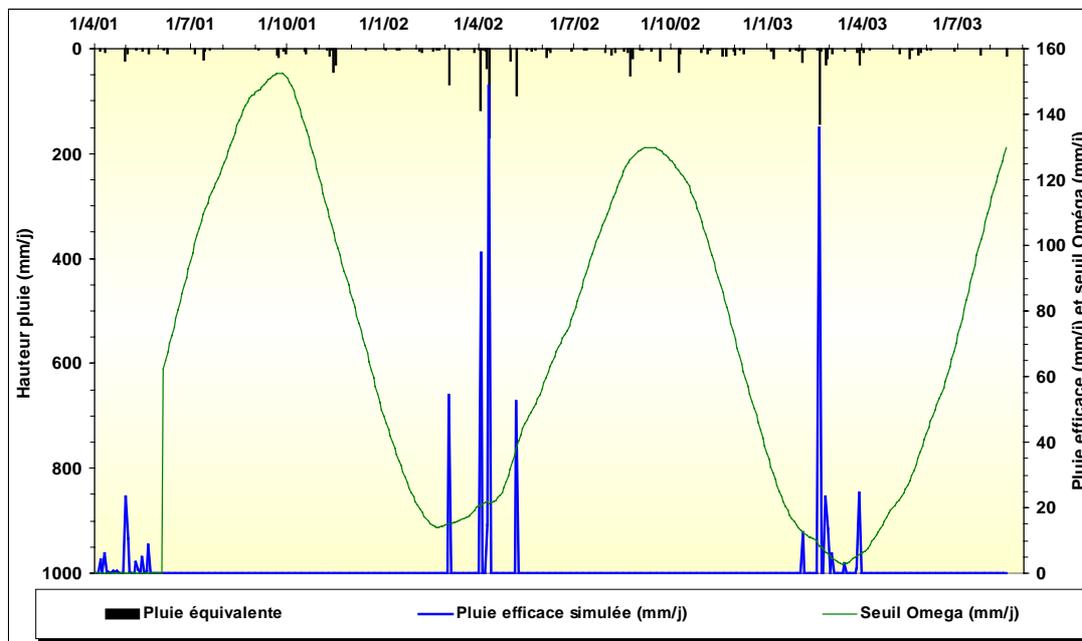


Illustration 42 - Pluie efficace et seuil de pluie efficace simulés avec prise en compte des pertes cumulées de l'Agly et du Verdoble.

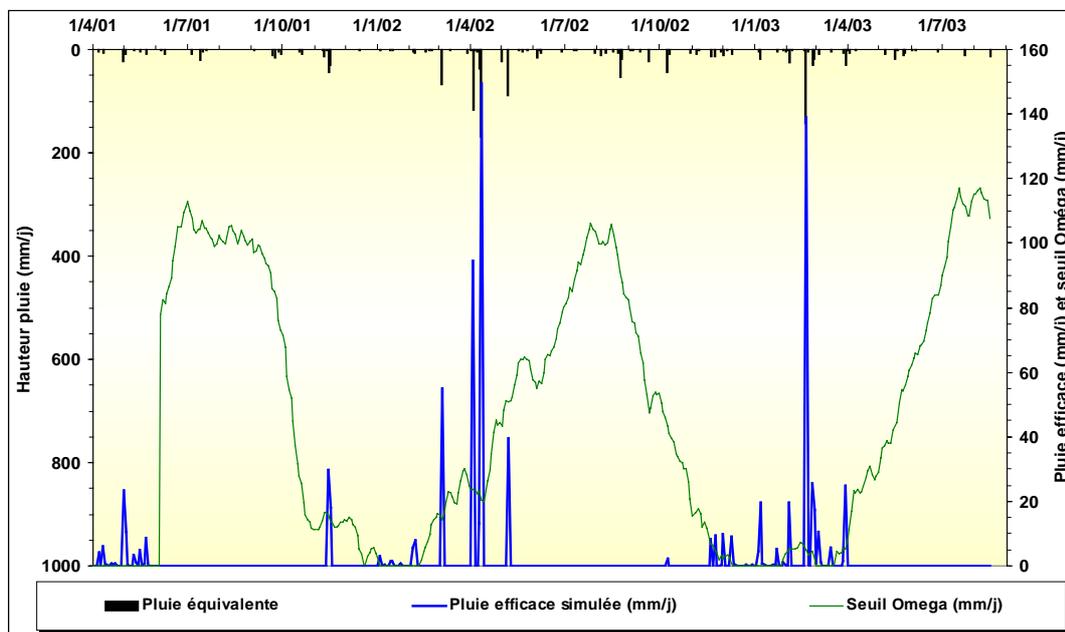


Illustration 43 - Pluie efficace et seuil de pluie efficace simulés avec prise en compte des pertes de l'Agly seule.

Les pluies efficaces qui ont été simulées au pas de temps journalier sont ensuite intégrées au pas de temps mensuel, pour être comparées aux pluies sur la période avril 2001 à août 2003 (ill. 44 et 45).

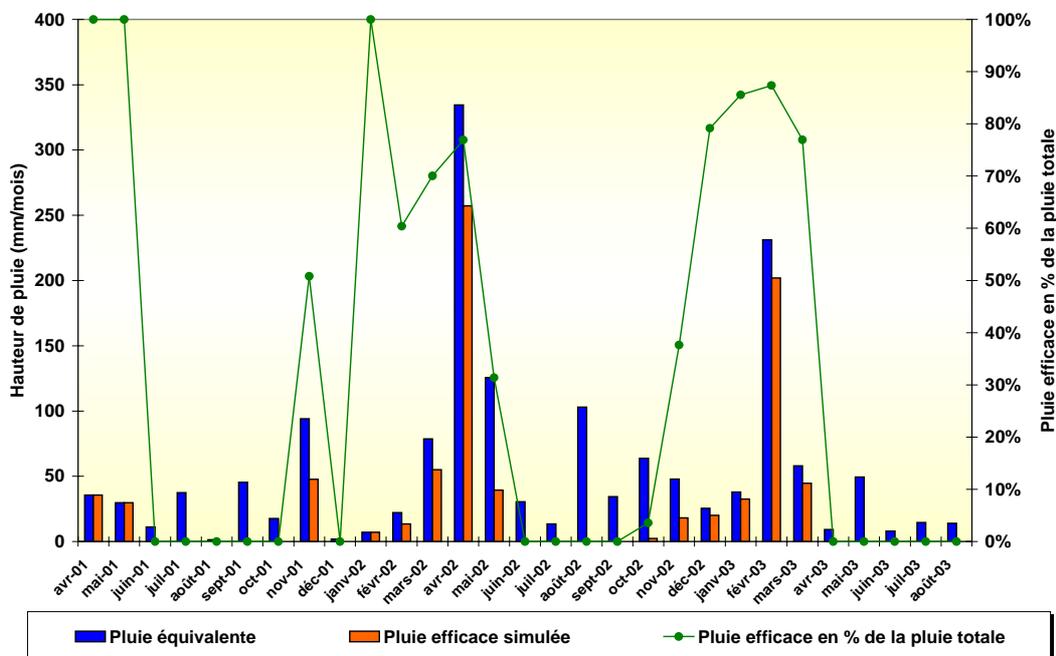


Illustration 44 - Pluie efficace mensuelle simulée (avec prise en compte des pertes de l'Agly).

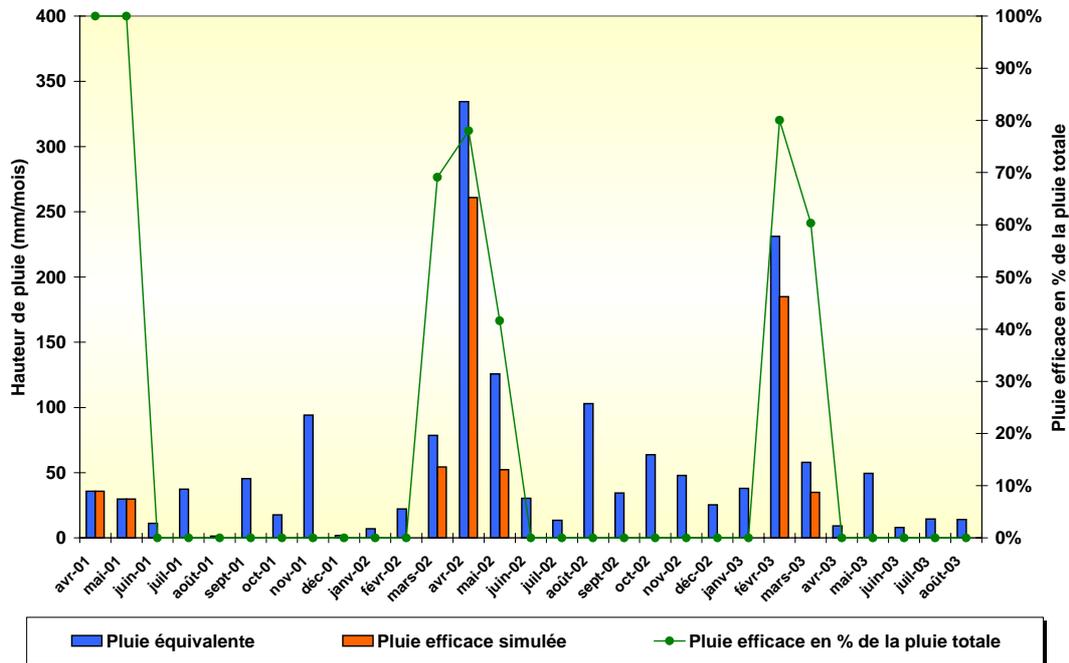


Illustration 45 - Pluie efficace mensuelle simulée (avec prise en compte des pertes de l'Agly et du Verdoble).

Sur la période avril 2001-août 2003, la pluie équivalente est de 1 583 mm, et les pluies efficaces : de 805 mm avec prise en compte des pertes de l'Agly, et de 653 mm avec les pertes cumulées Agly et Verdoble.

3.1.4. Effet barométrique

Cette partie reprend les principaux résultats obtenus par Duriez (2002). L'étude corrélatrice et spectrale effectuée avait pour objectifs de préciser le fonctionnement de la zone noyée de l'aquifère de Cases de Pène, en utilisant la chronique piézométrique au pas horaire alors disponible pour la période du 15 juin 2001 au 20 mars 2002.

L'analyse du spectre dans le domaine des fréquences avait fait apparaître la présence de deux périodicités marquées à 12 et 24 heures, indiquant que la zone noyée de Cases de Pène subit des variations piézométriques diurnes et semi-diurnes, preuve d'un effet de marée.

L'hypothèse de l'effet de la mer ayant été écartée, il en ressort que ces variations périodiques peuvent être attribuées aux marées terrestres qui résultent essentiellement de l'attraction de la lune, et, dans une moindre mesure, de l'attraction solaire. Cette attraction engendre des déformations du globe terrestre, qui sont généralement de faible amplitude et donc difficilement observables, sauf dans le cas de nappes captives, pour lesquelles les déformations peuvent engendrer des variations piézométriques de plusieurs centimètres (Mangin, 1975).

Sur cette première base, l'hypothèse de confinement de l'aquifère de Cases de Pène est donc avancée. Elle est de plus confirmée par la corrélation négative qui est mise en évidence entre les chroniques de niveau piézométrique et de pression atmosphérique : l'aquifère est sensible aux variations barométriques, ce qui confirme l'hypothèse de sa captivité.

Les effets diurnes et semi-diurnes permettent de calculer localement (à proximité du point d'observation) le coefficient d'emmagasinement et la porosité de l'aquifère :

- la porosité est estimée à 5,6 % ;
- le coefficient d'emmagasinement est estimé à $1,2 \cdot 10^{-4}$ avec l'hypothèse d'une épaisseur de l'aquifère de 100 m, et à $1,2 \cdot 10^{-3}$ avec une épaisseur de 1 000 m.

3.1.5. Conséquences sur la connaissance du système

Par la méthode de traitement du signal et de modélisation inverse, plusieurs aspects relatifs au fonctionnement du système aquifère de Cases de Pène ont pu être abordés.

La nature captive de l'aquifère a été mise en évidence :

- par l'influence constatée des marées terrestres et de la pression atmosphérique (effet barométrique) sur les variations des niveaux piézométriques ;
- la réponse impulsionnelle « rapide » montre un pic qui peut être assimilé à l'effet d'onde de pression qui se produit lors des crues des cours d'eau de l'Agly et du Verdoble.

Les modélisations inverses réalisées avec TEMPO suggèrent une contribution très importante des pertes de l'Agly et du Verdoble au niveau piézométrique de l'aquifère de Cases de Pène :

- La contribution relative moyenne des pertes de l'Agly au niveau piézométrique simulé est estimée à 73 % sur la période de juin 2001-août 2003, avec une augmentation en périodes de basses eaux (90 % environ).
- Si les pertes du Verdoble sont cumulées à celles de l'Agly, la contribution relative moyenne des pertes atteint 94 %, avec un maximum de 100 % en basses eaux.
- La prise en compte des pertes cumulées de l'Agly et du Verdoble permet d'obtenir des résultats plus cohérents en termes de réponses impulsionnelles que lorsque seules les pertes de l'Agly sont considérées :
 - les réponses impulsionnelles « rapides », qui peuvent indiquer un transfert de pression, ainsi qu'un « effet de chasse » sont de même durée (environ 50 j), mais l'amplitude est plus importante dans le cas de la prise en compte du Verdoble ;
 - la part de la réponse impulsionnelle à long terme des pertes devient majoritaire par rapport à celle des pluies quand les pertes du Verdoble sont prises en compte. Elle pourrait correspondre au transfert massique proprement dit de l'eau infiltrée par les pertes : l'effet sur le niveau piézométrique ne se ferait sentir qu'au bout d'un décalage en temps de l'ordre de trois mois. Ceci milite pour un transfert d'eau assez lent et confirme le faible coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ;

- avec la prise en compte des pertes du Verdoube, la réponse impulsionnelle correspondant aux pluies reste de faible amplitude et assez constante, ce qui traduit une faible recharge par les épisodes de pluies efficaces. La vidange du réservoir se produit faiblement et lentement au cours du tarissement et interviendrait pendant 180 j (6 mois) au maximum.

Dans les simulations de niveaux piézométriques obtenues avec TEMPO, le niveau de base de l'aquifère retenu pour optimiser l'ajustement sur la période 2001-2003 est de 26 m NGF. Avec cette valeur du niveau de base, la plupart des valeurs ponctuelles mesurées par la DDAF de 1992 à 1999 s'inscrivent dans la courbe des valeurs simulées. Exceptions sont faites des valeurs de juillet 1995 (valeur observée de 33,50 m NGF, et simulée de l'ordre de 28 m NGF), et de novembre 1995 (valeur la plus basse observée de 22,02 m NGF, et valeur simulée de l'ordre de 26,40 m NGF). Abaisser le niveau de base à 22 m NGF avec TEMPO conduit à dégrader les résultats de la simulation pour le reste de la période. Deux hypothèses peuvent alors être avancées :

- Depuis 1997, la mise en fonctionnement du barrage de Caramany conduit au soutien du débit de l'Agly et, en conséquence, au soutien du débit des pertes en période de basses eaux. Comme on a montré précédemment l'importante contribution des pertes au niveau piézométrique de l'aquifère, on est peut-être en présence d'un changement de régime hydrologique avec la mise en route du barrage, qui expliquerait une remontée du niveau de base par rapport aux périodes antérieures à 1997.
- Il n'est pas non plus exclu que cette valeur mesurée soit erronée.

3.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GLOBALE (GARDENIA)

3.2.1. Présentation du logiciel

a) Principe

Le logiciel GARDENIA (modèle Global À Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) a été développé par le BRGM. Il fonctionne sur le principe de réservoirs en série symbolisant les différents horizons naturels : le sol, la zone non saturée et la zone saturée (ill. 46).

La pluie efficace constitue la sortie du premier réservoir « SOL ».

Au niveau du réservoir superficiel « ZONE NON SATURÉE » s'effectue le partage de la pluie efficace entre le ruissellement de surface (assimilé à un écoulement rapide) et l'infiltration vers l'aquifère (recharge).

Le réservoir « ZONE SATURÉE » représente l'aquifère, dont la vidange est assimilée à un écoulement retardé. L'écoulement total vers le cours d'eau est la somme des écoulements rapide et retardé.

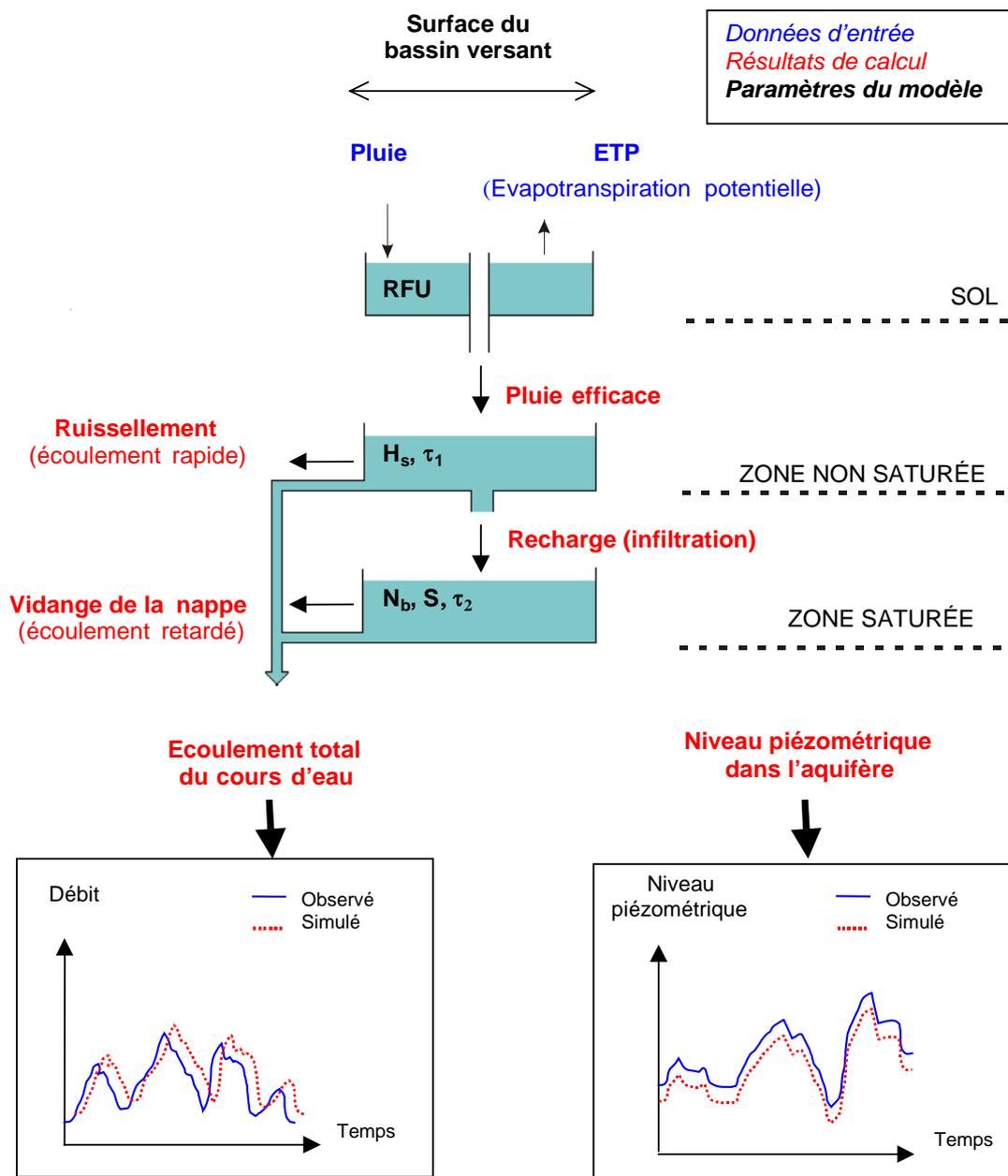


Illustration 46 - Schéma de principe du modèle global à réservoir GARDENIA.

b) Lois et paramètres du modèle

La pluie efficace est calculée à partir des chroniques concomitantes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, selon la méthode classique de bilans enchaînés de Turc et Thornthwaite prenant en compte la réserve en eau du sol à chaque pas de temps. La réserve en eau maximale du sol est fixée par le paramètre RFU (Réserve Facilement Utilisable, cf. § 2.2.2.).

L'infiltration vers l'aquifère suit une loi classique de vidange exponentielle de constante de temps τ_1 . Le ruissellement suit lui une loi non linéaire contrôlée par le paramètre H_s , hauteur seuil pour laquelle il y a égalité des débits entre le ruissellement et l'infiltration vers l'aquifère.

La vidange de l'aquifère suit une loi exponentielle de constante de temps τ_2 . Le niveau d'eau résultant dans l'aquifère est dépendant du bilan en eau entre apport par la recharge et vidange, et de deux paramètres : N_b , niveau de base, et S , coefficient d'emmagasinement.

Le modèle possède également d'autres paramètres sur lesquels l'utilisateur peut jouer pour améliorer le bilan en eau (surtout quand la simulation concerne les débits de cours d'eau), tels que la surface du bassin versant et des facteurs correctifs des pluies et des ETP (pour tenir compte d'incertitudes sur les données d'entrée par exemple).

c) Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée du modèle GARDENIA sont :

- des chroniques concomitantes de pluie et d'ETP, une seule valeur équivalente étant considérée pour tout le bassin versant, d'où l'appellation de modèle « global » ;
- une chronique de niveaux piézométriques observés, qui sera utilisée pour le calage du modèle.

d) Calage du modèle

Le calage s'effectue en faisant coïncider au mieux observations (niveaux piézométriques ou débits) et résultats de calcul sur la période de calage choisie, en jouant sur les différents paramètres du modèle, qui sont autant de degrés de liberté.

e) Limite des interprétations

Comme tout modèle, GARDENIA est une schématisation simplifiée des phénomènes physiques naturels. Son utilisation première est la reconstitution des variations de débits et/ou de niveaux piézométriques à partir de chroniques de pluie et d'ETP. La signification physique des différents paramètres est toute relative : un calage pourra être considéré comme correct, avec des valeurs numériques de paramètres qui ne sont pas forcément réalistes.

3.2.2. Données utilisées

a) Données climatologiques

GARDENIA ne prenant en compte qu'une pluie globale sur tout le bassin versant, nous avons utilisé la pluie pondérée équivalente calculée avec TEMPO (cf. § 3.1.2.) :

$$\text{Pluie équivalente} = 0,24 \times \text{Perpignan} + 0,76 \times \text{Tautavel}$$

Nous avons utilisé la chronique d'ETP pour la station de Perpignan.

Ces données sont disponibles au pas journalier du 1^{er} janvier 1969 au 31 octobre 2003, soit près de 35 années. Les niveaux piézométriques seront simulés sur toute cette période.

b) Suivi des niveaux piézométriques de Cases de Pène

La chronique de niveaux piézométriques de Cases de Pène sur la période du 28 mars 2001 au 31 octobre 2003 au pas journalier est utilisée pour le calage du modèle.

Les mesures ponctuelles antérieures effectuées par la DDAF de 1992 à 1999 (cf. § 2.1.2.) ne sont pas prises en considération dans le calage du modèle, mais seront utilisées à titre de comparaison aux niveaux piézométriques simulés.

Le limnigramme présenté dans la thèse de Faillat pour 1970 et 1971 ne sera comparé aux niveaux piézométriques simulés qu'à titre qualitatif, l'incertitude étant grande sur les données et sur l'altitude du repère de mesure (cf. § 2.1.1.).

3.2.3. Résultats des simulations

a) Calage du modèle : choix des paramètres

La qualité du calage d'un modèle dépend de plusieurs facteurs :

- l'aptitude du modèle conceptuel choisi à représenter les variations du système réel ;
- le nombre de paramètres : la difficulté du calage augmente avec le nombre de degrés de liberté du modèle ;
- l'effet de ces paramètres sur les résultats : des paramètres peuvent avoir des effets qui s'ajoutent ou au contraire s'annulent (par exemple, surface du bassin versant et coefficient correcteur des pluies). Un calage n'est donc pas univoque, plusieurs jeux de paramètres différents pouvant conduire à des calages équivalents en terme d'ajustement des chroniques observées et simulées ;
- les valeurs de départ données à ces paramètres : le calage sera facilité si les valeurs de départ sont proches des valeurs optimales.

Ces considérations préalables, et quelques tests préliminaires du modèle (dont des tests de sensibilité des paramètres), nous ont amenés à faire les choix suivants :

- le ruissellement étant peu représenté dans les milieux karstiques au profit de l'infiltration, le réservoir « ZONE NON SATURÉE » n'a pas été pris en compte dans le modèle. L'infiltration est donc égale à la pluie efficace ;
- cinq paramètres ont été laissés libres pour le calage : RFU, τ_1 , Nb, S, et τ_2 ;
- il n'a pas été pris en compte de coefficients correcteurs de pluie et d'ETP.

b) Résultats de l'ajustement retenu

L'ajustement le meilleur pour la période de calage choisie, c'est-à-dire 2001-2003, est présenté ci-dessous (ill. 47 et 48). Le coefficient de corrélation est médiocre, $R^2 = 0,849$.

Paramètres	RFU (mm)	$\tau 1$ (mois)	Nb (m NGF)	S	$\tau 2$ (mois)
Valeur initiale	15	0,05	26, puis 22	9.10^{-3}	1
Valeur ajustée	0	0,05	20	$1,44.10^{-2}$	4,7

Illustration 47 - Valeurs initiale et ajustée des paramètres du modèle.

Les résultats montrent que les variations de niveau piézométrique ne sont pas représentées de façon totalement satisfaisante : l'amplitude des pics de crue est sous-estimée, les étiages ne sont pas autant marqués et les variations sont lissées. Sur la période 1992-2003, les niveaux observés et simulés varient dans des fourchettes respectives de (22,02 - 70,07 m NGF) et (27,42 - 61,76 m NGF).

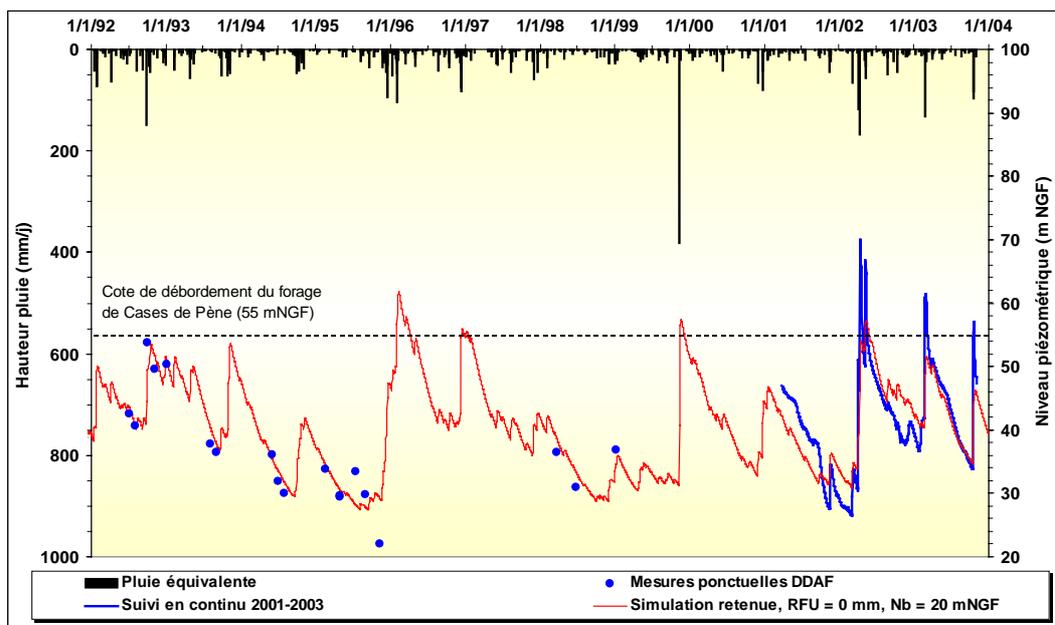


Illustration 48 - Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés pour l'ajustement retenu avec GARDENIA.

Les valeurs ponctuelles de 1992 à 1999 s'inscrivent relativement bien dans la ligne des niveaux piézométriques simulés, à l'exception de deux points :

- le 12 juillet 1995, le niveau haut de 33,5 m NGF ne correspond pas à un pic de crue simulé ;
- le 11 novembre 1995, le niveau bas de 22,02 m NGF n'est pas reproduit. Le minimum simulé est calculé pour le 17 septembre 1995, avec 27,42 m NGF.

Les niveaux piézométriques simulés pour la période 1970-1971 varient entre 31 et 46 m NGF, ce qui est dans l'ordre de grandeur des niveaux observés (ill. 49). Pour la crue d'octobre 1970, le niveau simulé ne dépasse cependant pas le seuil de débordement de l'aven de 50 m NGF, contrairement à ce qui est suggéré dans la thèse de Faillat.

Le calage optimal est obtenu avec une réserve utile ajustée à 0 mm, alors que la valeur initiale avait été fixée à 15 mm (cf. ill. 48). En conséquence, les pluies efficaces simulées sont importantes : en valeur annuelle, elles représentent entre 60 et 85 % de la pluie totale (ill. 50) et varient entre 195 mm/an (pour l'année 1983, année sèche avec 295 mm de pluie) et 838 mm/an (pour l'année 1996, année humide avec 1 026 mm de pluie). La pluie efficace moyenne annuelle simulée sur la période 1969-2003 est de 447 mm/an, et représente 75 % de la pluie moyenne annuelle totale (ill. 51).

Ces valeurs de pluies efficaces simulées sont très élevées en comparaison des ordres de grandeur connus et habituellement utilisés, qui oscillent entre 20 et 60 %, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 40-50 % (cf. § 2.2.2). Deux hypothèses pourraient être suggérées pour expliquer ce phénomène :

- la pluie équivalente utilisée dans les calculs sous-estime la pluie réelle tombée sur le bassin versant. Les analyses précédentes menées avec TEMPO (cf. § 3.1.) ne font cependant pas apparaître ce biais ;
- la recharge de l'aquifère induite par les pertes de l'Agly n'est pas prise en compte dans la simulation avec GARDENIA et se traduit par une augmentation artificielle de la pluie efficace simulée de la part de l'alimentation par les pertes. Cette hypothèse va dans le sens de l'analyse menée avec TEMPO.

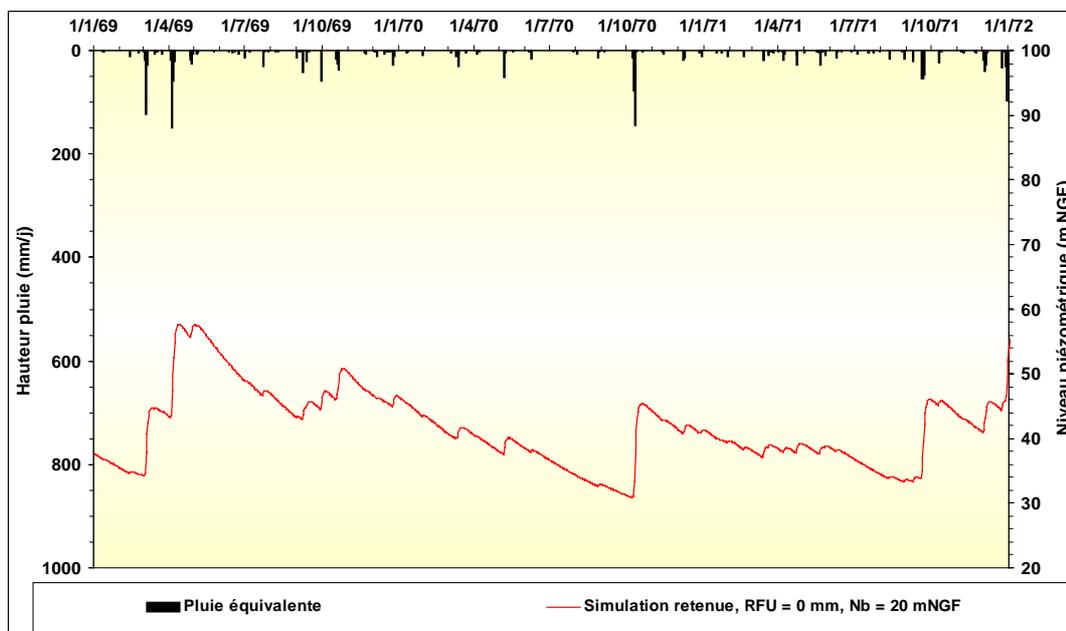


Illustration 49 - Niveau aquifère simulé pour la période 1969-1972.

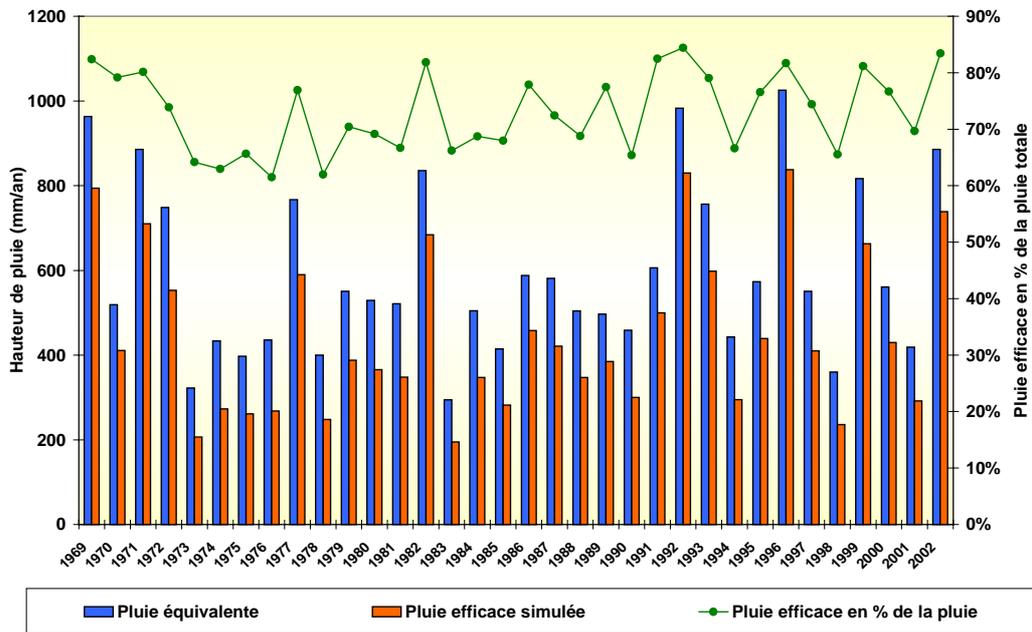


Illustration 50 - Pluie efficace annuelle simulée avec GARDENIA.

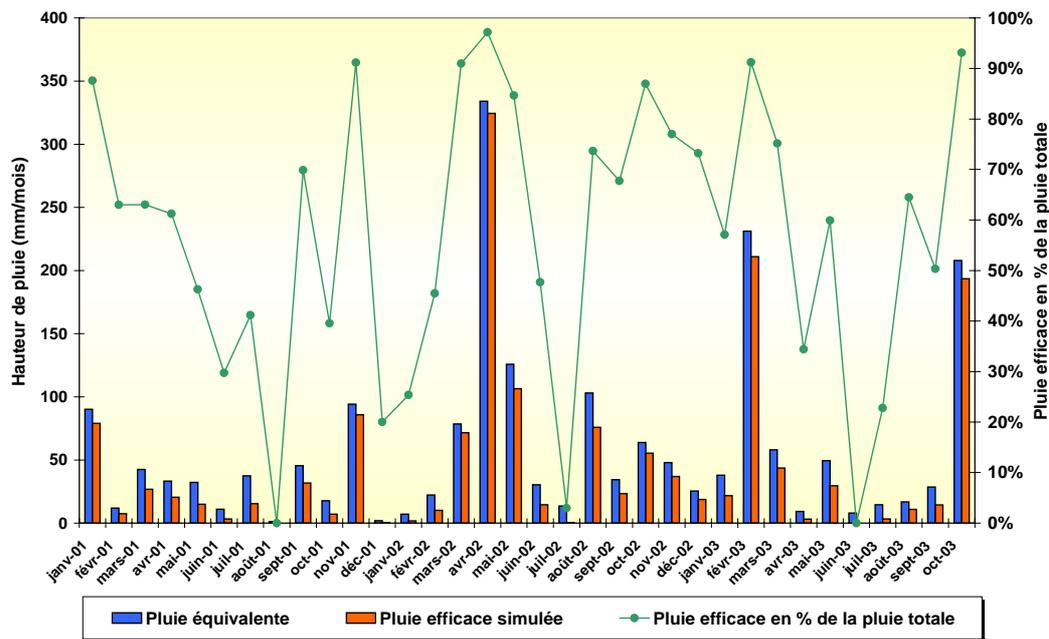


Illustration 51 - Pluie efficace mensuelle simulée avec GARDENIA (période 2001-2003).

c) Sensibilité du résultat au paramètre « niveau de base » de l'aquifère

Le calage optimal est obtenu avec un niveau de base de l'aquifère ajusté à 20 m NGF, alors que la valeur initiale a été fixée à 26 m NGF, puis 22 m NGF (la valeur de départ n'a pas eu d'influence sur le calage final des paramètres). Néanmoins, même avec cet

ajustement, le niveau minimal observé en novembre 1995 de 22,02 m NGF n'est pas restitué.

Nous avons alors effectué des tests de sensibilité des résultats du modèle au paramètre « niveau de base », en faisant varier ce paramètre de 15 à 26 m NGF, tous les autres paramètres restants par ailleurs égaux à leur valeur d'ajustement (ill. 52).

Les résultats obtenus suggèrent qu'il n'est pas possible de reproduire correctement à la fois les variations piézométriques sur la période 2001-2003, et le niveau bas de novembre 1995 : en imposant un niveau de base à 15 m NGF, le niveau piézométrique simulé se rapproche du niveau bas observé de 22 m NGF, mais se place alors largement en deçà des niveaux observés sur le reste de la période 1992-2003.

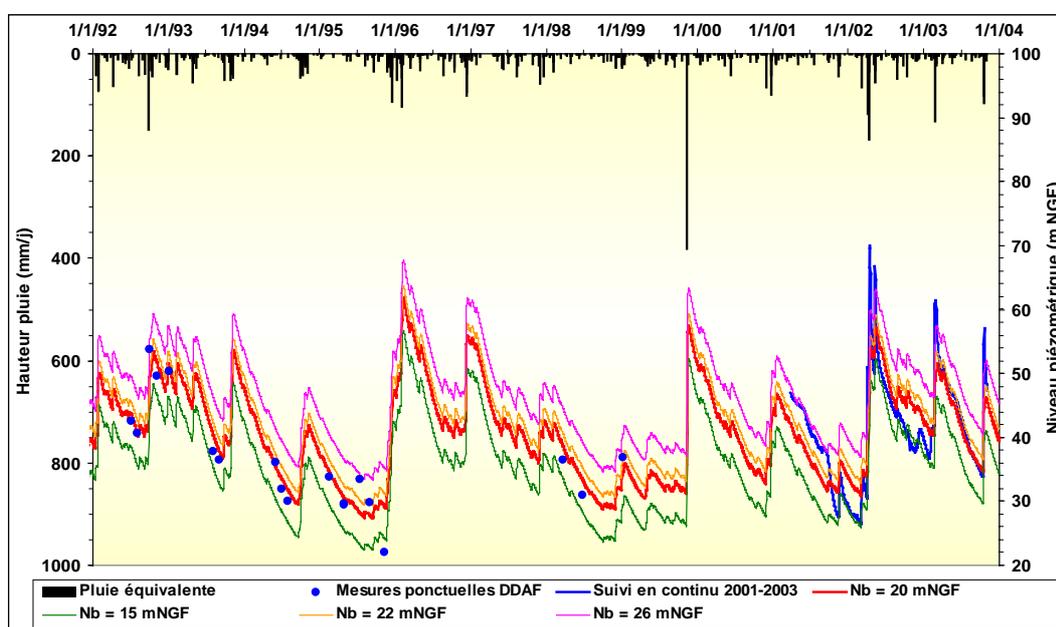


Illustration 52 - Sensibilité des simulations au paramètre « niveau de base » de l'aquifère.

3.2.4. Conséquences sur la connaissance du système

Les simulations obtenues avec GARDENIA suggèrent que ce modèle à réservoirs ne permet pas de reproduire de façon totalement satisfaisante les variations de niveaux piézométriques de l'aquifère de Cases de Pène : les variations rapides ainsi que les amplitudes des pics de crue ne sont pas fidèlement restituées. Aussi, les interprétations qui peuvent être avancées sur la connaissance du système au vu des résultats des simulations sont à prendre avec précautions.

a) Influence des pertes de l'Agly et du Verdoble

Les pluies efficaces simulées sont surestimées par rapport à des valeurs classiques connues, ce qui suggère qu'une autre recharge que celle directe par les pluies est à

prendre en compte. L'hypothèse de la recharge de l'aquifère de Cases de Pène par les pertes se confirme ainsi indirectement.

Un calcul sommaire peut être tenté à partir des résultats de GARDENIA : les pluies efficaces simulées se situent dans la fourchette 60-80 % des pluies totales, ce qui est globalement 30 % supérieur aux valeurs classiques. Si l'on fait l'hypothèse que ces 30 % sont dus à la recharge de l'aquifère par un débit « extérieur », on peut alors calculer que cet apport correspondrait à un débit spécifique moyen annuel (sur la période 1969-2003) de l'ordre de $4,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Avec l'hypothèse d'un bassin versant pour l'aquifère de Cases de Pène de l'ordre de 15 km^2 , on peut alors estimer ce débit « extérieur » moyen annuel à 64 l/s.

Plusieurs interprétations qualitatives sur les résultats de simulation suggèrent également l'influence des pertes de l'Agly sur la recharge de l'aquifère de Cases de Pène (ill. 53 et 54) :

- d'avril à octobre 2001, le tarissement simulé est inférieur à l'observé, alors que les débits de Caramany et des pertes de l'Agly sont importants. À partir de décembre 2001, la tendance s'inverse alors que les débits de Caramany et des pertes sont plus faibles ;
- en décembre 2002, les niveaux piézométriques observés montrent un pic qui semble bien corrélé à l'augmentation des débits de Caramany et des pertes de l'Agly. La simulation n'en rend logiquement pas compte puisqu'il n'y a pas d'épisode de pluie significatif à cette période.

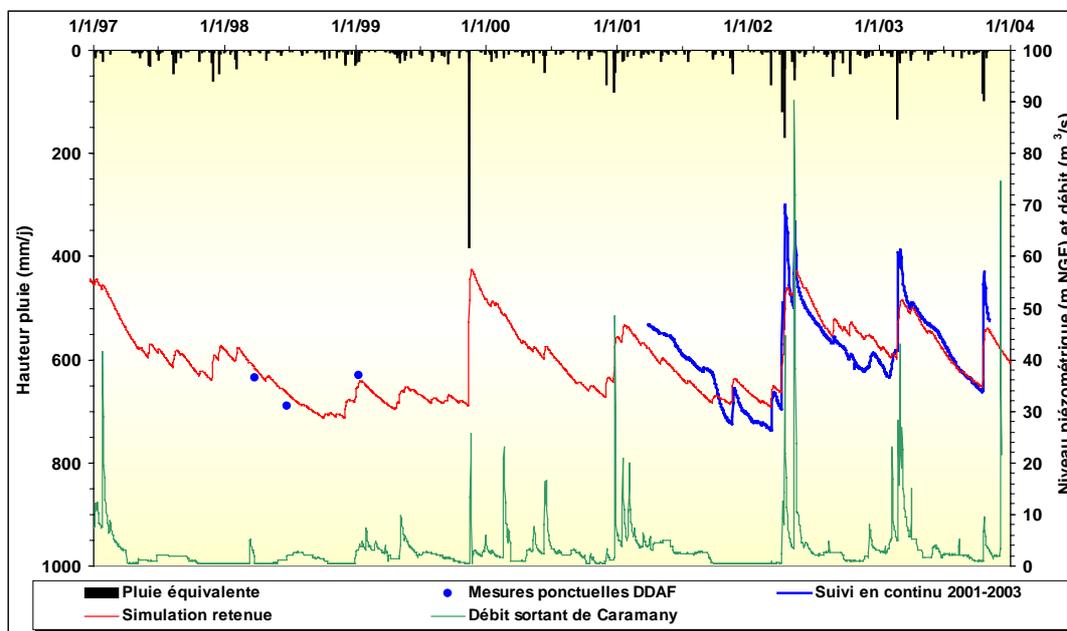


Illustration 53 - Comparaison du niveau simulé et du débit sortant de Caramany.

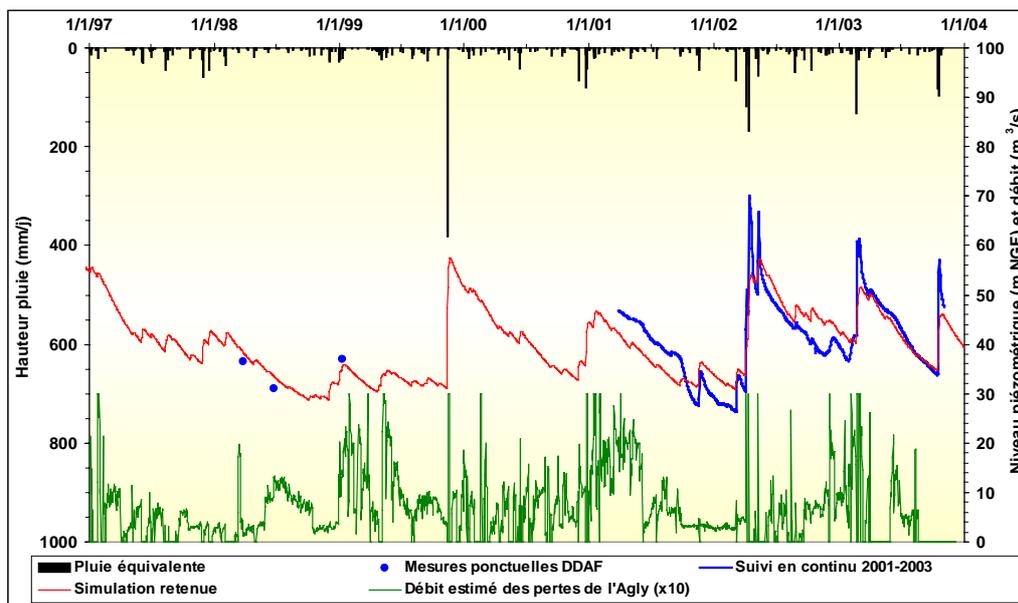


Illustration 54 - Comparaison du niveau simulé et du débit estimé des pertes de l'Agly (x 10 dans l'illustration).

b) Changement de régime hydrologique ?

Les simulations montrent qu'on ne parvient pas à retrouver le niveau bas observé de 22 m NGF de novembre 1995 sans dégrader la qualité des restitutions pour les autres périodes.

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène :

- Il y a eu, avec la mise en service du barrage de Caramany en 1997, un changement de régime hydrologique : le débit de l'Agly est soutenu en étiage, et les pertes de même en répercussion. La contribution relative des pertes de l'Agly à la recharge de l'aquifère est alors aujourd'hui plus importante en période de faibles pluies qu'elle ne l'était avant la mise en service du barrage.
- Cette valeur de 22 m NGF peut aussi être erronée.

4. Fonctionnement de l'aquifère de Cases de Pène et exploitabilité

Cette partie présente la synthèse des résultats pour l'interprétation du fonctionnement de l'aquifère de Cases de Pène. Ils concernent ceux relatifs à l'essai de pompage de longue durée, présentés dans le rapport (Petit *et al.*, 2002), ainsi que les résultats complémentaires issus des interprétations effectuées sur les données tant hydrauliques que géochimiques acquises depuis 2001, et présentées dans ce volume 3 et dans le volume 2.

4.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

4.1.1. Au cours de l'essai de pompage de longue durée

a) Relation avec les eaux de surface Agly et Verdoble

Les températures des eaux échantillonnées lors de l'essai de pompage de longue durée sont restées stables et voisines de 17,3 °C, valeurs légèrement supérieures (+ 0,5°C) à celles mesurées dans le forage d'observation (16,7 °C). Cette différence étant principalement attribuée à la dissipation thermique de la pompe et au dispositif de mesure de la température. Les températures de l'eau de Cases de Pène sont légèrement plus faibles que celles mesurées aux exutoires de Font Estramar et de Font Dame, mais sont néanmoins le témoin d'une circulation de l'eau en profondeur.

La conductivité de l'eau de Cases de Pène a faiblement évolué, restant en moyenne de l'ordre de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des variations d'amplitude maximale de l'ordre de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les analyses statistiques effectuées ont alors montré que la variabilité de la conductivité électrique de l'eau pompée au cours de l'essai était principalement contrôlée par les variations des teneurs en calcium Ca de l'eau et, dans une moindre mesure, par l'évolution des concentrations en ions hydrogénocarbonates HCO_3 , sulfates SO_4 et sodium Na.

Les teneurs en éléments chimiques ont présenté une tendance à l'augmentation, à l'exception des concentrations en sulfates et strontium qui ont diminué, et en bore qui sont restées quasiment constantes.

L'évolution des différents éléments chimiques en fonction des chlorures montre que la signature chimique des eaux de Cases de Pène, déjà différente de celle des eaux de l'Agly, s'en est encore éloignée au cours de l'essai de pompage. Ceci indique qu'il n'y a pas d'alimentation directe des eaux de l'Agly au système de Cases de Pène. Ceci n'exclut cependant pas l'hypothèse d'une contribution des eaux de l'Agly à l'alimentation du système, en considérant que les temps de résidence soient suffisamment longs (plusieurs mois) pour que les eaux de surface infiltrées

s'équilibrent avec la roche encaissante et acquièrent une signature de type « eau souterraine ». Cette hypothèse de temps de transfert long est de trois à quatre mois.

La contribution par des eaux du Verdoble à l'alimentation de Cases de Pène a été suggérée avec deux types d'analyses :

- les teneurs en Cl et Br, traceurs supposés conservatifs, de Cases de Pène sont du même ordre de grandeur que celles du Verdoble ;
- la signature isotopique en oxygène 18 et deutérium (^{18}O et ^2H) de Cases de Pène est proche de celle des eaux du Verdoble.

Les résultats des isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont montré que la signature des eaux de Cases de Pène est plus radiogénique que celle des eaux de l'Agly et du Verdoble, et que de plus, ce caractère radiogénique a augmenté au cours de l'essai de pompage. Ces résultats montrent donc qu'il n'y a pas d'alimentation directe des eaux de l'Agly et du Verdoble, ce qui conforte les données chimiques.

b) Contact des eaux de Cases de Pène avec le Lias marneux

Les teneurs en sulfates des eaux de Cases de Pène, très inférieures à celles des eaux de surface Agly et Verdoble, ont diminué durant l'essai de pompage de longue durée. L'interprétation de cette évolution est différente en fonction de l'hypothèse de contact ou non des eaux de Cases de Pène avec le Lias marneux, qui pourrait être une source de sulfates :

- dans l'hypothèse d'une absence d'interaction des eaux de Cases de Pène avec les niveaux marneux du Lias, la baisse des teneurs en sulfates pourrait s'interpréter comme une augmentation de la part relative des eaux « profondes » issues de l'infiltration lente des eaux de pluie ;
- dans l'hypothèse inverse, la diminution des teneurs en sulfates pourrait s'interpréter comme une diminution de la contribution relative de cette eau « profonde » à l'écoulement.

Les résultats des isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont alors permis de lever l'ambiguïté : les eaux de Cases de Pène présentent en effet une signature isotopique bien plus radiogénique que celle du Lias marneux, ce qui démontre une absence de contact avec ce niveau.

4.1.2. Analyses réalisées depuis 2001

a) Proximité des eaux de Cases de Pène au pôle « pertes »

Les données tant chimiques qu'isotopiques acquises depuis 2001 sur le système karstique du synclinal du Bas-Agly permettent de compléter les résultats acquis lors de l'essai de pompage. Elles ont été présentées en détail dans le volume 2, nous n'en rappelons ici que quelques éléments relatifs au sous-système aquifère de Cases de Pène.

L'étude de l'évolution des rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des teneurs en strontium, et des rapports molaires SO_4/Sr a permis de montrer que les eaux de Cases de Pène sont bien dissociées du pôle « Trias » et, quoique différentes, se rapprochent du pôle « pertes » de l'Agly et du Verdoble. Sur le diagramme des teneurs en sulfates en fonction des teneurs en chlorures, les eaux de Cases de Pène sont très proches du pôle « pertes ». De même, l'évolution des teneurs en bore en fonction des teneurs en deutérium indique que la signature des eaux de Cases de Pène est proche de celle du pôle « pertes ».

b) Estimation de la profondeur de circulation et du temps de résidence au sein du système karstique d'Opoul

L'utilisation des outils géochimiques et isotopiques sur les eaux des sources de Font Dame et de Font Estramar a permis de montrer que la composante profonde et chaude de l'écoulement au sein du système karstique d'Opoul est caractérisée par des eaux d'infiltration récentes (quelques années tout au plus), ayant circulé à 400 m de profondeur au maximum. D'un point de vue chimique, les eaux sont majoritairement à rattacher à celles des pertes de l'Agly et du Verdoble.

4.2. INTERPRÉTATION DES RELATIONS POTENTIELLES AVEC L'AGLY ET LE VERDOUBLE

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques ont permis de montrer qu'il n'y a pas de relation directe entre les eaux de surface (Agly et Verdoble) et le forage de Cases de Pène. Les eaux des pertes de l'Agly et du Verdoble participent néanmoins à l'alimentation de l'aquifère, en constituant une part des eaux d'infiltration « récentes » (vieilles de quelques années tout au plus) qui participent à la composante chaude et profonde des écoulements au sein de l'aquifère.

Ces résultats issus des outils géochimiques sont confortés par les analyses de traitement du signal effectuées sur les suivis de niveaux piézométriques de l'aquifère de Cases de Pène (cf. § 3.1.). En effet, la modélisation inverse conduit à considérer les pertes de l'Agly et du Verdoble comme variables explicatives des variations piézométriques de l'aquifère, en plus de la pluie efficace. Elles expliqueraient même plus de 60 % du niveau piézométrique, leur contribution relative étant maximale pendant les périodes de basses eaux. La réponse impulsionnelle des pertes présente les caractéristiques fondamentales suivantes :

- Une composante « rapide », sur une durée maximale de 50 j, indicative d'un transfert rapide de pression (l'aquifère étant captif), ainsi qu'un « effet de chasse », qui est de même durée (environ 50 j).
- Une composante « lente » qui devient majoritaire par rapport à celle des pluies quand les pertes du Verdoble sont prises en compte. Elle pourrait correspondre au transport proprement dit de l'eau infiltrée par les pertes : l'effet sur le niveau piézométrique ne se ferait sentir qu'au bout d'un décalage en temps de l'ordre de trois mois. Ceci milite pour un transfert d'eau assez lent et confirme le faible coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

Ce transfert massif lent permettrait à l'eau de surface de s'équilibrer avec la roche encaissante et de perdre ainsi sa signature, ce qui conforte l'hypothèse émise lors de l'essai de pompage (cf. § 4.1.1.).

Le débit moyen cumulé des pertes de l'Agly et du Verdoble a été estimé à 1 500 l/s sur la période 1997-2003 (cf. vol. 2). Pendant les périodes estivales, le débit de l'Agly est soutenu artificiellement par le barrage de Caramany, le débit des pertes s'en trouve alors augmenté par rapport à ce qu'était le fonctionnement « naturel » du sous-système avant la mise en service du barrage de Caramany, ce qui renforce la contribution relative des pertes au niveau piézométrique de l'aquifère pendant les périodes de basses eaux.

L'importance relative des pertes dans l'alimentation en eau de l'aquifère de Cases de Pène milite pour la nécessité de protéger la zone des pertes dans l'objectif d'exploitation pour l'alimentation en eau potable, même si cette nécessité peut être relativisée par les temps de transfert assez longs qui permettraient une atténuation des risques en cas de pollution.

4.3. RESSOURCES ET DÉBIT D'EXPLOITATION

Dans la perspective de prélèvements d'eau souterraine significatifs à l'échelle pluriannuelle, la définition des conditions d'exploitation du forage de Cases de Pène ne peut être dissociée du fonctionnement du système karstique « Opoul - Synclinal du Bas-Agly » dont il capte une partie de la ressource en eau.

4.3.1. Synthèse des connaissances sur le système karstique « Opoul - Synclinal du Bas-Agly »

a) Structure de l'aquifère

L'aquifère est principalement composé d'une puissante barre de calcaires massifs du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Ces formations sont structurées au sein du synclinal du Bas-Agly qui présente deux flancs dissymétriques :

- le flanc sud est très redressé, voire même avec des pendages inverses. Il affleure depuis l'ouest d'Espira-de-l'Agly et s'ennoie sous les formations plio-quadernaires vers Rivesaltes ;
- le flanc nord présente un pendage plus faible. Il s'étend depuis Espira à l'ouest (fermeture synclinale à l'affleurement) jusqu'à l'étang de Salses Leucate à l'est.

Dans l'axe synclinal, au niveau du forage de Cases de Pène, les formations carbonatées se situent à plus de 1 500 m de profondeur.

Ces deux flancs synclinaux ont été karstifiés principalement lors des périodes de bas niveaux marins du Messinien. Cette karstification a conduit au développement, à cette époque, de réseaux karstiques orientés vers les deux principales zones d'exutoires des eaux souterraines de l'ensemble carbonaté qui existaient à ce moment-là. Ces

zones d'exutoires étaient situées au droit de l'intersection de chacun des flancs du synclinal avec la paléotopographie : d'une part dans le secteur de Rivesaltes et, d'autre part, à l'est et au nord-est des sources de Font Dame et Font Estramar. Compte tenu de l'altitude des paléoxutoires cités ci-dessus, la karstification pourrait concerner les calcaires jusqu'à une profondeur d'environ 300 à 400 m sous le niveau actuel de la mer. Il est donc peu probable que les calcaires soient karstifiés au droit de l'axe du synclinal. Ces anciens exutoires étaient très vraisemblablement alimentés par les précipitations d'une part et par les pertes des cours d'eau de l'époque d'autre part. L'Agly n'avait ainsi très probablement pas de cours pérenne en surface, au moins entre la zone des pertes actuelles et Rivesaltes.

L'aquifère karstique comporte donc deux principaux (et anciens) axes de drainage qui coïncideraient respectivement avec les flancs nord et sud du synclinal du Bas-Agly. Le forage de Cases de Pène et l'aven de Baixas sont très vraisemblablement tous deux situés sur l'axe de drainage du flanc sud ou tout au moins très bien connectés à ce réseau de conduits.

b) Fonctionnement actuel de l'aquifère

Actuellement, cet aquifère karstique est alimenté par les précipitations sur son aire d'affleurement, par les pertes de l'Agly et du Verdoble (situés à 7 km du forage de Cases de Pène) et, dans une moindre mesure, par les pertes d'Opoul.

Ses principaux exutoires sont :

- sur le flanc nord de l'anticlinal, les sources de Font Dame et Font Estramar, situées à plus de 15 km du forage, à 1-2 m NGF ;
- en très hautes eaux, des émergences temporaires apparaissent sur le flanc sud de l'anticlinal, au sein duquel aucune source pérenne n'est connue. Ces sources temporaires existent en particulier au niveau de l'aven de Baixas (72 m NGF environ), ainsi qu'aux alentours du forage de Cases de Pène (55 m NGF environ, les charges hydrauliques étant néanmoins du même ordre de grandeur qu'à Baixas) ;
- en très hautes eaux, les pertes de l'Agly sembleraient aussi pouvoir fonctionner en exutoire temporaire, bien que peu probable au vu de l'existence du trop-plein à Cases de Pène.

Les écoulements au sein de l'aquifère se font donc essentiellement :

- au sein du flanc nord du synclinal, des pertes de l'Agly, du Verdoble et d'Opoul, et des eaux des précipitations directement infiltrées, d'une part vers les sources de Font Dame, Font Estramar et les autres sources au débit beaucoup plus faible du secteur de Salses (ces sources sont très probablement situées sur des systèmes annexes au principal axe de drainage) et d'autre part par des apports diffus des formations karstiques aux aquifères sédimentaires du Plio-Quaternaire, à l'est et surtout au nord-est de ces sources ;
- au sein du flanc sud du synclinal, des pertes de l'Agly et du Verdoble, et des eaux des précipitations directement infiltrées, vers les sources temporaires de Cases de

Pène et Baixas et, de manière diffuse, des formations karstiques vers l'aquifère du Plio-Quaternaire dans le secteur de Rivesaltes.

Hors périodes de crues et compte tenu de l'absence de sources similaires à celles de Font Dame et Font Estramar, le rôle de barrage joué par les formations plio-quaternaires limite très significativement les flux au sein du flanc sud du synclinal. L'essentiel des écoulements se dirige donc vers les sources de Font Dame et Font Estramar. En effet, l'ensemble des apports du karst aux formations sédimentaires est évalué à 400 l/s au total -secteurs de Rivesaltes d'une part et de l'étang de Salses d'autre part- avec sans doute au plus quelques dizaines de litres par seconde dans le secteur de Rivesaltes (apports du flanc sud du synclinal). Les vitesses d'écoulement des eaux au sein du flanc sud du synclinal sont donc très probablement beaucoup plus lentes, en étiage, qu'au sein du flanc nord, l'essentiel des flux s'y produisant en hautes eaux lorsque les sources temporaires sont actives. Par ailleurs, il ne peut être exclu que dans certaines conditions hydrologiques (certaines périodes de hautes eaux en particulier, mais peut-être aussi en étiage), les écoulements au sein du flanc sud du synclinal se fassent de l'est vers l'ouest.

Enfin, les sources de Font Dame et Font Estramar présentent une salinité significative. Les eaux salées proviennent en grande majorité de l'étang de Salses. Elles pourraient pénétrer au sein de l'aquifère par des conduits (à dominante verticale), de plusieurs dizaines, voire quelques centaines de mètres de profondeur. Ces conduits seraient similaires à ceux qui sont à l'origine des sources de Font Dame et Font Estramar, situés eux aussi sur le ou les anciens axes de drainage karstique, de direction générale SW-NE. Ces conduits fonctionneraient principalement en absorption, au lieu de fonctionner en exutoire comme les sources (certains d'entre eux pourraient temporairement fonctionner en exutoires du système karstique étudié ou de systèmes périphériques ; cf. pollutions bactériennes de l'étang de Salses). Les axes de drainage sont relativement profonds, et d'autant plus profonds que l'on se déplace vers l'est. Il en résulte que les salinités les plus importantes (et la thermalité la plus forte des eaux) sont observées :

- dans l'espace, de manière prépondérante au niveau des exutoires situés les plus à l'est (Font Estramar et dans une moindre mesure Font Dame), les sources et forages du secteur de Salses étant très significativement moins affectés ;
- dans le temps, en période de charges hydrauliques élevées (et, plus précisément, en période d'apports importants au karst par les pertes), qui permettent de générer des lignes de courant plus profondes qu'en périodes de faibles charges hydrauliques, mobilisant ainsi des eaux chaudes et salées.

L'aire d'alimentation du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly (recharge directe par les précipitations, hors bassin d'alimentation des zones de pertes) est évaluée à 166 km². Les principaux éléments de bilan de l'aquifère, à l'échelle interannuelle, sont présentés au sein de l'illustration 55.

Entrées		Sorties	
Nature	(l/s)	Nature	(l/s)
- Pertes : Agly	700	- Sources : Font Estramar	1 700
Verdouble	600	Font Dame	800
- Précipitations	1 400	- Autres sources (Salses, ...)	50
- Eau salée (étang de Salses)	200	- Sources temporaires (Cases de Pène, Baixas)	100
		- Apports diffus aux aquifères poreux : Secteur de Salses	300
		Secteur de Rivesaltes	50
Total :	3 000		3 000

Illustration 55 - Estimation du bilan en eau (en moyenne interannuelle) du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.

4.3.2. Caractéristiques hydrauliques du forage de Cases de Pène et débit maximal exploitable à court terme sur le site

L'essai de puits (cf. § 1.2.2.) permet les interprétations suivantes :

- les données recueillies au puits (cinq couples de données débit/rabattement pour des débits compris entre 75 et 320 m³/h) montrent un bon ajustement selon un modèle classique de type $s = b.Q + c.Q^2$;
- le coefficient de pertes de charges quadratiques est faible en valeur absolue ($c = 2,9.10^{-5} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$), ce qui est logique compte tenu du fait que le forage est en trou nu et qu'il recoupe des vides de taille importante ;
- la différence de charge mesurée entre le forage et le piézomètre en pompage (2,56 m en moyenne) est tout à fait conforme à l'estimation qui peut être réalisée au moyen du coefficient c (2,61 m). Les pertes de charge quadratiques sont donc circonscrites à l'environnement immédiat du forage (moins de 20 m de celui-ci et, très probablement, quelques décimètres ou mètres tout au plus) ;
- le coefficient de pertes de charges linéaires est lui aussi relativement faible en valeur absolue ($b = 1.10^{-3} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$), ce qui traduit la très forte « transmissivité » de l'aquifère dans les environs du puits ;
- les caractéristiques du forage n'ont pas significativement évolué (colmatage, décolmatage) depuis les essais de 1993 ;
- aucune turbidité n'a été observée lors de la réalisation des essais.

Sur la base de ces éléments et des diverses hypothèses présentées au sein de l'illustration 56, quant au positionnement de la pompe en exploitation et aux niveaux piézométriques au sein de l'aquifère (TBE = Très Basses Eaux, BE = Basses Eaux), le forage de Cases de Pène pourrait être exploité à des débits instantanés pouvant atteindre 850 à 1 000 m³/h, soit 240 à 280 l/s (sous réserve, entre autres, de la disponibilité de pompes permettant d'atteindre ce débit qui soit compatible avec les diamètres du forage).

Cette estimation correspond à un débit exploitable à « court terme », basé quasi exclusivement sur les caractéristiques du forage, qui ne préjuge donc pas des capacités de l'aquifère (cf. § 4.3.3.).

	Altitude m (NGF)	Profondeur (m)						
Repère forage	0	55						
Niveau piézométrique								
Très Basses Eaux (TBE)	22	33						
Basses Eaux (BE)	30	25						
Position pompe								
H1	-9	64						
H2	-20	75						
Coefficient de pertes de charges "b" =	1.18E-02	(m/(m ³ /h))						
Coefficient de pertes de charges "c" =	2.90E-05	(m/(m ³ /h) ²)						
	Piézométrie	Position pompe	Rabattement maximal admissible (m)	Rabattement calculé (m)	Pertes de charge linéaires (m)	Pertes de charge quadratiques (m)	Débit instantané maximal (m ³ /h) (l/s)	
Scénarios	TBE	H1	31	31.0	10.1	21.0	850	236
	TBE	H2	42	42.0	12.0	29.9	1016	282
	BE	H1	39	39.0	11.5	27.5	974	271
	BE	H2	50	50.0	13.3	36.7	1125	313

Illustration 56 - Scénarios d'exploitation du forage de Cases de Pène.

Dans la mesure où les essais (1993-2001) n'ont été mis en œuvre que sur la gamme 75-300 m³/h, il ne peut être exclu que des pompages à un débit plus important s'accompagnent de l'apparition, très probablement transitoire, d'une turbidité significative.

Par ailleurs, si une extrapolation des résultats des essais jusque vers 500 m³/h (140 l/s) semble raisonnable, elle ne peut être garantie pour des débits plus importants (validité de la loi de type $s = b.Q + c.Q^2$).

Si le forage devait être équipé pour des débits aussi importants, il serait donc souhaitable de procéder à un essai de pompage par paliers de débit et à un nouveau développement du puits, à un débit excédant la valeur maximale des débits de pompage envisagés ultérieurement en exploitation.

Dans la mesure où les pertes de charge quadratiques sont circonscrites aux environs immédiats du forage, si les débits instantanés souhaités sur ce site étaient supérieurs à la capacité du forage existant, une solution pourrait consister à réaliser plusieurs ouvrages du même type (ou de plus gros diamètre), espacés de 10 à 20 m les uns des autres (voire à moindre distance s'il est jugé que le risque géologique est important).

4.3.3. Évaluation du stock d'eau souterraine disponible sur le site de Cases de Pène

a) Choix de l'emplacement du forage

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus, il apparaît que le secteur de Cases de Pènes (flanc sud du synclinal du Bas-Agely) constitue un lieu privilégié de captage, par pompage, de la ressource en eau d'origine karstique.

En effet :

- il est situé sur l'un des deux axes majeurs de développement de la karstification, où les capacités de stockage de l'aquifère sont donc maximales. En outre, le flanc sud du synclinal présente l'intérêt, par rapport au flanc nord et à distance égale du littoral en ligne droite, d'une karstification potentiellement plus profonde ;
- l'exploitation des eaux souterraines karstiques devrait avoir peu d'impact global sur les aquifères poreux du Plio-Quaternaire, compte tenu du caractère limité des apports du karst dans le secteur de Rivesaltes. Des impacts locaux significatifs sont néanmoins probables, en particulier au sein de forages dans le Plio-Quaternaire situés à proximité immédiate du contact avec les calcaires ou *a fortiori* tirant une partie de leur débit de ceux-ci ;
- ce site d'exploitation des eaux souterraines minimise aussi l'impact éventuel quantitatif vis-à-vis des sources de Font Dame et Font Estramar, compte tenu de son éloignement vis-à-vis de celles-ci ;
- par ailleurs, les risques d'intrusion saline via le flanc sud du synclinal sont négligeables, la qualité des eaux souterraine au sein de la partie la plus orientale des formations carbonatées et au sein de l'aquifère du Roussillon étant excellente.

Néanmoins, compte tenu des débits souhaités (1 000 l/s environ au total au sein de l'aquifère), correspondant au tiers de la ressource renouvelable de l'aquifère, il est très probable que l'exploitation à un tel débit aurait un impact quantitatif sur les exutoires du système et, plus particulièrement, sur les sources de Font Dame et Font Estramar. La diminution associée de la charge hydraulique au sein du système pourrait en revanche entraîner un paradoxe apparent : la baisse de la salinité moyenne de l'eau de ces deux sources.

L'un des points faibles du choix du flanc sud de l'anticlinal pour l'implantation d'un forage d'exploitation tient à la faible surface relative d'affleurement de l'aquifère dans ce secteur. La part des pertes au sein du débit prélevé est prépondérante par rapport à celle de l'infiltration des eaux de pluie.

b) Estimation du stock d'eau disponible

À la fin de l'essai de pompage de longue durée, le rabattement maximal observé dans le piézomètre était de 6,22 m par rapport au niveau initial, mais ce rabattement était principalement dû au tarissement naturel de la nappe : la baisse du niveau provoquée par le pompage a été estimée inférieure à 1 m (Petit *et al.*, 2002).

La partie terminale de l'essai de pompage (du 20 août au 5 septembre 2001) comprend la période de pompage et une période non influencée par celui-ci, ces deux périodes ne subissant pas de précipitations significatives ni de variation notable du débit de l'Agly (soutenu par les lâchers du barrage de Caramany). Elle permet d'évaluer à environ 4,6 cm/j l'impact du pompage à 300 m³/h (83,33 l/s), et d'en déduire un « volume spécifique mobilisable » d'environ 157 000 m³ d'eau par mètre de rabattement pour l'aquifère.

La profondeur des principales zones perméables recoupées par le forage (à partir de - 21 m NGF, et au moins jusqu'à - 35 m sous le niveau de la mer actuelle) est en accord avec les résultats qui montrent que la karstification est bien développée en profondeur au sein du flanc sud du synclinal du Bas-Agly. Ces éléments militent très fortement en faveur de l'existence d'un stock d'eau souterraine important au sein de cette partie de l'aquifère. Ils conduisent à ne pas remettre en cause l'hypothèse selon laquelle le volume spécifique évalué ci-dessus pourrait concerner l'aquifère sur une tranche importante d'épaisseur et, en particulier, au moins dans la gamme des rabattements autorisés par le forage de Cases de Pène (rabattement maximum, hors pertes de charge quadratiques, jusqu'à la profondeur des premières venues d'eau significatives, soit - 21 m NGF) et très probablement sur 300 à 400 m d'épaisseur.

Sur cette base, le stock d'eau souterraine mobilisable sur le site de Cases de Pène peut être évalué comme présenté ci-dessous (ill. 57), sur la base de différentes hypothèses portant sur le rabattement maximal choisi au sein du forage d'une part et sur le niveau piézométrique « moyen annuel » au sein de l'aquifère (ME = Moyennes Eaux, BE = Basses Eaux).

	Altitude m (NGF)	Profondeur (m)							
Repère forage	0	55							
Niveau piézométrique									
Eaux médianes (ME)	37	18							
Basses Eaux (BE)	30	25							
Position pompe									
H1	-9	64							
H2	-20	74							
H3	-50	74							
Coefficient de pertes de charges "b" =	1.18E-02	(m/(m ³ /h))							
Coefficient de pertes de charges "c" =	2.90E-05	(m/(m ³ /h ²))							
	Piézométrie	Position pompe	Rabattement maximal admissible (m)	Rabattement total calculé (m)	Rabatte-ment lié au déstockage (m)	Pertes de charge quadratiques (m)	Débit moyen annuel (m ³ /h) (l/s)		Volume annuel prélevé (m ³ /an)
Scénarios									
300 m³/h	-	-	-	19.3	16.7	2.6	300	83.3	2 628 000
Non dénoisement des venues d'eau	ME	H1	46	46.0	34.7	11.3	623	173.0	5 456 228
	ME	H2	57	57.0	41.2	15.8	739	205.2	6 470 426
	ME	H3	87	87.0	56.8	30.2	1020	283.3	8 934 377
	BE	H1	39	39.0	30.4	8.6	546	151.6	4 780 096
	BE	H2	50	50.0	37.1	12.9	666	185.0	5 833 604
	BE	H3	80	80.0	53.4	26.6	959	266.3	8 396 616
Dénoisement des venues d'eau sans dénoyer l'aquifère (pdc quadratiques seulement)	ME	H1	66	65.8	46.0	19.8	826	229.4	7 233 040
	ME	H2	87	87.4	57.0	30.4	1023	284.2	8 962 680
	ME	H3	158	157.7	87.0	70.7	1562	433.8	13 679 880
	BE	H1	53	53.2	39.0	14.2	700	194.5	6 132 360
	BE	H2	73	73.4	50.0	23.4	897	249.3	7 862 000
	BE	H3	140	139.8	80.0	59.8	1436	398.9	12 579 200

Illustration 57 - Estimation des volumes d'eau souterraine mobilisables.

Ces estimations montrent que :

- le débit de 300 m³/h (83 l/s) envisagé au forage de Cases de Pène est un débit d'exploitation envisageable sans problèmes à moyen terme,
- le prélèvement d'un débit annuel de l'ordre de 150 à 200 l/s (550 à 750 m³/h) pourrait être atteint, voire dépassé, compte tenu des caractéristiques hydrauliques du forage existant (cf. § 4.3.2.) et du stock d'eau disponible au sein de l'aquifère.

c) Conditions d'exploitation

La mobilisation d'une part plus importante du stock d'eau disponible au sein de l'aquifère n'est pas assurée avec l'ouvrage actuel. Elle requièrerait, en tout état de cause, un approfondissement significatif du forage (ou des forages futurs) sur le site de Cases de Pène ou dans ses environs afin de rechercher des conduits plus profonds que ceux qui sont recoupés par l'ouvrage actuel. Il est très probable que ces conduits profonds existent et qu'ils se situent bien dans les environs du forage actuel. La réalisation d'un forage profond comportera néanmoins un risque géologique.

Compte tenu d'une part, des très bonnes connexions existant entre le forage de Cases de Pène et l'aven de Baixas et d'autre part, du fait que ces deux regards sur le karst appartiennent très vraisemblablement tous deux au principal drain du flanc sud du synclinal de l'Agly (et non à un système annexe au drainage), la réalisation d'un second forage d'exploitation dans le secteur Cases de Pène - Baixas ne semble pas constituer une solution permettant de mieux mobiliser le stock d'eau souterraine de cette partie de l'aquifère. En effet, ce forage capterait très vraisemblablement le seul et même réservoir. Il en est vraisemblablement de même au sein de l'ensemble du flanc sud du synclinal, que ce soit vers l'est, au-delà de Baixas, sous couverture, ou vers l'ouest, entre les pertes et Cases de Pène. La réalisation d'un forage (ou deux : un pour le Verdoble et un pour l'Agly) de suivi des charges hydrauliques au sein de l'aquifère en aval immédiat des pertes permettrait, entre autres objectifs de confirmer cette hypothèse concernant la partie ouest du système.

Le flanc nord du synclinal, et en particulier sa partie la plus éloignée des sources, constitue lui aussi un lieu privilégié d'exploitation des eaux souterraines. Il est proposé d'y rechercher des sites potentiels de forage permettant d'assurer le monitoring de l'aquifère, en particulier dans le cadre d'essais de validation de longue durée et à gros débit à Cases de Pène, ainsi que de déterminer la faisabilité de la mise en place d'un ou plusieurs sites de prélèvement complémentaires à celui de Cases de Pène.

5. Conclusions et perspectives

Le forage de Cases de Pène a fait l'objet d'un essai de pompage de type longue durée en été 2001, à un débit de 300 m³/h au début de la phase I du projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes karstiques des Corbières orientales ». Cet essai avait pour objet de tester les capacités réelles du système karstique mis en jeu en terme de productivité, de déterminer le débit et les conditions d'exploitation pour une éventuelle exploitation future du système pour l'alimentation en eau potable de Cases de Pène et d'autres collectivités du département des Pyrénées-Orientales. Les premières interprétations nécessitaient de replacer cet essai dans un contexte hydrologique plus général et de caractériser le comportement du forage vis-à-vis de la recharge. Le suivi des niveaux d'eau du forage et du piézomètre d'observation de l'aven de Cases de Pène, situé plus orientalement sur le même flanc sud du synclinal du Bas-Agly, a été effectué de 2001 à 2003.

Le forage de Cases de Pène est situé sur le flanc sud du synclinal du Bas-Agly et appartient au système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, dont les principaux exutoires sont les sources de Font Estramar et de Font Dame, situées à l'extrémité orientale du flanc nord de ce même synclinal. Ce système karstique binaire, alimenté par les eaux de pluies tombant sur un impluvium de quelques 120 à 150 km², dont une quinzaine de km² sur le flanc sud, et les pertes du Verdoube et de l'Agly, possède deux axes de drainage principaux coïncidant globalement avec les deux flancs, sud et nord du synclinal. Les pertes sont situées dans la zone d'affleurement de la charnière synclinale. Ce synclinal constitué de formations calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur, a été soumis à une karstification importante au moins lors des épisodes de variations de niveau marin (Messinien - 1 500 m et Quaternaire - 120 m). Cette karstification a conduit au développement d'un réseau de conduits karstiques orientés vers les deux principales zones d'exutoires qui existaient à cette époque : à l'extrémité des deux flancs nord et sud du synclinal. À partir de l'altitude présumée des paléoxutoires, estimée en considérant l'intersection des flancs du synclinal avec la paléotopographie de l'incision messinienne, la karstification pourrait concerner les calcaires jusqu'à une profondeur d'environ 400 m sous le niveau actuel de la mer.

Cet aquifère est actuellement rechargé par les précipitations efficaces et les pertes du Verdoube et de l'Agly ; cette recharge résulterait d'une contribution supérieure à 75 % des pertes vis-à-vis des précipitations, comme il a été montré à l'aide de reconstitution des variations du niveau d'eau dans le forage de Cases de Pène pour la période 1992 à 2003 (TEMPO et GARDENIA). Les pluies efficaces considérées avec GARDENIA sans prise en compte des pertes comme terme d'entrée sont surestimées, atteignant des valeurs de 195 à 838 mm/an, soit 60 à 85 % des pluies totales. La composante « pluie » n'est sensible qu'après des épisodes de pluies efficaces relativement courts. L'effet des pertes se traduit par un effet de transfert instantané de pression, le transfert de la masse d'eau infiltrée au niveau des pertes étant plus lent et se faisant sentir qu'au bout de trois mois environ au niveau du forage de Cases de Pène. La

contribution des pertes de l'Agly et du Verdoube au niveau piézométrique du forage de Cases de Pène est très importante.

Le réservoir se vidange lentement comme en atteste les coefficients de tarissement au niveau du forage, principalement du fait de l'absence d'exutoires à basse altitude sur le flanc sud. Le tarissement est logiquement influencé par les infiltrations au niveau des pertes, influencées notamment au niveau de l'Agly par le soutien au débit par les lâchers du barrage de Carramany.

De plus, les résultats des analyses corrélatoire et spectrale (Duriez, 2002) ont confirmé la nature captive de l'aquifère dans ce secteur. Le coefficient d'emmagasinement et la porosité de l'aquifère peuvent être estimés en exploitant les effets diurnes et semi-diurnes sur le niveau piézométrique du forage : porosité de 5,6 %, coefficient d'emmagasinement entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ et $1,2 \cdot 10^{-4}$, selon l'épaisseur de l'aquifère considérée (respectivement 1 000 et 100 m).

Les reconstitutions des variations des niveaux d'eau du forage de Cases de Pène sur la base des données ponctuelles entre 1992 et 1998 sont globalement satisfaisantes ; la valeur ponctuelle la plus basse avec 22,02 m NGF ne peut être reproduite sans dégrader les résultats au niveau des autres valeurs. Deux hypothèses peuvent être avancées : (i) changement de comportement hydrologique suite à la mise en service du barrage de Carramany, (ii) valeur erronée.

La signature hydrochimique des eaux de Cases de Pène indique qu'il n'y a pas d'alimentation directe par les eaux de l'Agly et du Verdoube. Si la signature des eaux des exutoires du flanc nord du synclinal du Bas-Agly indique l'existence d'un mélange d'eaux issues de trois pôles, le pôle « étang », le pôle « karst Roboul » et le pôle « pertes », les eaux de Cases de Pène ont une signature proche du pôle « pertes ». Les eaux de Cases de Pène sont donc à rattacher à celles des eaux des pertes ; au vu du temps de transfert au sein de l'aquifère de plusieurs mois, les eaux infiltrées interagissent avec la matrice rocheuse de l'aquifère et y acquièrent une signature différente.

Concernant l'exploitabilité du forage, il faut considérer les caractéristiques de l'ouvrage existant et les caractéristiques de l'aquifère :

- Au vu des caractéristiques des pertes de charge (linéaires et quadratiques) et de deux positions de pompe dans le forage, le forage pourrait être exploité à des débits instantanés pouvant atteindre 850 à 1 000 m³/h, soit 240 à 280 l/s.
- Au vu de l'impact du pompage de 300 m³/h sur le rabattement dans l'aquifère, 4,6 cm/jour, et un volume d'eau spécifique d'environ 157 000 m³ par mètre de rabattement pour l'aquifère, plusieurs scénarios ont été établis, considérant des conditions hydrologiques différentes, ainsi que des positions de pompe à des profondeurs différentes. Il en résulte qu'un débit d'exploitation de 300 m³/h (83 l/s) est possible et que des débits annuels équivalents de 150 à 200 l/s pourraient très vraisemblablement être atteints.

La mobilisation d'une part plus importante du stock d'eau disponible au sein de l'aquifère n'est pas assurée avec le dispositif actuel ; un approfondissement de

l'ouvrage ou la réalisation d'un nouvel ouvrage plus profond permettrait d'augmenter la probabilité d'une exploitabilité plus importante que celle proposée. De plus, le forage de Cases de Pène appartenant au système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, système binaire alimenté par les pertes de l'Agly et du Verdoube, son exploitation est conditionnée par ces relations hydrauliques. Une meilleure estimation des pertes permettrait de confirmer les volumes d'exploitation.

Pour des débits d'exploitation supérieurs à 150-200 l/s, des tests en grandeur nature devraient être réalisés expérimentalement afin de vérifier les effets à long terme sur les exutoires et sur la partie de l'aquifère du flanc nord du synclinal du Bas-Agly. Sur la base de la relation débit des cours d'eau/débit d'absorption des pertes/état de saturation du karst, il s'agirait de démontrer que la dépression créée au sein de l'aquifère sous l'effet d'un pompage engendrait une meilleure capacité d'absorption des pertes, en particulier en début des saisons des pluies.

Les perspectives en matière d'exploitabilité du système et de gestion de l'ensemble du système karstique, y compris la gestion de l'effet des lâchers de barrage sur les pertes de l'Agly, seront mises en œuvre dans le cadre de la phase II du projet. Elles sont les suivantes :

- implantation de piézomètres pour le suivi des pertes de l'Agly et du Verdoube en conditions naturelles, afin d'appréhender finement le sens et la direction des écoulements, l'inversion de gradients par exemple ainsi que l'évolution de la capacité d'absorption des pertes ;
- implantation de forages de reconnaissance au sein du flanc nord afin de rechercher des sites potentiels d'exploitation complémentaire au site de Cases de Pène ;
- nivellement de l'ensemble des points d'eau du réseau de suivi ;
- effectuer un suivi métrologique sur l'ensemble des points d'eau retenus à l'échelle du système karstique, lors de périodes d'essais hydrauliques sur les nouveaux ouvrages, en fonction de leurs résultats ;
- caractérisation globale de la vulnérabilité du système karstique, et plus particulièrement en ce qui concerne les impacts potentiels de pollution sur les cours d'eau Agly et Verdoube ;
- proposition d'une méthodologie de mise en œuvre d'essais à gros débit de longue durée (3 à 6 mois minimum en période d'étiage) sur le forage de Cases de Pène et sur les autres forages de reconnaissance ;
- synthèse exhaustive de l'ensemble des résultats du projet Corbières, avec la fin de la phase 2 (1^{er} semestre 2006).

L'implantation de nouveaux forages sur le flanc nord du synclinal du Bas-Agly revêt un grand intérêt, tant du point de vue de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ce grand système karstique complexe que du point de vue de la caractérisation de l'exploitabilité de ce système. Le risque géologique demeure important vis-à-vis de l'implantation de ces forages, vu que des forages ne peuvent être implantés dans le secteur des exutoires, partie de l'aquifère où *a priori* la karstification paraît la plus développée.

6. Principales références bibliographiques

Association de Recherches de Font Estramar (ARFE), correspondant Cyrille Brandt (1997) - Font Estramar : 11 ans de recherche en plongée dans un grand réseau noyé en bord de Méditerranée. 12th International Congress of Speleology, Symposium 4 : Exploration and Speleology. Vol. IV, p. 71-75, La Chaux-de-Fonds, Suisse.

Courtois N., avec la collaboration de Bakalowicz M., Cubizolles J., Dörfliger N., Izac J.L., Ladouche B. (2003) - Corbières : Évaluation de la ressource en eau souterraine des Corbières karstiques. Essai de traçage des pertes du Verdoubert. BRGM/RP-52211-FR, 82 p., 25 fig., 4 ann.

Daum J.R., Desprats J.F., Durand F. (1996) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1965-1994). Rapport BRGM R 38975.

Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt 66 (1986) - Barrage de Caramany-Ansignan. Étude des pertes de l'Agly.

Dörfliger N., Ladouche B., Le Strat P., et al. (2004) - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières ». Volume 1 - Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation. BRGM/RP-52918-FR. 107 p., 85 ill., 2 ann.

Duriez A. (2002) - Etude du fonctionnement hydrogéologique de karst de Font Estramar (Aude - Pyrénées-Orientales). Mémoire de DEA Hydrologie - Hydrogéologie de l'université Paris-Sud XI.

Faillat J.P. (1972) - Contribution à l'étude des circulations souterraines dans les formations carbonatées du haut-bassin de l'Agly (ruissellement souterrain et nappes karstiques). Thèse de l'université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier. 219 p.

Mangin A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de doctorat en sciences naturelles, Dijon.

Ladouche B., Dörfliger N., avec la collaboration de J.L. Izac, J. Cubizolles, C. Du Couëdic, B. Aunay, P. Thomson (2004) - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet Évaluation des ressources en eau des Corbières. Volume 2 - Caractérisations géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly » BRGM/RP-52919-FR. 198 p., 109 ill., 5 ann.

Mori A. (1982) - Notice et carte à 1/2 000 000 des réserves en eau utiles des sols de France. INRA, 54 p.

Petit V., Ladouche B., Dörfliger N., avec la collaboration de Izac J.L., Cubizolles J., Giroux H. et Emblanch Ch. (2002) - Projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières » - Compte rendu et interprétation du pompage d'essai de puits et de nappe (longue durée) à Cases de Pène. BRGM/RP-51394-FR.

Pinault J.L. (2001) - Manuel d'utilisateur de TEMPO, logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et hydrochimie. BRGM/RP-51459-FR.

Thomson P. (2002) - Analyse hydrogéologique du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly (Corbières orientales). Modélisation globale (TEMPO) et discrétisée (MARTHE). Rapport de stage du DESS Hydrogéologie et Environnement de l'université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service eau
1039, rue de Pinville
34000 – Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 80