

**Évaluation des ressources
en eau des Corbières**

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

Rapport final

BRGM/RP-52919-FR
février 2004



**CONSEIL
GÉNÉRAL**
PYRÉNÉES-ORIENTALES

Évaluation des ressources en eau des Corbières

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

Volume 2 - Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly »

Rapport final

BRGM/RP-52919-FR
février 2004

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

B. Ladouche, N. Dörfliger
Avec la collaboration de

J.L. Izac, J. Cubizolles, P. Le Strat, C. Du Couëdic, B. Aunay, P. Thomson



Mots clés : Hydrogéologie, Karst, Analyse corrélatrice et spectrale, TEMPO, Hydrochimie, Corbières, Font Estramar, Font Dame, Synclinal du Bas-Agly.

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

Ladouche B., Dörfliger N., avec la collaboration de Izac J.L., Cubizolles J., Le Strat P., Du Couëdic C., Aunay B., 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 2 - Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly ». BRGM/RP-52919-FR, 196 p., 109 ill., 5 ann.

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 Verdoubte ;
- système karstique des Adoux – las Bordes.

Le présent rapport (vol. 2) concerne la caractérisation du système karstique des Corbières d'Opoul - Synclinal du Bas-Agly, tant en terme de structure que de fonctionnement. Différentes méthodes complémentaires ont été mises en œuvre afin de procéder à cette caractérisation : (i) étude géologique détaillée à partir des cartes géologiques, de levés de terrain, de photos aériennes, des forages existants et de données sismiques offshore, (ii) étude hydrologique des relations pluies-débit au niveau des exutoires et de piézomètres d'observation (quelques douze points) et des pertes de l'Agly et du Verdoubte, (iii) étude hydrogéochimique au niveau des sources, pertes mais aussi au contact karst et aquifère plio-quaternaire du Roussillon. Une caractérisation des réserves-ressources du système a été mise en œuvre à partir des hydrogrammes des exutoires principaux (sources de Font Estramar et de Font Dame) : analyses des courbes de récession, notamment. Les questions relatives au rôle des pertes dans le fonctionnement de ce système karstique binaire, aux échanges entre les deux aquifères (karst et plio-quaternaire du Roussillon), à l'origine de la salinité des sources de Font Estramar et de Font Dame ont été traitées à l'aide de ces différentes méthodes, et également par une approche théorique de simulation entre les deux aquifères (analyse de sensibilité sur les paramètres hydrauliques, le nombre des conduits karstiques), afin d'y apporter des réponses.

Les principaux résultats à l'issue de cette première phase sont les suivants :

- Le système karstique se développe au sein des formations de calcaire massif du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur, structurées en synclinal -synclinal du Bas-Agly- présentant deux flancs dissymétriques. Ces formations sont karstifiées sur quelques 400 m parmi les plus de 1 000 m de formations potentiellement

karstifiables, comme on peut le déduire de l'intersection des formations calcaires avec la surface topographique de l'incision messinienne du Roussillon. Ce système est marqué par deux axes de drainage principaux, coïncidant globalement avec les deux flancs du synclinal. La structure de ce synclinal est complexe, affectée par une tectonique marquée par les déformations régionales, faille de Prades et faille nord-pyrénéenne ; un doublement de séries est probable au centre du synclinal. Le réseau karstique qui s'y développe peut être caractérisé de réseau de type anastomosé, marqué par deux directions principales : N45°-75° et N105°-135°.

- Ce système karstique est un système binaire, alimenté par les précipitations de l'impluvium évalué à quelques 165 km² et par les pertes de l'Agly et du Verdoube. Ces pertes contribuent à hauteur de 40-60 % aux débits des exutoires, sources de Font Estramar et Font Dame, de manière générale à l'échelle de la période observée (1997-2003). Cette contribution peut être plus importante en cours de période d'étiage.
- Le système est caractérisé par un comportement hydraulique complexe, variable dans le temps, fonction du régime hydrologique ; les exutoires actuels fonctionnent comme des exutoires de trop-plein. Les mises en charge du système sont à relier à la présence de formations du Plio-Quaternaire, « bouchon » hydraulique. De plus, le système est caractérisé par l'existence d'un épikarst, siège de l'infiltration des pluies, bien connecté à la zone noyée, qui est bien drainée et karstifiée, au vu des durées de recharge et de transfert des pluies.
- Le système possède un comportement non homogène vis-à-vis du stockage des eaux souterraines. Le volume des réserves par défaut est estimé à quelques 25 millions de m³. La taille du réservoir souterrain est estimée à 70 millions de m³ (volume de régulation).
- Les relations entre les deux aquifères karstique et du Plio-Quaternaire ont été mises en évidence par l'interprétation hydrogéochimique et par simulation sur un cas théorique. Les flux entre les deux aquifères peuvent prendre place au niveau du flanc sud (secteur de Rivesaltes) avec quelques l/s et au niveau du flanc nord (secteur Salses – Mas Péchot) avec quelques l/s.
- L'origine de la salinité des sources de Font Estramar et de Font Dame est liée à l'intrusion récente (quelques dix ans) de l'eau de l'étang de Salses Leucate ; l'intrusion peut prendre place au niveau de la faille de Prades probablement reliée au réseau de drains karstiques et au niveau des affleurements des calcaires le long de l'étang. Des différences de salinité se marquent entre les exutoires, la salinité de Font Estramar résultant d'une contribution de 10 % d'eau salée et celle de Font Dame de 5 %.
- L'anomalie thermique des exutoires implique des circulations à une profondeur estimée à quelques 360-390 m, profondeur cohérente avec les profondeurs de karstification de 400 m sous le niveau actuel de la mer, des calcaires. Deux types d'écoulement prennent place au sein de ce système, avec des écoulements locaux de subsurface (pluies, épikarst) dans le réseau de drainage ou dans les systèmes annexes au drainage, et des écoulements régionaux, pour lesquels les infiltrations au niveau des pertes jouent un rôle important.

Des perspectives ont été dégagées au terme de cette première phase en vue de la phase II du projet :

- amélioration de la connaissance de la fonction d'entrée du système karstique binaire au niveau des pertes, avec l'implantation de station de jaugeage et de piézomètres ;
- nivellement précis des différents points d'eau du réseau d'observations pour apprécier notamment des inversions de gradient possibles sur le flanc sud ;
- implantation de forages de reconnaissance prioritairement sur le flanc nord du synclinal, à partir d'investigation géophysique complémentaire et de reconnaissance géologique ;
- des essais hydrauliques au niveau des forages en fonction des résultats, ainsi que des analyses hydrogéochimiques ;
- actualisation de l'interprétation des analyses sur les hydrogrammes, des relations pluies-débit, en intégrant deux cycles hydrologiques supplémentaires (2004-2005) et appréciation de la variabilité temporelle du système vis-à-vis du stockage des eaux souterraines.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Caractéristiques du système karstique du « synclinal du Bas-Agly »	19
2.1. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE - SCHÉMA STRUCTURAL	19
2.1.1. Contexte géologique et structural.....	19
2.1.2. Étude géologique du synclinal du Bas-Agly	23
2.1.3. Identification des plans de drainage selon la méthode Eraso	29
2.1.4. Géologie et ressource en eau potentielle dans le karst	31
2.2. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE	31
2.2.1. Détermination du bilan hydrologique.....	31
2.2.2. Analyse des débits classés	36
2.2.3. Analyses corrélatoires et spectrales des hydrogrammes des sources de Font Estramar et Font Dame	43
2.2.4. Traitement des chroniques de débit de Font Estramar par le filtre de moyenne mobile.....	47
2.2.5. Analyse de courbes de récessions de la source de Font Estramar	49
2.2.6. Évaluation de la stationnarité du système de Font Estramar et du volume de régulation du réservoir	53
2.2.7. Analyses fonctionnelles à court terme du karst d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly	56
2.2.8. Rôle hydrogéologique des pertes de l'Agly et du Verdoble.....	63
2.2.9. Synthèse du fonctionnement hydrogéologique	72
2.3. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOCHIMIQUE DU SYSTÈME KARSTIQUE PAR LE SUIVI DE CRUE	75
2.3.1. Suivis temporels de la conductivité de la température et de la minéralisation de l'eau des sources de Font Estramar et Font Dame....	75
2.3.2. Caractérisation géochimique et isotopique des eaux du système karstique d'Opoul	84
2.3.3. Caractérisation du mécanisme de salinisation du système karstique par l'étude des données physico-chimiques de la source de Font Estramar.....	95

2.3.4. Synthèse sur le fonctionnement géochimique	111
2.4. ANALYSES QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU SYSTÈME KARSTIQUE PAR L'APPROCHE DE MODÉLISATION GLOBALE DITE « BOÎTE NOIRE » À L'AIDE DU LOGICIEL « TEMPO »	112
2.4.1. Objectifs.....	112
2.4.2. Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système du karst d'Opoul pris dans sa globalité (QFont Dame + QFont Estramar)	113
2.4.3. Modélisation inverse du système karstique d'Opoul en intégrant les pertes de l'Agly et du Verdoble	116
2.4.4. Modélisation inverse des relations pluie-débit et des variations temporelles de la température et des teneurs en chlorure du système karstique de Font Estramar	121
2.4.5. Synthèse des résultats par modélisation inverse	129
2.5. INTERACTION KARST ET AQUIFÈRE PLIO-QUATERNAIRE.....	131
2.5.1. Approche hydrogéologique par modèle théorique.....	131
2.5.2. Approche hydrogéochimique	138
3. Schéma conceptuel du système « synclinal du Bas-Agly »	145
4. Conclusions et perspectives	155
5. Principales références bibliographiques.....	159

Liste des illustrations

Illustration 1 -	Extrait de la synthèse cartographique à 1/100 000 du massif des Corbières (d'après Aunay <i>et al.</i> , 2004).	21
Illustration 2 -	Légende de la carte numérique géologique des Corbières (Aunay <i>et al.</i> , 2004).	22
Illustration 3 -	Localisation des coupes préexistantes, des profils sismiques et de la coupe interprétative.	24
Illustration 4 -	Coupe géologique interprétative (cf. localisation ill. 3) entre Vingrau et Bompas au niveau du synclinal du Bas-Agely (Du Couëdic et Le Strat, 2003).	25
Illustration 5 -	Identification des principaux accidents à partir de la photo-interprétation.	25
Illustration 6 -	Épaisseur des formations représentées sur la coupe de Rivesaltes.	26
Illustration 7 -	Localisation des forages mentionnés.	27
Illustration 8 -	Localisation des trois secteurs de prospection pour implantation de forages de reconnaissance au niveau du synclinal du Bas-Agely.	29
Illustration 9 -	Histogramme des directions des plans de drainage (Duriez, 2002) (357 données exprimées au total, représentation selon l'azimut des plans en degré au niveau de l'abscisse).	30
Illustration 10 -	(a) Représentation du mode de lecture du diagramme de Wülf, (b) représentation polaire des plans de drainage du massif de Périllos (Duriez, 2002).	30
Illustration 11 -	Limites supposées de l'impluvium des calcaires affleurants du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agely.	33
Illustration 12 -	Estimation de la surface du bassin d'alimentation à l'aide des données d'ETP de la station Météo France de Perpignan.	34
Illustration 13 -	Estimation de la surface du bassin d'alimentation à l'aide du déficit d'écoulement (calculé par la formulation de Turc).	34
Illustration 14 -	Coupe schématique des principales formations géologiques régionales du secteur d'étude (d'après Duval C., 2003).	36
Illustration 15 -	Débits classés de la source de Font Estramar sur l'ensemble des données de la période 1971-2003 (classes de débit de 250 l/s).	38
Illustration 16 -	Débits classés de la source de Font Dame sur l'ensemble des données de la période 1998-2003 (classes de débit de 100 l/s).	39
Illustration 17 -	Débits classés pour l'ensemble du système karstique (somme des débits des trop-pleins des exutoires de Font Dame et Font Estramar) sur la période 1998-2003.	40
Illustration 18 -	Hauteurs classées pour la piézométrie de l'ouvrage BSS 10795X0030 (104) sur la période 1998-2003.	41
Illustration 19 -	Corrélogramme du débit à Font Estramar (période 1971-2003) et du débit de Font Dame (période 1998-2003).	43

Illustration 20 -	Corrélogramme croisé (pluie-débit) des sources de Font Estramar (période 1971-2003) et Font Dame (période 1998-2003).....	44
Illustration 21 -	Densité spectrale de puissance de la source de Font Estramar (période 1984-1996).....	45
Illustration 22 -	Fonction de gain entre la pluie et le débit à Font Estramar pour les périodes 1971-1982, 1984-1996 et 1997-2003.	46
Illustration 23 -	Fonction de phase entre la pluie et le débit à Font Estramar pour la période 1997-2003.....	46
Illustration 24 -	Moyennes mobiles annuelles sur les chroniques de pluie et de débit journalier à Font Estramar.	48
Illustration 25 -	Exemple de courbe de récession de la source de Font Estramar et résultats de l'ajustement (cycle hydrologique 2001-2002).	50
Illustration 26 -	Paramètres moyens des récessions de la source de Font Estramar déterminés par la méthode de Mangin.	50
Illustration 27 -	Position de la source de Font Estramar dans la classification de Mangin (1975).....	52
Illustration 28 -	Analyse R/S des chroniques journalières de précipitation et de débit de la source de Font Estramar.	54
Illustration 29 -	Estimation du volume de régularisation du système de Font Estramar à partir de la courbe des débits cumulés (périodes 1972-1982, 1984-1996 et 1997-2003), d'après Réménieras, 1960.	55
Illustration 30 -	Évolution temporelle du niveau de l'étang de Salses Leucate (Port Fitou ⁴) de la hauteur d'eau au niveau des piézomètres P102, P104, P107, PRoboul, Baixas et Font Dame.....	57
Illustration 31 -	Corrélogrammes simples et croisés des niveaux piézométriques et des précipitations.....	58
Illustration 32 -	Décalage temporel entre les différentes stations suivies (piézomètres) et la source de Font Estramar (exutoire de trop-plein du système karstique).....	59
Illustration 33 -	Coefficients de tarissement des piézomètres.....	59
Illustration 34 -	Densité spectrale de puissance (spectre simple) des hauteurs d'eau de la source de Font Estramar et de Font Dame et du piézomètre 102 (n° BSS 10795X0028) et du piézomètre de la pisciculture de Font Dame (n° BSS 10795X0050).	60
Illustration 35 -	Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) des hauteurs d'eau des piézomètres 104, 107, Roboul et du piézomètre de Cases de Pène.....	61
Illustration 36 -	Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) de la pression atmosphérique et du marnage de l'étang de Salses Leucate.	62
Illustration 37 -	Spectres croisés (fonctions de cohérence et de gain) de la pression atmosphérique et du niveau piézométrique du forage de la pisciculture de Font Dame (10795X0050).	62
Illustration 38 -	Spectres croisés (fonctions de cohérence et de gain) du marnage de l'étang et du niveau piézométrique du forage de la pisciculture de Font Dame (10795X0050).	63

Illustration 39 - Estimation des débits moyens des pertes de l'Agly et du Verdouble.	64
Illustration 40 - Estimation des débits instantanés des pertes du Verdouble.	65
Illustration 41 - Position des points de suivi du réseau hydrographique et des zones des pertes (fonds scannés 1/100 000 ® copyright IGN Paris 1999, autorisation n° 90-9068).	66
Illustration 42 - Jaugeages différentiels sur le Verdouble, en amont et aval de la zone des pertes des gorges du Verdouble.	67
Illustration 43 - Illustration du fonctionnement hydrogéologique d'une zone de pertes (cas des pertes de la Buèges, Hérault).	68
Illustration 44 - Évolution temporelle des débits des pertes de l'Agly et des débits sortant du barrage de l'Agly.	70
Illustration 45 - Évolution temporelle des débits des pertes de l'Agly et du Verdouble.	71
Illustration 46 - Évolution temporelle de débits des pertes et du débit de l'Agly à Caramany (restitués par le barrage).	71
Illustration 47 - Évolution des débits et de la conductivité électrique des eaux des sources de Font Estramar et Font Dame lors du suivi géochimique 2002. La position temporelle des échantillons d'eau analysés est également reportée.	76
Illustration 48 - Évolution de la conductivité, de la température et du débit de la source de Font Estramar depuis le 18 décembre 2001.	78
Illustration 49 - Relation concentrations versus conductivité dans les eaux de Font Estramar.	78
Illustration 50 - Évolutions temporelles de la conductivité électrique des eaux du ruisseau de Font Dame, du piézomètre 102, et du débit de Font Dame.	79
Illustration 51 - Relation concentrations versus conductivité dans les eaux de Font Dame.	80
Illustration 52 - Évolution temporelle des chroniques de conductivité et de température.	81
Illustration 53 - Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) des chroniques de température et de conductivité des sources de Font Dame et Font Estramar et du piézomètre P102.	82
Illustration 54 - Évolution des teneurs en sodium, potassium et magnésium en fonction des concentrations en chlorure.	85
Illustration 55 - Évolution des teneurs en calcium, sulfate et strontium en fonction des concentrations en chlorure.	86
Illustration 56 - Évolution des rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des teneurs en strontium.	87
Illustration 57 - Évolution des rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des rapports molaire SO_4/Sr	88
Illustration 58 - Évolution des teneurs en sulfate des eaux du karst d'Opoul en fonction des concentrations en chlorure.	89
Illustration 59 - Évolution des teneurs en bore et bromure en fonction des concentrations en chlorure.	90

Illustration 60 - Évolution des teneurs en bore en fonction des teneurs en deutérium des eaux échantillonnées au sein du karst et au niveau de l'étang de Salses Leucate.	91
Illustration 61 - Plan du réseau noyé (exploré) de la source de Font Estramar (d'après C. Brandt, ARFE 2002).	96
Illustration 62 - Évolution de la teneur et du flux de chlorure en fonction du débit.	98
Illustration 63 - Évolutions temporelles du débit, de la pluviométrie, de la conductivité et du flux de chlorure (décembre 2001 à octobre 2003).	100
Illustration 64 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques de l'effet piston.	100
Illustration 65 - Évolutions temporelles du débit, de la pluviométrie, de la conductivité et du flux de chlorure lors de la crue n° 1 du 7 mars 2002.	101
Illustration 66 - Évolution du volume d'eau et du flux de chlorure « pistonné » à la source de Font Estramar lors des crues en fonction du cumul de précipitation.	102
Illustration 67 - Évolution du flux de chlorure exporté à la source de Font Estramar lors des phases « pistons » des crues en fonction du débit initial et du flux initial en chlorure.	103
Illustration 68 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques des périodes de dilution.	104
Illustration 69 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques des périodes de (re)concentration.	104
Illustration 70 - Évolution de la durée de la phase de dilution en fonction du débit.	105
Illustration 71 - Évolution du flux de chlorure entre le début et la fin des crues.	106
Illustration 72 - Coupe schématique d'une source salée par effet Venturi (d'après Arfib, 2001).	106
Illustration 73 - Coupe schématique d'une source salée par une intrusion diffuse d'eau marine en profondeur dans le conduit (d'après Arfib, 2001).	107
Illustration 74 - Contexte géologique au niveau de l'étang de Salses Leucate (extrait de la carte n° 1079 à 1/50 000, © BRGM copyright).	109
Illustration 75 - Coupe schématique interprétative du fonctionnement hydrogéologique du système karstique au niveau de la source de Font Estramar.	110
Illustration 76 - Corrélogramme croisé pluie-débit obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).	113
Illustration 77 - Réponse impulsionnelle (a) et comparaison du débit modélisé au débit mesuré (b) : écart-type = 888 l/s ; 91 % de la variance totale expliquée).	114
Illustration 78 - Hypothèse 1 : réponses impulsionnelles de la pluie efficace et des débits des pertes du système karstique d'Opoul.	118
Illustration 79 - Hypothèse 1 : comparaison du débit modélisé aux débits mesurés (QFont Dame + QFont Estramar) : (93 % de la variance totale expliquée).	118
Illustration 80 - Hypothèse 1 : identification des différentes parties de l'hydrogramme unitaire du système karstique pris dans sa globalité.	119
Illustration 81 - Hypothèse 1 : évolution temporelle des contributions des composantes de l'écoulement.	120

Illustration 82 - Hypothèse 2 : comparaison du débit modélisé aux débits mesurés (QFont Dame + QFont Estramar) (90 % de la variance totale expliquée).	120
Illustration 83 - Évolution temporelle des variables caractérisant les composantes événementielle et pré-événementielle de l'écoulement.	122
Illustration 84 - Calcul de l'hydrogramme unitaire normalisé de la source de Font Estramar.	123
Illustration 85 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie.	123
Illustration 86 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré à la source de Font Estramar : écart-type = 825 l/s (90 % de la variance totale expliquée, Nash = 0,83).	124
Illustration 87 - Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.	124
Illustration 88 - Réponse impulsionnelle de la composante événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.	126
Illustration 89 - Réponse impulsionnelle de la composante pré-événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.	126
Illustration 90 - Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles événementielle (température) et pré-événementielle (teneur en Cl) : somme = 0,924.	127
Illustration 91 - Réponses impulsionnelles du débit de Font Estramar, du flux événementiel (déterminé par la température) et du flux pré-événementiel (déterminé par les teneurs en Cl).	127
Illustration 92 - Décomposition des différentes composantes de l'hydrogramme de Font Estramar : 39 % d'eau d'infiltration issue du réservoir peu minéralisée et 61 % d'eau profonde chaude et minéralisée de la zone noyée.	128
Illustration 93 - Représentation conceptuelle du fonctionnement du système karstique.	130
Illustration 94 - Schéma du modèle théorique de simulation des échanges hydrauliques entre le karst et le Plio-Quaternaire (Aunay, 2003).	132
Illustration 95 - Maillages utilisés lors des modélisations (modifié à partir d'Aunay, 2003).	132
Illustration 96 - Caractéristiques des simulations 2D et 3D (FLEFLOW) et commentaires des résultats (modifié, d'après Aunay, 2003).	135
Illustration 97 - Exemple de simulation en 2D (coupe) : représentation des vitesses d'écoulement dans les éléments discrets (Aunay, 2003).	136
Illustration 98 - Localisation des points de prélèvement des campagnes spatiales.	139
Illustration 99 - Liste des points d'eau échantillonnés dans les formations plio-quaternaires lors des campagnes spatiales.	140
Illustration 100 - Listes des points d'eau échantillonnés au sein du système karstique d'Opoul et du Bas-Agly lors des campagnes spatiales.	140
Illustration 101 - ACP : corrélation variables - facteur principaux. Projection dans le plan F1-F2 de l'espace des variables.	141
Illustration 102 - ACP-Projections des échantillons dans le plan principal F1-F2.	141
Illustration 103 - Rapports isotopiques du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse des teneurs en strontium.	142

Illustration 104 - Évolution de la piézométrie dans le karst et au sein du Pliocène continental (29-34 m) dans le secteur de la pisciculture de Font Dame.	143
Illustration 105 - Représentation schématique en plan des axes de drainage et du bilan hydrologique du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, sur fond de carte de la topographie de l'incision messinienne (d'après Duvail <i>et al.</i> , 2001).....	146
Illustration 106 - Bilan hydrologique des flux à l'échelle du système karstique des « Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly ».	148
Illustration 107 - Interaction entre les aquifères karstique et plio-quaternaire : synthèse des résultats en provenance des analyses hydrogéochimiques.	149
Illustration 108 - Coupe schématique du flanc nord du synclinal du Bas-Agly, expliquant le fonctionnement des sources de Font Estramar et de Font Dame, ainsi que le processus de salinisation.	152

Liste des annexes

Annexe 1 - Résultats de l'analyse des courbes de récessions de la source de Font Estramar pour la période 1971-2003.	163
Annexe 2 - Estimation du débit des pertes du Verdoble.	167
Annexe 3 - Diagrammes de Piper et tableaux des données hydrochimiques pour les sources de Font Estramar et de Font Dame.	171
Annexe 4 - Diagrammes de Piper et tableaux des données hydrochimiques pour les sources de Font Estramar et de Font Dame.....	177
Annexe 5 - Estimation du débit de trop-plein de Cases de Pène.....	191

1. Introduction

Le projet « Évaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières », initié au cours du premier trimestre 2001, a pour objectif d'évaluer les ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés des Corbières orientales. Il s'agit ainsi d'augmenter les connaissances sur le fonctionnement des principaux systèmes karstiques et de proposer des solutions pour :

- assurer une gestion durable des eaux souterraines et respectueuse de l'environnement ;
- et sécuriser l'approvisionnement actuel et futur. Ce projet s'inscrit ainsi dans la perspective de satisfaire les besoins en eau à l'horizon 2010.

Cette étude est motivée par la demande des conseils généraux des Pyrénées-Orientales et de l'Aude, au vu des problèmes de ressource en eau auxquels sont confrontées un certain nombre de collectivités :

- qualité et quantité de la ressource :
 - contaminations salines et risques d'intrusions salines au niveau de la plaine du Roussillon et teneurs élevées en sulfates dans la nappe calcaire dans le secteur de Ferrals-les-Corbières et Thézan-des-Corbières,
 - contamination bactériologique épisodique au niveau de l'étang de Salses Leucate,
 - importance de l'alimentation de l'étang par les eaux souterraines karstiques et besoin de préciser l'extension du bassin d'alimentation des systèmes karstiques contributifs,
 - rôle des pertes de l'Agly et du Verdoube vis-à-vis du fonctionnement du système karstique s./ . du « synclinal du Bas-Agly » avec notamment les exutoires de Font Estramar et de Font Dame,
 - incidence de la gestion actuelle et future du barrage Agly sur le fonctionnement du karst ;
- sécurisation de l'approvisionnement en eau potable pour les besoins futurs ;
- exploitation possible des eaux pour le thermalisme (existence de sources avec des anomalies de CO₂ et de température).

La zone d'étude s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés, d'ouest en est du cours d'eau l'Aude à la Méditerranée, et du nord au sud de Narbonne à Perpignan. Elle est centrée sur les formations jurassico-crétacées calcaires de la nappe de charriage des Corbières. Les zones de consommation en eau potable les plus importantes sont essentiellement les secteurs littoraux compris entre Perpignan et Narbonne, à savoir de Canet-Plage à Port-la-Nouvelle, les deux villes de Narbonne et Perpignan incluses.

Le BRGM, en partenariat avec les conseils généraux de Pyrénées-Orientales et de l'Aude et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, a bâti un projet qui s'inscrit

dans son programme de recherche sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques, en appui scientifique à la politique de l'eau des conseils généraux.

Le projet d'évaluation des ressources en eau souterraine des Corbières orientales karstiques comprend deux phases. La première phase, phase I, a débuté au premier trimestre 2001 et s'achève au premier trimestre 2004. La phase II, d'une durée de 24 mois, prend le relais au terme de la phase I, afin de vérifier la présence de la ressource en eau. Elle comprend la réalisation de forages et vise aussi à finaliser la caractérisation de certains systèmes karstiques (synclinal de Soulatgé, synclinal de Boucheville). La première phase a compris la sélection des sites à caractériser, l'instrumentation des sites, le suivi hydrologique et hydrochimique des sources et autres points d'eau (piézomètres), ainsi qu'une synthèse géologique régionale. L'ensemble de ces données a fait l'objet de différents traitements dont l'interprétation conduit à un schéma de fonctionnement et à une première évaluation de la ressource pour les différents systèmes karstiques étudiés.

L'ensemble des résultats est présenté à travers une série de cinq rapports de phase I :

- Volume 1 : « Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation ».
- **Volume 2 : « Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique « du synclinal du Bas-Agly ».**
- Volume 3 : « Rapport final « Interprétation de l'essai de pompage de Cases de Pène ».
- Volume 4 : « Caractérisation hydrogéologique des systèmes karstiques des Corbières orientales : La Mouillère – La Tirounère – Le Verdoube et les Adoux Las Bordes ».
- Volume de synthèse : « Synthèse des principaux résultats de la caractérisation de la ressource et du fonctionnement hydrogéologique des cinq systèmes karstiques des Corbières orientales ».

Les cinq rapports complètent et synthétisent les rapports édités au cours de cette première phase :

- BRGM/RP-51103-FR : État des connaissances hydrogéologiques des Corbières orientales (2001) ;
- BRGM/RP-51394-FR : Compte rendu et interprétation du pompage d'essai de puits et nappe (longue durée) à Cases de Pène (2002) ;
- BRGM/RP-51595-FR : Introduction à la géologie du karst des Corbières (juillet 2002) ;
- BRGM/RP-52211-FR : Corbières : évaluation de la ressource en eau souterraine des Corbières karstiques. Essai de traçage des pertes du Verdoube (2003).

Le présent rapport (vol. 2) concerne la caractérisation du système karstique des Corbières d'Opoul - Synclinal du Bas-Agly, tant en terme de structure que de fonctionnement. Différentes méthodes complémentaires ont été mises en œuvre, afin de procéder à cette caractérisation : (i) étude géologique détaillée à partir des cartes géologiques, de levés de terrain, de photos aériennes, des forages existants et de

données sismiques offshore, (ii) étude hydrologique des relations pluies-débit au niveau des exutoires et de piézomètres d'observation (douze points) et des pertes de l'Agly et du Verdoble, (iii) étude hydrogéochimique des sources, pertes mais aussi au contact karst/aquifère Plio-Quaternaire du Roussillon.

Une caractérisation des réserves-ressources du système a été mise en œuvre à partir des hydrogrammes des exutoires principaux (sources de Font Estramar et de Font Dame) : analyses des courbes de récession, notamment. Les questions relatives au rôle des pertes dans le fonctionnement de ce système karstique binaire, aux échanges entre les deux aquifères (karst et plio-quaternaire du Roussillon), à l'origine de la salinité des sources de Font Estramar et de Font Dame ont été traitées à l'aide de ces différentes méthodes, et également par une approche théorique de simulation des deux aquifères (analyse de sensibilité sur les paramètres hydrauliques, le nombre de conduits karstiques), afin d'y apporter des réponses.

2. Caractéristiques du système karstique du « synclinal du Bas-Agly »

Les caractéristiques du système karstique du « synclinal du Bas-Agly », comprenant également les Corbières d'Opoul, sont définies à partir de la mise en œuvre de différentes méthodes : (i) étude géologique, (ii) analyses hydrogéologiques des chroniques enregistrées aux exutoires (hauteur d'eau, débits, conductivité, température) et des piézomètres à l'aide d'outils statistiques et de traitement du signal, (iii) application des outils hydrochimiques et isotopiques pour caractériser le faciès hydrochimique, le fonctionnement du système (temps de transit, interaction eau-roche), l'origine de la salinité et l'interrelation entre l'aquifère karstique et l'aquifère plio-quadernaire du Roussillon, et (iv) la modélisation inverse du système à partir des chroniques pluie, débits, conductivité, température. Ce système karstique étant binaire¹, le rôle des pertes du Verdoube et de l'Agly est également considéré dans sa caractérisation.

2.1. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE - SCHÉMA STRUCTURAL

La synthèse géologique concernant le système karstique du « synclinal du Bas-Agly », qui comprend plusieurs sous-systèmes : Cases de Pène sur le flanc sud et les Corbières d'Opoul, résulte des travaux antérieurs (rapport BRGM « Introduction à la géologie du karst des Corbières », réf. BRGM/RP-51595-FR), ainsi que d'une note technique réalisée en 2003 concernant la proposition de sites d'implantation de forages de reconnaissance au niveau du synclinal. De plus, une synthèse des principaux résultats d'inventaire portant l'identification de plans de drainage, à partir de la méthode d'Eraso (1985), a été réalisée par A. Duriez (2002) dans le cadre d'un stage de DEA réalisé sous la direction d'Alain Mangin, directeur du laboratoire CNRS de Moulis.

2.1.1. Contexte géologique et structural

L'ensemble de la zone d'étude de ce système karstique, dit du « synclinal du Bas-Agly », appartient aux unités internes de la zone nord-pyrénéenne, caractérisée par la présence des formations géologiques du Crétacé inférieur, du Malm et du Lias-Dogger. Des formations post-tectonique éocène pyrénéenne (bassins oligocènes intra-Corbières) sont également présentes (Estagel, Espira-de-l'Agly). Les unités internes de cette zone sont séparées des unités externes au nord par un chevauchement, le chevauchement de Vingrau.

¹ Système karstique binaire : système dont une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables qui concentrent l'infiltration des eaux en un point (perte). Le drainage karstique souterrain du système est généralement très développé. Le bassin du système correspondant comprend l'impluvium karstique, ainsi que le bassin versant drainé par les pertes.

Les Corbières d'Opoul et le synclinal du Bas-Agly résultent du charriage des nappes intervenant au cours de l'Eocène. Le paroxysme tectonique d'âge bartonien (Eocène supérieur) a eu pour conséquence de déplacer d'épaisses formations calcaire-marneuses ; ces formations ont été décollées de leur substratum et déplacées du sud-est vers le nord-ouest lors de la phase de serrage de la zone axiale des Pyrénées (zone interne métamorphique). Le Trias et le Jurassique inférieur (Lias inférieur) ont joué le rôle de semelle de décollement.

- **Synclinal du Bas-Agly : massif karstique de Cases de Pène**

Le massif karstique de Cases de Pène, d'une superficie évaluée à environ 10 km², est situé dans le flanc sud du synclinal du Bas-Agly (ill. 1) ; il est constitué des formations carbonatées du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur. Ces formations carbonatées sont comprises entre deux niveaux pouvant être considérés comme imperméables : les marnes du Lias marneux et celles de l'Albien. Vers l'est, au niveau du col de Baixas, les calcaires plongent sous les sédiments mio-plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Faillat, 1972).

Le synclinal du Bas-Agly présente un flanc sud fortement redressé. À l'ouest d'Estagel, la série du flanc sud est inverse, puis à l'est d'Estagel, la série devient verticale. Le flanc nord est penté vers le sud. L'axe du synclinal suit une direction E-W à ENE-WSW et plonge vers l'est. Le synclinal, pincé dans le secteur d'Estagel, s'évase au niveau de la plaine du Roussillon. Le flanc sud est recoupé par la faille majeure de Prades (direction NNE-SSW) entre Espira-de-l'Agly et Rivesaltes. Les sédiments miocènes, pliocènes et quaternaires recouvrent en discordance le compartiment abaissé.

- **Corbières d'Opoul**

Ce secteur est dominé par des faciès calcaires karstifiables du Mésozoïque allochtone (ill. 2). Le Crétacé est à l'affleurement sur la majorité du massif, le Jurassique n'étant présent qu'à la périphérie : les calcaires du Jurassique constituent la bordure NW des Corbières orientales et affleurent NE et au SW de la zone des plateaux d'Opoul-Périllos.

Les formations calcaires du Jurassique et du Crétacé atteignent une épaisseur maximale de 1 200 m. Le Jurassique est constitué de bas en haut de cargneules, grès, marnes vertes et micacées à rares bancs calcaires roux surmontés par des dolomies et des calcaires sombres marneux, d'une épaisseur variable pouvant atteindre jusqu'à 500 m (Jurassique inférieur, Lias) ; le Dogger (Jurassique moyen) est constitué de calcaires et de dolomies d'une épaisseur pouvant atteindre 200 m à Feuille. Enfin, le Jurassique supérieur (Malm) comprend des calcaires à patine grise avec des bancs de dolomies et de brèches à ciment rouge, d'une puissance atteignant 300 m.

Une succession de synclinaux et d'anticlinaux, dont les axes sont orientés NE-SO (Got, 1965 ; Gadel, 1966 et Bakalowicz *et al.*, 1997), se chevauchent les uns les autres du SE vers le NO ; ils résultent de l'histoire pyrénéenne. Quatre synclinaux principaux peuvent être distingués, de Salses vers Vingrau : le synclinal de Salses, le synclinal des Fontanilles, le synclinal d'Opoul et le synclinal de Mas Farines à Périllos.



Synthèse cartographique à 1/100 000 du Massif des Corbières

Février 2004

(d'après les cartes à 1/50 000 de Capendu, de Leucate,
de Narbonne, de Perpignan, de Quillan, de Rivesaltes et de Tuchan
à 1/80 000 de Quillan
à 1/100 000 des Formations Cénozoïques du Bassin du Roussillon)
Par B. Aunay, C. Duval, P. Le Strat, G. Clauzon, N. Dörfliger

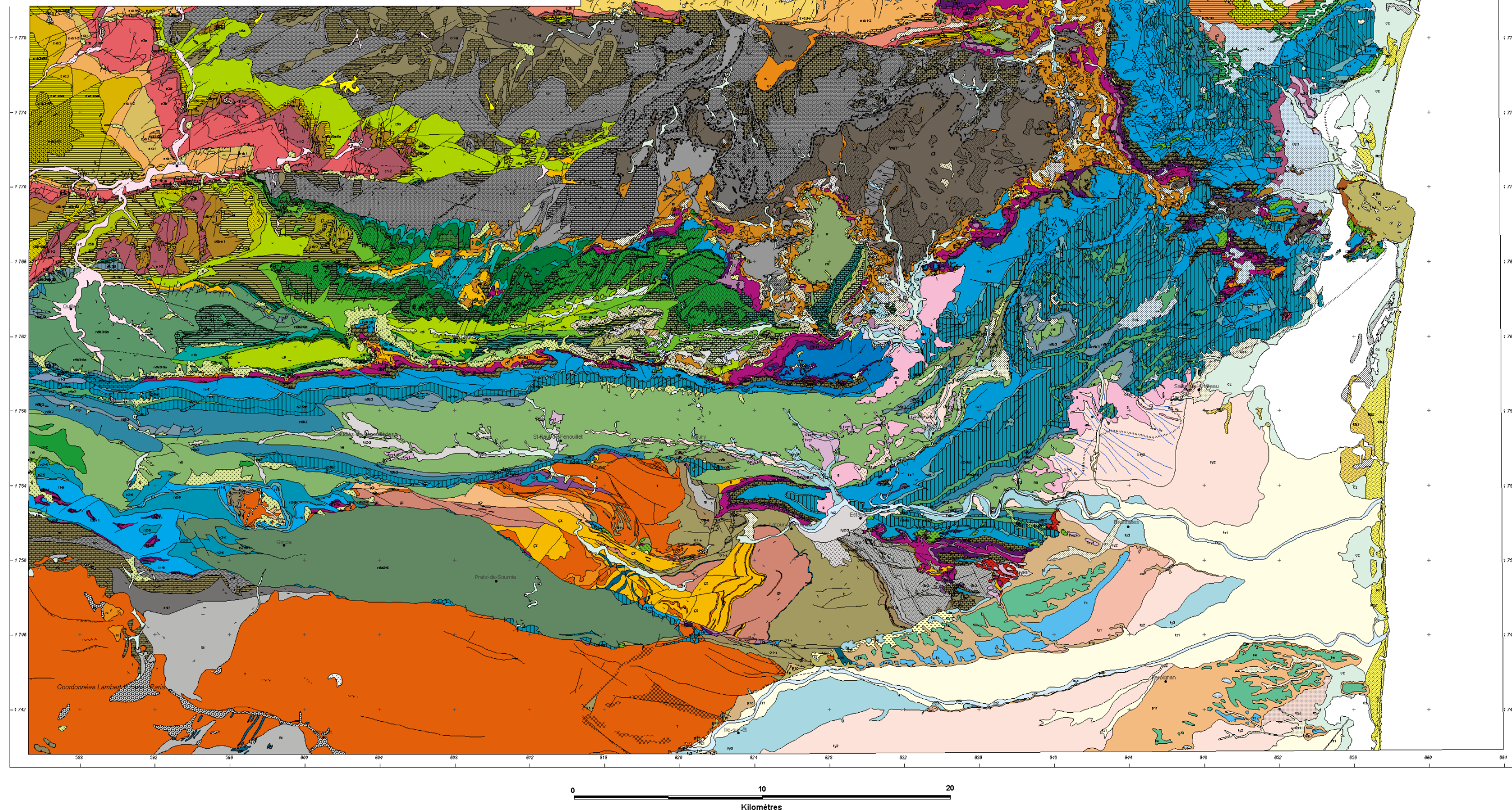
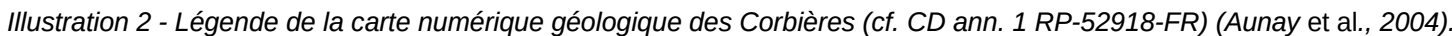


Illustration 1 - Extrait de la synthèse cartographique à 1/100 000 du massif des Corbières (d'après Aunay et al., 2004).



2.1.2. Étude géologique du synclinal du Bas-Agly

Le synclinal du Bas-Agly est un pli important d'axe est-ouest, affecté par des failles. Son flanc nord s'appuie sur le synclinal de Saint-Paul-de-Fenouillet avec un pendage faible, alors que son flanc sud est fortement redressé. À l'est, entre Espira-de-l'Agly et Rivesaltes, les formations mésozoïques sont au contact avec les formations plio-quadernaires du bassin du Roussillon par l'intermédiaire de la faille de Prades.

Parmi les résultats des travaux d'Aunay et Le Strat (2002), dans le cadre de l'analyse de la mise en place et du développement des réseaux karstiques, les éléments suivants peuvent être mis en avant :

- le niveau de base potentiel des écoulements souterrains a pu atteindre - 1 500 m NGF² lors de la crise de salinité messinienne (5,3 Ma) ; dans ces conditions la totalité des empilements calcaires du synclinal du Bas-Agly ($\approx$ 1 000 m) est potentiellement karstifiée ;
- la formation du puits d'une profondeur supérieure à - 164 m NGF, appartenant au réseau karstique noyé de Font Estramar, est attribuée à la crise messinienne ;
- l'Agly n'est pas un fleuve messinien ; lors de la crise de salinité messinienne, les écoulements au sein des calcaires sont donc essentiellement souterrains.

De plus, au vu de la salinité des principaux exutoires de ce système complexe (Font Estramar, Font Dame) et de la variabilité spatiale de celle-ci, appréhendée par méthode hydrochimique (cf § 2.3.), une étude géologique détaillée à l'échelle du synclinal du Bas-Agly est nécessaire afin de proposer des sites d'investigation en vue d'implanter des forages de reconnaissance. Si la ressource semble être importante, il est nécessaire de la capter par forage car elle ne peut être captée aux exutoires en raison de leur salinité élevée.

Ainsi, une étude géologique et structurale détaillée du synclinal du Bas-Agly a été effectuée, à partir de l'interprétation de photos aériennes centrées sur les flancs sud et nord du synclinal, de travaux de terrain et des documents de référence.

Les documents de référence utilisés sont les suivants :

- documents cartographiques :
 - carte IGN (échelle 1/25 000) du secteur étudié,
 - carte géologique (échelle 1/50 000) feuille de Rivesaltes ainsi que son livret guide,
 - photo interprétation réalisée à partir de photos aériennes indiquant des bancs repérables ainsi que des fractures,
 - informations des forages profonds : forages d'ELNE1 et de CANET1 ;

Remarque : Les autres forages consultés à la Banque du Sous-Sol ne sont pas suffisamment profonds : ils ne recoupent pas les niveaux calcaires en profondeur.

² Nivellement Général de France.

- coupes trouvées dans la littérature (ill. 3) :
 - 2 coupes nord-sud réalisées à partir de profils sismiques offshore et à terre, le long de la côte méditerranéenne :
 - interprétation du profil sismique off-shore N323 (Duvail et Le Strat, 2001),
 - interprétation du profil sismique nord-sud du bassin du Roussillon (Duvail, Aunay, Le Strat *et al.*, 2002) ;
 - coupe schématique présentée sur la carte géologique (feuille de Rivesaltes) : présentation d'une structure synclinale pour les séries mésozoïques, synclinal du Bas-Agly ; ce synclinal est respectivement chevauché au sud et chevauchant au nord sur une semelle triasique.

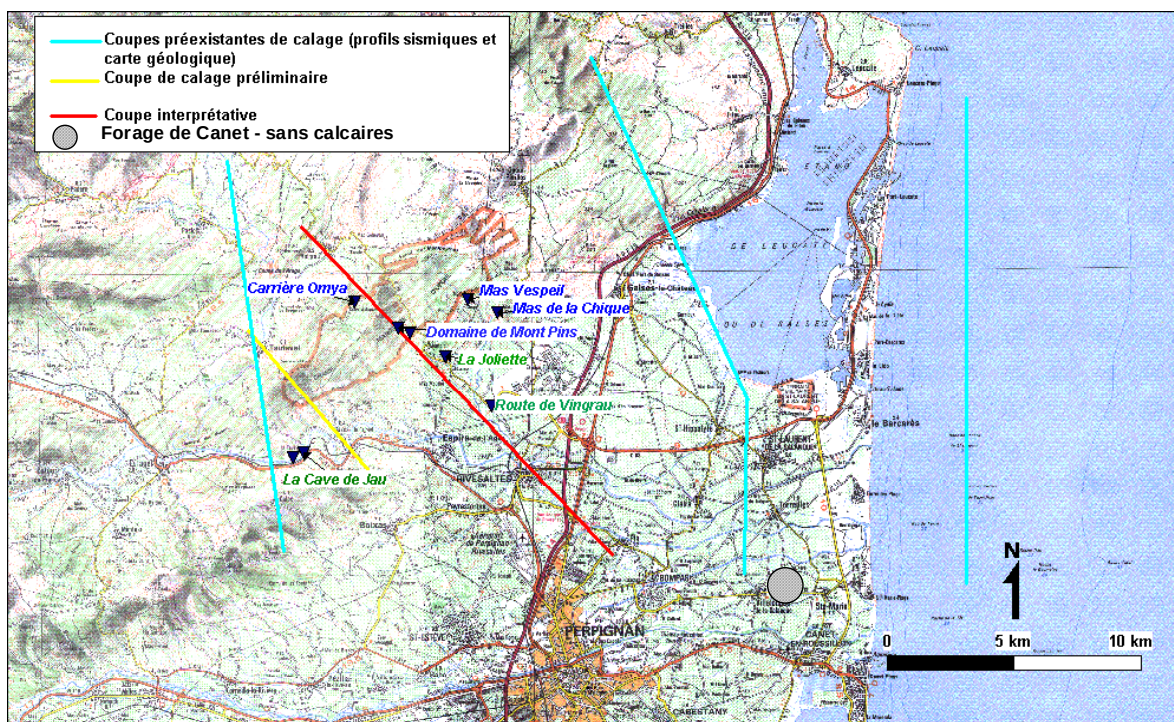


Illustration 3 - Localisation des coupes préexistantes, des profils sismiques et de la coupe interprétative.

À partir de ces données, une coupe interprétative géologique SE-NO a été réalisée, entre Vingrau et Bompas (ill. 4). L'intérêt de cette coupe est lié à la prise en compte des nouvelles observations géologiques et structurales et interprétations récentes sur le secteur.

Le style tectonique de la coupe a été déduit des observations de terrain (failles « en dos de dauphins » relevées à proximité des carrières de Montpins et de Naréda situées sur le flanc nord du synclinal), de l'interprétation des photos aériennes et de l'interprétation des profils sismiques. Le style tectonique du flanc nord du synclinal n'est pas considéré, au niveau de la coupe, comme étant un pli de grande envergure, mais il est de style « cassant tangentiel ».

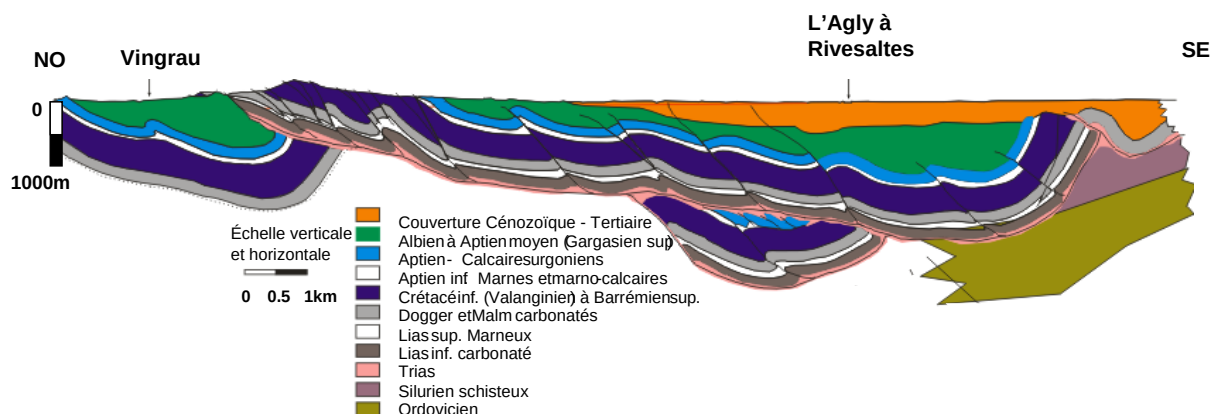


Illustration 4 - Coupe géologique interprétative (cf. localisation ill. 3) entre Vingrau et Bompas au niveau du synclinal du Bas-Agly (Du Couëdic et Le Strat, 2003).

La photo-interprétation permet de distinguer une densité importante de fractures sur les séries mésozoïques calcaires (ill. 5). Les fractures et les bancs relevés en photo aérienne ont été reportés sur les cartes topographiques et géologiques afin de les intégrer dans le dessin de la coupe interprétative. Le « style », déduit de cette portion de structure au niveau du flanc nord, est appliqué au reste de la formation.

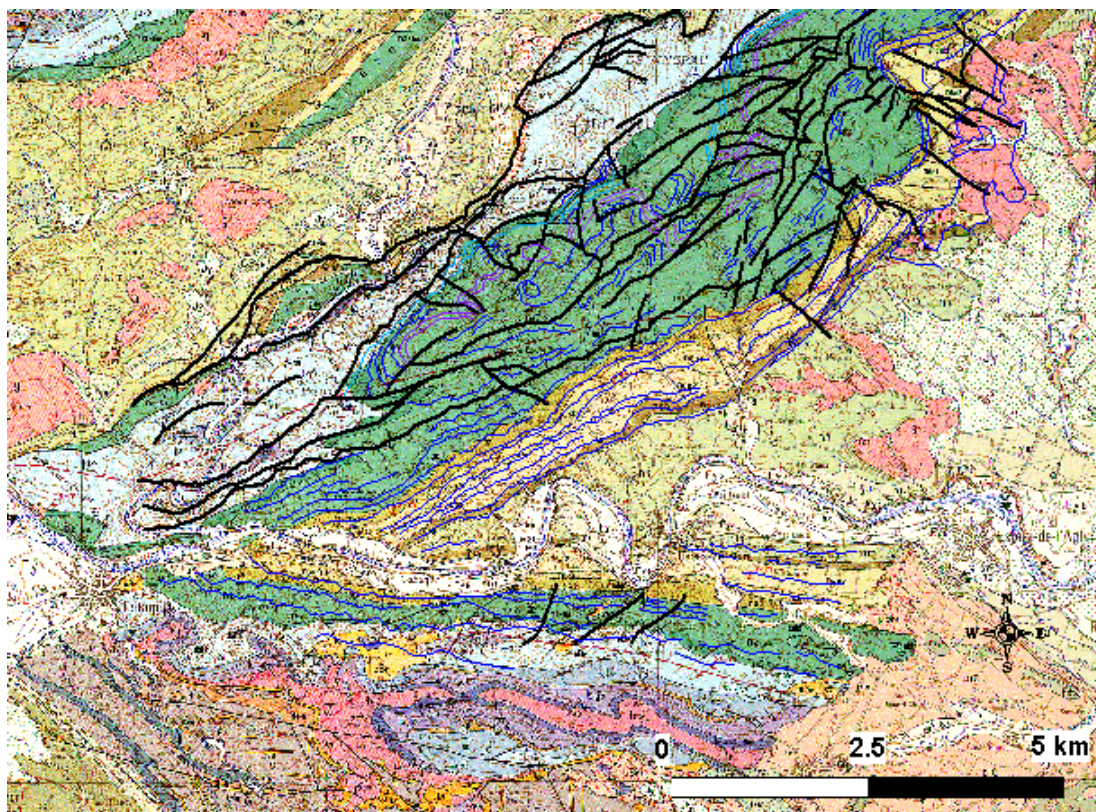


Illustration 5 - Identification des principaux accidents à partir de la photo-interprétation.

Afin de dresser cette coupe interprétative, les épaisseurs des séries indiquées dans la littérature ont été prises en considération dans la mesure du possible. Ces épaisseurs sont indiquées dans le tableau ci-après (ill. 6) :

Âge	Nature	Hydrogéologie	Épaisseur
fin du Crétacé inf.	marnes et marno-calcaires	imperméable	plus de 300 m
Gargasien inf	calcaires urgoniens	karst	150 m
Bédoulien sup	marnes et marno-calcaires	imperméable	120 m
Malm, Dogger et Crétacé basal	calcaires urgoniens, calcaires et dolomies	karst	570 m
Lias sup	marnes et marno-calcaires	imperméable	100 m
Lias inf	calcaires	karst	120 m
Trias	évaporites	<i>problème de potabilité (salinité)</i>	
Silurien	schistes	imperméable	
Ordovicien	schistes	imperméable	

Illustration 6 - Épaisseur des formations représentées sur la coupe de Rivesaltes.

Au niveau de la coupe interprétative, le flanc nord du synclinal du Bas-Agry est caractérisé par les calcaires du Crétacé inférieur à l'affleurement, de faible pendage et affectés par des failles recoupant également les formations sous-jacentes. La série trias-aptien serait marquée par un doublement de série dans la partie centrale du synclinal ; cette interprétation repose sur les indications des profils sismiques en mer.

Aucun forage profond n'atteint les calcaires sous couverture tertiaire et sous les marnes et marno-calcaires du Crétacé inférieur. L'extrémité du flanc sud du synclinal du Bas-Agry n'est pas affleurant (sous couverture tertiaire) ; il est marqué par des séries redressées.

Afin de proposer des sites d'intérêt pour implanter des forages de reconnaissance moyennant ou non des investigations géophysiques complémentaires, l'information concernant les forages existants et leurs caractéristiques hydrogéologiques a été analysée. L'analyse a été conduite par secteur (cf. ill. 7) :

- **Forages au niveau du flanc sud du synclinal du Bas-Agry** : le forage de Cases de Pène (10903X0026) d'une profondeur de 90,5 m, est artésien en périodes de hautes eaux ; il recoupe les formations calcaires du Crétacé inférieur. L'essai de pompage de longue durée a été réalisé en 2001, avec un débit de 300 m³/h. L'interprétation de cet essai a montré que la surface d'alimentation correspond globalement au flanc sud et de plus que ce débit d'exploitation peut être appliqué en tout cas pendant 9 mois sur 12. Par ailleurs, l'étude des tarissements non influencés indique un débit proche de 500 m³/h, 300 m³/h selon Faillat (1972) ; l'influence du soutien du barrage de Caramany à l'alimentation des pertes joue un rôle dans le fonctionnement hydraulique du flanc sud. Le piézomètre au niveau de l'aven de Baixas est situé à l'extrémité affleurante du flanc sud au contact avec les formations du Plio-Quaternaire. Il a une profondeur de 50 m. Ces deux ouvrages ont un comportement hydraulique similaire comme l'atteste le suivi piézométrique en continu. Ce sont les deux ouvrages principaux sur ce flanc du synclinal.

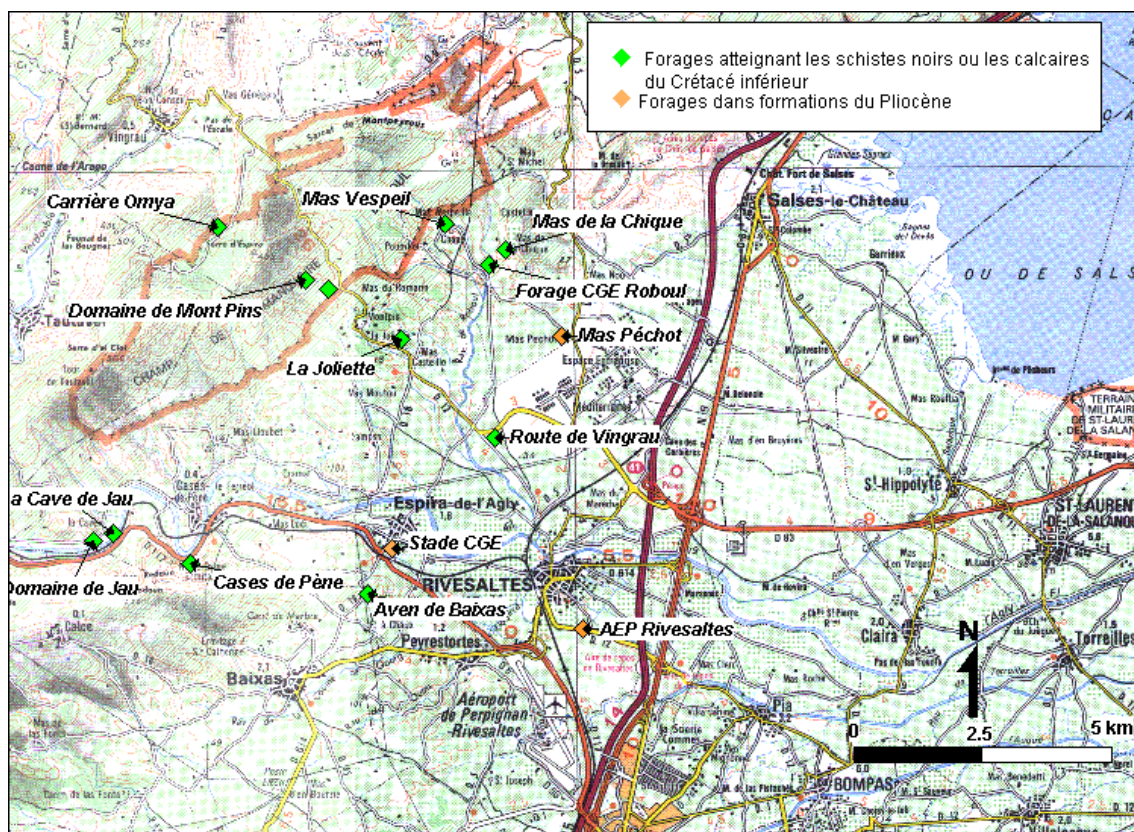


Illustration 7 - Localisation des forages mentionnés.

- **Forages au niveau du flanc nord du synclinal du Bas-Agry** : on dénombre des forages effectués tant pour des particuliers que pour des besoins industriels liés à l'activité de carrière. Le forage de la carrière d'Omya atteint une profondeur de 320 m pour un débit relativement faible inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$; cet ouvrage n'est pas exploité. Trois forages ont été réalisés au domaine de Montpins (carrière provençale) dont un de 240 m profondeur et un autre de 300 m de profondeur dans les calcaires du Valanginien-Bédoulien inférieur (Crétacé inférieur, calcaires en petits et en gros bancs) ; leur débit d'exploitation est inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ($2 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le forage récent de 300 m avec en sus des problèmes de turbidité). De plus, il y a des forages à usage individuel dont les débits d'exploitation sont inférieurs au m^3/h . Ces forages ont des profondeurs globalement de 120 à 200 m : forage du Mas de la Chique (10904X0001) (147,2 m) (dès 74 m Aptien moyen, dès 110 m Urgo Aptien dolomie), ancien forage CGE au bord du Roboul (170 m), forage de Mas Vespeil (10904X0065) (134 m), forage de Mas La Joliette (205 m dans les schistes noirs durs -Albien métamorphique- 10904X0006). Le forage de la route de Vingrau (10904X0005) a une profondeur de 53,8 m et atteint dans le dernier mètre les formations albiennes ; il est situé essentiellement dans le Pliocène et capte le Pliocène. Un essai de pompage avec un débit de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ a été réalisé (Gadel, 1970).
- **Forages au niveau du Pliocène** : l'épaisseur totale du Pliocène (BRGM/RP-51197-FR, 2001) varie, comme on peut le voir, également sur la coupe interprétative de

moins de 100 m sur la partie NO à proximité de la surface d'érosion messinienne jusqu'à 300-400 m dans le secteur de Bompas, voire plus au SE (700-800 m). Les forages profonds sont les deux forages pétroliers au niveau du bassin du Roussillon qui ne recoupent pas les formations mésozoïques mais le socle, soit les forages d'ELNE1 et de CANET1. Le forage de reconnaissance pour l'AEP de Rivesaltes, forage F2 (10911X0024), artésien, est un forage de 152,8 m de profondeur, interceptant de haut en bas les formations suivantes : Pliocène jusqu'à -90 m (gravier sable, alternance de niveaux argileux et sableux (gris, jaunes) et de niveaux plus ou moins graveleux) ; d'argiles, et de sable fossilifère noir (- 90 à - 129 m) et dès - 129 jusqu'à - 152,8 m, brèches sédimentaires, dolomie, calcaire, marbres de l'Urgo-Aptien. À noter que ce forage n'intercepte pas directement les calcaires.

Les forages dans le Pliocène ont des profondeurs variables, 50 à 150 m globalement pour des débits d'exploitation atteignant 75 m³/h (exemples : forage de Mas Péchot (10904X0022) avec 73 m de profondeur, un débit de 15-20 m³/h ; forage CGE à Espira de l'Agly (10904X0099) de 135 m de profondeur avec un débit de 75 m³/h.

À partir des informations relatives à ces forages, le flanc nord ne semble pas présenter un grand intérêt du point de vue de l'exploitation de la ressource, si l'on ne cible pas les calcaires du Crétacé inférieur dans leur totalité, voire les calcaires sous-jacents du Malm et Dogger (ill. 8, secteur 1). D'autre part, en supposant l'existence de circulations profondes et d'axe de drainage au niveau des grands accidents tels que la faille de Prades, cela nécessiterait de réaliser des forages de plus de 500 m de profondeur, le Pliocène pouvant atteindre des épaisseurs de 200 à 300 m.

Au vu des conditions d'artésianisme rencontrées au forage de reconnaissance F2 AEP de Rivesaltes, s'il y a contact entre les deux aquifères, cela peut être dans le secteur d'accidents majeurs. Certaines de ces failles sont supposées à partir des interprétations des profils sismiques et de la réalisation de cartes d'isohypses-isobathes pour les formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon ; leur tracé devrait être précisé à l'aide d'investigation géophysique.

Enfin, au vu des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'exploitation de la ressource au niveau du flanc sud du synclinal (forage de Sainte-Colombe à Cases de Pène), le secteur de la prolongation du flanc sud du synclinal au SE de Rivesaltes constituerait également une cible pour implanter un autre forage de reconnaissance (secteur 2, ill. 8).

Cependant, au vu de la réaction hydraulique concomitante du forage de Cases de Pène et du piézomètre de l'aven de Baixas, ce forage capterait très vraisemblablement le même réservoir que Cases de Pène (vol. 3, BRGM/RP-52920-FR). Trois secteurs pourront faire l'objet de prospection par forage de reconnaissance avec investigation géophysique complémentaire ou non, selon suggestion du comité technique (annexe réponse de septembre 2003). Ces réalisations prendront place au début de la phase 2 du projet.

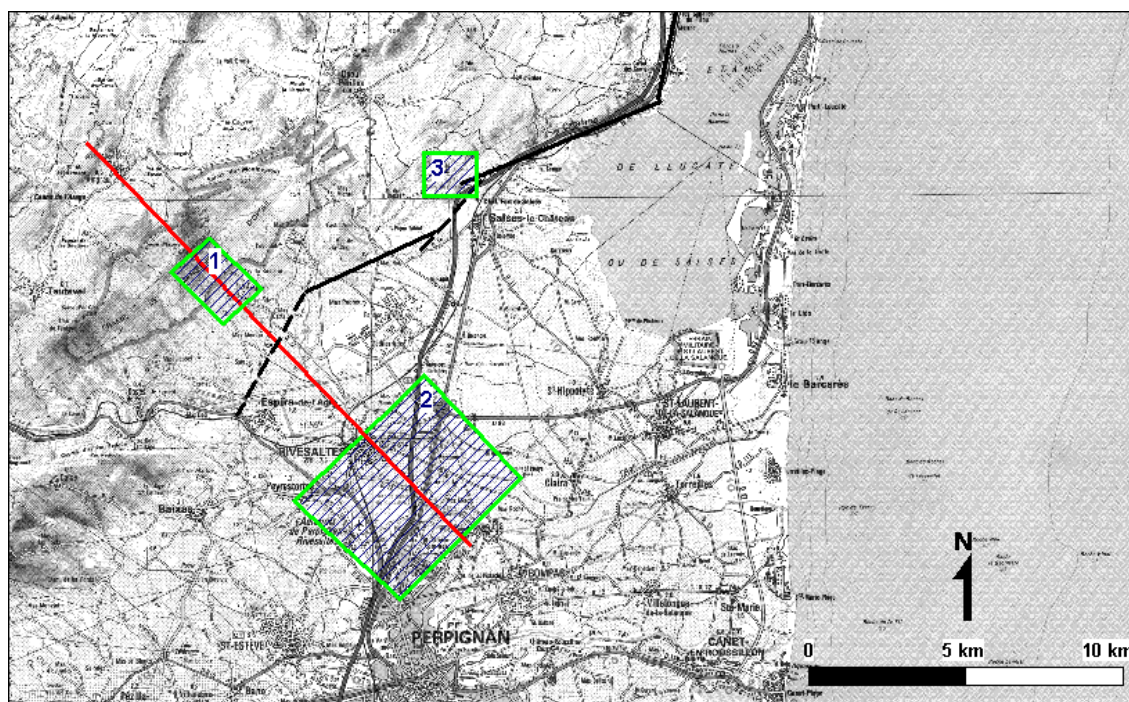


Illustration 8 - Localisation des trois secteurs de prospection pour implantation de forages de reconnaissance au niveau du synclinal du Bas-Agly.

2.1.3. Identification des plans de drainage selon la méthode Eraso

Le principe de la méthode proposée par Eraso (1985) est d'identifier les plans en distension qui permettent selon son postulat un écoulement ; elle nécessite de déterminer l'ellipsoïde des déformations de l'aquifère, à partir d'observations et de mesures effectuées sur le terrain prenant en compte la nature et l'orientation des fractures et des microfractures. Les failles (sans prise en compte de la chronologie des jeux successifs des failles, en ne considérant que l'ellipsoïde des déformations et non des contraintes), les stylolithes (illustrations de compression perpendiculaires à la composante majeure de l'ellipsoïde des déformations) et les veines (témoin d'une tectonique de distension, leur plan est orienté perpendiculairement à la composante mineure de l'ellipsoïde de déformation) ont été relevés à l'affleurement.

Huit sites ont été analysés par A. Duriez (2002) : au nord, sites du plat de Crouzal (route D227 près de Feuillat) et le château d'Opoul-Périllos, à l'est, au niveau de la résurgence de Font Estramar et au lieu-dit « Dessus des Moulins » à 500 m au NW de la source de Font Dame, au sud, au niveau de l'ancienne carrière à proximité du Mas San Miquel (route D5), ainsi qu'au forage de Cases de Pène, et à l'ouest, à Planal de la Caune de l'Arago et sur le flanc sud-ouest du mont d'Estagel (route D117 près d'Estagel). 317 données sont traitées pour le calcul de l'ellipsoïde des déformations. L'histogramme des plans de drainage (ill. 9) montre que, si les plans de drainage s'orientent selon toutes les directions, deux directions prépondérantes ressortent : (i) N45°-N75° et (ii) N105°-N135°. De plus, la représentation des plans selon un diagramme de Wülf (ill. 10), avec la majorité des pôles situés sur la périphérie du

diagramme, indique que les plans se développent de manière prépondérante de manière verticale à subverticale. Cependant, il existe également des plans présentant un pendage beaucoup plus faible, compris entre 10 et 30°. L'inventaire des phénomènes karstiques réalisé notamment par Salvayre (1977) est caractérisé par des cavités explorées verticales, à l'exception du réseau noyé de Font Estramar.

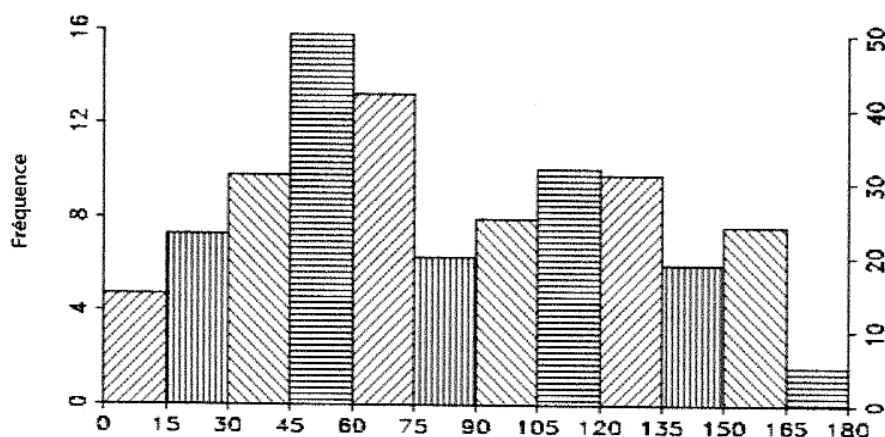


Illustration 9 - Histogramme des directions des plans de drainage (Duriez, 2002) (357 données exprimées au total, représentation selon l'azimut des plans en degré au niveau de l'abscisse).

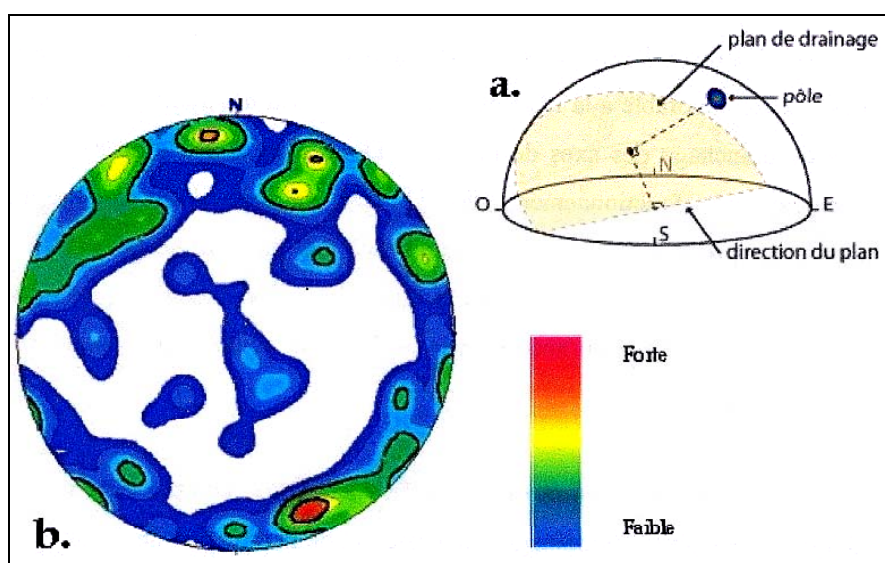


Illustration 10 - (a) Représentation du mode de lecture du diagramme de Wülf, (b) représentation polaire des plans de drainage du massif de Périllos (Duriez, 2002).

En conclusion, les plans de drainage se répartissent de manière assez homogène sur l'ensemble des directions. Deux directions dominent, avec des pendages forts, principalement verticaux à subverticaux. Duriez (2002) conclut à l'existence, dans le cas d'un système bien karstifié, d'un réseau de drains de type anastomosé, comme en témoigne le réseau noyé de Font Estramar, affecté néanmoins de déformations selon

deux directions dominantes : N45°-N75° et N105°-N135°. Ces deux directions sont cohérentes avec le schéma structural régional de la zone d'étude, la faille de Prades étant N40° et la faille nord-pyrénéenne N90°. De plus, les directions d'écoulement mises en évidence par essais de traçage suivent principalement ces deux directions également (Salvayre, 1974), soit WNW-ESE pour les essais de coloration des pertes du Verdoube et de l'Agly (non confirmé), et WNW-EES pour les connexions hydrauliques entre le Roboul ou l'aven des Amandiers et les exutoires de Font Estramar et Font Dame.

2.1.4. Géologie et ressource en eau potentielle dans le karst

En résumé, le système karstique du « synclinal du Bas-Agly et Corbières d'Opoul » est un système complexe du point de vue de l'architecture géologique. La position du niveau de base lors de la crise messinienne qui aurait atteint - 1 500 m NGF, a potentiellement permis une karstification de l'ensemble de la pile sédimentaire, soit plus de 1 000 m d'épaisseur. Ces séries sont affleurantes sur les flancs nord et sud du synclinal, et affectées d'une tectonique cassante. Le synclinal est dissymétrique avec un faible pendage au nord et des pendages très forts au sud (flanc redressé). Un doublement de série est probable au centre du synclinal, sous couverture mésozoïque et cénozoïque. Les plans de drainage se développent *a priori* selon toutes les directions, laissant penser à l'existence d'un réseau de drainage de type anastomosé, néanmoins avec deux directions prédominantes N45°-75° et N105°-135. Ces deux directions correspondent globalement aux deux directions d'écoulement souterrain mis en évidence par essai de traçage.

Les secteurs proposés pour des investigations complémentaires et pour l'implantation de forages de reconnaissance sont globalement situés selon les axes de drainage présumés vers les exutoires principaux et/ou vers le Plio-Quaternaire. Le drainage entre ces deux aquifères peut être réalisé à la faveur d'accidents tectoniques mettant en connexion les deux aquifères. Des incertitudes existent quant à l'interprétation de la coupe transverse au niveau du synclinal du Bas-Agly ; elles pourront être levées avec les résultats des investigations complémentaires et forages (géophysique de type sismique et panneau électrique).

2.2. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE

2.2.1. Détermination du bilan hydrologique

a) Données bibliographiques et antérieures

Un essai de délimitation du bassin versant souterrain du système de Font Estramar et Font Dame a été proposé par Llana Alonso (1995). Les limites proposées ont été basées sur les données géologiques et stratigraphiques de la région, et sur les traçages réalisés par Salvayre (1969) (ill. 11). Dans ses conclusions, Llana Alonso (1995) remarquait que « la surface totale de ce bassin d'environ 170 km², ne correspond pas avec un exutoire à débit moyen autour de 3 m³/s. D'après le bilan hydrique calculé, le débit de Font Estramar (et Font Dame) correspondrait à un bassin d'alimentation de 200 à 300 km² ».

Depuis cet essai de délimitation, les études menées dans le cadre du projet « Corbières » ont permis d'affiner la délimitation du système karstique. Les résultats des traçages de Salvayre (1969) aux pertes du Verdoubert ont été confirmés par les traçages effectués en 2001 (sous-phase « Caractérisation provisoire des systèmes en terme de transfert », BRGM/RP-52211-FR). Une restitution faible mais significative du traceur (fluorescéine) a été retrouvée aux sources de Font Estramar, Font Dame et du château de Salses. Un traçage a été également effectué dans les pertes de l'Agly (sulforhodamine) ; les résultats en terme de restitution aux sources de Font Dame et de Font Estramar ne sont pas significatifs. La connexion hydraulique n'est pas prouvée, mais reste supposée comme vraisemblable.

L'interprétation de l'essai de pompage à Cases de Pène en 2001 a conclu que le système de Cases de Pène est caractérisé par un grand volume et une grande transmissivité (BRGM/RP-51394-FR). L'aven de Baixas appartient au même système hydraulique et ses variations de niveau sont similaires à celles du forage de Cases de Pène. Le piézomètre 104, situé à 14 km à vol d'oiseau de Cases de Pène (et de l'autre côté du synclinal), apparaît également influencé par la sollicitation de l'aquifère lors du pompage (Petit *et al.*, 2002).

b) Bilan hydrologique et délimitation du bassin d'alimentation

L'étude des bilans hydrologiques repose sur l'analyse de la cohérence qui existe entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire d'un système ; elle permet de caractériser globalement les limites de l'impluvium du système. La méthodologie est exposée en détail dans le volume 1 (BRGM/RP-52918-FR).

Les calculs de bilans hydrologiques ont été réalisés pour la période du 1^{er} octobre 1998 au 30 septembre 2003, soit pour cinq cycles hydrologiques. Les volumes écoulés aux exutoires de Font Dame et Font Estramar sont les suivants :

- 128,5 millions de m³ pour la source de Font Dame (débit moyen = 783 l/s, mini = 393 l/s, maxi = 6 467 l/s, médiane = 749 l/s) ;
- 292,3 millions de m³ pour la source de Font Estramar (débit moyen = 1 781 l/s, mini = 768 l/s, maxi = 25 285 l/s, médiane = 1 343 l/s).

Pour l'ensemble de système karstique, le volume écoulé est de **420,9 millions de m³** (Font Dame + Font Estramar) pour la période du 01/10/1998 au 30/09/2003 (débit moyen = 2 565 l/s, mini = 1 276 l/s, maxi = 31 337 l/s, médiane = 2 039 l/s).

Les lames d'eau précipitées sur le bassin d'alimentation en considérant les stations pluviométriques de Périllos (410 m NGF), de Tautavel (200 m NGF) et de Fitou (littoral, 1 m NGF) sont respectivement de 4 591, 2 906 et 3 537 mm pour la période considérée (cinq cycles hydrologiques, cf. ill. 12).

Sur la période du 01/10/1998 au 30/09/2003, les pluies efficaces moyennes, calculées à l'aide des données d'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) de la station Météo France de Perpignan (eq. 1, vol. 1 BRGM/RP-52918-FR), sont comprises entre 212 et 354 mm (ill. 12).

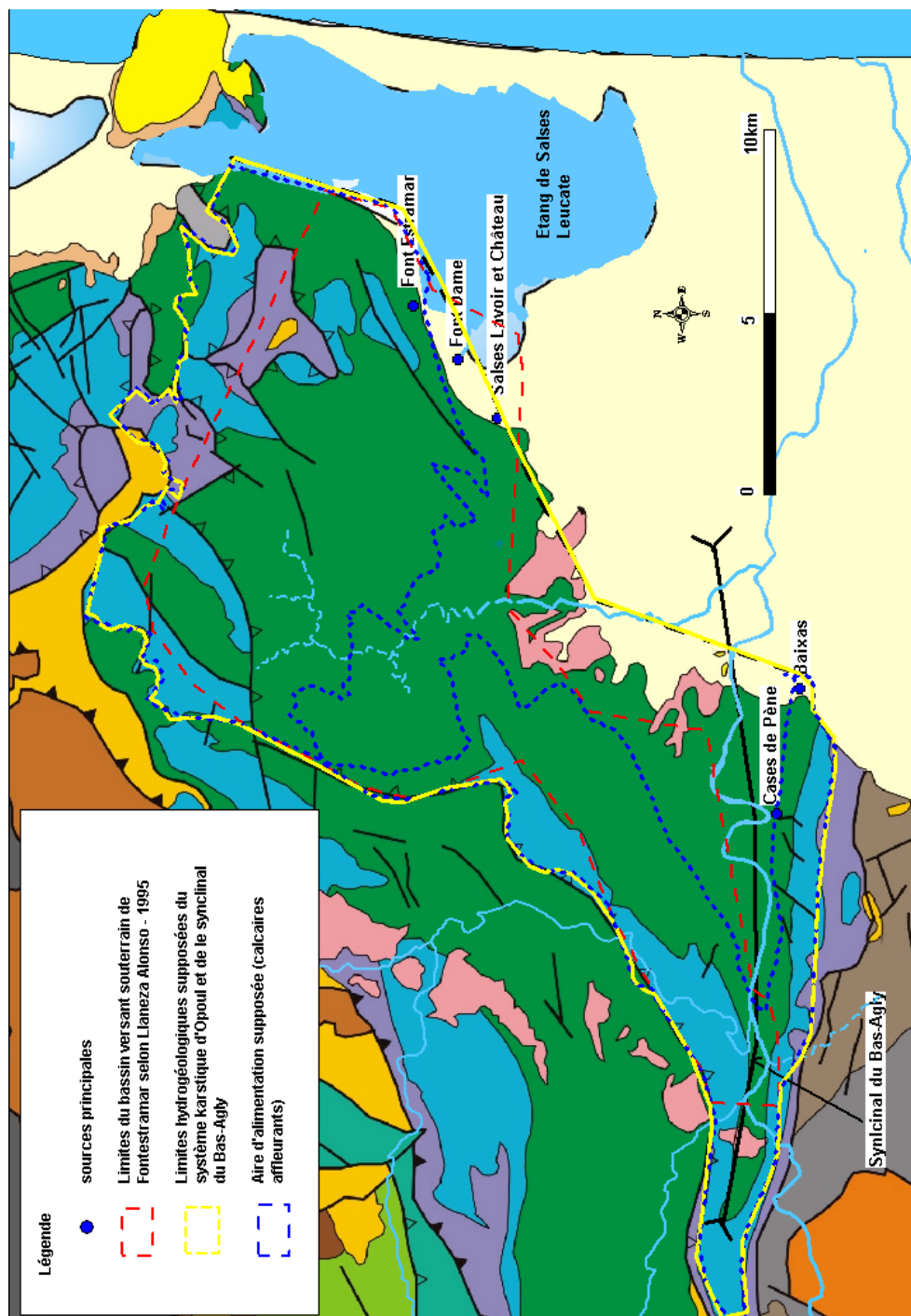


Illustration 11 - Limites supposées de l'impluvium des calcaires affleurants du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.

Station pluviométrique	Cumul de précipitation (mm) 1998-2003	Précipitation moyenne inter-annuelle (mm)	Pluie efficace moyenne (mm)	Surface bassin ³ d'alimentation (km ²)
Périllos	4 591	918	354	237
Tautavel	2 906	581	212	397
Fitou	3 537	707	216	253

Illustration 12 - Estimation de la surface du bassin d'alimentation à l'aide des données d'ETP de la station Météo France de Perpignan.

L'estimation de la pluie efficace à l'aide de l'ETP au lieu de l'ETR (qui n'est pas connue dans le secteur d'étude) peut conduire à sous-estimer les pluies efficaces dans la mesure où l'ETR est généralement inférieure à l'ETP. Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation est comprise entre 237 et 397 km².

L'estimation de l'ETR demeure le problème de base de la méthode précédente en raison des problèmes liés à la détermination des paramètres climatiques sur la zone d'étude. C'est pour cette raison que l'on procède généralement aux calculs du déficit d'écoulement à l'aide de la formulation de Turc afin de mieux contraindre l'estimation des surfaces des bassins d'alimentation. Le déficit d'écoulement moyen calculé (éq. 3, volume 1 BRGM/RP-52918-FR) est compris entre 483 et 585 mm, ce qui représente une lame d'eau moyenne infiltrée comprise entre 98 et 149 mm (ill. 13). Selon ces données, la superficie du bassin d'alimentation comprise entre 253 et 861 km². L'estimation de la surface du bassin d'alimentation par la méthode de Turc n'apparaît pas satisfaisante compte tenu des écarts observés. La formulation de Turc n'est pas en mesure de prendre en compte la spécificité du climat de la zone d'étude (prise en compte des effets du vent, Tramontane).

Station pluviométrique	Température moyenne annuelle (°C) *	Déficit moyen inter-annuelle (mm) 1998-2002	Lame d'eau moyenne infiltrée (mm)	Surface bassin d'alimentation (km ²)
Périllos	13	585	332	253
Tautavel	14	483	98	861
Fitou	15	559	149	566

* estimation à partir des données de la répartition moyenne des isothermes (Bertrand, 1974).

Illustration 13 - Estimation de la surface du bassin d'alimentation à l'aide du déficit d'écoulement (calculé par la formulation de Turc).

L'estimation de la surface du bassin d'alimentation à l'aide des bilans hydrologiques n'apparaît pas complètement satisfaisante. Les estimations dénotent que la surface du bassin d'alimentation est supérieure à 240 km². Les surfaces minimales obtenues sont très supérieures à la superficie des calcaires affleurants au niveau de l'impluvium, soit 166 km² (Thomson, 2002). Cette comparaison indique qu'une grande part des

³ Surface du bassin d'alimentation estimée sur la base du volume d'eau écoulé pour l'ensemble du système karstique (Font Dame + Font Estramar) : 420,9 millions de m³ (du 01/10/1998 au 30/09/2003, cinq cycles hydrologiques).

écoulements de ce système karstique binaire provient de l'alimentation par les pertes qui se produisent sur l'Agly et le Verdoube.

La détermination de la superficie d'un bassin d'alimentation est limitée, par l'incertitude sur la détermination de la pluie efficace. De plus ce bilan sommaire est calculé à l'aide des volumes des deux principaux exutoires (la source de Font Estramar et de Font Dame) et ne prend pas en considération les flux au contact des deux aquifères, karst et poreux du Plio-Quaternaire. En considérant des débits de fuite 400 l/s (max) [12 614 400 m³] et des débits d'autres sources temporaires (Fort de Salses : 20 l/s, soit 630 720 m³ par an ; Fitou et Malpas : 15 l/s, soit 473 400 m³), la superficie du bassin d'alimentation apparaît nécessairement supérieure à 240 km².

Les limites de l'impluvium des calcaires affleurants (166 km²) pour le système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly sont présentées à l'illustration 11 :

- au nord-est, les fenêtres tectoniques sur le Trias ;
- au nord et nord-ouest, la limite a été établie sur le contact des calcaires avec le Lias marneux ;
- à l'ouest, les calcaires qui affleurent autour de Paziols semblent bien isolés hydrauliquement par des failles qui les mettent en contact avec les marnes aptiennes. Nous considérons pour cette étude que le front de chevauchement de Vingrau constitue une limite entre le massif d'Opoul et le massif du Pech de Genièvre au nord de Vingrau.
- au sud, le flanc sud du synclinal du Bas-Agly est en contact avec les marnes du Lias ;
- au sud-est, le karst s'enfonce sous les matériaux plio-quaternaires du bassin du Roussillon ; la formation carbonatée est cisailée et abaissée par la faille de Prades (faille normale). Il y a vraisemblablement une continuité hydraulique entre le massif calcaire karstique et l'aquifère multicouche du Roussillon, mais peu d'informations sont disponibles sur des transferts éventuels entre les deux systèmes et la géométrie du secteur est mal connue (cf § 2.5.1.). Des calculs estimatifs à partir de simulations hydrauliques sur un cas théorique pour apprécier les flux entre deux formations de perméabilité contrastée, karst et plio-quaternaire et affectée pour le karst par des drains (nombre et taille variable) sont mises en œuvre ; les secteurs d'échange entre les deux aquifères sont déterminés considérant la géologie et également les résultats de la campagne spatiale de caractérisation hydrogéochimique (cf § 2.5.2.).

Néanmoins, il est considéré que le jeu de la faille a entraîné un contact entre les calcaires karstifiés mésozoïques, et l'aquifère multicouche pliocène dans le bassin du Roussillon (ill. 14). Plusieurs auteurs ont indiqué la présence d'une continuité hydraulique entre le massif calcaire karstifié et l'aquifère multicouche du Roussillon (Gadel, 1966 ; Chabart, 1996 et Duriez, 2002). L'aquifère multicouche du Roussillon a été simulé par une modélisation distribuée (Chabart, 1996). Le modèle a été calé à partir des données piézométriques qui démontrent un apport du nord-ouest (massif calcaire karstifié - cf. ill. 5). Le débit provenant du massif calcaire sur la bordure du modèle a été simulé par des mailles de potentiel imposé. Il a été quantifié pour plusieurs scénarios (90 l/s en régime permanent, 50 l/s en transitoire en période de

basses eaux et 160 l/s en transitoire en période de hautes eaux) (Chabart, 1996). On constate que ces débits sont très faibles par rapport à ceux des exutoires karstiques.

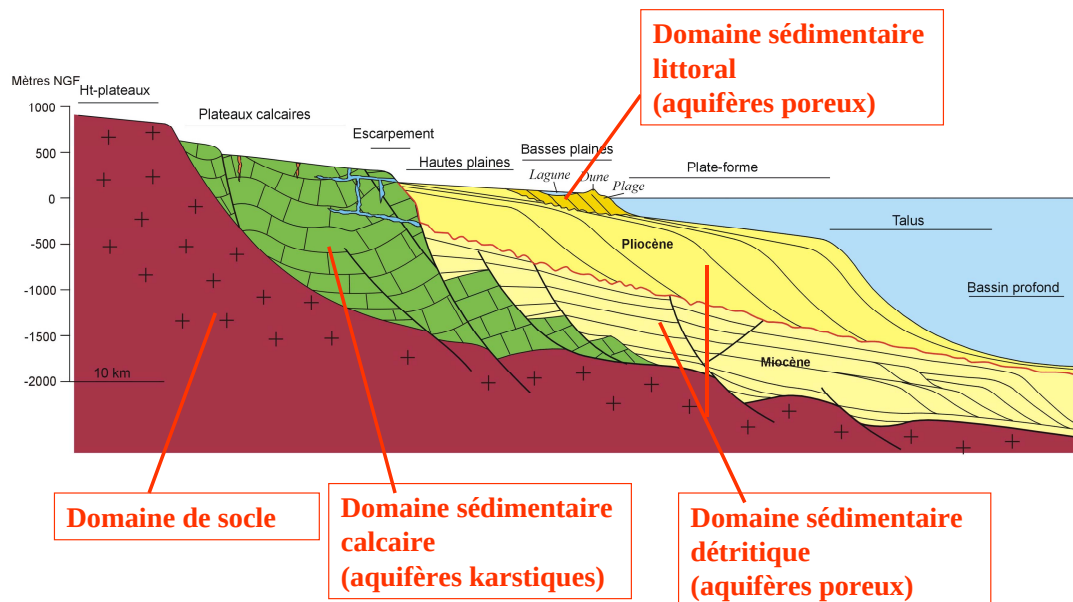


Illustration 14 - Coupe schématique des principales formations géologiques régionales du secteur d'étude (d'après Duvail C., 2003).

2.2.2. Analyse des débits classés

Cette méthode a pour objectif de caractériser les régimes d'écoulement observables sur un exutoire. Ces variations sont mises en évidence à partir de l'ajustement d'une loi statistique liant des classes de débit à leurs fréquences d'apparition.

Nous avons, dans un premier temps, cherché à caractériser le comportement hydraulique des deux principaux exutoires de trop-plein du système karstique (sources de Font Dame et Font Estramar) en les étudiant séparément, afin de mettre en évidence des différences éventuelles de comportement. Dans un second temps, nous avons considéré le système dans sa globalité en étudiant les débits cumulés de Font Dame et Font Estramar sur la période commune (1998-2003). Les résultats ont été comparés à ceux obtenus au niveau du piézomètre 104 (n° BSS 10795X0030), afin de mieux contraindre les informations obtenues sur le fonctionnement du système.

a) Source de Font Estramar

La chronique des débits journaliers analysée s'étend sur la période 1971-2003, soit compte tenu des lacunes, sur un total de 10 625 mesures. En raison des lacunes (1982-1984 et 1996-1997), trois périodes distinctes ont été étudiées :

- chronique 1 : 1971-1982 (4 038 valeurs) ;
- chronique 2 : 1984-1996 (4 197 valeurs) ;
- chronique 3 : 1997-2003 (2 900 valeurs).

Pour les périodes considérées, les débits journaliers moyens, minimum et maximum mesurés sont respectivement :

- chronique 1 : 1971-1982 ($Q_{\text{moy}} = 1\,787 \text{ l/s}$, $Q_{\text{min}} = 700 \text{ l/s}$, $Q_{\text{maxi}} = 30\,000 \text{ l/s}$) ;
- chronique 2 : 1984-1996 ($Q_{\text{moy}} = 2\,201 \text{ l/s}$, $Q_{\text{min}} = 640 \text{ l/s}$, $Q_{\text{maxi}} = 34\,500 \text{ l/s}$) ;
- chronique 3 : 1997-2003 ($Q_{\text{moy}} = 1\,878 \text{ l/s}$, $Q_{\text{min}} = 768 \text{ l/s}$, $Q_{\text{maxi}} = 33\,300 \text{ l/s}$).

Pour l'ensemble des chroniques, le débit moyen inter-annuel est de l'ordre de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Compte tenu des observations disponibles, les valeurs extrêmes et moyennes du débit de la source de Font Estramar ne semblent pas avoir été modifiées depuis la mise en eau du barrage de l'Agly (1996).

L'analyse des débits classés de la source de Font Estramar a été réalisée avec un intervalle de classe de 250 l/s . Cette analyse a pour objectif d'identifier les différents régimes d'écoulement observables sur un exutoire (mise en réserve, fuites vers un autre système, mise en fonctionnement de trop-plein, etc.) qui se produisent généralement de manière répétitive pour des valeurs particulières de débit. L'analyse a été menée à la fois sur les trois chroniques individualisées (chroniques 1, 2 et 3) et pour l'ensemble des données disponibles.

Les ajustements réalisés pour l'ensemble de la chronique sont présentés à l'illustration 15. Deux ruptures ont été identifiées pour des valeurs de débit comprises entre $1\,500$ et $2\,000 \text{ l/s}$ (1^{re} rupture) et pour des débits proches de $9\,000 \text{ l/s}$ (2^e rupture). Les traitements réalisés sur les chroniques individualisées (chroniques 1, 2 et 3) permettent également de mettre en évidence ces ruptures de pente pour des valeurs de débit comparables (illustrations non présentées).

La première rupture se produit en contexte de moyennes et/ou de basses eaux (débit compris entre $1\,500$ et $2\,000 \text{ l/s}$) pour une fréquence cumulée de 75% . La seconde rupture (débit proche de $9\,000 \text{ l/s}$) se produit, pour une fréquence cumulée proche de 96% en contexte de forte crue.

En moyennes et basses eaux, on montre que la pente α_2 est inférieure à α_1 . En période de très forte crue ($Q > 9\,000 \text{ l/s}$), on observe que la pente de la droite α_3 est supérieure à α_2 . Les caractéristiques de la distribution permettent de mettre en évidence les points suivants (Magnin, 1971 ; Marsaud, 1996) :

- Lorsque le débit excède $2\,000 \text{ l/s}$, les propriétés hydrauliques du système changent, le système évacue plus facilement les eaux. Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (alimentation plus importante par les pertes). Les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées et peuvent également traduire une diminution de la capacité de stockage du milieu. Pour les débits inférieurs à $2\,000 \text{ l/s}$, le comportement du système est plus inertiel et traduit globalement la vidange des réserves.

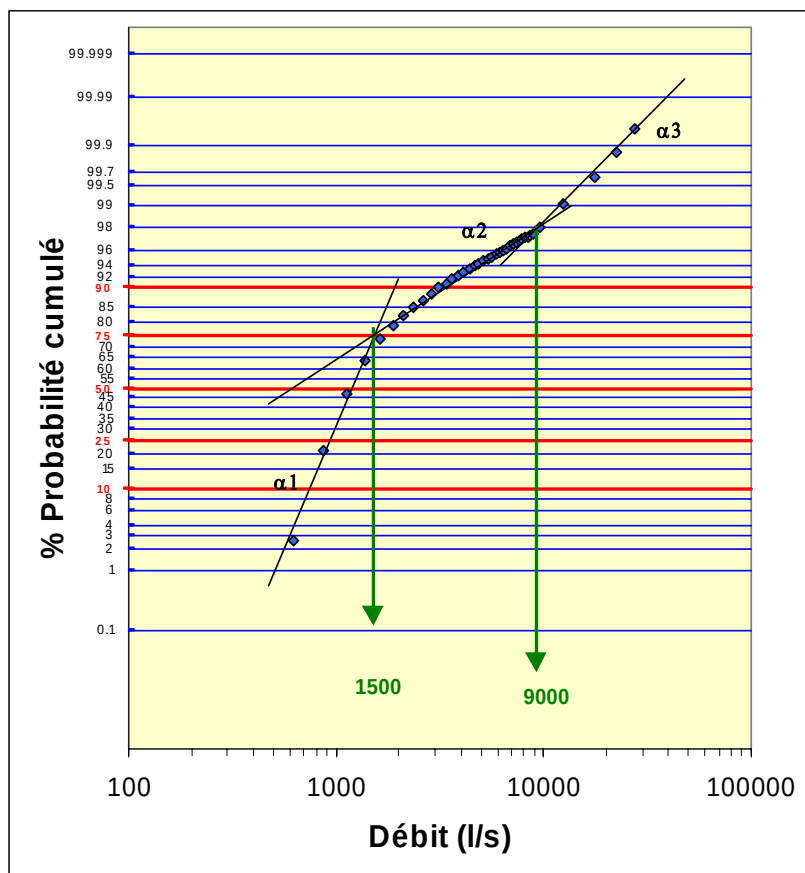


Illustration 15 - Débits classés de la source de Font Estramar sur l'ensemble des données de la période 1971-2003 (classes de débit de 250 l/s).

- Lorsque le débit excède 9 000 l/s, les propriétés hydrauliques du milieu changent de nouveau (changement de la pente), le système évacue moins facilement les eaux. Ce comportement peut traduire un problème dans la courbe de tarage pour les débits très élevés (débits sous-estimés) ou la mise en fonction de trop-plein correspondant à des cavités à proximité de l'exutoire (une part des débits de crue échappe à la station de jaugeage). Cette dernière hypothèse est vraisemblable, puisque de nombreuses résurgences temporaires ont été observées le long de la voie ferrée en période de crue. Ces observations de terrain ont été mises à profit pour implanter le réseau de piézomètres de la DDAF 66 dans les années 1970 (Bénech, comm. personnelle).

Les traitements réalisés sur les chroniques individualisées (chroniques 1, 2 et 3) mettent également en évidence ces ruptures de pente pour des valeurs de débit comparable (illustrations non présentées).

b) Source de Font Dame

La chronique des débits journaliers analysée s'étend sur la période 1998-2003, soit sur un total de 2 133 mesures. Les débits de la source de Font Dame ont été calculés à

partir de la courbe de tarage établie à l'aide de la chronique de hauteur d'eau du piézomètre 102 (cf. vol. 1 - BRGM/RP-52918-FR).

Pour la période considérée, les débits journaliers moyens, minimum et maximum sont respectivement de 778, 383 et 6 467 l/s.

L'analyse des débits classés de la source de Font Dame a été réalisée avec un intervalle de classe de 100 l/s. Les ajustements réalisés sont présentés à l'illustration 16.

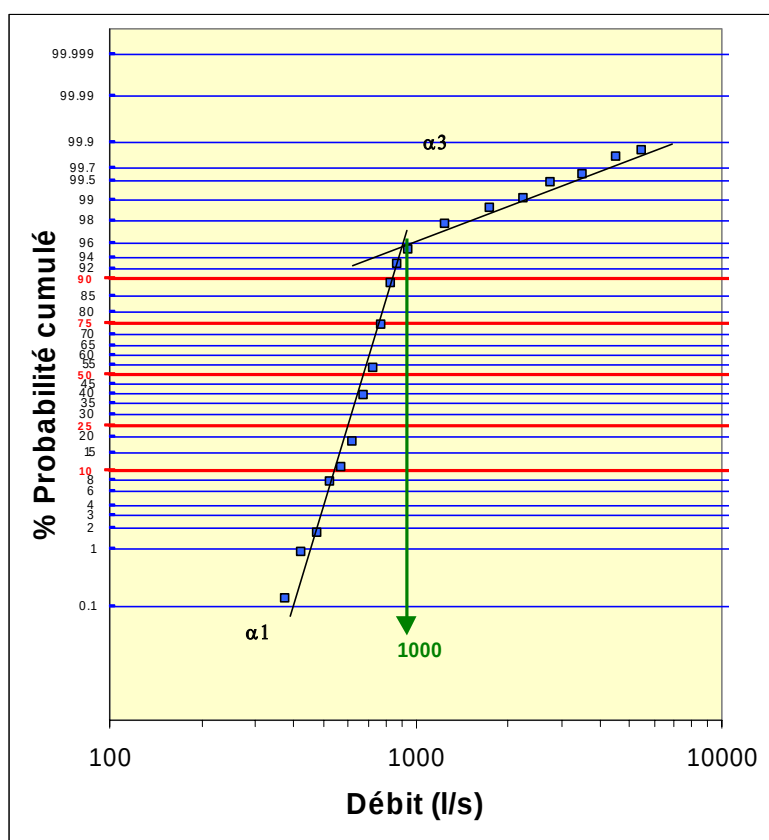


Illustration 16 - Débits classés de la source de Font Dame sur l'ensemble des données de la période 1998-2003 (classes de débit de 100 l/s).

Contrairement à la source de Font Estramar, une seule rupture de pente a été identifiée sur la distribution des débits classés de Font Dame. Cette rupture s'observe pour des valeurs de débit proches de 1 000 l/s pour une fréquence cumulée supérieure à 96 % en contexte de crue. Les caractéristiques de la distribution correspondent au cas B de la classification de Marsaud (cf. vol. 1 - BRGM/RP-52918-FR).

Les caractéristiques de la distribution indiquent un changement de comportement hydraulique lorsque le débit est supérieur à 1 000 l/s, le système évacue plus facilement les eaux en période de crue. Ce comportement traduit la participation d'eau en provenance d'un autre système (apport par les pertes de l'Agly et du Verdoubert).

L'étude des débits classés de la source de Font Dame ne permet pas de mettre en évidence un problème de tarage pour les débits très élevés (débits sous-estimés), et n'indique pas qu'une part des débits de crue échappe à la station de jaugeage.

Compte tenu du contexte du ruisseau de Font Dame (le ruisseau s'organise peu à peu au sein d'une zone de marécage au fur et à mesure que l'on s'éloigne des émergences), il n'était pas certain que celui-ci draine l'ensemble des eaux issues des émergences en période de crue.

c) Somme des débits des trop-pleins (Font Dame + Font Estramar)

La chronique des débits journaliers cumulés étudiée s'étend sur la période 1998-2003, soit sur un total de 2 133 mesures.

Pour la période considérée, les débits journaliers moyens pour l'ensemble du système, minimum et maximum sont respectivement de 2 200, 1 276 et 31 337 l/s. Compte tenu de l'importance des débits de la source de Font Estramar, celle-ci impose fortement l'évolution générale de la distribution des débits classés (ill. 17). L'évolution est très similaire à celle de la source de Font Estramar prise séparément (ill. 15).

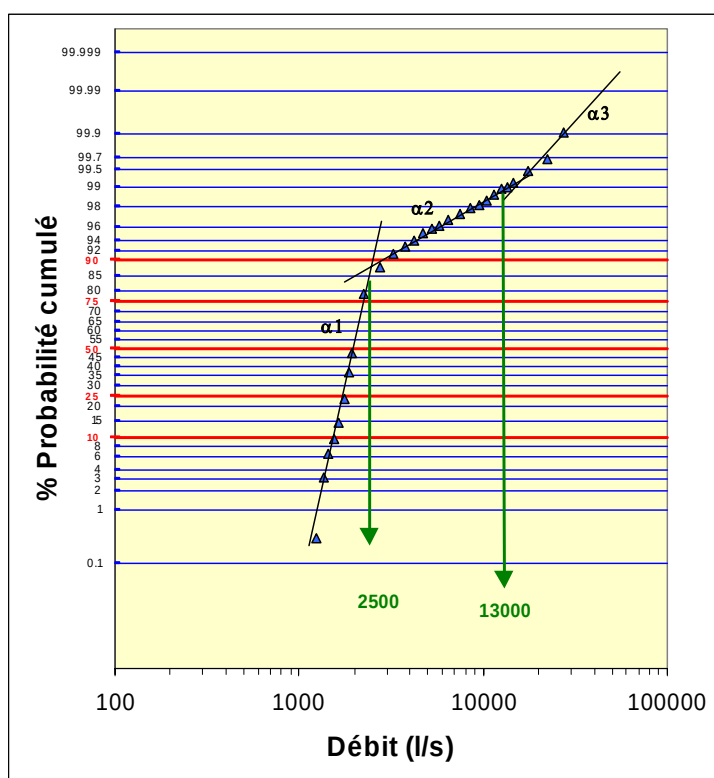


Illustration 17 - Débits classés pour l'ensemble du système karstique (somme des débits des trop-pleins des exutoires de Font Dame et Font Estramar) sur la période 1998-2003.

De manière similaire à Font Estramar, deux ruptures ont été identifiées sur la distribution. La première rupture se produit pour une fréquence cumulée de 75 %

autour de 2 500-3 000 l/s. La seconde rupture (débit proche de 13 000 l/s) se produit, pour une fréquence cumulée proche de 99 % en contexte de forte crue. La pente α_2 est inférieure à α_1 , tandis que la pente α_3 est supérieure à α_2 .

Les caractéristiques de la distribution indiquent un changement de comportement hydraulique lorsque le débit est supérieur à 2 500 l/s, le système évacue plus facilement les eaux en période de crue. Ce comportement traduit la participation d'eau en provenance d'un autre système, ce qui apparaît cohérent compte tenu de la nature binaire de ce système (apport par les pertes de l'Agly et du Verdoble). La seconde rupture est liée à la mise en fonction de trop-plein lors des crues importantes ($Q > 13\,000$ l/s) comme on l'a mentionné précédemment.

Dans le but de caractériser le comportement du karst non plus à proximité des sources de trop-pleins (Font Dame, Font Estramar), mais au sein du bassin d'alimentation, nous avons réalisé une analyse des « niveaux d'eaux » classés à l'aide des données du piézomètre 104 pour lequel nous disposons d'une chronique suffisamment longue.

L'étude de la chronique du piézomètre 102 n'a pas été effectuée puisque que ces données sont utilisées pour le calcul du débit de Font Dame. Les ajustements réalisés pour la chronique piézométrique du 104 sont présentés à l'illustration 18.

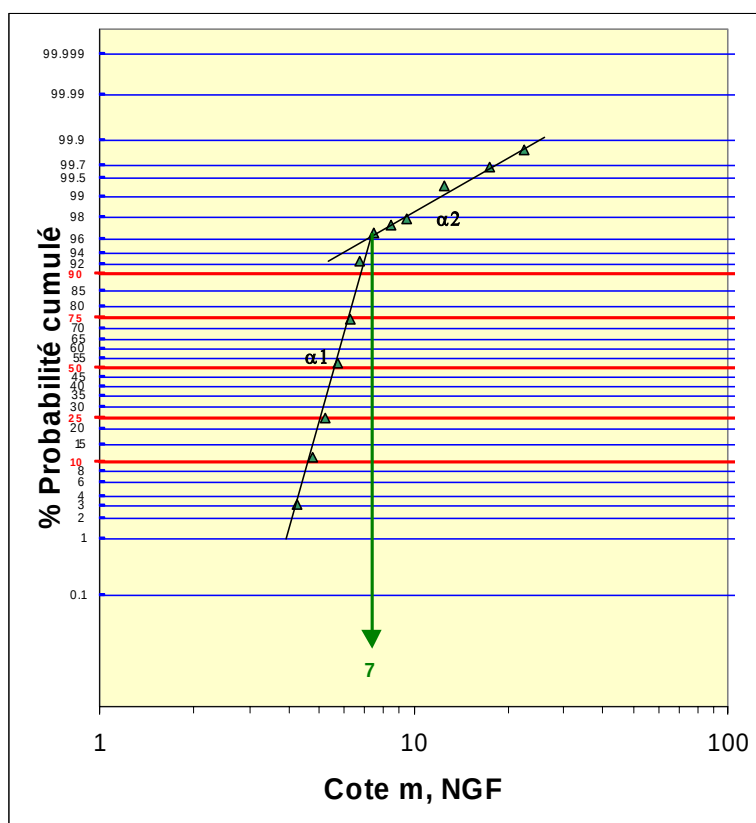


Illustration 18 - Hauteurs classées pour la piézométrie de l'ouvrage BSS 10795X0030 (104) sur la période 1998-2003.

Une seule rupture de pente a été identifiée sur la distribution des hauteurs classées du piézomètre 104. Cette rupture s'observe pour des valeurs de hauteur proche de 7 m NGF pour une fréquence cumulée supérieure à 96 % en contexte de crue. Par analogie avec les débits classés, les caractéristiques de la distribution obtenue correspondent au cas B de la classification de Marsaud (cf. vol. 1 - 1 BRGM/RP-52918-FR).

Les caractéristiques de la distribution indiquent un changement de comportement hydraulique lorsque le niveau piézométrique est supérieur à 7 m NGF, le système évacue plus facilement les eaux en période de crue. Ce comportement traduirait la participation d'eau en provenance d'un autre système. Signalons que la cote de 7 m NGF s'observe lorsque les débits de trop-pleins (Font Dame + Font Estramar) sont supérieurs à 2 500 l/s.

En résumé, l'analyse des débits classés des sources de trop-pleins de Font Estramar et de Font Dame mettent en évidence un **comportement hydrodynamique différent du système karstique en période d'étiage et en période de crue**. Lors des périodes de crue, le système karstique pris dans sa globalité devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux lorsque le débit cumulé est supérieur à 3 000 l/s. La rupture observée indique que les propriétés hydrauliques du système changent.

Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (alimentation plus importante par les pertes) et également des conditions de sortie des eaux. Le comportement observé dénote la participation d'eau en provenance d'un autre système, ce qui apparaît cohérent compte tenu de la nature binaire de ce système karstique (apport par les pertes de l'Agly et du Verdoube).

Les conditions de sortie des eaux apparaissent également favorisées et peuvent traduire une diminution de la capacité de stockage du milieu. La présence des formations du Plio-Quaternaire, au contact avec les formations calcaires dans la zone d'émergence des sources joue vraisemblablement un rôle important dans la dynamique des écoulements du système karstique. En effet, les formations du Plio-Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement lors des périodes de crue.

En période de crue, les formations plio-quaternaires ne sont pas en mesure d'absorber l'intégralité de la mise en charge du karst provoquée par l'infiltration de la pluie et l'apport au niveau des pertes. Le karst mis en charge utilise alors en période de crue un réseau plus transmissif pour évacuer les eaux, ce qui se traduit par une modification des paramètres de la distribution des débits classés (pente $\alpha_2 < \alpha_1$). Les **sources de Font Estramar** et de **Font Dame** apparaissent ainsi comme **des sources de trop-plein pour le système karstique d'Opoul et du Bas-Agly**.

Il convient maintenant de s'intéresser aux informations obtenues par les analyses corrélatoires et spectrales afin de quantifier l'organisation de la structure de drainage du système karstique.

2.2.3. Analyses corrélatoires et spectrales des hydrogrammes des sources de Font Estramar et Font Dame

L'objectif de ces traitements mathématiques est d'appréhender le comportement général du système karstique à travers entre autres, l'étude des relations pluie-débit mesurées au niveau d'un exutoire. Dans le cas présent, il s'agit d'étudier le comportement du système à long terme (plusieurs cycles hydrologiques). L'étude a été réalisée principalement sur les chroniques de la source de Font Estramar.

Les corrélogrammes simples des débits des sources de Font Estramar et Font Dame sont présentés en illustration 19. L'analyse corrélatoire simple cherche à traduire la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grands. Elle permet de tester le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques.

D'après Mangin, le temps pour lequel le corrélogramme atteint la valeur de 0,2 permet d'appréhender l'effet mémoire du système. L'effet mémoire de Font Estramar est faible, de l'ordre de 18 jours contre 11 pour Font Dame (ill. 19). Ces résultats indiquent que le système karstique est globalement peu inertiel, ce qui traduit un système bien drainé (la zone noyée apparaît ainsi comme bien karstifiée).

Les « analyses croisées » ont été effectuées à l'aide des chroniques de pluie mesurée à Périllos, Tautavel et Vingrau (données DAFF 66) et à Perpignan (données Météo France). Les traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel Tempo (© BRGM).

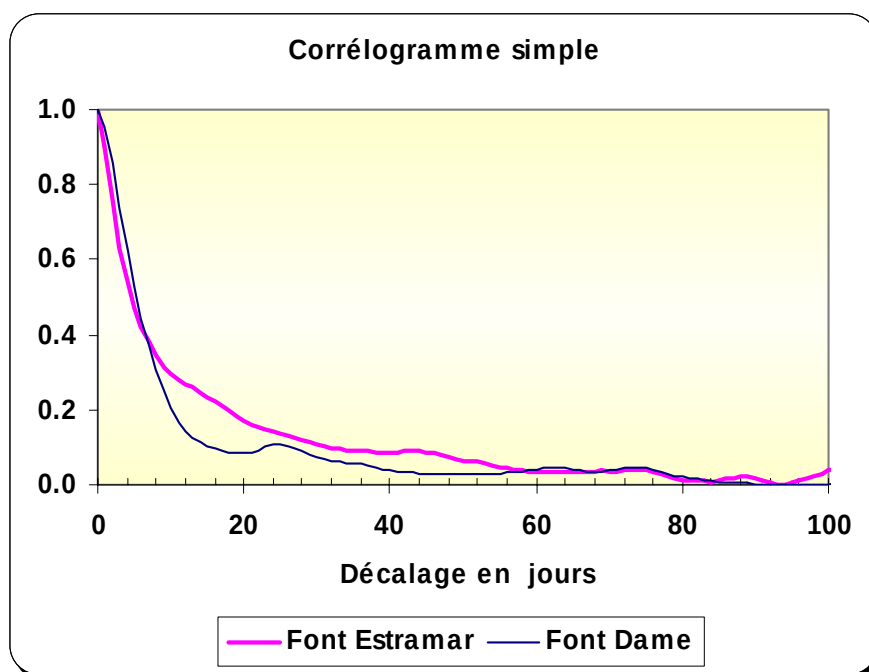


Illustration 19 - Corrélogramme du débit à Font Estramar (période 1971-2003) et du débit de Font Dame (période 1998-2003).

Les corrélogrammes croisés (pluie-débit) donnent une image acceptable de la réponse impulsionnelle du système karstique car celle-ci est déterminée à partir d'un nombre important de données pluie-débit (10 625 et 2 133 mesures de débit journalier respectivement pour Font Estramar et Font Dame) et surtout parce que le signal d'entrée peut être considéré comme aléatoire.

Pour les sources de Font Estramar et de Font Dame, la longueur de la réponse du débit à la pluie (durée de la recharge) est estimée respectivement à 40 et 20 j environ. Les réponses impulsionnelles, qui présentent un pic pour les faibles décalages (2 j pour Font Estramar, 3 pour Font Dame), sont caractéristiques de système bien drainé et donc évolué vis-à-vis de la karstification (ill. 20).

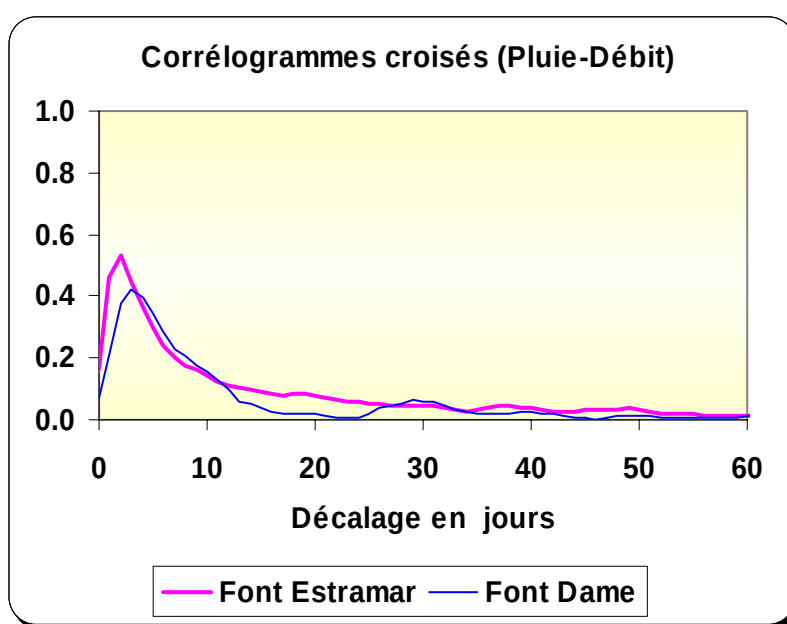


Illustration 20 - Corrélogramme croisé (pluie-débit) des sources de Font Estramar (période 1971-2003) et Font Dame (période 1998-2003).

L'**analyse spectrale simple** (densité spectrale de puissance DSP) permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence. En d'autre terme, la densité spectrale de puissance permet d'obtenir des informations par exemple, sur la tendance du système à long terme.

Pour le système de Font Estramar, l'analyse a porté sur les différentes chroniques individualisées (1971-1982, 1984-1996, 1996-2003). Les densités spectrales de puissance relative présentent un pic pour les basses fréquences (365 j), ce qui indique que l'information portée par les pluies est avant tout transformée dans le cycle annuel (ill. 21). Selon les périodes considérées, la fonction de gain qui renseigne sur la manière dont le signal d'entrée est amplifié (> 1) ou atténué (< 1) par le système présente un pic plus ou moins important pour la fréquence correspondant au pic de 365 j (ill. 22). La valeur du gain est inférieure à 1 (gain = 0,6) pour la période 1971-1982 contre 1,3 environ pour les périodes 1984-1996 et 1997-2003.

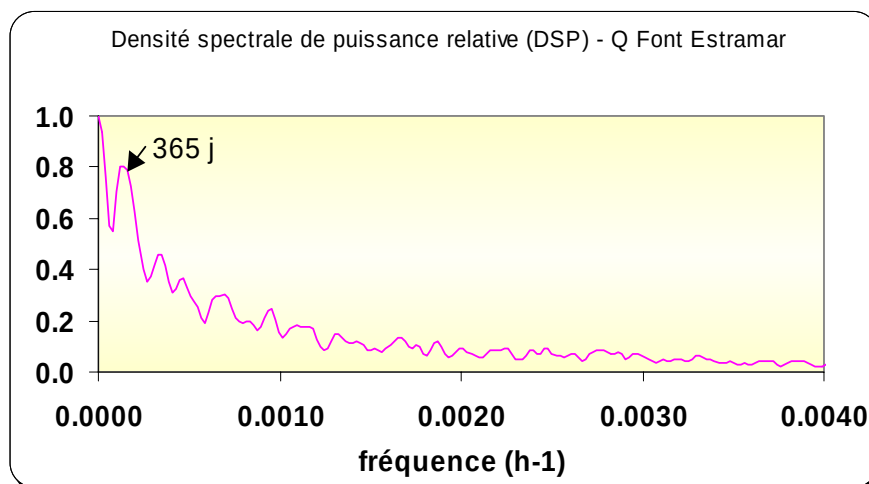


Illustration 21 - Densité spectrale de puissance de la source de Font Estramar (période 1984-1996).

Pour la première période (1971-1982), l'atténuation du signal pour les basses fréquences (365 j) traduit une consommation de signal entre l'entrée (pluies/pertes) et la sortie (débit à l'exutoire). Ceci indique donc que le système karstique a globalement stocké de l'eau ou que les pertes par évapotranspiration réelle ont été plus importantes. Pour les deux périodes suivantes (1984-1996 et 1997-2003), l'amplification du signal pour les basses fréquences (365 j) traduit globalement un apport d'eau ou un déstockage et/ou une diminution de la demande évapotranspiratoire réelle. Cette dernière hypothèse n'apparaît pas consistante, car les conditions climatiques ne sont pas significativement différentes de celles des périodes précédentes.

Pour la période 1997-2003 (ill. 22), les valeurs du gain à 90 et 30 jours sont plus importantes que celles des périodes précédentes (1971-1982 et 1997-2003) ce qui indique que l'atténuation du signal entre l'entrée (pluies/pertes) et la sortie (débit à l'exutoire) est moins marquée à moyen terme (90 et 30 j). Ce résultat est à mettre en relation directe avec une modification des conditions d'entrée, notamment au niveau des pertes de l'Agly. En effet, la gestion du barrage de l'Agly (soutien des débits de l'Agly en étiage depuis 1996) a entraîné une modification des conditions naturelles d'alimentation, notamment en périodes estivales.

Le déphasage moyen calculé pour les fréquences inférieures à la fréquence de coupure ($f_c = 0,01 \text{ h}^{-1}$) suivant la méthode proposée par Padilla et Pulido-Bosch (1995) est de l'ordre de 35 h (ill. 23). Ce faible déphasage exprime à la fois la réponse du système à la pluie efficace et à l'alimentation par les pertes de l'Agly et du Verdoubert. Ce résultat indique que la karstification est bien développée entre la zone d'infiltration (épikarst)/d'alimentation (pertes) et la zone noyée du système karstique et que la transmission des impulsions se produit dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés.

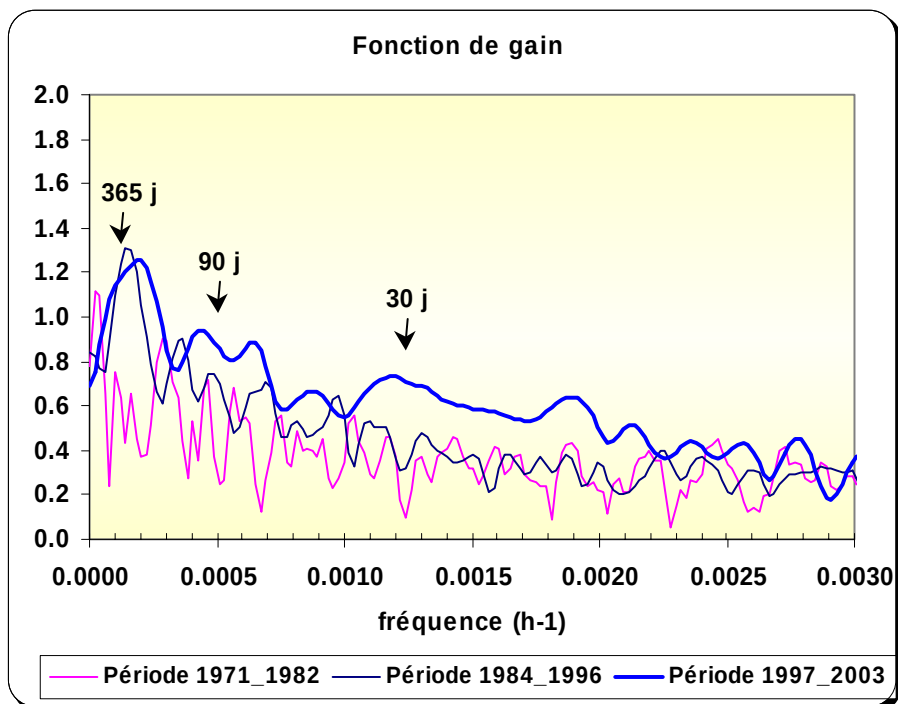


Illustration 22 - Fonction de gain entre la pluie et le débit à Font Estramar pour les périodes 1971-1982, 1984-1996 et 1997-2003.

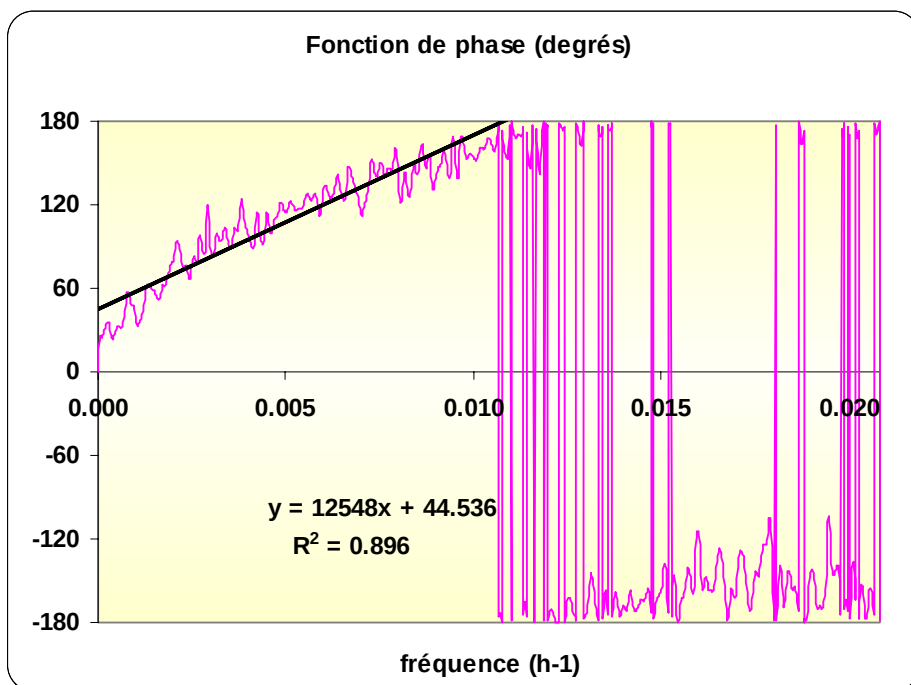


Illustration 23 - Fonction de phase entre la pluie et le débit à Font Estramar pour la période 1997-2003.

En résumé, les analyses corrélatoires et spectrales ont permis d'étudier le **comportement du système à long terme** (plusieurs cycles hydrologiques).

La **zone noyée du système karstique d'Opoul apparaît bien drainée et bien connectée**, d'un point de vue hydraulique, à l'**épikarst** qui constitue le **siège de l'infiltration des pluies** et à la **zone d'alimentation par les pertes**. Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 35 h, après un épisode pluvieux. Ce faible déphasage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés.

La **réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de vingt jours** environ (durée de la recharge) pour la source de Font Dame, contre quarante jours environ pour la source de Font Estramar. L'analyse à long terme de l'hydrogramme de Font Estramar montre que le système karstique a un **comportement non homogène vis-à-vis du stockage** (recharge et décharge des réserves en fonction des conditions hydroclimatiques). Le système présente pour certaines périodes, une tendance à déstocker de l'eau à l'échelle annuelle (période 1994-1996), ou au contraire à stocker de l'eau (période 1971-1982).

Pour la période 1997-2003, l'étude de la fonction de gain permet de mettre en évidence une modification des conditions d'entrée, notamment au niveau des pertes de l'Agly. La gestion du barrage de l'Agly (soutien des débits de l'Agly en étiage depuis 1996) a entraîné une modification des conditions naturelles d'alimentation, notamment en périodes estivales. L'effet de la modification est essentiellement perceptible à moyen terme (30 et 90 j).

Il convient maintenant de comprendre les raisons de cette hétérogénéité de comportement vis-à-vis du stockage (recharge et décharge) par les précipitations. S'agit-il d'un effet lié à la quantité de pluie infiltrée et/ou à sa répartition temporelle ?.

2.2.4. Traitement des chroniques de débit de Font Estramar par le filtre de moyenne mobile

Dans le cadre des études des systèmes hydrologiques, le filtre de moyenne mobile peut être utilisé pour mettre en évidence les tendances, à long terme, qui peuvent exister au sein des chroniques de pluie et de débit. L'amplitude de la moyenne mobile utilisée dans notre étude est de 365 j, ce qui permet d'évaluer le rôle régulateur pluri-annuel du système de Font Estramar.

La chronique filtrée des précipitations permet de mettre en évidence le caractère excédentaire ou déficitaire des pluies en fonction des cycles hydrologiques. Par exemple, on montre à l'illustration 24 que les cycles hydrologiques 1971-1972, 1977-1978, 1996-1997 et 1999-2000 sont fortement excédentaires en pluviométrie. À l'inverse, on montre que les cycles 1975-1976 et 1998-1999 sont fortement déficitaires en pluviométrie.

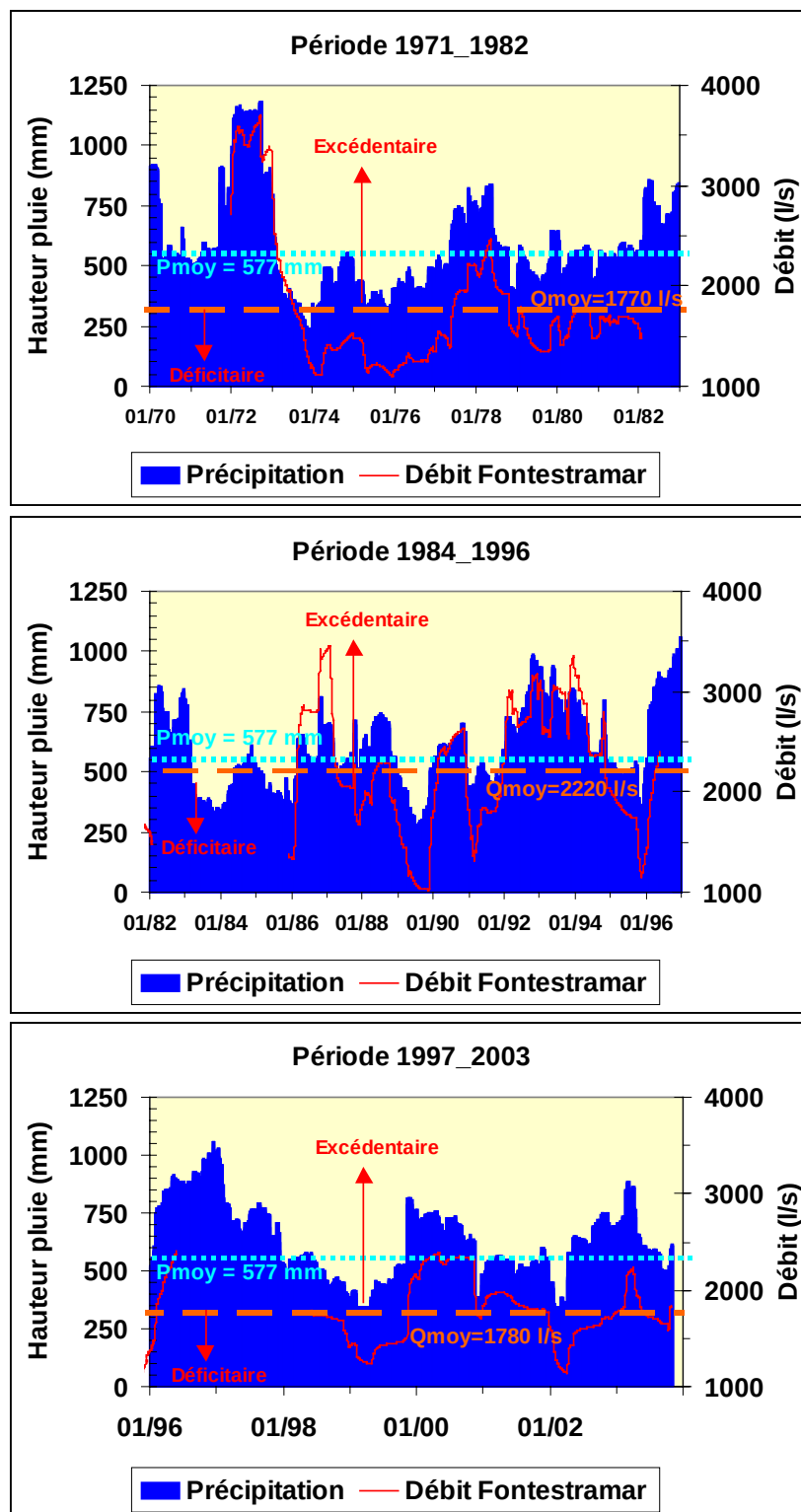


Illustration 24 - Moyennes mobiles annuelles sur les chroniques de pluie et de débit journalier à Font Estramar.

La chronique filtrée des débits a une structure modulée qui suit globalement celle des précipitations. Les cycles excédentaires et déficitaires sont bien marqués, le déficit ou l'excédent de pluviométrie se fait sentir rapidement sur les débits de la source. Ces résultats tendent à montrer que le système a un comportement globalement peu régulateur à l'échelle pluri-annuelle. Le temps de régulation du système est de l'ordre de grandeur du cycle hydrologique (environ 1 an).

Pour le cycle hydrologique 1996-1997, les débits moyens de Font Estramar apparaissent très élevés alors que l'excès pluviométrique n'est pas particulièrement important. L'importance des débits moyens pour ce cycle hydrologique peut avoir pour origine un rôle plus important joué par les pertes de l'Agly et du Verdoubert, suite à modification des conditions d'alimentation (soutien des débits de l'Agly en étiage par le barrage de l'Agly). Les pertes semblent donc jouer un rôle non négligeable dans la manière dont le système régule ses réserves à l'échelle pluri-annuelle. Le comportement particulier des pertes dans le fonctionnement hydrogéologique du système karstique sera abordé ultérieurement (cf. § 2.4.).

Après avoir montré que le système karstique présente globalement un temps de régulation modeste (de l'ordre d'un cycle hydrologique), il convient maintenant de d'évaluer le volume dynamique écoulable et le volume de régulation du système afin de fixer l'ordre de grandeur des réserves mobilisable du système.

Le volume dynamique est déterminé par l'analyse des courbes de récession. Cette méthode permet de fixer l'ordre de grandeur minimal des réserves et permet en outre d'obtenir des informations quant aux modalités d'écoulement.

2.2.5. Analyse de courbes de récessions de la source de Font Estramar

Les traitements mathématiques ont été réalisés pour l'ensemble des données de débit journalier disponibles à la source de Font Estramar (période 1971-2003). L'ajustement des courbes de récession a été réalisé suivant la méthode de Mangin (1970).

Pour la source de Font Estramar, 23 périodes de décrues jugées significatives ont été traitées. Les paramètres des ajustements ainsi que la fiabilité des résultats (critère de Nash⁴) sont présentés dans le tableau de l'annexe 1. Sur l'ensemble des récessions analysées, 21 ajustements satisfont à un critère supérieur à 80 %, ce qui constitue un résultat acceptable. Un exemple d'ajustement pour le cycle 2001-2002 est présenté graphiquement sur l'illustration 25. Les paramètres moyens des 23 ajustements jugés significatifs sont rassemblés dans le tableau ci dessous (ill. 26).

Les coefficients de tarissement sont relativement élevés ($0,007 \pm 0,002$), ce qui indique que la zone noyée du système est bien karstifiée et se vidange assez vite.

⁴ Le critère de Nash caractérise la distance entre la série observée et le modèle. Ce coefficient inclut à la fois les erreurs systématiques (biais) et aléatoires (bruit).

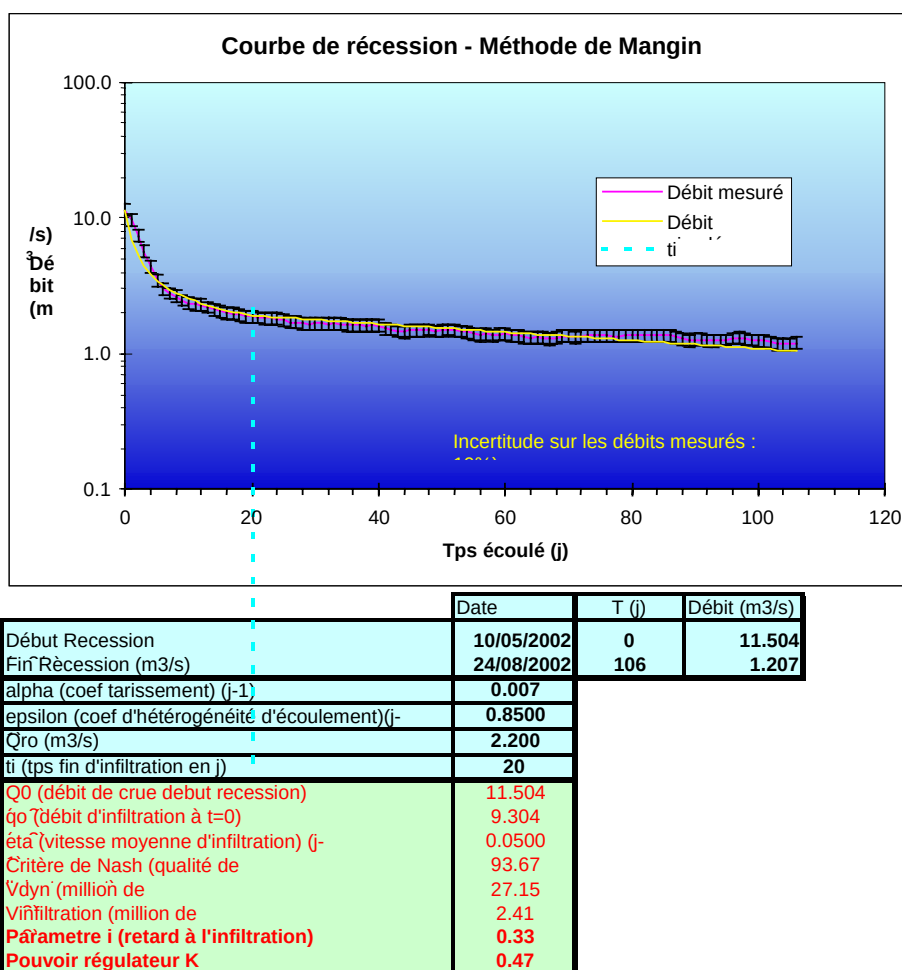


Illustration 25 - Exemple de courbe de récession de la source de Font Estramar et résultats de l'ajustement (cycle hydrologique 2001-2002).

Paramètres d'ajustement	Moyens	écart type
alpha (coefficient tarissement) (j ⁻¹)	0,007	0,002
epsilon (coefficient d'hétérogénéité d'écoulement) (j ⁻¹)	0,48	0,25
Qro (m³)	1,9	0,5
Temps de fin d'infiltration (ti) (j)	19	7
Q0 (débit au pic de crue) (m³)	11,7	5,3
qo (débit d'infiltration à t=0) (m³)	9,8	5,0
Eta (vitesse moyenne d'infiltration) (j ⁻¹)	0,06	0,03
Volume dynamique (million de m³)	25,4	6,3
Volume d'infiltration (million de m³)	3,5	2,2
Parametre i (retard à l'infiltration)	0,48	0,13
Pouvoir régulateur K	0,43	0,12

Illustration 26 - Paramètres moyens des récessions de la source de Font Estramar déterminés par la méthode de Mangin.

Le temps de fin d'infiltration est relativement court ($19 \text{ jours} \pm 7$) et les vitesses moyennes d'infiltration, relativement élevées ($0,06 \pm 0,03$) dans la zone d'infiltration (épikarst) indiquent que le système présente une karstification importante. La zone d'infiltration (épikarst) apparaît donc bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée du système. Les coefficients d'hétérogénéité d'écoulement sont globalement élevés ($0,48 \pm 0,25$) et extrêmement variables d'un cycle hydrologique à l'autre. Ce résultat indique que le système karstique est assez sensible aux variations saisonnières de l'alimentation par les pluies.

Les valeurs du volume dynamique sont importantes ($25 \text{ millions de m}^3 \pm 6$) et aussi variables d'un cycle à l'autre ce qui traduit la sensibilité de la zone noyée du système aux variations saisonnières et inter-annuelles de l'alimentation (pluie, débit des pertes).

Le pouvoir régulateur ($K = 0,43 \pm 0,12$) et le retard à l'infiltration ($i = 0,48 \pm 0,13$) sont également variables d'un cycle à l'autre. Le report des valeurs moyennes dans le diagramme de classification de Mangin (ill. 27) permet de comparer le système karstique de Font Estramar avec d'autres systèmes étudiés dans la littérature. La valeur moyenne des paramètres se positionne à la limite des domaines 1 et 2 de la classification.

Ces valeurs sont caractéristiques d'un système complexe de grande taille, dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes, et dont la karstification est plus importante à l'amont qu'à l'aval et qui présente des retards à l'alimentation (pertes). Le pouvoir régulateur ($K = 0,43 \pm 0,12$) élevé est propice à l'accumulation de réserves.

En résumé, les **caractéristiques fonctionnelles du système de Font Estramar** ont pu être évaluées. Les résultats indiquent que la **zone d'infiltration des pluies (épikarst) est bien karstifiée et est également bien connectée à la zone noyée du système**. La durée d'infiltration est relativement courte ($19 \text{ j} \pm 7$).

Le système karstique apparaît également assez sensible aux variations saisonnières de l'alimentation par les pluies. La zone noyée est bien karstifiée et se vidange assez rapidement. La valeur moyenne du volume dynamique (estimation par défaut du volume des réserves) est importante : de l'ordre de 25 millions de m^3 (± 6 millions de m^3). Les réserves du système karstique apparaissent également sensibles aux variations saisonnières et inter-annuelles de l'alimentation (pluie, débit des pertes).

Le pouvoir régulateur ($K = 0,43 \pm 0,12$) et le retard à l'infiltration ($i = 0,48 \pm 0,13$) de Font Estramar positionnent le système dans la famille des systèmes complexes de grande taille, dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes, et dont la karstification est plus importante à l'amont qu'à l'aval et qui présente des retards à l'alimentation (pertes).

Il convient maintenant de préciser l'ordre de grandeur de la taille du réservoir du système et d'évaluer si le système a un comportement stationnaire, autrement dit, d'évaluer si le comportement passé du système peut expliquer son comportement futur. Cette étude peut être réalisée à l'aide de l'analyse R/S (Rescaled range analysis).

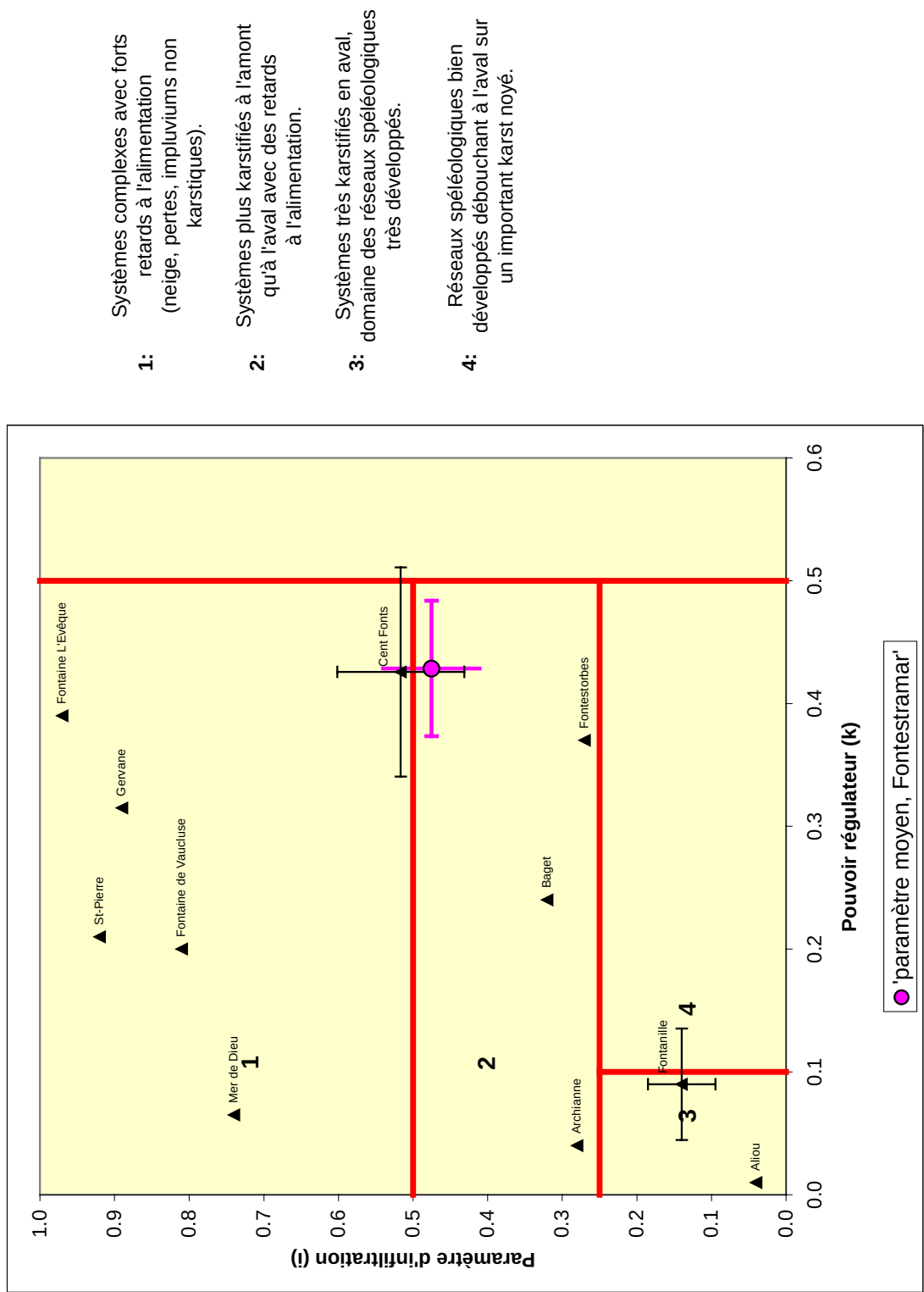


Illustration 27 - Position de la source de Font Estramar dans la classification de Mangin (1975).

2.2.6. Évaluation de la stationnarité du système de Font Estramar et du volume de régulation du réservoir

L'analyse R/S (Rescaled range analysis) est une méthode d'analyse statistique qui permet d'évaluer si le comportement passé d'un système peut expliquer son comportement futur. Pour cela, le coefficient de Hurst (H) est calculé. Il correspond à l'écart entre une valeur à un instant donné « t » et la valeur moyenne de la série considérée divisée par l'écart-type. La valeur de ce coefficient permet de caractériser la stationnarité ou non d'une série de valeurs (Mandelbrot, 2000).

D'une manière générale, le coefficient H est compris entre 0,5 et 1. La valeur de 0,5 correspond au domaine aléatoire pur (phénomène non linéaire) tandis que la valeur 1 correspond au domaine structuré (phénomène linéaire).

Une chronique peut être à la fois stationnaire et non stationnaire suivant l'intervalle de temps que l'on considère pour l'analyse de l'interdépendance des événements. Nous cherchons à caractériser les phénomènes à long terme, l'étude de la stationnarité a donc été abordée à l'échelle annuelle (365 j) et semestrielle (180 j). L'étude a été réalisée sur les trois chroniques de débit disponibles : 1971-1982, 1984-1996 et 1997-2003.

Le débit de Font Estramar étant à la fois dépendant des précipitations et de l'action régulatrice ou non du réservoir, mettre en évidence le rôle de ce dernier nécessite un traitement préalable des chroniques de pluie. Quel que soit l'intervalle de temps considéré (365 ou 180 j), le coefficient de Hurst (H) des chroniques de précipitations tend vers 0,5, ce qui indique que la pluie est un phénomène aléatoire pur.

Pour les débits de Font Estramar, les coefficients de Hurst (H) sont plus élevés et apparaissent bien différents selon la période considérée. Pour la période 1971-1982, H présente une valeur proche de 0,9, tandis que pour la période 1984-1996, H est nettement plus faible (0,65 environ, ill. 28). Pour la période 1997-2003, les coefficients ne sont pas significatifs à l'échelle annuelle, en raison d'une chronique trop courte. À l'échelle semestrielle (180 j), le coefficient de Hurst est de 0,56, ce qui traduit un comportement fortement non linéaire.

Lors de la période 1971-1982, le système karstique avait un comportement globalement linéaire et stationnaire ($H = 0,88$) et avait tendance à réguler de manière importante les précipitations (de manière similaire à un aquifère poreux). Pour la période 1984-1996, le système a présenté un comportement nettement moins linéaire ($H = 0,65$) et régulait moins bien les précipitations. Cette différence de comportement devrait se traduire par des volumes de régulation différents.

L'étude de l'évolution de l'état du réservoir peut être abordée par l'analyse de la courbe des débits cumulés. Cette technique est utilisée pour l'étude de régularisation des débits des cours d'eau au moyen de retenues ou barrage (Réménieras, 1960). Elle consiste à estimer à partir des écarts entre volumes cumulés et volume moyen, la capacité nécessaire au réservoir pour réguler le débit à une valeur moyenne.

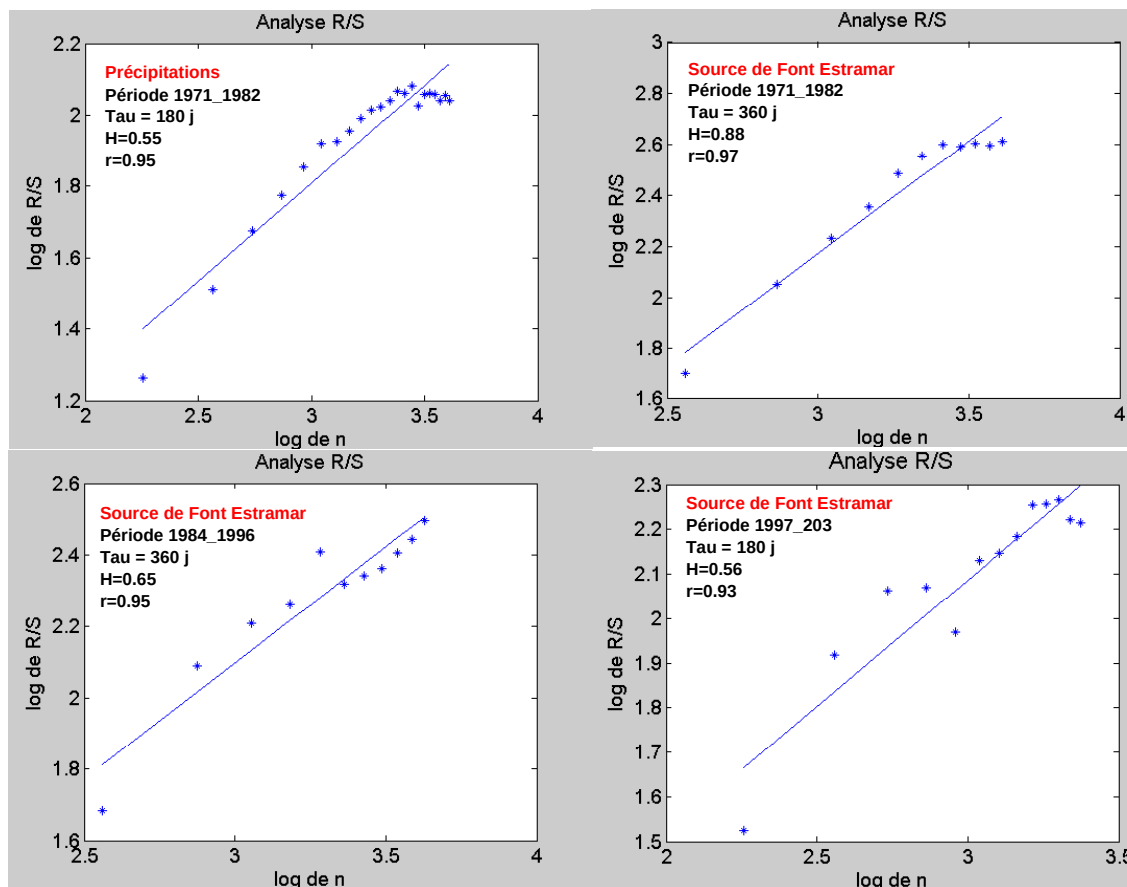


Illustration 28 - Analyse R/S des chroniques journalières de précipitation et de débit de la source de Font Estramar.

La capacité de stockage du réservoir est estimée par le segment d'ordonnée compris entre les deux tangentes extrêmes (à la courbe des débits naturels) parallèles à la droite du débit moyen. Un exemple graphique est présenté sur l'illustration 29. Cet intervalle correspond, pour une retenue, à la variation entre les volumes minimaux et maximaux d'exploitation (par analogie, cotes mini et maxi).

Pour la période 1972-1982 le volume de régularisation du système a été estimé à 68 millions de m^3 , ce qui constitue une valeur importante. Une valeur similaire de 67 millions de m^3 a été estimée pour la période 1984-1986. Dans l'état actuel des connaissances, une estimation du volume de régulation de l'ordre de 70 millions de m^3 apparaît vraisemblable, ce qui signifie que la taille du réservoir est au moins de l'ordre de ce volume.

La période 1997-2003 contraste fortement avec les précédentes, le volume estimé est nettement plus faible, de l'ordre de 29 millions de m^3 seulement. Le caractère nettement plus non linéaire (coefficient de Hurst = 0,56) du système pour la période 1997-2003 semble également se traduire par des volumes de régulation plus faibles.

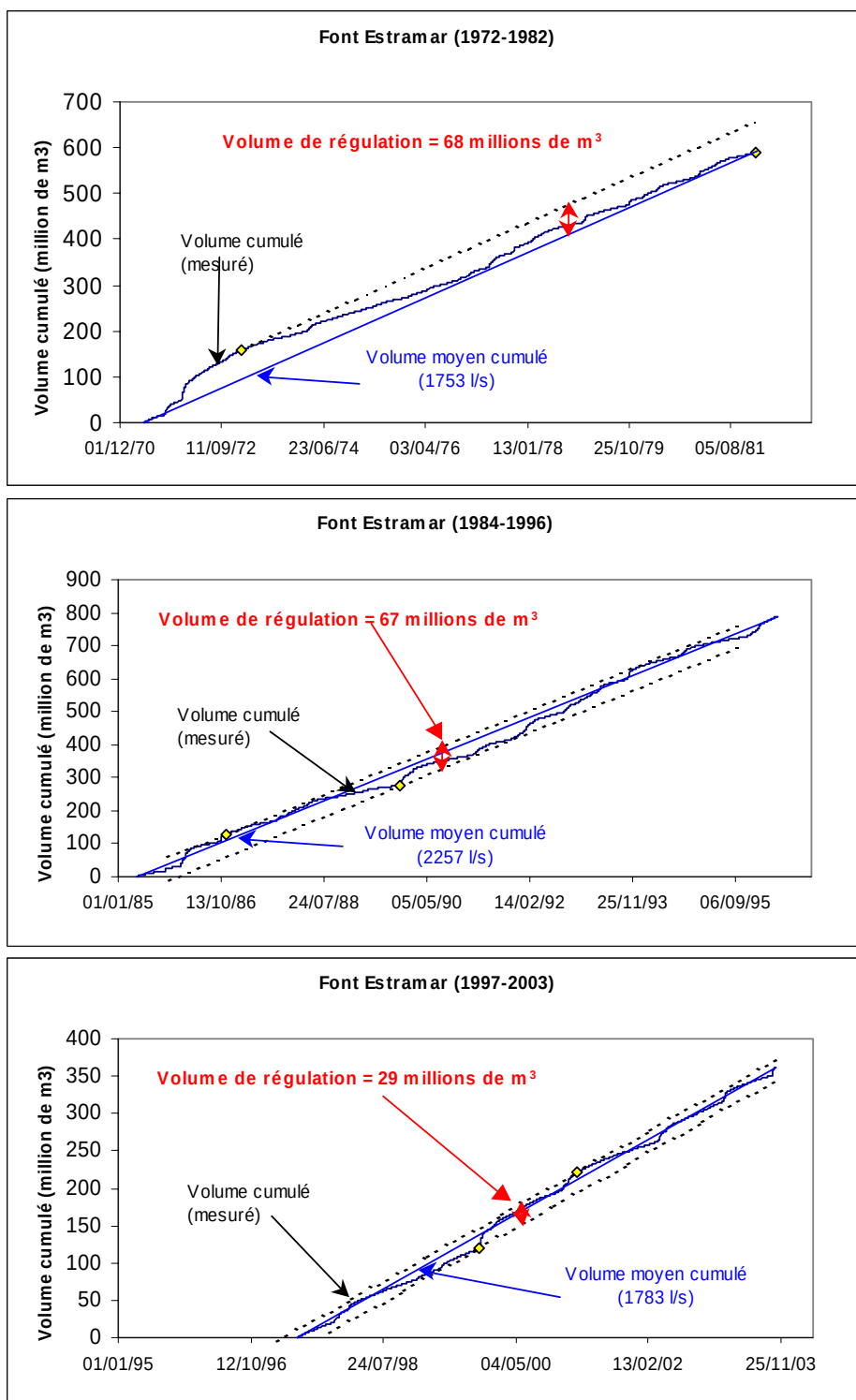


Illustration 29 - Estimation du volume de régularisation du système de Font Estramar à partir de la courbe des débits cumulés (périodes 1972-1982, 1984-1996 et 1997-2003), d'après Réménieras, 1960.

Depuis la mise en eau du barrage de l'Agly, le soutien des débits de l'Agly, lors des périodes estivales notamment, a modifié les conditions d'alimentation du karst au niveau des pertes. L'écart entre les volumes minimaux et maximaux s'est réduit, ce qui signifie que l'état des réserves du karst est proche de leur maximale, soit 70 millions de m³. L'effet du soutien de l'Agly par le barrage semble donc se traduire par un apport d'eau plus important au système. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu par l'analyse du gain (cf. § 2.2.3.). Si ces résultats venaient à se confirmer, le changement de comportement du système depuis 1997 (système globalement d'avantage non linéaire, volume de régulation plus faible en raison de l'augmentation de l'alimentation par les pertes) pourrait être une conséquence directe de la mise en eau du barrage de l'Agly et du soutien du débit de l'Agly au cours des périodes estivales.

Le volume des réserves du système karstique (estimé à 70 millions de m³) est à mettre en relation avec le volume dynamique déduit de l'analyse des courbes de récession (25 ± 6 millions de m³). Le rapport des deux volumes estimés donne une bonne image du pouvoir régulateur du système (de l'ordre de 0,36).

Nous avons caractérisé le comportement du système karstique à long terme (sur plusieurs cycles hydrologiques), il convient maintenant d'appréhender son fonctionnement à court terme. La caractérisation du système à court terme peut être également réalisée à l'aide des analyses corrélatoire et spectrale.

2.2.7. Analyses fonctionnelles à court terme du karst d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly

Des analyses corrélatoire et spectrale ont été réalisées⁵ sur les chroniques de données horaires enregistrées à la source de Font Estramar (hauteur d'eau de la vasque, conductivité, température), à la source de Font Dame au niveau de la pisciculture (hauteur du ruisseau, conductivité, température), au niveau du piézomètre 102 (10795X0028) situé à l'amont immédiat de la source de Font Dame (hauteur, conductivité, température) et au niveau de l'ancien forage (10795X0050) de la pisciculture de Font Dame (hauteur d'eau).

Les données horaires du marnage de l'étang de Salses Leucate enregistrées à Port-Fitou⁶, la piézométrie de Baixas-Cases de Pène, les données de hauteur d'eau et de température des piézomètres 104 (10795X0030), 107 (10795X0033) et Roboul (10904 X0105), les données de pression atmosphérique mesurées au niveau du piézomètre 102 et la pluviométrie journalière de la station Météo France d'Opoul-Périllos ont été également utilisées. Les données des piézomètres 103 et 105, équipés récemment (novembre 2003), n'ont pas été étudiées en raison de chroniques trop courtes.

L'intérêt des méthodes corrélatoires et spectrales est de mettre en évidence les phénomènes structurés influençant l'évolution temporelle des chroniques (ill. 30).

⁵ Logiciel TEMPO (BRGM).

⁶ Données Conseil général de l'Aude.



Illustration 30 - Évolution temporelle du niveau de l'étang de Salses Leucate (Port Fitou⁴) de la hauteur d'eau au niveau des piézomètres P102, P104, P107, PRoboul, Baixas et Font Dame.

a) Analyse corrélatoire et spectrale des chroniques de hauteur d'eau

Les corrélogrammes simples des hauteurs d'eau présentent des courbes de décroissance caractéristiques de processus autorégressifs, c'est-à-dire qu'au temps « t » la valeur mesurée dépend de la valeur mesurée au temps « t-1 ». La courbe décroît faiblement en fonction des décalages croissants lorsque l'inertie est importante (cas de Baixas-Cases de Pène, ill. 31b) ou plus rapidement lorsque l'effet mémoire est plus faible (cas des variations de niveau de l'étang, ill. 31b).

La chronique de hauteur d'eau du piézomètre 102 apparaît faiblement corrélée aux précipitations ($r = 0,1$, ill. 31d) et fortement corrélée à la piézométrie mesurée au niveau des piézomètres Roboul et 104, ainsi qu'à la piézométrie du flanc sud du synclinal au niveau de Baixas-Cases de Pène (ill. 31e).

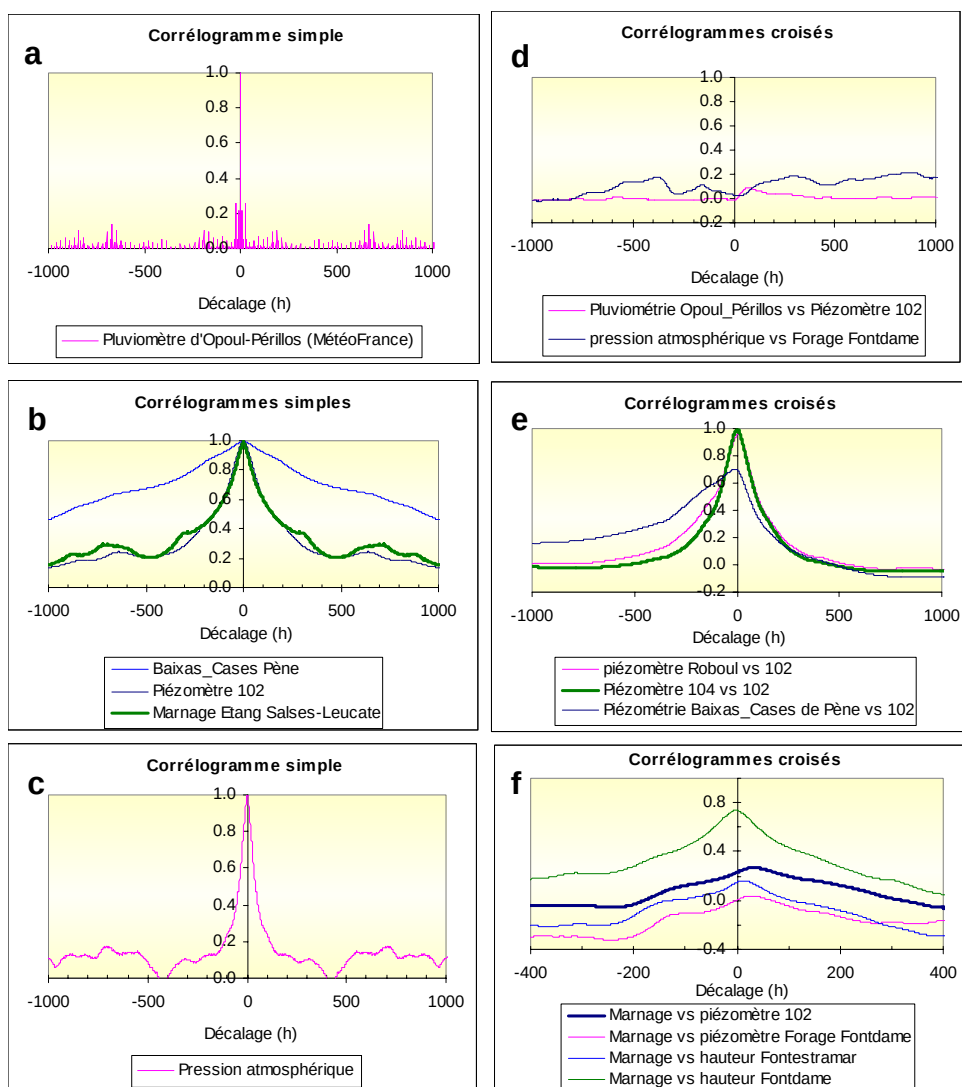


Illustration 31 - Corrélogrammes simples et croisés des niveaux piézométriques et des précipitations.

Lors des périodes de crue, les pics de hauteur d'eau de la source de Font Estramar se produisent systématiquement avant ceux des autres points du réseau de suivi. L'illustration 32 permet de visualiser les différents décalages temporels déduits des analyses corrélatoires croisées. À la lecture de l'illustration 32, deux familles de points d'eau peuvent se distinguer :

- points avec un retard important vis-à-vis des exutoires (> 6 h) ;
- et points avec un retard plus faible (< 6 h).

	Décalage temporel (en heures)	Commentaire	Coefficient de corrélation maximum
Sce Font Estramar (BSS)_P102 (10795X0028)	+ 13 ± 1	P102 en retard	0,9572
Sce Font Estramar_P104 10795X0030	+ 13 ± 1	P104 en retard	0,9578
Sce Font Estramar_P107 (10795X0033)	+ 2 ± 1	P107 en retard	0,9397
Sce Font Estramar_PRoboul	+ 6 ± 1	PRoboul en retard	0,9660
Sce Font Estramar_PFD (10795X0050)	+ 10 ± 1	Piézo FD en retard	0,7693
Sce Font Estramar_PBaixas-Pène	+ 18 ± 1	PBaixas-Pène en retard	0,7769
P102 (10795X0028)_ Piézo FD (10795X0050)	- 3 ± 1	P102 en retard	0,6981

Illustration 32 - Décalage temporel entre les différentes stations suivies (piézomètres) et la source de Font Estramar (exutoire de trop-plein du système karstique).

Il faut également considérer la position des points d'eau au niveau des flancs du synclinal du Bas-Agly. Le forage de Cases de Pène tout comme le piézomètre de l'aven de Baixas sont situés sur le flanc sud du synclinal du Bas-Agly. Ce flanc sud plonge sous le contact avec les formations plio-quaternaires; les écoulements sont freinés par les formations de plus faible perméabilité en direction d'un paléo-exutoire supposé. Ce temps de réaction important par rapport à la réaction de la source de Font Estramar dénote un frein au flux d'eau à l'extrémité du flanc sud du synclinal du Bas-Agly.

Parmi les points situés sur le flanc nord du synclinal du Bas-Agly, les piézomètres du Roboul et le 107 réagissent avec un faible retard par rapport à l'exutoire de Font Estramar ; ce comportement peut être lié à leur position sur un axe de drainage annexe bien connecté au réseau de drainage, avec une charge hydraulique du même ordre de grandeur (25-20 m). Le comportement des autres points situés sur ce même flanc nord traduit l'hétérogénéité du karst, voire une influence par des circulations profondes liées aux pertes de l'Agly et du Verdoble. À rappeler que ces ouvrages ne sont pas des ouvrages complets, qu'ils recoupent différentes fractures ou indices de vide à différentes profondeurs.

La détermination du coefficient de tarissement au niveau de certains des ouvrages (ill. 33), permet de mettre en évidence des résultats contrastés au niveau des flancs sud et nord du synclinal du Bas-Agly :

Flanc du synclinal du Bas-Agly	Piézo mètre	Coefficient de tarissement
Nord	102	0.0013
Nord	104	0,0009 – 0,001
Nord	Roboul	0,0013 – 0,0014 – 0,003
Sud	Cases de Pène	0,002 – 0,004

Illustration 33 - Coefficients de tarissement des piézomètres.

La vidange du système est de manière générale faible à l'échelle des points d'observation du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agely, au vu des valeurs du coefficient de tarissement.

Le coefficient de tarissement est relativement homogène à l'échelle des points d'observation situés sur le flanc nord du synclinal. Les blocs ou systèmes annexes au réseau de drainage aboutissant aux exutoires se vidangent de façon homogène. À noter que le tarissement du forage de Cases de Pène est influencé par le soutien du barrage de l'Agly et du débit écoulé au niveau de l'Agly et de la capacité d'adsorption des pertes.

L'analyse spectrale simple met en évidence dans le domaine fréquentiel l'existence ou non de périodicité dans la chronique. Des phénomènes périodiques sont nettement identifiés à 24 et 12 h pour hauteurs d'eau des sources de Font Dame et Font Estramar, le piézomètre 102 et l'ancien forage de la pisciculture (ill. 34a, b, c et d), ainsi que pour les chroniques différenciées⁷ de hauteur d'eau des piézomètres 104, 107 Roboul et Cases de Pène (ill. 35a, b, c et d).

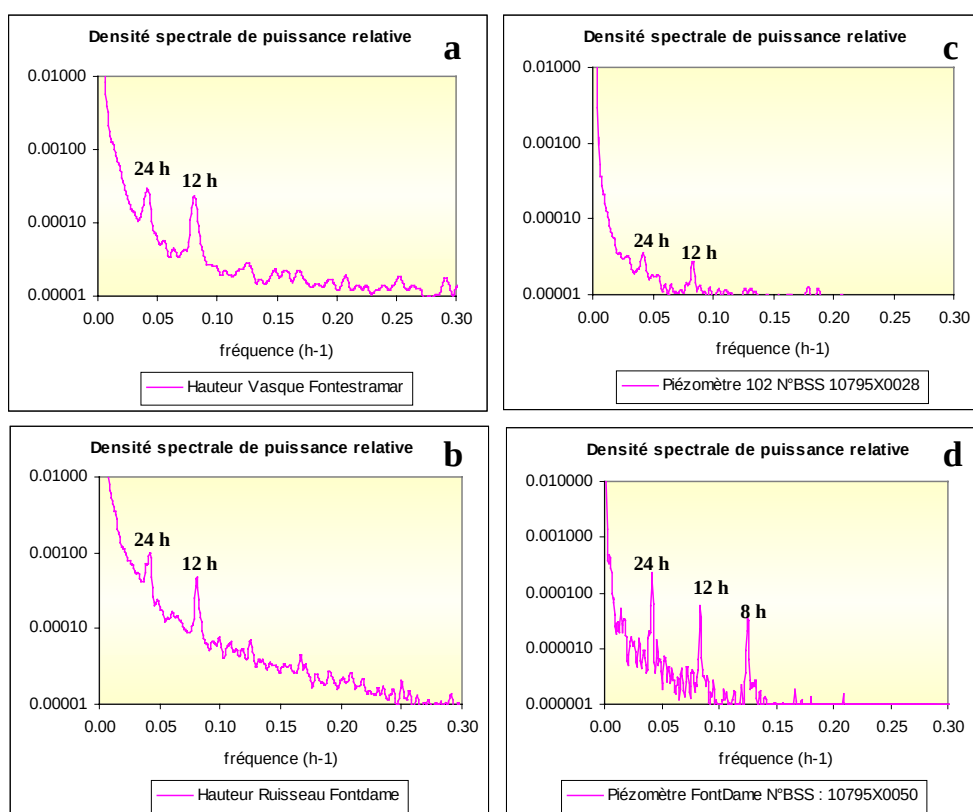


Illustration 34 - Densité spectrale de puissance (spectre simple) des hauteurs d'eau de la source de Font Estramar et de Font Dame et du piézomètre 102 (n° BSS 10795X0028) et du piézomètre de la pisciculture de Font Dame (n° BSS 10795X0050).

⁷ Dérivée d'ordre 1 des chroniques de hauteur d'eau.

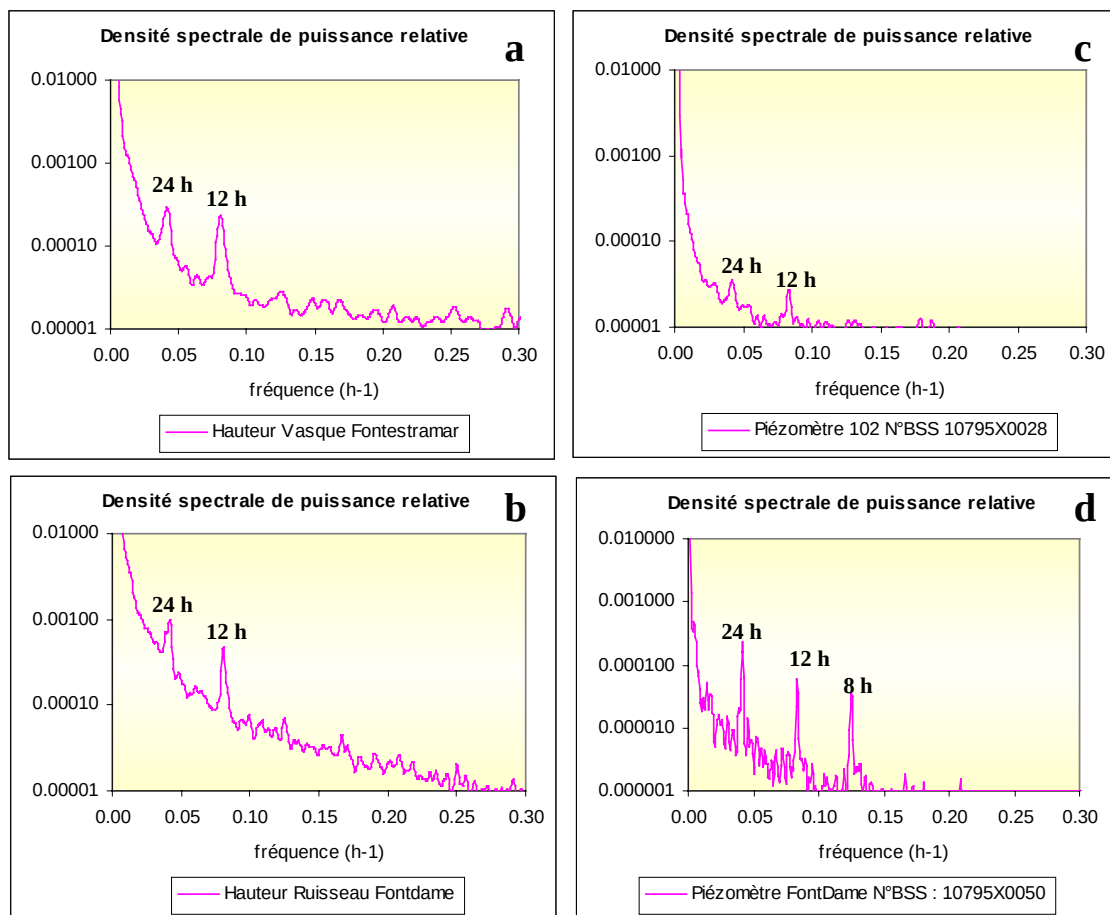


Illustration 35 - Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) des hauteurs d'eau des piézomètres 104, 107, Roboul et du piézomètre de Cases de Pène.

Pour l'aquifère karstique et l'aquifère du Pliocène (29-34 m de profondeur, Piézo FD 10795X0050), la présence de pic à 12 et 24 h indique que les variations piézométriques sont affectées par des phénomènes diurne (24 h) et semi-diurne (12 h).

Pour l'aquifère karstique, les corrélations croisées entre le marnage et les hauteurs d'eau de Font Dame, Font Estramar et du piézomètre 102 sont positives (cf. ill. 31f) ce qui indique que la piézométrie de l'aquifère est influencée par les effets de marée maritime. Pour les hauteurs d'eau de Font Estramar et de Font Dame, l'effet de la marée n'est pas direct compte tenu des valeurs des coefficients de corrélation (0,26 pour le piézomètre 102 et 0,16 pour Font Estramar). L'action de la marée de l'étang sur le ruisseau de Font Dame est bien plus directe et importante (corrélation de 0,72) pour les décalages inférieurs à 24 h. Ce résultat illustre bien la problématique qui se pose pour l'établissement de la courbe de tarage de la source de Font Dame. Le seuil de Font Dame est « changeant » en fonction du niveau de l'étang.

Pour l'aquifère captif du Pliocène au niveau de la pisciculture de Font Dame (29-34 m de profondeur, 10795X0050), nous avons cherché à vérifier si les variations diurnes et

semi-diurnes observées étaient engendrées par les effets de marée terrestre (effets barométriques) compte tenu de la captivité de l'aquifère ou à des effets de marées maritimes (ill. 36a et b).

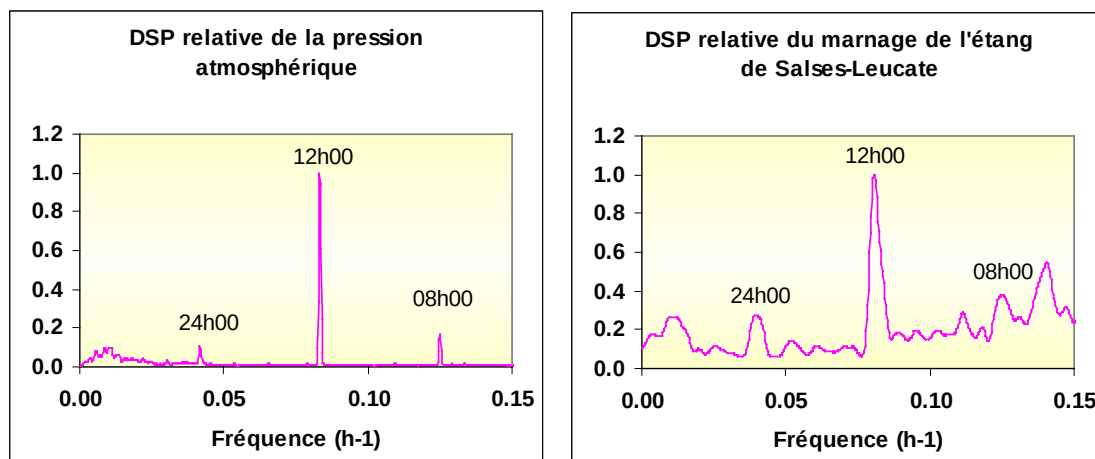


Illustration 36 - Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) de la pression atmosphérique et du marnage de l'étang de Salses Leucate.

L'étude des spectres croisés (pression atmosphérique - niveau piézométrique) indique que les pics à 12 h 00 et 08 h 00 sont liés à la pression atmosphérique compte tenu des valeurs de l'amplitude du carré de la cohérence (ill. 37a). Le pic à 24 h 00 observé sur le spectre simple n'est pas lié à l'effet barométrique compte tenu de la faiblesse de la cohérence (ill. 37a). Pour la fréquence correspondant au pic à 12 h, le gain est proche de 1. L'information barométrique à 12 h 00 est presque entièrement transmise à l'aquifère quasiment sans aucune atténuation (ill. 37b).

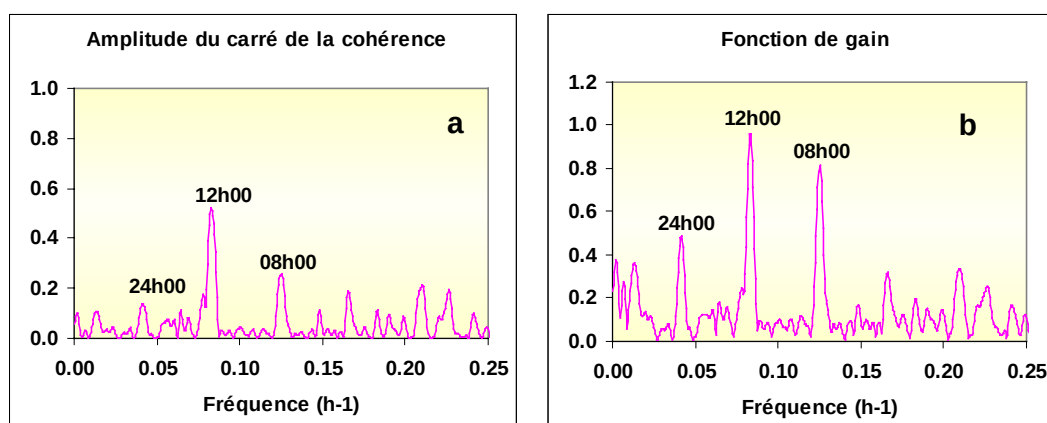


Illustration 37 - Spectres croisés (fonctions de cohérence et de gain) de la pression atmosphérique et du niveau piézométrique du forage de la pisciculture de Font Dame (10795X0050).

Dans un second temps, nous avons cherché à vérifier si les variations diurnes observées pouvaient être également engendrées par les effets de marée maritime compte tenu de la proximité de l'étang de Salses Leucate. L'étude des spectres croisés

(marnage - niveau piézométrique) indique que le pic à 24 h 00 est globalement cohérent à celui du marnage compte tenu de la valeur de l'amplitude du carré de la cohérence ($> 0,2$, ill. 38a). L'absence de cohérence entre le marnage et la piézométrie à la fréquence correspondant au pic de 12 h 00 indique que le marnage n'est pas responsable de la périodicité observée à 12 h 00 sur le spectre simple (ill. 36a).

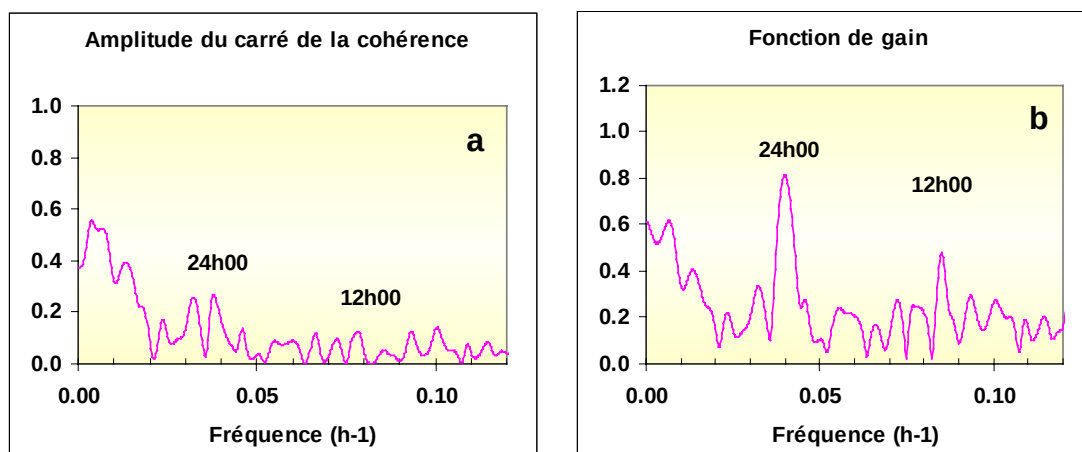


Illustration 38 - Spectres croisés (fonctions de cohérence et de gain) du marnage de l'étang et du niveau piézométrique du forage de la pisciculture de Font Dame (10795X0050).

Pour la fréquence correspondant au pic à 24 h 00, le gain est inférieur à 1 (ill. 38b). La périodicité à 24 h 00 du marnage de l'étang est donc transmise à l'aquifère captif du Pliocène avec une atténuation.

En résumé, la **nappe captive du Pliocène**, entre 29 et 34 m de profondeur au niveau de la pisciculture de Font Dame, est à la fois **soumise aux effets de marée maritime** (pic à 24 h 00) et à **l'effet barométrique** (pics à 12 h 00 et 8 h 00).

2.2.8. Rôle hydrogéologique des pertes de l'Agly et du Verdoble

a) Contexte hydrographique et hydrogéologique

L'Agly se perd au sein des calcaires aptiens au passage du défilé d'Estagel à Cases de Pène. Les études des pertes de l'Agly réalisées conjointement de 1980 à 1986 par BRL et par la DDAF⁸ en vue de la mise en place d'un barrage en amont sur l'Agly, avaient conduit à les localiser exclusivement dans le bief compris entre la cave coopérative d'Estagel et le trou de la Pastère, près du Mas de Jau (zone des fuites de 3 km) et à les estimer au maximum à un débit de 1 m³/s (DDA 1986).

Les autres données disponibles concernent les estimations des débits moyens des pertes calculés entre 1995 et 1999 pour certains paliers de lâchures du barrage de l'Agly (ill. 39, DDAF 66, CB/NB - Agly 2000). Ces estimations indiquent que le débit

⁸ Barrage de Cassagnes-Caramany-Ansignan, Étude des pertes de L'Agly, CNARBRL-DDA, Mai 1986.

moyen des pertes de l'Agly peut être compris entre 0,3 et 1,5 m³/s selon l'importance des débits moyens de l'Agly à Planèzes.

Périodes des lâchers considérées	Débits moyens de l'Agly à Planèzes (m ³ /s)	Débits moyens des pertes de l'Agly (m ³ /s)	Débits moyens des pertes du Verdoble (m ³ /s)
15/06 au 19/06/1995	0,986	0,569	0,229
19/06 au 27/06/1995	2,160	1,060	0,231
27/06 au 04/07/1995	3,300	0,979	0,254
04/07 au 11/07/1995	2,710	0,752	0,266
11/07 au 17/08/1995	1,940	0,471	0,255
17/08 au 29/08/1995	1,290	0,588	0,164
19/07 au 13/09/1996	2,560	0,962	0,337
13/09 au 30/09/1996	1,260	0,604	0,302
25/06 au 18/09/1997	2,170	0,294	0,302
18/09 au 22/09/1997	1,570	0,509	0,565
22/09 au 13/10/1997	0,990	0,537	0,464
13/10 au 16/10/1997	0,825	0,495	0,470
27/05 au 23/06/1998	1,130	0,804	0,376
23/06 au 10/07/1998	2,200	1,148	0,280
10/07 au 08/08/1998	2,480	1,310	0,195
08/08 au 03/09/1998	2,070	1,090	0,174
03/09 au 05/10/1998	1,530	0,868	0,214
05/10 au 12/10/1998	1,040	0,64	0,237
01/06 au 24/06/1999	1,980	0,491	0,613
24/06 au 06/07/1999	1,830	0,846	0,575
06/07 au 03/08/1999	2,320	0,631	0,378
03/08 au 15/08/1999	2,140	0,455	0,401
15/08 au 01/09/1999	1,800	0,804	0,231
01/09 au 01/10/1999	1,380	0,795	0,178
01/10 au 16/10/1999	0,904	0,718	0,186
16/10 au 25/10/1999	0,629	0,456	0,186
25/10 au 01/11/1999	0,463	0,301	0,149

(en **gras**, valeurs jugées significatives en raison de l'absence de contribution du Maury et du Verdoble)

Illustration 39 - Estimation des débits moyens des pertes de l'Agly et du Verdoble.

Le Verdoble se perd lors de son passage dans le méandre des Maures au sein des calcaires du Jurassique. Serrat (2000) a estimé les pertes à 0,706 m³/s lors des jaugeages effectués le 14/05/1999. La valeur moyenne pour l'année 1996 a été évaluée à 0,622 m³/s.

Les données de la DDAF indiquent que le débit moyen des pertes du Verdoble est compris entre 0,15 et 0,47 m³/s lors des périodes utilisées pour estimer les débits des pertes de l'Agly (ill. 39).

Serrat (2000) estime la limite supérieure du débit des pertes du Verdoble aux alentours de 0,7 et 0,8 m³/s. Les jaugeages ponctuels effectués dans le cadre de cette étude indiquent au contraire que le débit des pertes du Verdoble peut être supérieur à 2 m³/s (ill. 40).

Date	Q amont (l/s)	Q aval (l/s)	Q pertes (l/s)
28/05/2001	717	0	717
22/06/2001	215	0	215
18/07/2001	172	0	172
18/07/2001	172	0	172
23/07/2001	161	0	161
23/07/2001	114	0	114
18/10/2001	113	0	113
25/10/2001	69	0	69
23/01/2002	134	0	134
24/04/2002	2 565	467	2 098
10/05/2002	2 005	513	1 492
26/06/2002	333	0	333
10/10/2002	427	0	427
08/11/2002	196	0	196
16/01/2003	225	0	225
24/02/2003	3 475	1 474	2 001
12/06/2003	261	0	261
31/07/2003	31	0	31
17/09/2003	51	0	51

Illustration 40 - Estimation des débits instantanés des pertes du Verdoube.

b) Procédure de calcul des débits journaliers

Afin de mieux connaître le fonctionnement du système karstique notamment à l'aide du logiciel TEMPO (cf. § 2.4.), nous avons été amenés à estimer les flux d'eau journaliers qui contribuent à l'alimentation du karst au niveau des pertes.

Les débits journaliers des pertes de l'Agly et du Verdoube ont été estimés pour la période 01/01/1997 au 31/03/2002. Nous disposons des débits journaliers aux quatre stations hydrométriques de la DDAF (Planèze, canal de Latour, Tautavel et Mas de Jau – cf. ill. 41). Entre la station de Planèze à l'amont et la station de Mas de Jau à l'aval, le cours aérien de l'Agly subit les modifications suivantes :

- prise du canal de Latour de France dont le débit journalier est connu (station hydrométrique de la DDAF) ;
- confluent du Maury : cet affluent coule presque entièrement sur les marnes imperméables de l'Albien, mais à son entrée dans la plaine d'Estagel, il disparaît entièrement à l'étiage sans que l'on puisse préciser s'il s'agit d'un phénomène karstique ou d'une infiltration dans les alluvions (BRL, 1970). Il n'y a pas de station hydrométrique sur le Maury ; nous disposons seulement des valeurs de quelques jaugeages. Le débit du Maury a été estimé à partir du rapport : débit spécifique du Maury/débit spécifique du Verdoube à Tautavel [Maury 6,0 l/s/km² au Mas Cumps, Verdoube 9,9 l/s/km² à Tautavel (Faillat, 1972)] ;
- pertes de l'Agly dans le bief compris entre la cave coopérative d'Estagel et le trou de la Pastère ;
- confluence du Verdoube : en amont de la confluence avec l'Agly le Verdoube se perd en totalité à l'étiage dans les calcaires du Jurassique. Nous disposons des débits journaliers du Verdoube à Tautavel (station hydrométrique de la DDAF) ;
- station hydrométrique de la DDAF à Mas de Jau ;

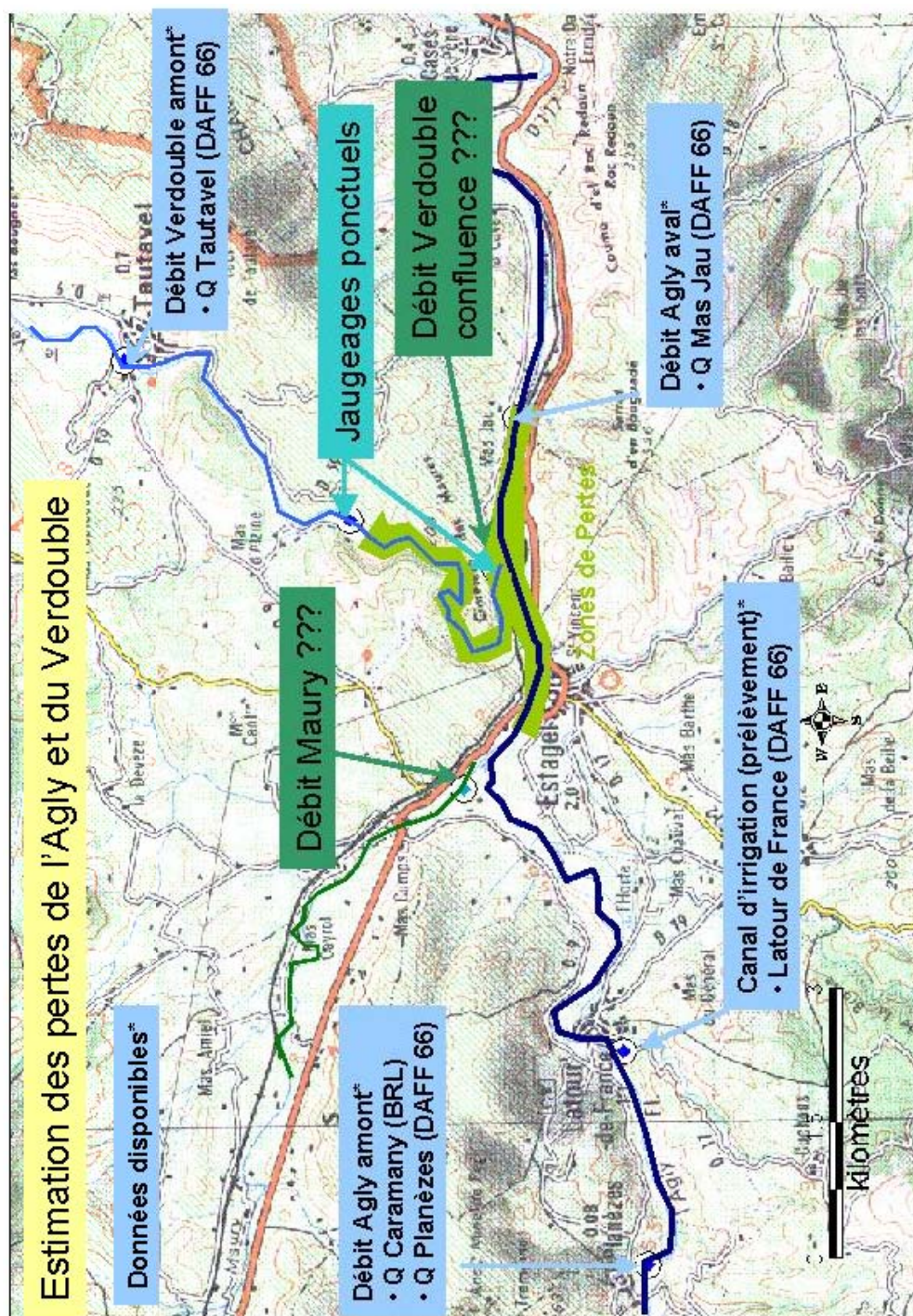


Illustration 41 - Position des points de suivi du réseau hydrographique et des zones des pertes (fonds scannés 1/100 000 © copyright IGN Paris 1999, autorisation n° 90-9068).

- la Pastère : il s'agit d'un puits naturel de plusieurs mètres de diamètre et de plusieurs mètres de profondeur, creusé dans les calcaires du lit de l'Agly. Nous avons négligé toutes pertes et/ou éventuels extravasements en aval de la station de Mas de Jau. L'étude de la DDA (1986) permet de suggérer que « les pertes observées à l'aval du Mas de Jau paraissent proportionnellement faibles ».

Les débits des pertes du Verdouble et de l'Agly sont estimés à partir de bilan d'eau du réseau hydrographique (cf. ill. 41) :

- pertes du Verdouble : $Q_{\text{pertes}} = (Q_{\text{Verdoble amont}} - Q_{\text{Verdoble confluence}})$;
- pertes de l'Agly : $Q_{\text{pertes}} = (Q_{\text{Agly amont}} + Q_{\text{Maury}} + Q_{\text{Verdoble confluence}}) - (Q_{\text{Agly aval}} + Q_{\text{Canal}})$.

Pour estimer les flux d'eau journaliers absorbés par les pertes à partir des suivis hydrométriques des quatre stations de la DDAF (cf. ill. 41), il convient de faire plusieurs hypothèses sur le fonctionnement du système.

c) Hypothèses pour l'estimation des pertes du Verdouble

Pour le Verdouble, le débit journalier à la confluence avec l'Agly n'est pas connu. Au cours du suivi ponctuel, 19 jaugeages différentiels ont été réalisés sur le Verdouble entre mai 2001 et septembre 2003, au niveau du mas d'Alzine (Verdoble amont) et à l'aval des gorges (Verdoble aval des pertes) au niveau du pont de la route de liaison entre Estagel et Mas de Jau. Ce suivi permet de montrer que le débit des pertes est extrêmement variable au cours du temps (valeurs ponctuelles comprises entre 30 et 2 100 l/s, ill. 42). Le débit des pertes est fonction du débit amont et de l'état hydrogéologique du karst au niveau de la zone d'absorption des pertes.

Date	Q amont (l/s)	Q aval (l/s)	Q pertes (l/s)
28/05/01	717	0	717
22/06/01	215	0	215
18/07/01	172	0	172
18/07/01	172	0	172
23/07/01	114	0	114
23/07/01	161	0	161
18/10/01	113	0	113
25/10/01	69	0	69
23/01/02	134	0	134
24/04/02	2565	467	2098
10/05/02	2005	513	1492
26/06/02	333	0	333
10/10/02	427	0	427
08/11/02	196	0	196
16/01/03	225	0	225
24/02/03	3475	1474	2001
12/06/03	261	0	261
31/07/03	31	0	31
17/09/03	51	0	51

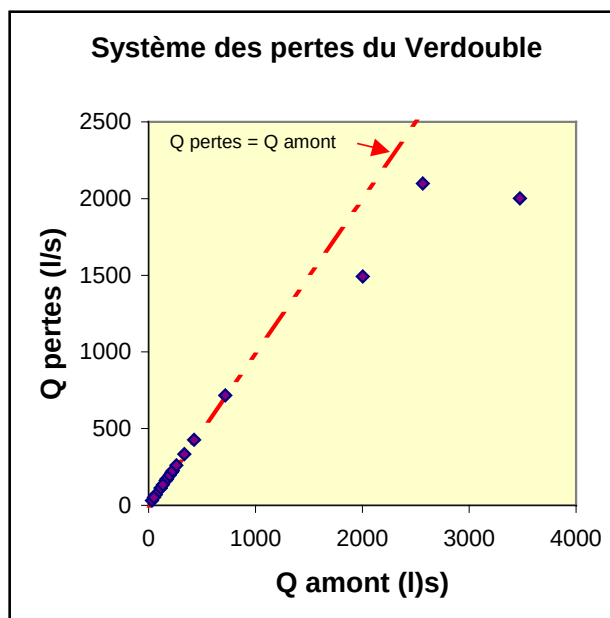


Illustration 42 - Jaugeages différentiels sur le Verdouble, en amont et aval de la zone des pertes des gorges du Verdouble.

Ce type de comportement a déjà été observé sur d'autres systèmes karstiques et notamment au niveau des gorges de la Buèges dans l'Hérault (Ladouche *et al.*, 2002). Cette étude a montré que la capacité d'absorption évolue suivant une hystérésis au cours des crues et qu'elle est bornée à la capacité maximale d'absorption (4 000 l/s pour le système de la Buèges, cf. ill. 43) à la capacité minimale d'absorption (300 l/s pour le système de la Buèges).

Les capacités maximale et minimale du karst évoluent au cours du cycle en fonction de l'état de « saturation » du karst. En d'autres termes, les premières crues d'automne présentent des capacités maximale et minimale élevées. Lors d'une succession de crues rapprochées dans le temps, les capacités d'absorption (maximale et minimale) diminuent (ill. 43).

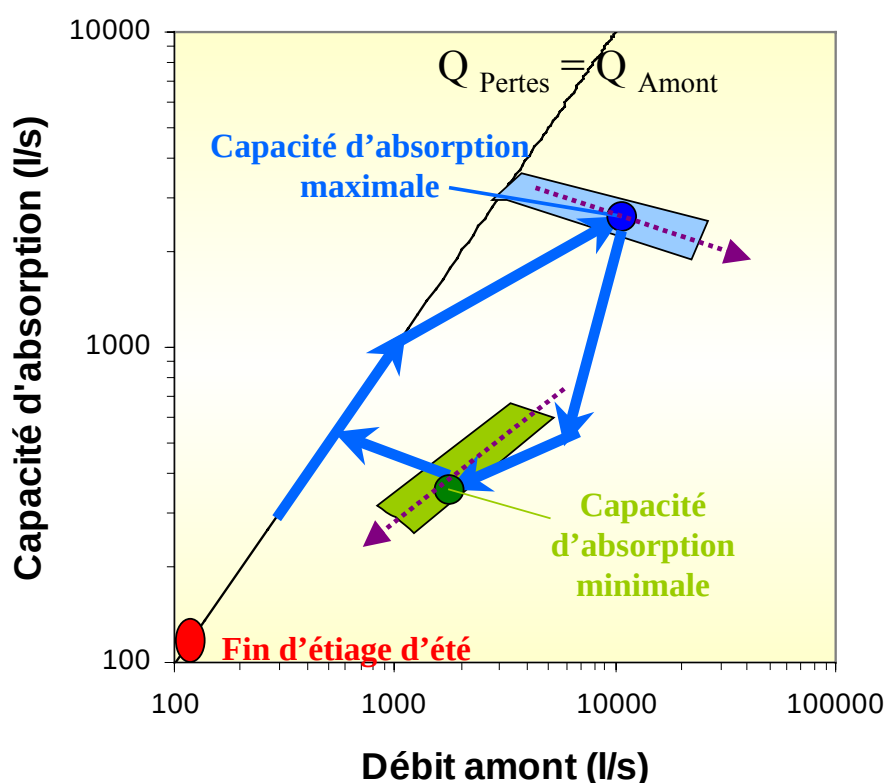


Illustration 43 - Illustration du fonctionnement hydrogéologique d'une zone de pertes (cas des pertes de la Buèges, Hérault).

L'étude détaillée du comportement hydrogéologique des pertes du Verdoube ne peut pas être menée faute d'un suivi hydrologique à l'aval des pertes. Pour estimer le débit journalier des pertes à partir de la chronique des débits journaliers de Tautavel (DAFF 66), plusieurs hypothèses simplificatrices sur le fonctionnement des pertes du Verdoube peuvent être proposées :

- **hypothèse 1** : les débits des pertes sont reliés aux débits amont par une relation puissance (cf. ill. 1, ann. 2) : $Q_{\text{pertes}} = 3,56 \cdot (Q_{\text{amont}})^{0,791}$, $R^2 = 0,975$;

- **hypothèse 2** : la capacité maximale d'absorption du karst au niveau des pertes du Verdouble est de 3 000 l/s.

L'évolution temporelle des débits calculés (débits des pertes et de confluence avec l'Agly) pour la période 2001-2003 est présentée sur l'illustration 4 en annexe. Les calculs ont été effectués pour la période du 01/01/1997 au 19/08/2003. Les valeurs observées (jaugeages ponctuels) sont relativement bien restitués. **Le débit moyen des pertes du Verdouble pour cette période est de 706 l/s.** Cette valeur est similaire aux estimations faites par Serrat (2000).

d) Hypothèses pour l'estimation des pertes de l'Agly

La procédure utilisée précédemment pour estimer le débit journalier des pertes du Verdouble permet également d'estimer le débit du Verdouble à la confluence avec l'Agly. Il convient maintenant d'estimer le débit du Maury afin d'évaluer le débit des pertes de l'Agly.

Hypothèse 1 : le débit spécifique (l/s/km²) du Maury est identique à celui du Verdouble à Tautavel. Connaissant la surface des deux bassins hydrographiques (SBV Verdouble = 305 km² ; SBV Maury = 84 km²), on détermine le facteur de proportionnalité qui lie le débit du Verdouble à Tautavel au débit du Maury :

$$Q \text{ Maury estimé} = 0,28 * Q(\text{Verdouble à Tautavel}).$$

Hypothèse 2 : la capacité maximale d'absorption du karst au niveau des pertes de l'Agly est semblable à celle du Verdouble (3 000 l/s). L'évolution temporelle des débits des pertes calculés est présentée à l'illustration 44.

La procédure de calcul utilisée permet de restituer de manière satisfaisante les débits moyens des pertes de l'Agly estimés par la DDAF. Cette comparaison permet une validation *a posteriori* de la procédure de calcul mis en œuvre.

Le débit moyen des pertes de l'Agly pour la période du 01/02/1997 au 19/08/2003 est de 810 l/s. Le débit moyen cumulé des pertes de l'Agly et du Verdouble est donc de l'ordre de 1 500 l/s sur la période 1997-2003.

L'illustration 45 permet de faire une comparaison entre les débits des pertes de l'Agly et du Verdouble ainsi estimés. Une différence essentielle caractérise les deux chroniques lors des périodes estivales. On montre que le débit des pertes de l'Agly est très nettement supérieur à celui du Verdouble en raison du soutien des débits de l'Agly par le barrage de Caramany (ill. 46).

En raison du soutien par le barrage, le débit des pertes lors des périodes estivales se trouve artificiellement augmenté, ce qui d'un point de vue hydrogéologique a une répercussion sur la recharge et vraisemblablement sur la charge hydraulique de l'aquifère karstique. La réalisation d'un piézomètre au niveau de la zone des pertes permettrait de mieux comprendre la fonction d'entrée que constituent les pertes de l'Agly et du Verdouble dans le fonctionnement global du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.

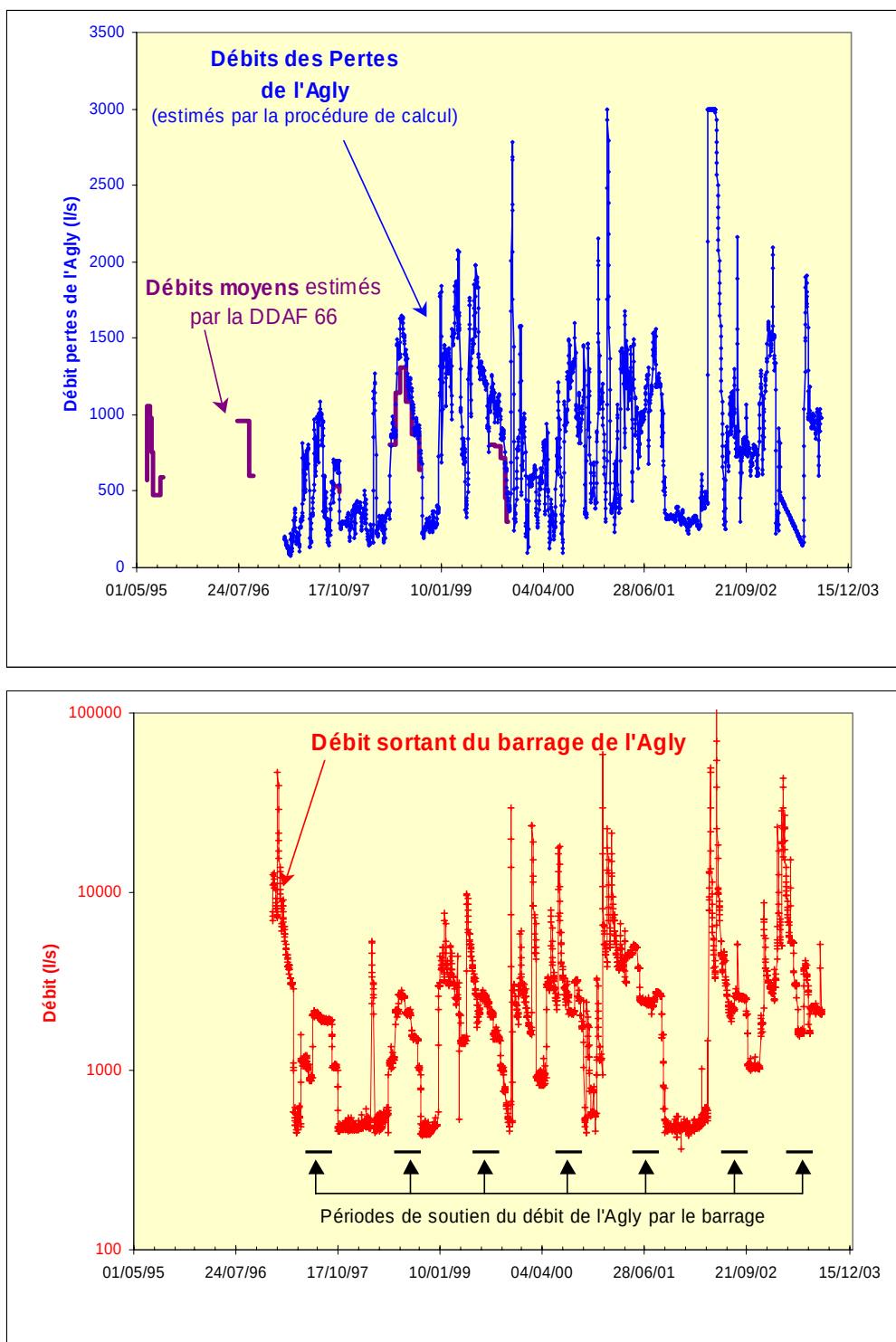


Illustration 44 - Évolution temporelle des débits des pertes de l'Agly et des débits sortant du barrage de l'Agly.

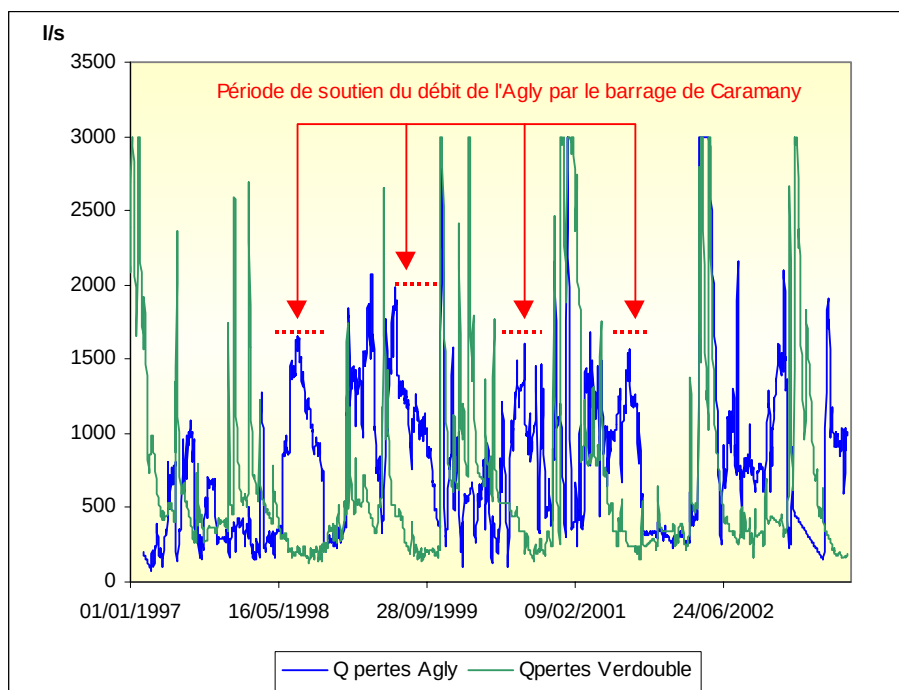


Illustration 45 - Évolution temporelle des débits des pertes de l'Agly et du Verdoble.

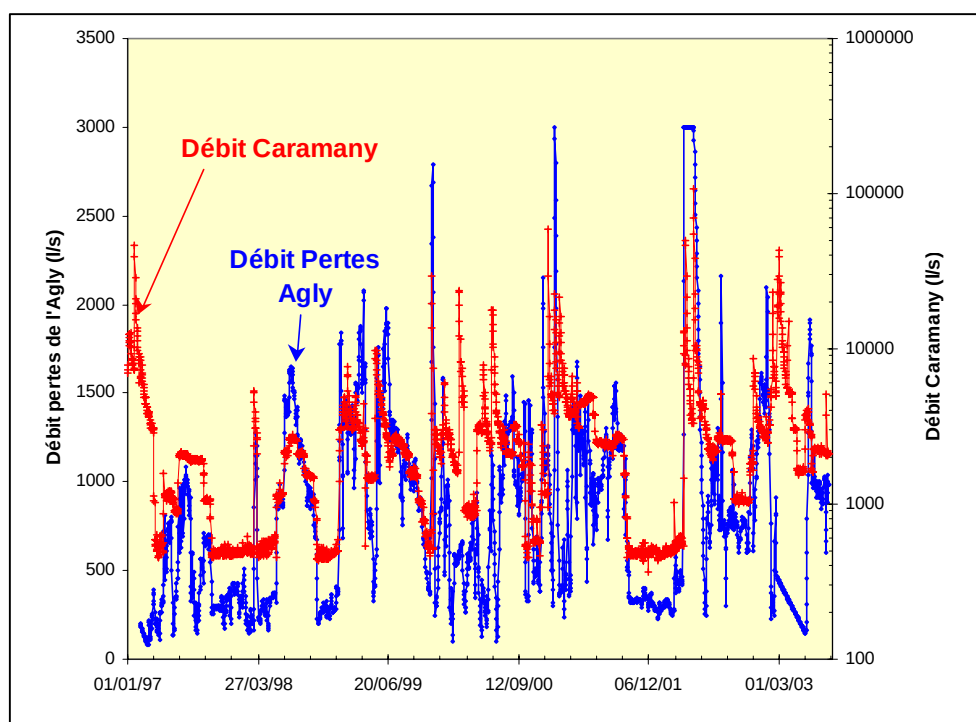


Illustration 46 - Évolution temporelle de débits des pertes et du débit de l'Agly à Caramany (restitués par le barrage).

2.2.9. Synthèse du fonctionnement hydrogéologique

Le système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly est un système karstique complexe de grande taille, possédant des sous-systèmes : au niveau du flanc sud avec Cases de Pène-Baixas et sur le flanc nord avec Font Dame notamment. Les écoulements apparaissent comme nettement hiérarchisés. Le système semble comporter un réseau karstique de type anastomosé, avec néanmoins deux directions prédominantes N45°-75° et N105°. Les analyses des chroniques piézométriques montrent des différences de comportement selon que le point d'observation est situé à proximité ou à distance de drains du réseau, aussi bien sur le flanc nord que sur le flanc sud du synclinal du Bas-Agly.

La superficie de l'impluvium des calcaires affleurants permettant la recharge par les précipitations est d'environ 165 km². Ce bassin est délimité à partir des connaissances géologiques et des connexions hydrauliques prouvées ou supposées par des essais de traçages artificiels.

La surface apparente du bassin d'alimentation, estimée par bilan hydrologique -sur la base du débit moyen écoulé (2 565 l/s) aux deux principaux exutoires (Font Dame et Font Estramar) sur la période 1998-2003, est supérieure à 240 km². En considérant des débits de fuite vers le Plio-Quaternaire (400 l/s maximum) et les débits d'autres sources (Fort de Salses : 20 l/s ; Fitou et Malpas : 15 l/s), la superficie du bassin d'alimentation apparaît nécessairement supérieure à 240 km².

L'estimation de la superficie du bassin d'alimentation par les calculs de bilan hydrologique est fortement limitée en raison, entre autre, de l'incertitude sur la détermination de la pluie efficace. Cette superficie sera affinée ultérieurement lors de la modélisation globale des relations pluie-débit à l'aide de TEMPO (cf. § 2.4.). La comparaison de la surface de l'impluvium des calcaires affleurants (165 km²) et de la superficie apparente du bassin d'alimentation (> 240 km²) indique qu'une grande part des écoulements provient de l'alimentation par les pertes qui se produisent sur les cours d'eau de l'Agly et du Verdoble. Le bassin d'alimentation du système karstique, système binaire, intègre donc les surfaces d'alimentation contributives des pertes.

L'estimation des débits moyens des pertes sur la période 1997-2003 est de l'ordre de 1 500 l/s (810 l/s pour les pertes de l'Agly et 706 l/s pour les pertes du Verdoble). En période estivale, les pertes de l'Agly sont très nettement supérieures à celles du Verdoble ; cette différence est expliquée par le soutien des débits de l'Agly par le barrage de l'Agly. Le comportement détaillé des pertes dans le fonctionnement hydrogéologique du système karstique sera abordé ultérieurement (cf. § 2.4.). Les analyses corrélatrice et spectrale ont néanmoins permis de mettre en évidence une modification des conditions d'entrée, après la mise en service du barrage, notamment au niveau des pertes de l'Agly.

L'effet de la modification est essentiellement perceptible à moyen terme (90 et 30 j). **La gestion du barrage de l'Agly (soutien des débits de l'Agly en étiage depuis 1996) a entraîné une modification des conditions naturelles d'alimentation du karst.**

D'un point de vue hydrogéologique, le soutien des débits de l'Agly par le barrage a une répercussion sur la recharge (augmentation), très vraisemblablement sur la charge hydraulique de l'aquifère karstique et, d'une manière plus générale, sur le transfert d'eau au sein du système karstique. **La réalisation de piézomètres au niveau des zones des pertes permettrait de mieux comprendre la fonction d'entrée que constituent les pertes de l'Agly et du Verdoube dans le fonctionnement global du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.**

Les caractéristiques fonctionnelles et les réserves mobilisables du système karstique ont pu être évaluées. Les données disponibles de la source de Font Estramar ont permis d'étudier, par ailleurs, le comportement à long terme du système karstique (plusieurs cycles hydrologiques).

La zone noyée du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly apparaît bien drainée et bien connectée, d'un point de vue hydraulique d'une part, **à l'épikarst qui constitue le siège de l'infiltration des pluies**, et **d'autre part à la zone d'alimentation par les pertes**. Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 35 h après un épisode pluvieux. Ce faible décalage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés. **La réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de 20 jours** environ (durée de la recharge) pour la source de **Font Dame contre 40 jours** environ pour la source de **Font Estramar**.

L'analyse à long terme de l'hydrogramme de Font Estramar montre que le système karstique a un **comportement non homogène vis-à-vis du stockage** (recharge et décharge des réserves en fonction des conditions hydroclimatiques). Le système présente pour certaines périodes, une tendance à déstocker de l'eau à l'échelle annuelle (période 1984-1996), ou au contraire à stocker de l'eau (période 1971-1982). Pour la période 1971-1982 le volume de régulation du système a été estimé à 68 millions de m³, ce qui constitue une valeur importante. Une valeur similaire de 67 millions de m³ a été estimée pour la période 1984-1986.

Dans l'état actuel des connaissances, **la taille du réservoir** peut être estimée à **70 millions de m³** environ. Le volume dynamique déduit de l'analyse des courbes de récession est estimé à 25 (± 6) millions de m³ (variable d'un cycle à l'autre). Le rapport des deux volumes estimés (de l'ordre de 0,36) donne une bonne image du pouvoir régulateur du système.

La période 1997-2003 contraste fortement avec les périodes précédentes (1971-1982 ; 1984-1996), le volume de régulation estimé est nettement plus faible, de l'ordre de 29 millions de m³ seulement. Le caractère nettement plus non linéaire du système mis en évidence pour la période 1997-2003 semble également se traduire par un volume de régulation plus faible. Depuis la mise en eau du barrage de l'Agly, le soutien des débits de l'Agly lors des périodes estivales notamment, a modifié les conditions d'alimentation du karst au niveau des pertes.

L'écart entre les volumes minimaux et maximaux est réduit : l'état des réserves du karst s'approche de leur valeur maximale. L'effet du soutien de l'Agly par le barrage se traduit donc par un apport d'eau plus important au système. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus par les autres méthodes. Ces résultats, établis pour cinq cycles hydrologiques, demanderont à être vérifiés au cours de la seconde phase du projet.

S'il venait à se confirmer, le changement de comportement du système depuis 1997 (système globalement davantage non linéaire, volume de régulation plus faible en raison de l'augmentation de l'alimentation par les pertes) pourrait être une conséquence directe de la mise en eau du barrage de l'Agly et du soutien du débit de l'Agly au cours des périodes estivales.

Le **comportement hydrodynamique du système karstique est différent en période de crue et d'étiage**. Lors des périodes de crue, **le système karstique** pris dans sa globalité **devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux lorsque le débit cumulé est supérieur à 3 000 l/s**. La rupture observée sur les courbes de débits classés indique que les propriétés hydrauliques du système changent.

Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (alimentation plus importante par les pertes) et également des conditions de sortie des eaux. Le comportement observé dénote donc la participation d'eau en provenance d'un autre système.

Ce comportement est cohérent compte tenu de la nature binaire de ce système karstique (apport par les pertes de l'Agly et du Verdoube en plus de la recharge par les pluies efficaces).

En période de crue, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées. Ce résultat a vraisemblablement deux origines, d'une part, la capacité de stockage du karst tend vers son maximum et celui-ci ne peut pas absorber plus d'eau, d'autre part, en période de crue, le karst mis en charge utilise un réseau plus transmissif pour évacuer les eaux.

Les **formations du Plio-Quaternaire**, au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources, **jouent un rôle important dans la dynamique des écoulements du système karstique**. En effet, les formations du Plio-Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. Les **sources de Font Estramar** et de **Font Dame** apparaissent ainsi comme **des sources de trop-plein pour le système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly**.

En période d'étiage, les niveaux d'eau et les débits du système karstique sont influencés à court terme par les effets de marée maritime, notamment à proximité immédiate des sources de trop-plein (Font Dame et Font Estramar). Les résultats indiquent donc qu'une connexion hydraulique existe entre le système karstique et l'étang de Salses Leucate.

2.3. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOCHIMIQUE DU SYSTÈME KARSTIQUE PAR LE SUIVI DE CRUE

L'approche hydrochimique est un complément indispensable aux études hydrogéologiques. La notion de traçage naturel, à partir de l'analyse chimique des eaux des aquifères et de sa variation tant dans le temps que dans l'espace, a démontré, depuis plusieurs dizaines d'années, sa pertinence pour l'étude des hydrosystèmes complexes et en particulier les aquifères karstiques.

L'approche hydrogéochimique est particulièrement bien adaptée pour mettre en évidence les phénomènes de mélange et de participation de différents réservoirs évoluant au cours du cycle hydrologique.

Afin d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement hydrogéologique du système karstique d'Opoul, un suivi géochimique détaillé a été réalisé au niveau des sources de Font Dame et Font Estramar au cours de l'année 2002. Quatre crues ont été échantillonnées, soit un total de 27 échantillons pour la source de Font Estramar et un total de 17 échantillons pour la source de Font Dame (ill. 47).

Outre ces suivis de crue, des échantillons d'eau ont été prélevés et analysés au niveau des sites suivants : source du lavoir à Salses-le-Château, piézomètres 102, 104, 107 et Roboul, forage de Cases de Pène, eaux de l'Agly et du Verdoube au niveau des zones des pertes.

Les problématiques qui ont été abordées à l'aide de l'approche géochimique sont les suivantes :

- Origine de la salinité des sources de Font Dame et de Font Estramar ?
- Les formations du Trias jouent-elles un rôle dans cette salinité ?
- Rôle et impact des pertes de l'Agly et du Verdoube dans le fonctionnement ?
- Rôle joué par l'épikarst ?

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux résultats des suivis physico-chimiques (conductivité et température) des sources de Font Estramar et Font Dame.

2.3.1. Suivis temporels de la conductivité de la température et de la minéralisation de l'eau des sources de Font Estramar et Font Dame

a) Source de Font Estramar

Les évolutions de la température et de la conductivité de l'eau de Font Estramar montrent des tendances similaires et, elles sont corrélées négativement au débit de la source. Aussi, à une augmentation de débit, correspond généralement une diminution de la température et de la conductivité des eaux de la source et inversement. On observe que le minimum de conductivité et de température des eaux se produit après le pic de crue.

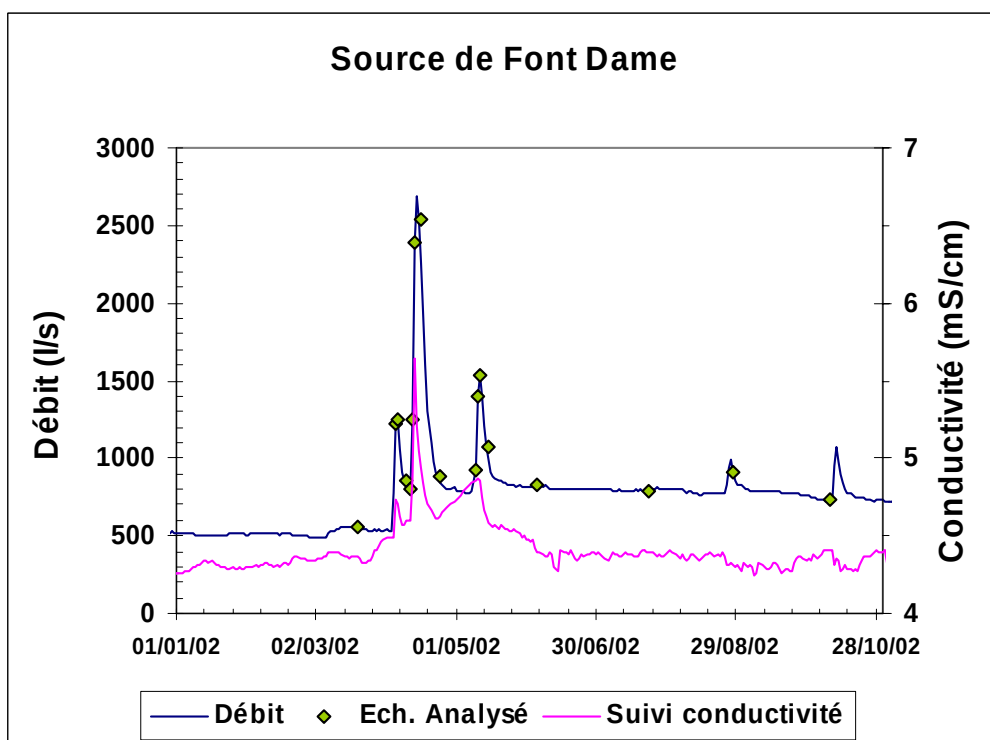
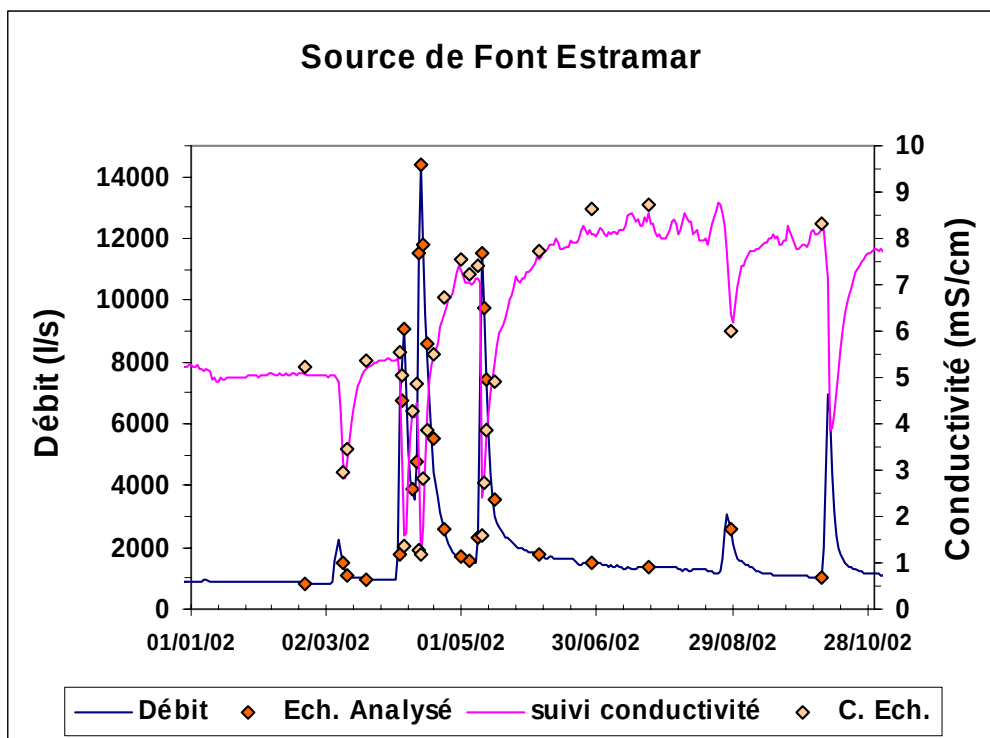


Illustration 47 - Évolution des débits et de la conductivité électrique des eaux des sources de Font Estramar et Font Dame lors du suivi géochimique 2002. La position temporelle des échantillons d'eau analysés est également reportée.

L'évolution générale de la conductivité et de la température lors des crues peut être expliquée par le phénomène de mélange avec une eau moins minéralisée et plus froide.

On montre par ailleurs que les petites crues ($Q < 3\,000\text{ l/s}$) ne se traduisent pas par une diminution de la température des eaux de la source, contrairement à la conductivité (ill. 48).

Les gammes de variation des températures et des conductivités sont importantes (ill. 48). Les paramètres moyens enregistrés depuis la mise en place de la station de mesure (18/12/2001) sont les suivants⁹ :

- **Conductivité moyenne = 6,78 mS/cm ($2\sigma = 1,36\text{ mS/cm}$)** ; min = 1,11 mS/cm ; maxi = 8,77 mS/cm ($\Delta C = 7,66\text{ mS/cm}$).
- **Température moyenne = 18,0 °C ($2\sigma = 0,5$)** ; mini = 15,6 °C ; maxi = 18,6 °C ($\Delta T = 3\text{ °C}$). La température moyenne élevée de la source par rapport aux valeurs attendues (autour de 15,5 °C) dénote la participation d'une composante thermale (profonde).

L'évolution temporelle de la conductivité de la source de Font Estramar permet d'illustrer le comportement complexe du système karstique.

Deux types de réponse sont observés. La première, à court terme, comme on l'a souligné précédemment (échelle de la crue soit de quelques jours) se manifeste par une dilution par des eaux peu minéralisées et globalement plus froides (l'essentiel des crues se produisant à une période de l'année (automne, hiver, printemps) où les eaux de recharge sont plus froides que celles de l'aquifère). La seconde est observée à long terme et se traduit par une augmentation significative de la conductivité électrique et de la température des eaux de la source (ill. 48).

Ce phénomène s'observe très nettement en 2002 et 2003 et intervient plusieurs semaines après les épisodes de crues majeures des périodes printanières. Les évolutions observées suggèrent donc une augmentation relative de la contribution minéralisée, d'origine vraisemblablement profonde puisque les températures de l'eau de la source semblent également augmenter lors de ces périodes.

Les concentrations en chlorure, sodium, potassium, magnésium et dans une moindre mesure calcium et sulfate sont très bien corrélées à la conductivité électrique (ill. 49). Lors des périodes de crue, le faciès chimique des eaux de type chloruré sodique évolue vers un faciès de type chloruré calcique (fig. 1, ann.3). Les teneurs moyennes et extrêmes des éléments chimiques sont présentées dans le tableau 1 de l'annexe 3. La teneur moyenne en chlorure des eaux de la source de Font Estramar est de 1 372 g/l.

⁹ Période d'observation du 18/12/2001 au 07/10/2003.

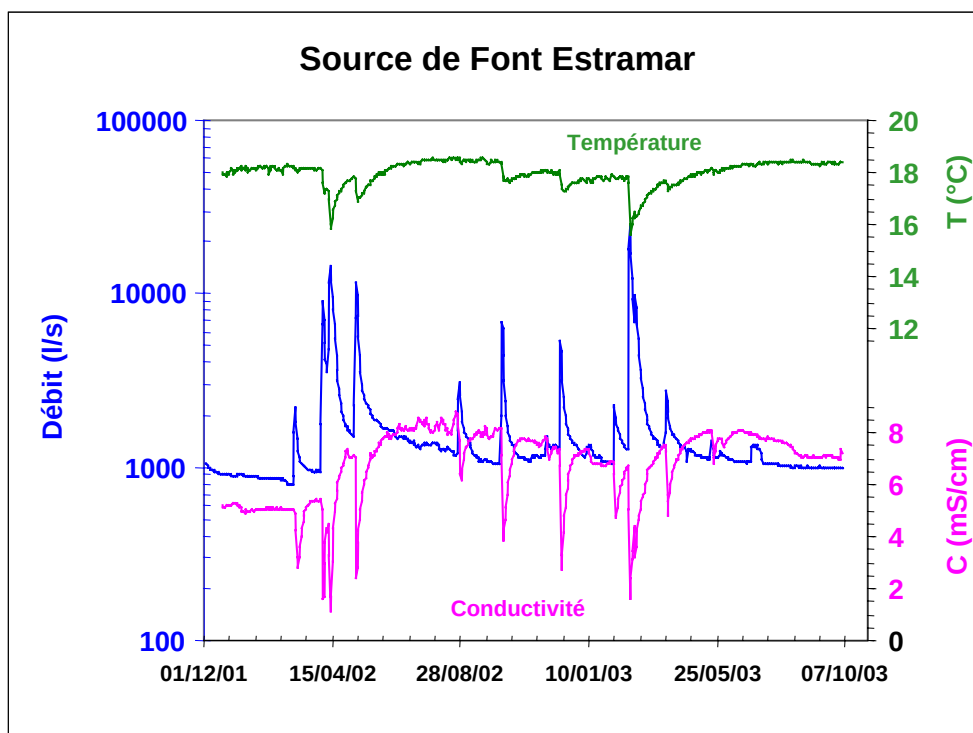


Illustration 48 - Évolution de la conductivité, de la température et du débit de la source de Font Estramar depuis le 18 décembre 2001.

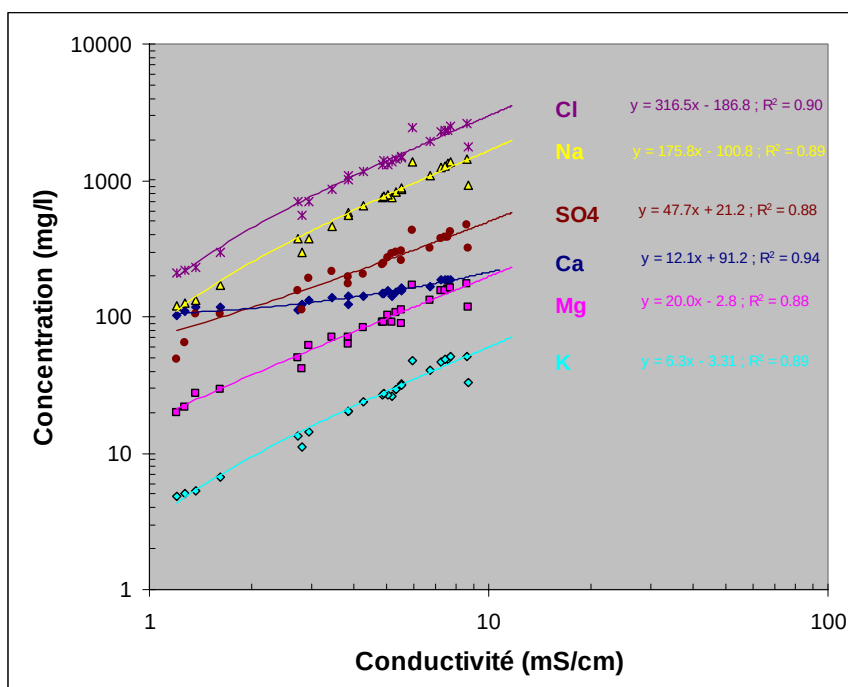


Illustration 49 - Relation concentrations versus conductivité dans les eaux de Font Estramar.

b) Source de Font Dame

L'évolution de la température et de la conductivité de l'eau de la source de Font Dame présente un comportement différent de celui de la source de Font Estramar. Les gammes de variation des températures et des conductivités de la source sont nettement plus faibles :

- **Conductivité moyenne = 4,34 mS/cm ($2\sigma = 0,17$ mS/cm)** ; min = 4,03 mS/cm ; maxi = 5,64 mS/cm ($\Delta C = 1,61$ mS/cm contre $\Delta C = 7,66$ mS/cm pour Font Estramar).
- **Température moyenne = 17,3 °C ($2\sigma = 0,2$)** ; mini = 16,5 °C ; maxi = 17,7 °C ($\Delta T = 1,2$ °C contre $\Delta T = 3$ °C pour Font Estramar). La température moyenne élevée de la source par rapport aux valeurs attendues (autour de 15,4 °C, moyenne 1946-2000, Météo France) dénote la participation d'une composante thermique (profonde).

L'autre différence qui caractérise la source Font Dame par rapport à Font Estramar est que la conductivité apparaît corrélée positivement au débit de la source lors des crues importantes. À une augmentation importante de débit, correspond une augmentation de la conductivité des eaux de la source (ill. 50). L'évolution de la conductivité de la source de Font Dame lors des crues n'est donc pas à rattacher à celle mesurée dans le karst au niveau du piézomètre 102 ou à Font Estramar (diminution). Pour expliquer l'augmentation de la conductivité observée à Font Dame, il faut invoquer le processus d'effet piston qui chasse du système une eau plus minéralisée pour expliquer la réponse de la source de Font Dame.

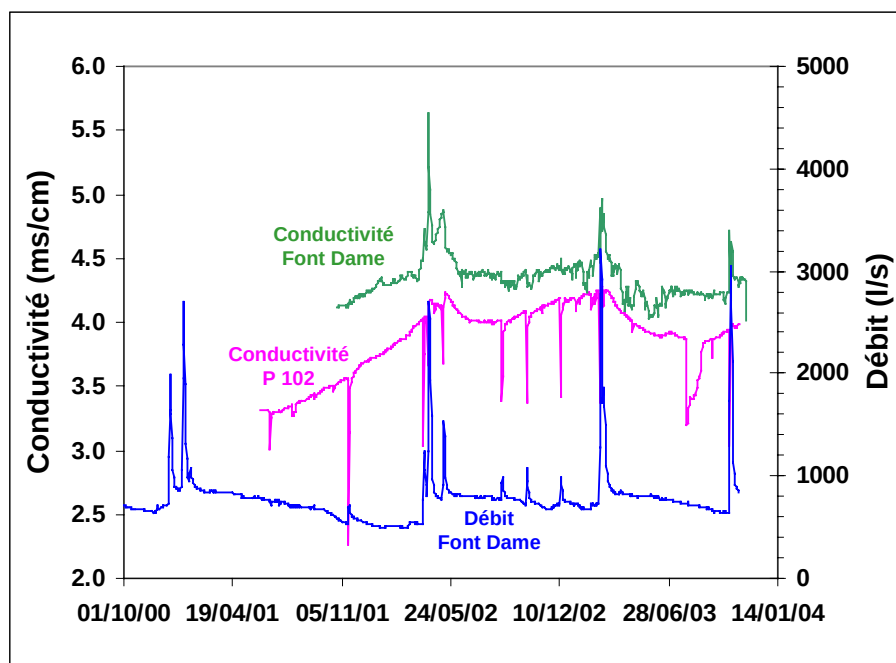


Illustration 50 - Évolutions temporelles de la conductivité électrique des eaux du ruisseau de Font Dame, du piézomètre 102, et du débit de Font Dame.

Les concentrations en chlorure, sodium, sulfate et dans une moindre mesure potassium et magnésium apparaissent globalement bien corrélées à la conductivité électrique (ill. 51). Lors des périodes de crue, le faciès chimique des eaux évolue peu et demeure de type chloruré sodique (fig. 2, ann. 3). Les teneurs moyennes et extrêmes des éléments chimiques mesurés sont présentés dans le tableau 2 de l'annexe 3. La teneur moyenne en chlorure des eaux de la source de Font Dame est de 1 219 mg/l.

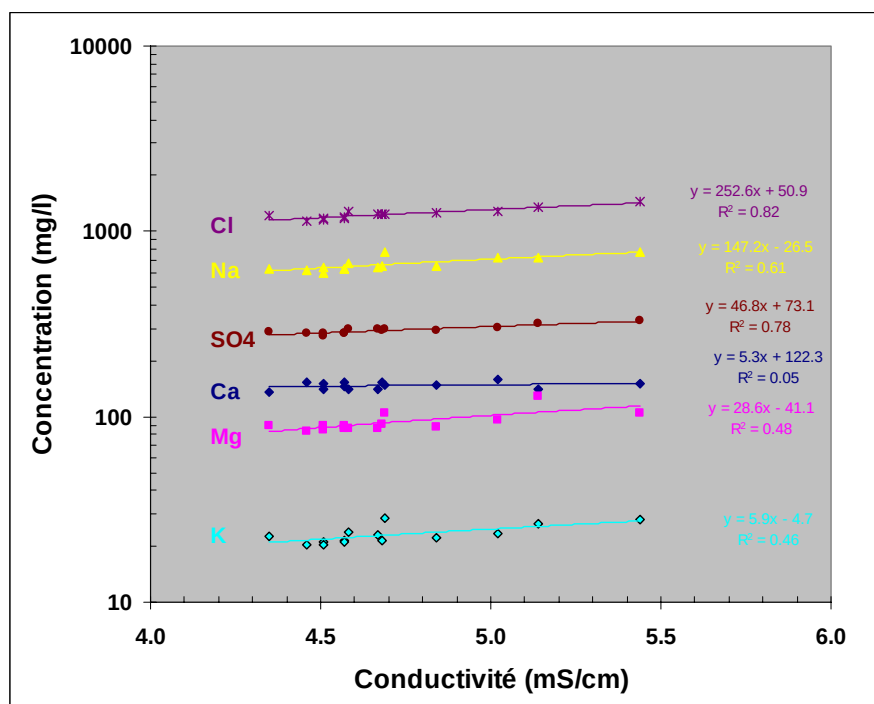


Illustration 51 - Relation concentrations versus conductivité dans les eaux de Font Dame.

c) Analyses spectrales des chroniques de température et de conductivité.

L'étude a porté sur les chroniques de conductivité et température enregistrées aux sources de Font Dame et Font Estramar et au niveau du piézomètre 102. Les chroniques de température mesurées aux niveaux des piézomètres 104, 107 et Roboul ont également fait l'objet d'une étude. L'évolution temporelle des paramètres est présentée à l'illustration 52.

L'analyse spectrale simple des chroniques de température mesurées aux sources de Font Dame et Font Estramar conforte les résultats obtenus sur les hauteurs d'eau (cf. § 2.2.3.). Les résultats mettent en évidence dans le domaine fréquentiel l'existence de phénomènes périodiques à 24 h 00 et 12 h 00 (ill. 53a, b) à relier, comme on l'a précédemment souligné, aux effets de la marée maritime de l'étang de Salses Leucate. Il est intéressant de noter que l'effet de marée ne se marque pas vraiment sur la conductivité des sources (ill. 53d, e). À court terme, l'évolution de la minéralisation des sources n'est donc pas, ou très peu, liée aux variations du niveau de l'étang.

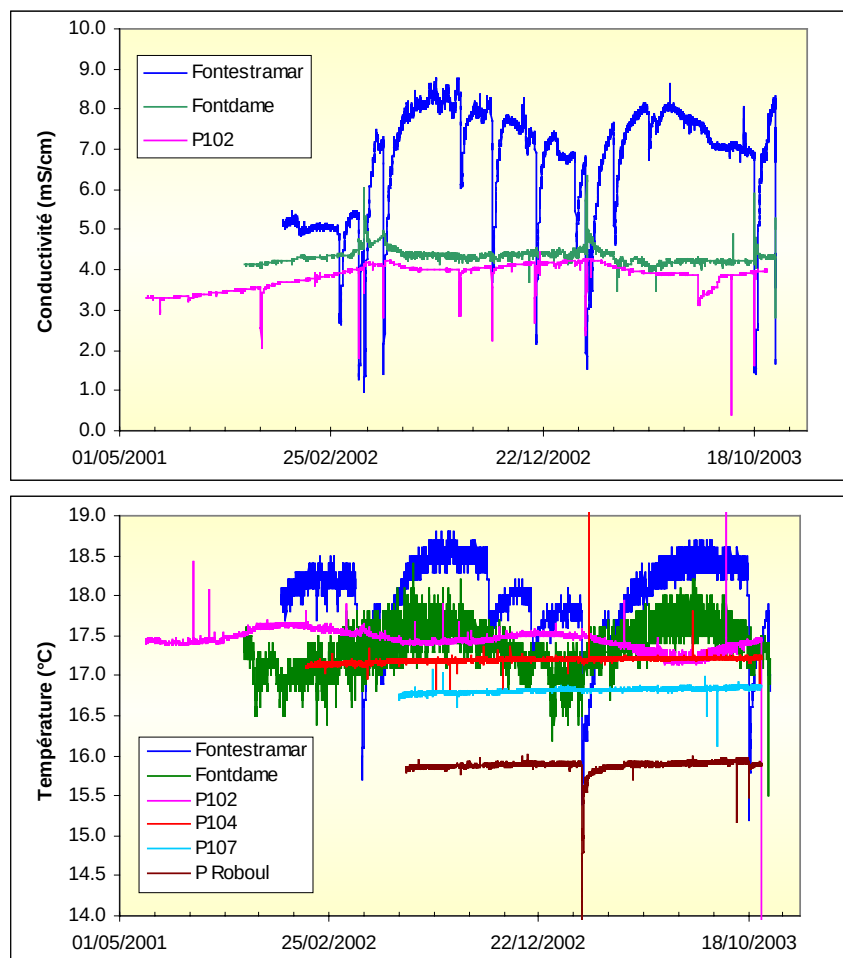


Illustration 52 - Évolution temporelle des chroniques de conductivité et de température.

Les chroniques de température et de conductivité mesurées au niveau du piézomètre 102 ne permettent pas de mettre en évidence les phénomènes diurnes et semi-diurnes (ill. 53c, f) contrairement à la hauteur d'eau (ill. 34c). Aucun phénomène périodique n'a été trouvé pour les chroniques de température mesurées au niveau des piézomètres P104, 107 et Roboul (illustrations non présentées).

Il est intéressant de noter que les chroniques de température des sources de Font Dame et Font Estramar semblent présenter une évolution périodique à long terme (ill. 52). En effet, les températures des mois d'été apparaissent plus élevées que celles des mois d'hiver, ce qui suggère une légère influence saisonnière du climat (les températures atmosphériques des mois d'été sont supérieures à celles des mois d'hiver). Ces résultats peuvent s'expliquer par la position des centrales d'acquisition par rapport aux émergences. Pour les sources de Font Dame et Font Estramar, les centrales d'acquisition de conductivité-température sont situées respectivement à environ 500 et 300 m des émergences. Les eaux ont le temps d'être influencées d'un point de vue thermique par la température de l'air compte tenu des distances aux émergences.

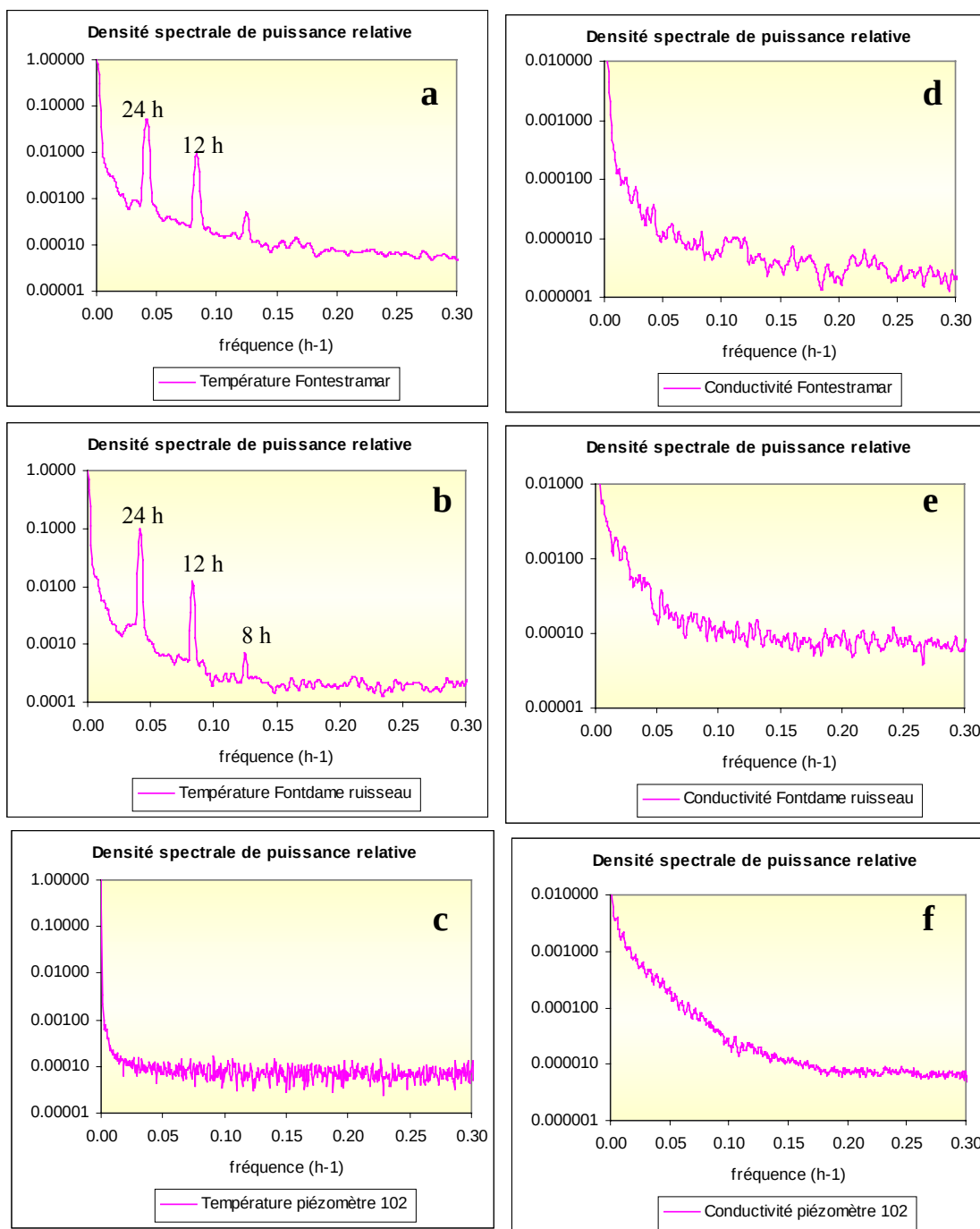


Illustration 53 - Densité spectrale de puissance relative (spectre simple) des chroniques de température et de conductivité des sources de Font Dame et Font Estramar et du piézomètre P102.

Pour la température de l'eau au piézomètre 102, un phénomène cyclique inverse est mis en évidence (ill. 52). On observe globalement des températures plus faibles en été et des températures plus élevées en hiver. La température de l'eau au niveau du 102 paraît donc refléter l'évolution réelle de la température de l'aquifère karstique car l'eau n'est pas sous l'influence des températures de l'air ambiant. Dans ce contexte, l'évolution observée semble indiquer que la contribution relative de la composante thermique (profonde) est plus importante lors des mois d'hiver (hautes eaux) que lors des mois d'été (basses eaux).

Aucun phénomène périodique à long terme n'est observé pour les chroniques de température des piézomètres P104, P107 et Roboul.

On observe par ailleurs que la température mesurée au niveau du piézomètre Roboul est nettement plus faible (15,9 °C en moyenne) que celles mesurées aux autres points d'eau suivis. La température de l'eau du piézomètre Roboul est voisine de la température moyenne annuelle de l'air du secteur d'étude (15,4 °C, moyenne 1946-2000, Météo France). L'influence de la composante thermique dans le secteur du piézomètre Roboul apparaît donc assez limitée contrairement aux autres points suivis :

- T_{moy} Font Estramar = 18,0 °C ;
- T_{moy} Font Dame = 17,3 °C ;
- T_{moy} P102 = 17,4 °C ;
- T_{moy} P104 = 17,2 °C ;
- T_{moy} P107 : 16,8 °C.

À titre d'information, les températures des eaux au niveau des piézomètres P103 et P105, récemment équipés de capteur de niveau d'eau (novembre 2003), étaient respectivement de 15,8 °C et 17,1 °C.

d) Synthèse

La minéralisation des eaux des sources de Font Dame et Font Estramar est bien corrélée à la conductivité électrique des eaux. La minéralisation (et la température) de l'eau de la source de Font Dame évolue peu au regard des variations observées à la source de Font Estramar. La source de Font Estramar apparaît en moyenne 1,5 fois plus minéralisée que celle de Font Dame. Les eaux des sources sont de type chloruré sodique. Les eaux présentent une anomalie de température de + 2 à + 2,5 °C par rapport aux valeurs des températures attendues pour les eaux souterraines de la région (+ 15,5 °C).

La source de Font Dame présente un fonctionnement différent de celle de Font Estramar lors des périodes de crues. En effet, la conductivité de l'eau de la source de Font Dame apparaît relativement stable lors des crues de faible importance ($Q < 1\,200$ l/s) et augmente significativement lors des crues importantes ($Q > 1\,200$ l/s). Pour expliquer cette réponse, il faut invoquer le processus d'effet piston qui chasse une eau plus minéralisée du système, lors des crues.

À l'inverse, la conductivité et la température de la source de Font Estramar évoluent fortement lors des crues et également au cours du cycle hydrologique. La réponse à court terme (lors des crues) qui se traduit par une diminution (parfois importante) de la conductivité et de la température des eaux est expliquée par le processus de mélange avec des eaux peu minéralisées et globalement plus froides. Un décalage temporel est observé entre la réponse hydrologique et la réponse géochimique, le pic de dilution se produisant généralement lors de la décrue. L'étude détaillée de l'évolution des paramètres physico-chimiques de la source au cours des crues (cf. § 2.3.3.) permettra d'apporter des informations sur les mécanismes de la salinisation du système karstique.

La réponse à long terme se traduit par une augmentation significative de la conductivité électrique des eaux dans les semaines qui suivent les épisodes de crues majeures des périodes printanières. Au cours des périodes estivales, la minéralisation amorce une légère diminution. Un phénomène similaire est observé pour la température mais l'amplitude des variations demeure plus réduite. Les évolutions observées suggèrent une augmentation relative de la composante profonde du système. On cherchera à vérifier cette hypothèse par l'approche de modélisation globale dite « boîte noire » à l'aide du logiciel « TEMPO » (cf. § 2.3.4.).

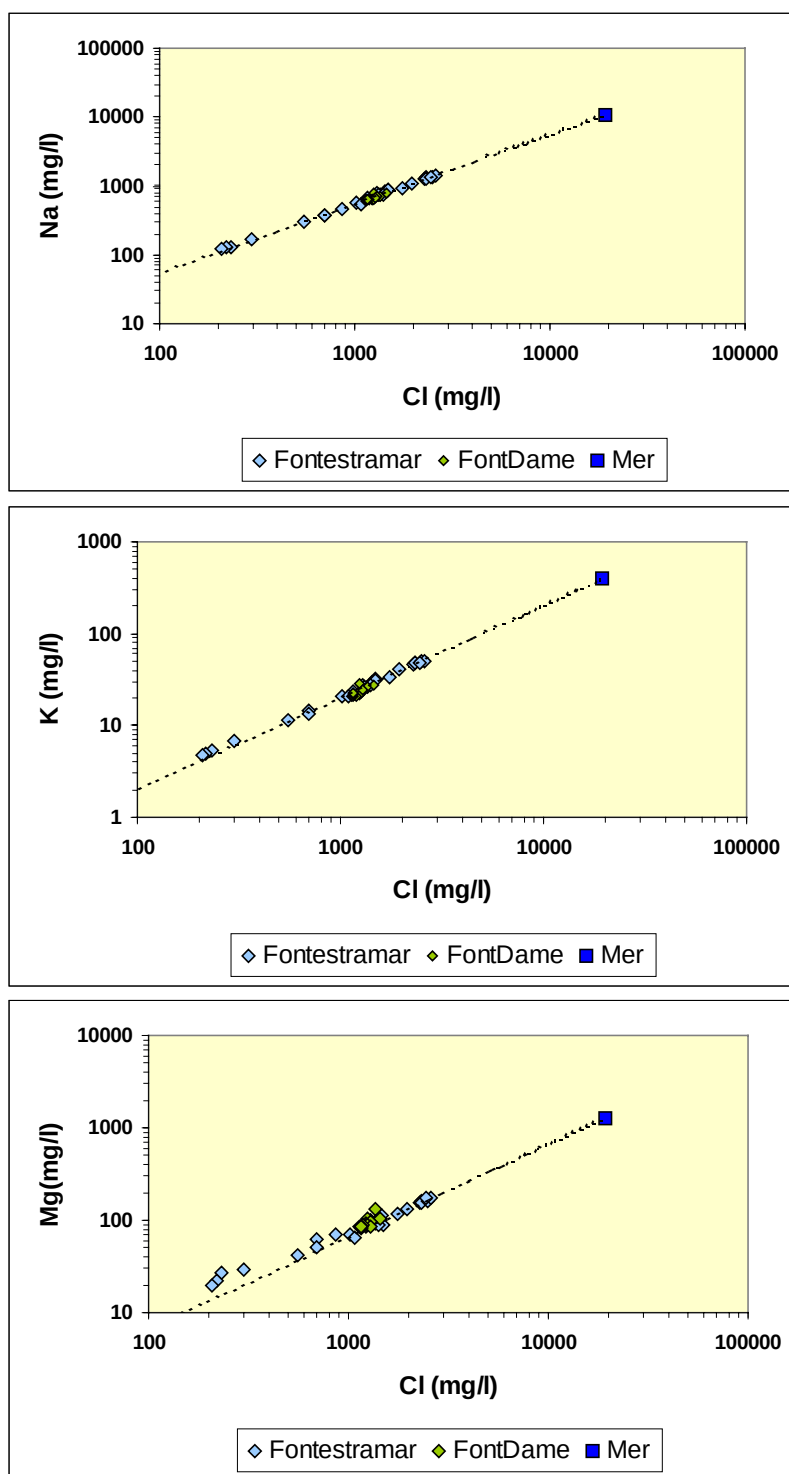
2.3.2. Caractérisation géochimique et isotopique des eaux du système karstique d'Opoul

Les eaux des sources de Font Dame et Font Estramar sont de type chloruré sodique comme on l'a montré précédemment. Nous allons maintenant tirer parti des informations que portent les différentes espèces chimiques dissoutes dans les eaux pour étudier de manière plus détaillée l'origine des eaux des sources, identifier et estimer la part respective des eaux de chaque réservoir mises en jeu dans les mélanges afin de fournir des indications sur le fonctionnement hydrogéologique du système karstique.

a) Origine de la salinité des sources de Font Dame et Font Estramar

On montre à l'aide des différents diagrammes de l'illustration 54 que les teneurs en sodium, potassium et magnésium exprimées en fonction des teneurs en chlorures des eaux des sources s'alignent sur la droite de dilution de l'eau de mer. La signature en chlorure, sodium, potassium et magnésium des eaux des sources peut donc s'expliquer comme le résultat d'un simple mélange entre une eau d'origine marine et une eau de pluie.

Dans les différents diagrammes de l'illustration 55 (Ca vs Cl, SO₄ vs Cl et Sr vs Cl), on montre que les eaux des sources sont globalement toutes enrichies en calcium, sulfate et strontium par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer. Ce résultat indique que les eaux ont interagi avec l'encaissant géologique et se sont chargées en ces éléments. Dans le contexte géologique local, on rencontre les formations des évaporites du Trias à la base des formations carbonatées, le Trias et le Lias marneux ayant joué le rôle de semelle de décollement lors de la mise en place de la nappe charriée des Corbières (cf. § 1.1. Synthèse géologique).



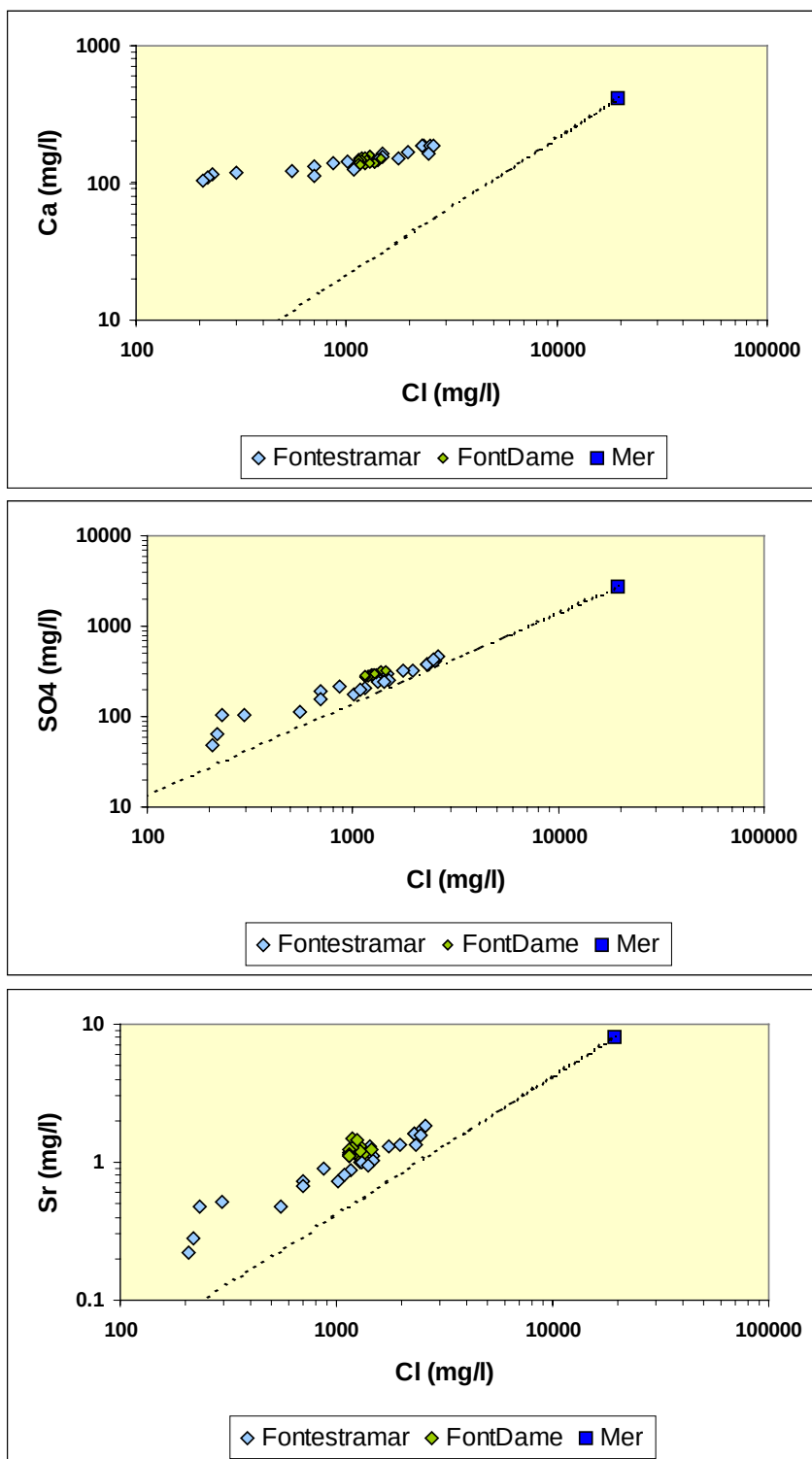


Illustration 55 - Évolution des teneurs en calcium, sulfate et strontium en fonction des concentrations en chlorure.

Dans ce contexte, l'une des explications possibles qui permettrait d'expliquer l'enrichissement en calcium, sulfate et strontium des eaux serait d'envisager un contact des eaux avec les évaporites du Trias.

La problématique de rôle éventuel joué par le Trias peut être étudiée à l'aide des isotopes du strontium. Rappelons que les eaux qui drainent les roches acquièrent la composition isotopique en Sr (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des minéraux de cette roche les plus sensibles à la dissolution. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral avec lequel elle a été en contact (dissolution).

L'illustration 56 présente l'évolution des rapports isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) du strontium des eaux échantillonnées en fonction des teneurs en strontium. Ce type de représentation permet de distinguer très nettement les différents types d'eau. Le pôle marin, caractérisé par l'eau de mer et/ou l'eau de l'étang présente de fortes teneurs en strontium et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevés ($> 0,709$) par rapport aux eaux échantillonnées au sein du système karstique ou aux exutoires de Font Dame et Font Estramar. L'eau du pôle Trias, caractérisée à l'aide des signatures géochimiques de la source de la Fouradade présente des teneurs élevées en strontium et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très faibles (0,7073) compatibles avec ceux de l'eau de mer au Trias (Veizer, 1989).

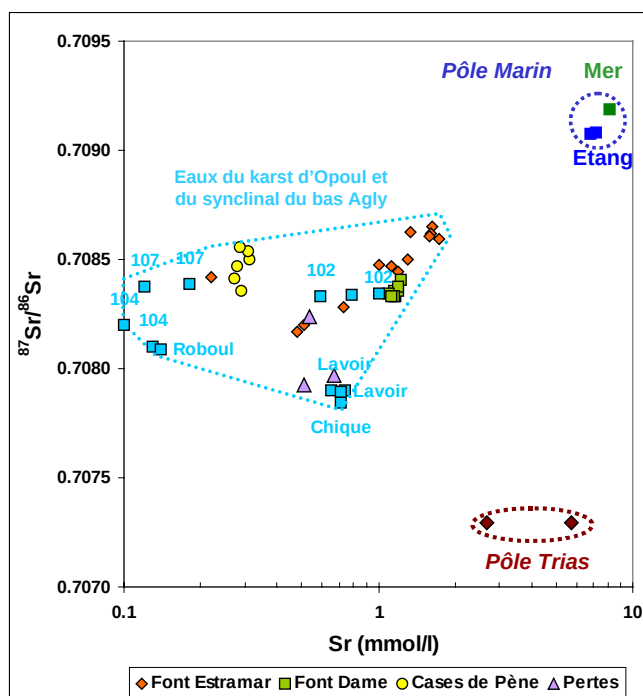


Illustration 56 - Évolution des rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des teneurs en strontium.

Dans cette représentation, les signatures des eaux de Font Dame et de Font Estramar ne semblent pas être influencées par le pôle du Trias, ce qui est confirmé à l'aide de la représentation de l'illustration 57.

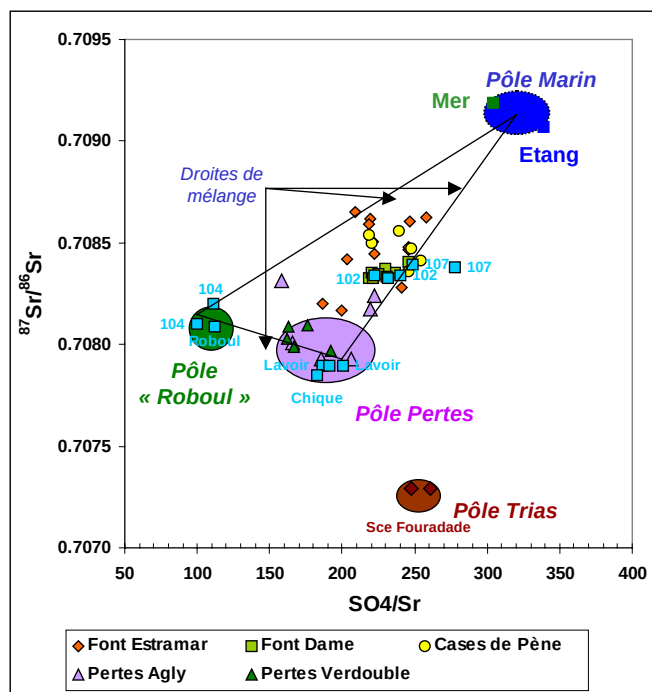


Illustration 57 - Évolution des rapports isotopiques du strontium des eaux en fonction des rapports molaire SO_4/Sr .

En effet, on montre à l'aide du diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr que les signatures des eaux des sources de Font Dame et Font Estramar s'inscrivent dans un triangle de mélange défini par les pôles « marin », « Roboul » et « pertes Agly-Verdoble ».

À l'aide de l'illustration 58 qui exprime l'évolution des teneurs en sulfate en fonction des concentrations en chlorure, on montre que les eaux des pertes de l'Agly et du Verdoble apportent des quantités de sulfate non négligeables (environ 150 mg/l) au système karstique d'Opoul. On montre que la signature des eaux de la source de Font Estramar en période de crue évolue vers le pôle « Roboul » contrairement à la source de Font Dame. En effet, la signature de la source de Font Dame est globalement expliquée par le résultat d'un simple mélange¹⁰ à deux composantes : « pôle marin » et « pôle pertes ». L'illustration 58 permet, en outre, de montrer que la signature des eaux de Cases de Pène prélevées lors de l'essai de pompage sont très proches de celles des pertes. Les points apparaissent très éloignés de la signature des eaux du pôle « Roboul ». Ce résultat indique donc que les pertes contribuent majoritairement à l'alimentation de ce sous-système karstique.

¹⁰ Dans une représentation semi-logarithmique, les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées.

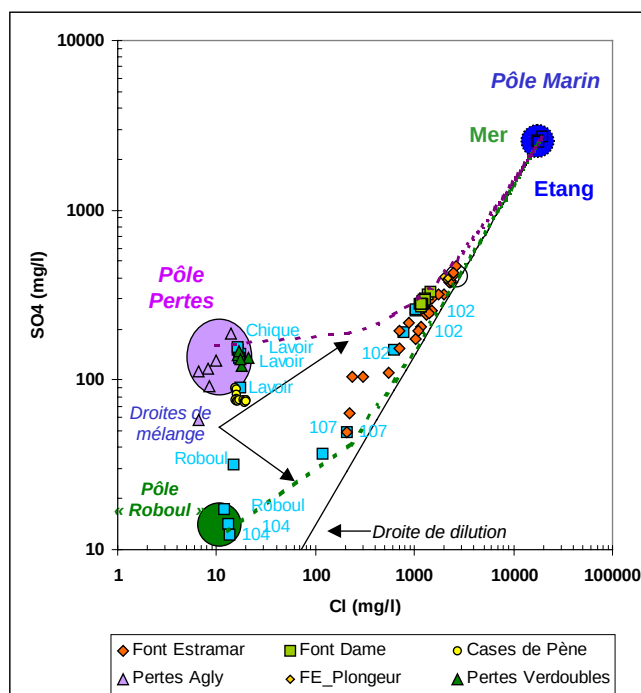


Illustration 58 - Évolution des teneurs en sulfate des eaux du karst d'Opoul en fonction des concentrations en chlorure.

Les diagrammes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Ca/Sr ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr (non représentés) n'apportent pas d'informations complémentaires.

En conclusion, la salinité des eaux des sources karstiques littorales de Font Dame et Font Estramar n'est pas liée à un contact avec les évaporites du Trias. Les résultats de cette étude confortent ceux obtenus antérieurement (Puradimaja, 1991 ; Faillat *et al.*, 2003).

Intéressons-nous maintenant à la composante marine qui contribue à la signature des sources littorales de Font Dame et de Font Estramar. En d'autres termes, la salinité des eaux provient-elle de l'eau de mer ou de l'eau de l'étang de Salses Leucate ?

b) Identification du pôle salé : eau de mer ou eau de l'étang de Salses Leucate ?

Afin d'établir le schéma conceptuel de fonctionnement du système karstique, il est important de savoir si la salinité des sources littorales de Font Dame et Font Estramar est due à de l'eau de mer ou à l'eau de l'étang de Salses Leucate. La confrontation des informations chimiques et isotopiques peut aider à répondre à cette question.

Les différents diagrammes de l'illustration 59 (B vs Cl et Br vs Cl) montrent que les eaux des sources sont globalement appauvries en bore et bromure par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer. Pour expliquer ces appauvrissements, il faut que l'eau marine qui participe au mélange soit appauvrie en bore et bromure. En 1998, lors d'une étude qui avait pour objectif l'identification des sources de pollution bactériologique au niveau de quelques tables conchyliques de l'étang de Salses

Leucate (Ladouche *et al.*, 2000), une campagne d'échantillonnage des eaux de l'étang avait été réalisée suivant un profil nord-sud.

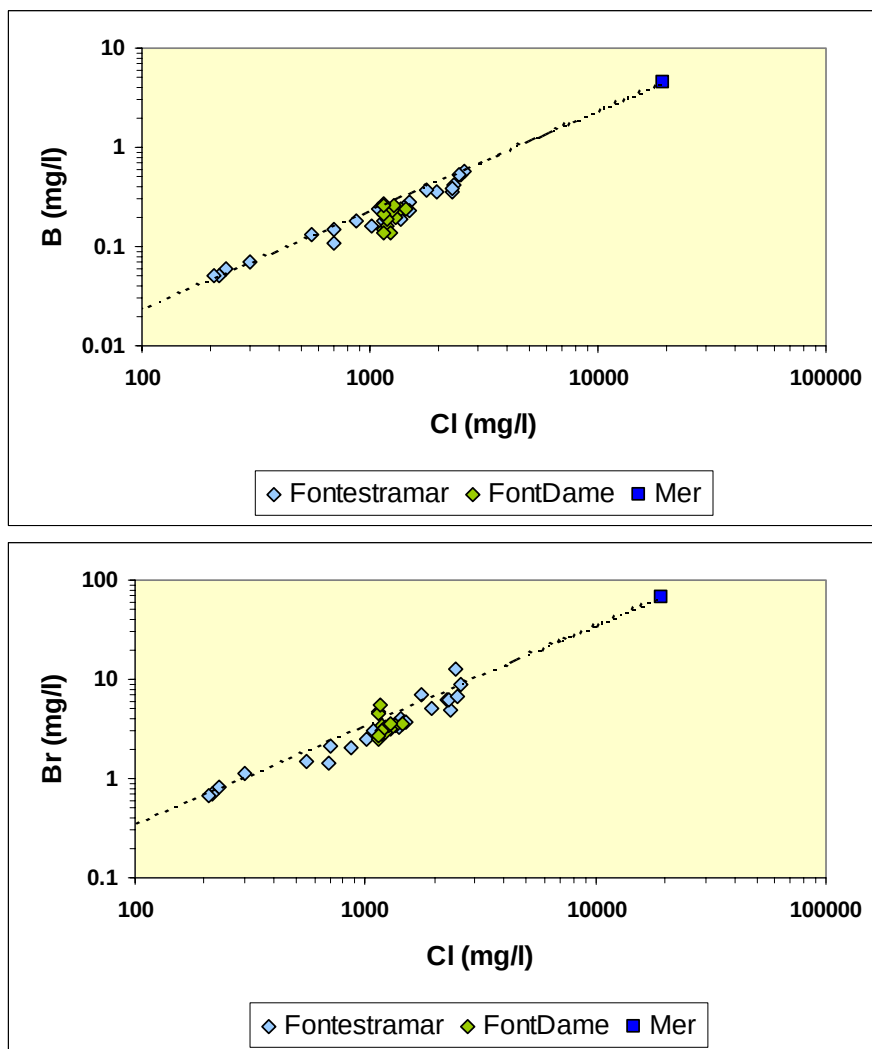


Illustration 59 - Évolution des teneurs en bore et bromure en fonction des concentrations en chlorure.

Pour identifier l'origine de la salinité des sources littorales, nous avons utilisé les informations géochimiques obtenues en 1998 sur l'étang de Salses Leucate.

Dans le diagramme de l'illustration 60 qui présente l'évolution des teneurs en bore en fonction des teneurs en deutérium des eaux, nous avons reporté toutes les informations disponibles pour étudier le système karstique d'Opoul. Les eaux de l'étang prélevées en 1998 apparaissent globalement comme nettement appauvries en bore par rapport à l'eau de mer et présentent des teneurs en deutérium similaires à celles de l'eau de mer. Les signatures des eaux prélevées au sein du système karstique sont également reportées.

Les eaux des piézomètres Roboulet 104 sont enrichies en deutérium par rapport aux eaux du lavoir de Salses-le-Château et du forage du mas de la Chique. Les eaux du lavoir de Salses-le-Château et du forage du mas de la Chique présentent de nouveau une signature très voisine de celle mesurée au niveau des pertes de l'Agly et du Verdoube. Ce résultat conforte ceux obtenus précédemment. La signature isotopique des eaux du pôle « pertes » appauvries en isotopes lourds par rapport à l'eau du pôle « Roboul » définie précédemment, s'explique par le gradient isotopique altitudinal des précipitations (les pluies précipitées à des altitudes élevées sont appauvries en isotopes lourds par rapport aux pluies littorales). En effet, les eaux de l'Agly et du Verdoube, qui s'infiltrent au niveau des zones de pertes, sont issues de bassins hydrologiques situés à des altitudes supérieures à celle de l'aire de recharge du karst d'Opoul.

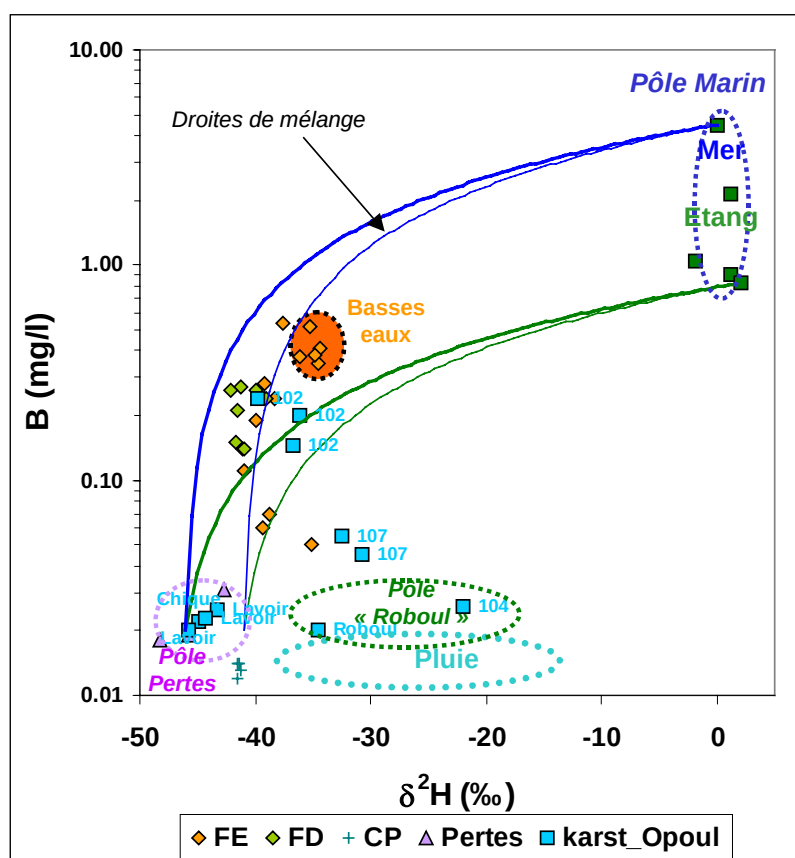


Illustration 60 - Évolution des teneurs en bore en fonction des teneurs en deutérium des eaux échantillonnées au sein du karst et au niveau de l'étang de Salses Leucate.

Les différentes courbes de l'illustration 60 représentent les droites de mélange (dans une représentation semi-logarithmique les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées). Les courbes bleues représentent les droites de mélange entre l'eau de mer et les bornes extrêmes du pôle « pertes ». Les courbes vertes représentent les droites de mélange entre les bornes extrêmes du pôle « pertes » et l'eau de l'étang mesurée en 1998.

Le diagramme de l'illustration 60 permet de nouveau de montrer que la signature des eaux de Font Estramar évolue fortement au cours des crues et tend vers celle du pôle « Roboul ». En période de basses eaux, la signature des eaux de Font Estramar n'est pas expliquée comme le résultat d'un mélange entre le pôle « pertes » et l'eau de mer (courbes bleues).

À l'inverse, si l'on considère les valeurs appauvries en bore de l'étang, on peut expliquer les signatures des eaux de Font Estramar mesurées lors des périodes estivales. Ce résultat suggère donc que la salinité des eaux des sources littorales du karst est liée à l'infiltration dans l'hydrosystème d'eau de l'étang de Salses Leucate. Ces résultats semblent donc corroborer ceux obtenus par l'analyse hydrogéologique. Un calcul de proportion de mélange indique que la source de Font Estramar est composée au maximum de 10 % d'eau de l'étang.

c) Estimation de la profondeur de circulation des eaux à l'aide du géothermomètre silice.

Nous avons déjà souligné que les eaux des sources de Font Dame et Font Estramar présentent une anomalie de température de + 2 à + 2,5 °C par rapport aux valeurs des températures attendues pour les eaux souterraines de la région (+ 15,5 °C). Les températures moyennes des eaux des sources sont respectivement de 17,5 et 18 °C. Ces résultats traduisent la participation d'eau profonde et chaude à l'écoulement des sources karstiques littorales.

Pour estimer les profondeurs de circulation des eaux en rapport avec les niveaux géologiques rencontrés, il faut estimer les températures profondes. En effet, les températures mesurées au niveau des sources ne reflètent pas celle de l'eau en profondeur, car la température des eaux diminue plus ou moins rapidement lors de leur remontée vers la surface.

L'évaluation des températures profondes et donc des profondeurs de circulation atteintes par les eaux peut être abordée par l'utilisation de géothermomètres. Les calculs sont basés sur les équilibres chimiques qui sont thermo-dépendants. Les températures calculées sont à considérer comme les températures maximales atteintes par l'eau en profondeur. Afin de limiter les erreurs d'interprétation, il faut veiller à ce que les conditions suivantes soient vérifiées (Fournier, 1977) :

- les réactions thermo-dépendantes se produisent en profondeur ;
- les éléments utilisés se trouvent dans les formations géologiques traversées par l'eau ;
- le temps de séjour de l'eau est suffisamment long pour que les réactions thermodynamiques se produisent ;
- la remontée de l'eau vers la surface est rapide afin d'éviter les ré-équilibrations ;
- il ne faut pas qu'il se produise de mélange avec les eaux superficielles lors de la remontée des eaux profondes.

En contexte sédimentaire, le géothermomètre à silice¹¹ peut être utilisé car les formes de silice (quartz, calcédoine) se rencontrent en quantités variables dans les formations géologiques. Toutes les formes de silice sont solubles dans l'eau, la solubilité de la silice contenue dans les roches étant principalement fonction de la température (à pH constant). Les réactions sont difficilement réversibles dans le cas des solutions sursaturées. Ainsi les courbes de saturation peuvent être utilisées pour estimer la température maximale atteinte par l'eau dans le réservoir.

L'emploi du géothermomètre à silice repose sur un certain nombre d'hypothèses contraignantes (3, 4, 5) qu'il convient de vérifier :

- **Hypothèse 3** « le temps de séjour de l'eau est suffisamment long pour que les réactions thermodynamiques se produisent ». Pour vérifier cette hypothèse, on peut calculer l'indice de saturation du minéral. En période d'étiage, les indices de saturation des eaux vis-à-vis du quartz sont proches de 0, voire très légèrement supérieurs (jusqu'à 0,16), ce qui indique que les eaux sont à l'équilibre ou très légèrement sur-saturées vis-à-vis du minéral. Pour atteindre cet état thermodynamique, les eaux ont donc résidé suffisamment longtemps. L'hypothèse 3 est vérifiée.
- **Hypothèse 4** « la remontée de l'eau vers la surface est rapide afin d'éviter les ré-équilibrations ». En contexte karstique, les vitesses d'écoulement sont rapides. Pour les systèmes de Font Dame et Font Estramar, les vitesses d'écoulements déduites de l'essai de traçage « Verdoube » sont comprises entre 3 et 13 m/h (Courtois *et al.*, 2003). L'hypothèse 4 est considérée vérifiée.
- **Hypothèse 5** « Il ne faut pas qu'il se produise de mélange avec les eaux superficielles lors de la remontée des eaux profondes ». Cette hypothèse est la plus difficile à respecter pour ce système karstique. En effet, on ne peut pas exclure la possibilité qu'un mélange se produise entre les eaux profondes chaudes et les eaux superficielles plus froides lors de la remontée des eaux. Afin de minimiser l'impact du mélange, il convient de s'intéresser aux résultats des périodes de basses eaux, périodes pour lesquelles on suppose que la contribution des eaux superficielles froides est la plus faible. C'est en effet au cours des périodes d'étiages estivaux que la température des sources, notamment à Font Estramar, est la plus élevée.

Sur la base des teneurs en silice mesurées au niveau des sources lors des périodes d'étiage ($\text{CSiO}_2 = 7,2 \text{ mg/l}$ pour Font Estramar ; $\text{CSiO}_2 = 7,5 \text{ mg/l}$ pour Font Dame), la température maximale atteinte par l'eau dans le réservoir serait d'environ 29-30 °C.

La détermination des profondeurs maximales de circulation des eaux au sein de l'aquifère nécessite la connaissance de la température moyenne annuelle de la zone d'étude (T_m). Le gradient géothermique local (G_g) et de la température profonde calculée par le géothermomètre (T_g) : $P_m = (T_g - T_m) / G_g$

¹¹ L'utilisation du géothermomètre à silice est basée sur l'équilibre thermodynamique suivant :
 $\text{SiO}_2(\text{S}) + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$.

Le gradient géothermique moyen de la zone d'étude a été estimé à 37,5 °C/km (GEOTHERMA¹²) et la température annuelle de la zone d'étude à 15,5 °C. Sur la base de ces résultats, la profondeur maximale de circulation des eaux au sein du système karstique serait comprise entre 360 et 390 m de profondeur.

d) Estimation du temps de résidence de l'eau à l'aide des teneurs en tritium

L'isotope tritium de la molécule d'eau est instable dans le temps et est fréquemment utilisé comme chronomètre pour dater les eaux. (3H, isotope radioactif de période courte de 12,26 ans)¹³. C'est un marqueur des masses d'eau contemporaines. En effet, une production artificielle s'est ajoutée à la production naturelle au cours des essais thermonucléaires aériens, pendant la période 1952-1963 ; les essais ont cessé depuis 1963. Par l'intermédiaire de cette production artificielle, on peut donc différencier les eaux qui résultent des précipitations sans tritium nucléaire (avant 1952) des eaux de précipitations formées dans une atmosphère contenant du tritium nucléaire. La présence de tritium dans une eau témoigne d'une alimentation récente.

À titre d'information, les teneurs en tritium de quelques eaux de pluie de Perpignan échantillonnées dans les années 1960 sont données ci-dessous (BD-ISO, <http://infoterre.brgm.fr>).

date	unité tritium	
31/07/1965	394	(± 16,0)
31/12/1965	190	(± 10,0)
31/12/1966	113	(± 8,0)

Les teneurs en tritium des pluies actuelles sont très faibles et globalement comprises entre 2 et 7 unités tritium, les valeurs les plus élevées étant observées en hiver et au printemps (BD-ISO, <http://infoterre.brgm.fr>).

Les eaux des sources de Font Dame et de Font Estramar, prélevées le 15 septembre 2003 dans un contexte de basses eaux (Q Font Dame = 670 l/s ; Q Font Estramar = 990 l/s), présentent respectivement des teneurs de 5 UT (± 2) et 3 UT (± 1). Compte tenu des valeurs mesurées, l'écoulement des sources est assuré par des eaux infiltrées récemment dans le système, tout au plus quelques années. La composante profonde chaude du système est donc également constituée d'eau d'infiltration récente.

e) Synthèse

Les faciès chimiques des eaux des sources de Font Dame et de Font Estramar sont de type chloruré sodique. Les signatures en chlorure, sodium, potassium et magnésium des eaux s'expliquent comme le résultat d'un simple mélange entre une eau d'origine marine et une eau de pluie. La salinité des eaux des sources littorales du karst d'Opoul

¹² GEOTHERMA : Etude de synthèse du potentiel géothermique du littoral méditerranéen de Marseille à Perpignan (1981-1982) ; univ. Bordeaux III.

¹³ Production naturelle de 1 atome pour 10¹⁸ atomes.

est liée à l'infiltration dans l'hydrosystème d'eau de l'étang de Salses Leucate qui se distingue de l'eau de mer par des teneurs en bore et brome plus faibles.

Un calcul de proportion de mélange indique que la source de Font Estramar est composée au maximum de 10 % d'eau de l'étang lors des périodes de basses eaux.

Les eaux des sources sont globalement toutes enrichies en calcium, sulfate et strontium par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer ce qui indique que les eaux ont interagi avec l'encaissant géologique et se sont chargées en ces éléments. Les eaux des sources karstiques n'interagissent pas avec les formations des évaporites du Trias situées à la base des formations carbonatées.

Les eaux des pertes de l'Agly et du Verdouable apportent des quantités de sulfate non négligeables (environ 150 mg/l) au système karstique d'Opoul et permettent donc d'expliquer l'enrichissement en sulfate observé. En période de crue, la signature géochimique de la source de Font Estramar est expliquée comme le résultat d'un mélange à trois composantes : « pertes », « étang » et « karst d'Opoul ». Ce dernier pôle est peu minéralisé et présente notamment de faibles concentrations en sulfate (< 20 mg/l). En période de basses eaux, les signatures des sources de Font Dame et Font Estramar s'expliquent principalement comme le résultat d'un mélange à deux composantes : « pertes » et « étang ».

La composante profonde et chaude de l'écoulement 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 à rattacher à celles des pertes.

2.3.3. Caractérisation du mécanisme de salinisation du système karstique par l'étude des données physico-chimiques de la source de Font Estramar

La source de Font Estramar est la résurgence la plus importante du système karstique des Corbières. La source, de type vauclusien, émerge d'une vasque noyée d'une trentaine de mètres de diamètre et d'une dizaine de mètres de profondeur. Le réseau noyé exploré par l'ARFE (Brandt, 2001) se développe sur 2 750 m (ill. 61). Il s'agit d'un réseau subhorizontal dont la profondeur est comprise entre - 35 et - 50 m NGF. Un conduit unique atteint une profondeur de - 64 m. Ce dernier continue en profondeur, mais n'a pu être exploré. Nous avons montré précédemment que la salinité des eaux de la source de Font Estramar était d'origine marine (résultat d'un mélange entre l'eau de l'étang et celle du karst) et qu'elle n'était pas liée à la présence du Trias en profondeur.

Le suivi des paramètres physico-chimiques de la source a permis par ailleurs, de souligner l'extrême variabilité temporelle de la minéralisation des eaux de la source (court et long terme). Nous allons chercher à identifier les facteurs qui contrôlent l'évolution de la minéralisation des eaux de la source au cours des nombreuses crues enregistrées au cours de la période 2002-2003, afin de caractériser les mécanismes de salinisation du système karstique.

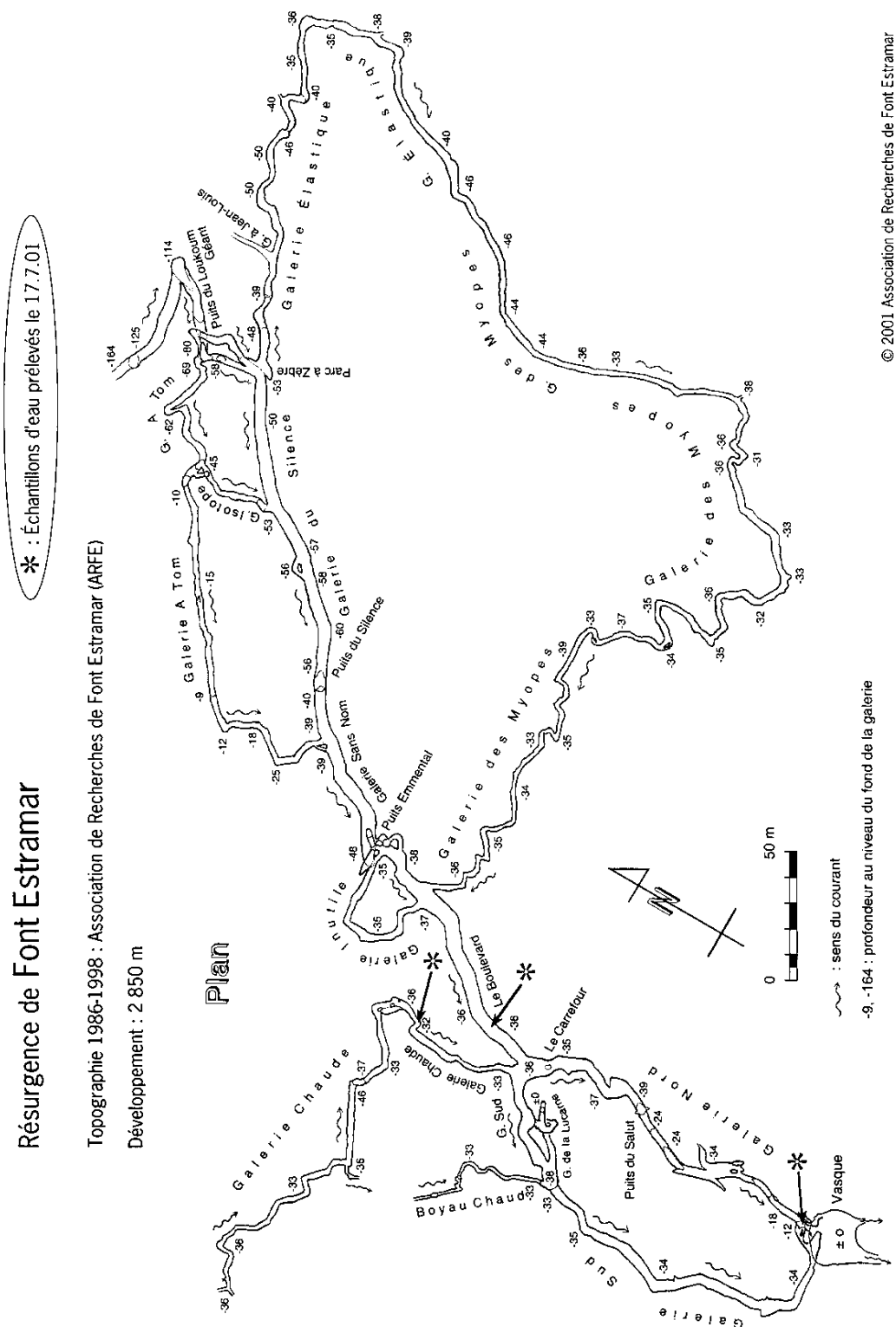


Illustration 61 - Plan du réseau noyé (exploré) de la source de Font Estramar (d'après C. Brandt, ARFE 2002).

a) Revue bibliographique

« Dans les cas des aquifères karstiques côtiers, il faut ajouter à la complexité habituelle du karst l'existence de l'eau salée et de la zone de transition dont la dynamique peut devenir très complexe » (Pulido-Bosch et al., 2001).

Bien qu'il existe de nombreuses publications sur le karst et sur la problématique du biseau salé, les travaux effectués sur la thématique des aquifères karstiques côtiers et leurs relations avec l'intrusion saline restent rares (Cotecchia, 1997 ; Van Dam, 1999 ; Arfib, 2001).

Dans le cas d'aquifères poreux, la théorie de Ghyben-Herzberg (selon le modèle d'équilibre hydrostatique de la lentille d'eau douce sur l'eau de mer, l'épaisseur de la couche d'eau douce vaut 40 fois l'altitude de la surface piézométrique) peut être utilisée couramment en respectant quelques conditions (distribution homogène des porosités et des conductivités hydrauliques). Ce modèle permet de prévoir la position de la limite entre l'eau douce et l'eau salée. Plus tard, Hubbert (1940), Cooper (1959), Glover (1959) et Henry (1964) démontrent que cette limite est en réalité une zone de transition liée à l'advection et à la dispersion. Ces modèles de fonctionnement ne sont applicables que dans le cas d'une distribution homogène des porosités et des conductivités hydrauliques.

Le milieu karstique est caractérisé par son hétérogénéité (double porosité d'origine cassante et chimique). Le fonctionnement hydrodynamique du système est double, différent dans les conduits et dans la matrice encaissante. Cette dualité de l'écoulement influence l'intrusion saline qui est perturbée par l'écoulement dans les conduits et peut avoir une distribution spatiale très différente (Arfib, 2001).

L'influence des conduits entraîne une intrusion saline dans la matrice calcaire à altitude plus élevée et plus avancée dans les terres que celle prévue par une relation du type Ghyben-Herberg (Calvache & Pulido-Bosch, 1994 ; Wicks & Herman, 1995). D'autres auteurs montrent que l'eau douce et l'eau salée utilisent l'une et l'autre les fractures et conduits pour rejoindre préférentiellement la zone de mélange ou d'équilibre des fluides de densité différente (Stringfield & Legrand, 1971 ; Moore *et al.*, 1992 ; Howard & Mullings, 1996). Cependant, dans la plupart des cas, les conduits très perméables engendrent une répartition très irrégulière de l'eau douce (Arfib, 2001).

Breznik (1973) propose une classification des sources saumâtres karstiques basée sur l'origine de la contamination :

- sources contaminées par effet de densité ;
- sources contaminées par cause hydrodynamique ;
- sources contaminées par la combinaison des deux effets précédemment cités.

b) Approche méthodologique utilisée

La méthodologie utilisée pour caractériser le mécanisme de la salinisation de la source de Font Estramar s'inspire de celle employée par Arfib (2001). Des éléments de comparaison seront présentés afin de souligner les différences de fonctionnement du

système de Font Estramar par rapport à celui de la source Almyros d'Héraklion étudié par Arfib.

La première étape consiste à établir un rapport entre la conductivité et la concentration en chlorure. Vingt-six échantillons d'eau ont été prélevés et analysés lors du suivi géochimique de la source de Font Estramar (2002) couvrant une très large gamme de débits (ill. 47).

Les conductivités extrêmes pour les échantillons prélevés sont 1,20 et 8,73 mS/cm, les teneurs en chlorures étant de 208 mg/l et 2 600 mg/l. Ces conductivités sont similaires à celles mesurées par la centrale d'acquisition (ill. 47). Les valeurs extrêmes journalières mesurées par la centrale d'acquisition de Font Estramar sont de 1,11 et 8,77 mS/cm. La relation qui lie la teneur en chlorure à la conductivité est de type linéaire (cf. ann. 4) :

$$\text{Cl (mg/l)} = 271,65 + 334,85 \times \text{Cond (mS/cm)}.$$

Remarque : la conductivité explique 98,85 % de la variabilité des teneurs en chlorure ce qui constitue un bon résultat.

La seconde étape consiste à calculer le flux convectif de chlorure à la source (débit multiplié par la concentration en sel) et de le représenter d'une part en fonction du débit et d'autre part en fonction de la concentration en chlorure (ill. 62). Cette étape permet d'appréhender de fonctionnement de la source vis-à-vis de la salinité. La salinité maximum de la source de Font Estramar, 2,6 g/l a été atteinte en juillet et août 2002 au cours de l'étiage qui fait suite à la crue du 10 mai 2002.

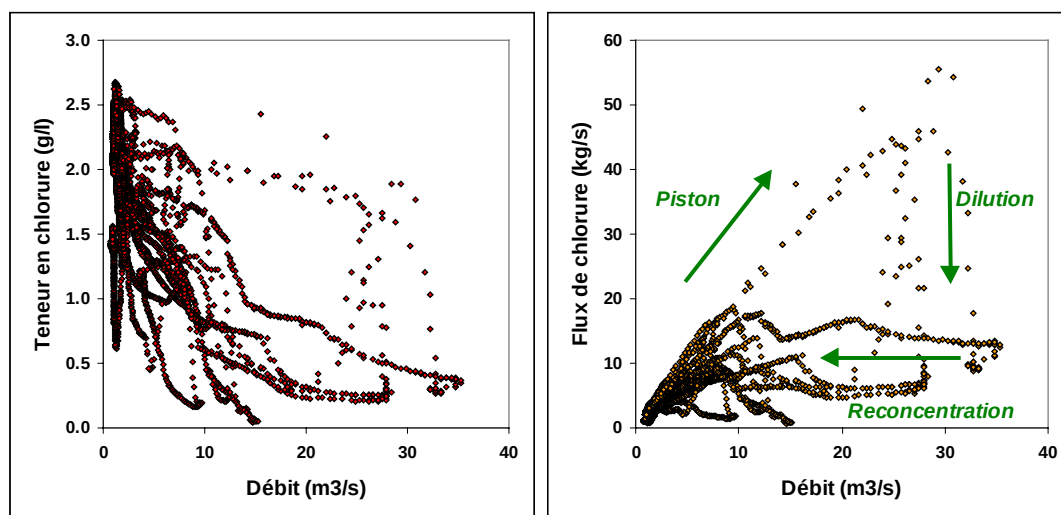


Illustration 62 - Évolution de la teneur et du flux de chlorure en fonction du débit.

Sur l'illustration 62, on observe que les teneurs en chlorure se répartissent sans réelle organisation en fonction du débit. La relation entre le flux de chlorure et le débit permet par contre de mettre en évidence une hystérésis qui s'explique par une phase de « piston », puis de « dilution » et enfin de (re)concentration.

Dans la méthodologie développée par Arfib (2001), une correction est apportée sur le flux de chlorure, afin de ne considérer que les phases de dilution et de (re) concentration. La correction porte sur l'effet piston. Lors d'une crue, le volume « pistonné » correspond au volume d'eau déjà présent dans un conduit karstique et expulsé avant que l'eau récemment infiltrée ne parvienne à la résurgence. En d'autres termes, le volume de l'effet piston correspond à de l'eau contenue dans le conduit alimentant la source, ayant déjà acquis sa salinité, et sur lequel l'augmentation de débit n'a aucun effet sur sa salinité.

Dans le cas de la source Almyros d'Héraklion, sur 18 crues étudiées, le volume de l'effet piston est presque constant (770 000 m³). En conséquence, la géométrie du réseau karstique semble assez simple (un conduit unique). Les mesures de débit à la source Almyros d'Héraklion reflètent un transfert quasi instantané de l'onde de pression à la source (augmentation du débit) mais la salinité correspondante n'est observée qu'après l'expulsion de 770 000 m³ d'eau à la source.

Le volume pistonné étant constant, Arfib (2001) corrige la valeur de la salinité, pour un débit à un temps donné, en prenant la valeur de la salinité mesurée après expulsion du volume constant (770 000 m³) à la source. Ceci revient à transformer la sortie du système pour que les ondes de pression et de transfert de matière corrigé soient en phase.

Pour les 11 crues étudiées de la source de Font Estramar (ill. 63), les corrections développées par Arfib (2001) ne fonctionnent pas. Les graphiques obtenus (non représentés dans le présent rapport) sont très similaires aux représentations de l'illustration 62.

La géométrie du réseau karstique de Font Estramar apparaît donc beaucoup plus complexe (plusieurs conduits) que celui de la source Almyros d'Héraklion car le volume pistonné est très variable lors des différentes crues observées (de 0,28 à 0,68 million de m³ expulsés ; ill. 64). Afin de poursuivre l'étude, il est nécessaire de connaître la cause de la variabilité du volume pistonné lors de crues.

c) Facteurs contrôlant les variations du volume et du flux de chlorure pistonné

Pour réaliser cette analyse, nous avons reporté les principales caractéristiques des différentes crues étudiées dans l'illustration 64. Le cumul des précipitations correspond à la somme des précipitations tombées sur le bassin d'alimentation au cours des trois jours¹⁴ qui ont précédé les différentes crues. Le volume pistonné correspond au volume compris entre l'augmentation du débit et le début de la première chute de la conductivité (cf. exemple de la crue n° 1 du 07 mars 2002, ill. 65). Les flux de chlorure exportés ainsi que les valeurs instantanées en début et fin d'effet piston sont également reportés. Les paramètres hydrologiques de la crue sont également présentés.

¹⁴ Plusieurs tests ont été effectués (pluie cumulée journalière, sur deux, trois, quatre et cinq jours). Les résultats obtenus avec les pluies cumulées sur trois jours permettent d'établir les corrélations avec les volumes pistonnés, contrairement aux autres (pluie cumulée journalière, deux, quatre et cinq jours).

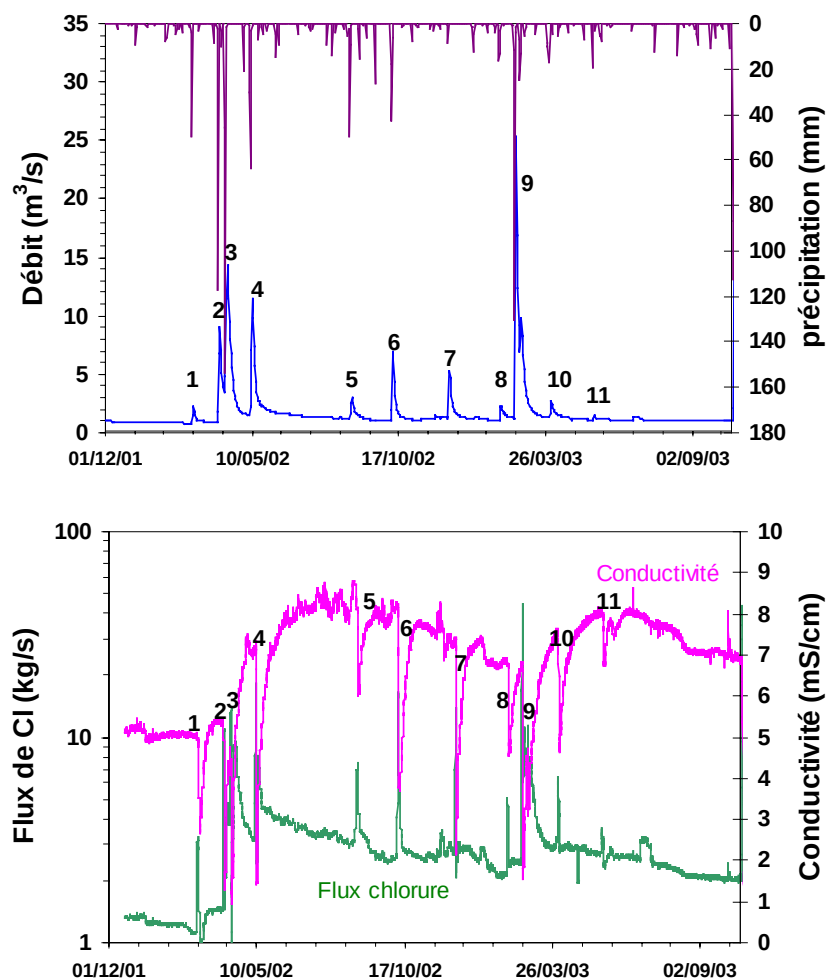


Illustration 63 - Évolutions temporelles du débit, de la pluviométrie, de la conductivité et du flux de chlorure (décembre 2001 à octobre 2003).

n° Crue	Cumul pluie 3 j précédents crues (mm)	Durée de l'effet piston en heure	Vol. pistonné en million m3	Flux de Cl exporté en tonne	Flux i. de Cl		Débit instantané		Pic de de Crue m3/s
					début piston kg/s	fin piston kg/s	début piston m3/s	fin piston m3/s	
1	54	50	0.28	393	1.1	3.3	0.71	2.40	2.40
2	120	34	0.58	859	1.4	10.9	0.95	7.98	9.74
3	201	23	0.62	788	4.4	13.9	3.63	11.37	15.20
4	98	35	0.68	1442	3.3	18.3	1.55	9.31	12.50
5	62	71	0.54	1344	3.1	7.4	1.19	3.23	3.23
6	67	29	0.51	1185	2.7	16.7	1.08	7.92	7.92
7	9	17	0.27	609	2.7	13.8	1.26	6.54	6.54
8	33	36	0.28	573	2.3	5.0	1.15	2.48	2.48
9	148	15	0.55	1062	2.5	44.7	1.26	24.85	27.95
10	39	30	0.28	611	3.6	6.5	1.60	2.88	2.88
11	22	57	0.28	673	2.8	3.6	1.15	1.49	1.49

Illustration 64 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques de l'effet piston.

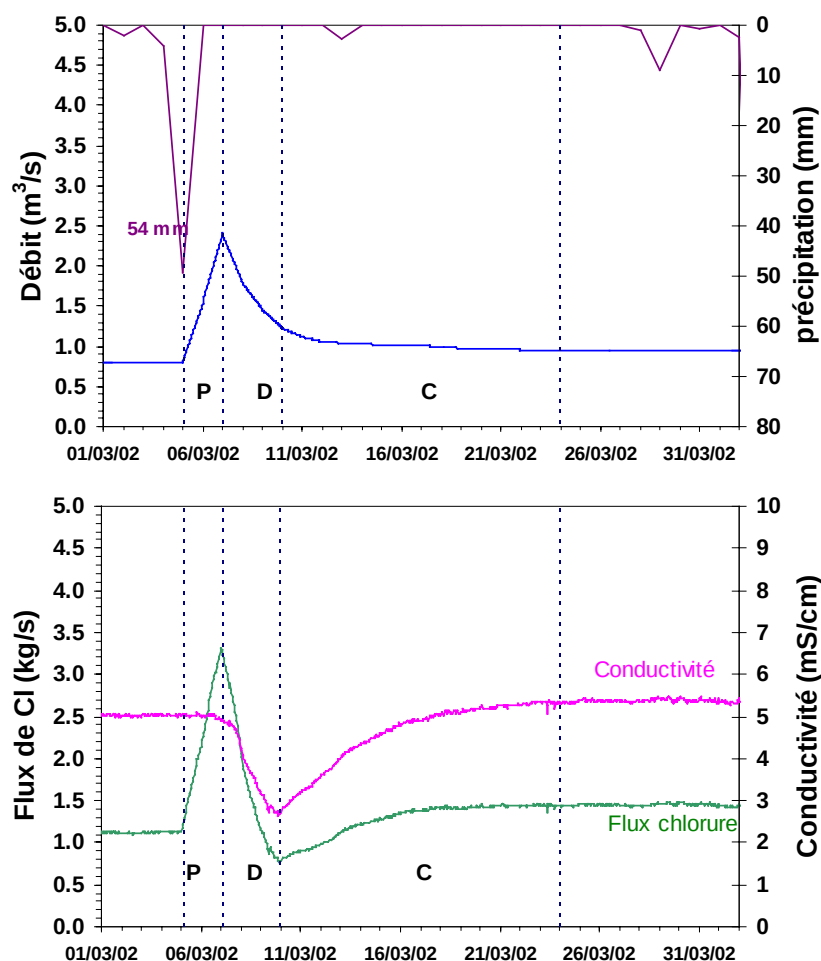


Illustration 65 - Évolutions temporelles du débit, de la pluviométrie, de la conductivité et du flux de chlorure lors de la crue n° 1 du 7 mars 2002.

(Les phases de piston « P », dillution « D » et de (re)concentration (C) sont également reportées).

Nous avons déjà souligné que le volume « pistonné » lors des crues (volume d'eau déjà présent dans les conduits karstiques et expulsé avant que l'eau récemment infiltrée ne parvienne à la résurgence) est très variable (de 0,28 à 0,68 million de m³). Néanmoins, les résultats apparaissent non aléatoire, on peut en effet distinguer un premier groupe (crues n° 1, 7, 8, 10 et 11) dont les volumes « pistonnés » (V_p) sont de l'ordre de 0,28 million de m³ et un second (crues n° 2, 3, 4, 5, 6 et 9) dont les volumes « pistonnés » sont de l'ordre de 0,58 million de m³ en moyenne.

L'importance du cumul de pluie précipitée au cours des trois jours qui précèdent les crues (ill. 66a) semble être l'un des facteurs explicatifs. Les résultats suggèrent que le premier groupe (V_p = 0,28 106 m³) correspond aux épisodes pluvieux d'importance modérée (H < 54 mm) tandis que le second coïncide avec les épisodes pluvieux importants (H > 62 mm et jusqu'à 200 mm). Le contexte hydrologique initial ne semble pas jouer un rôle important tout comme la durée de l'effet piston (de 17 à 57 h).

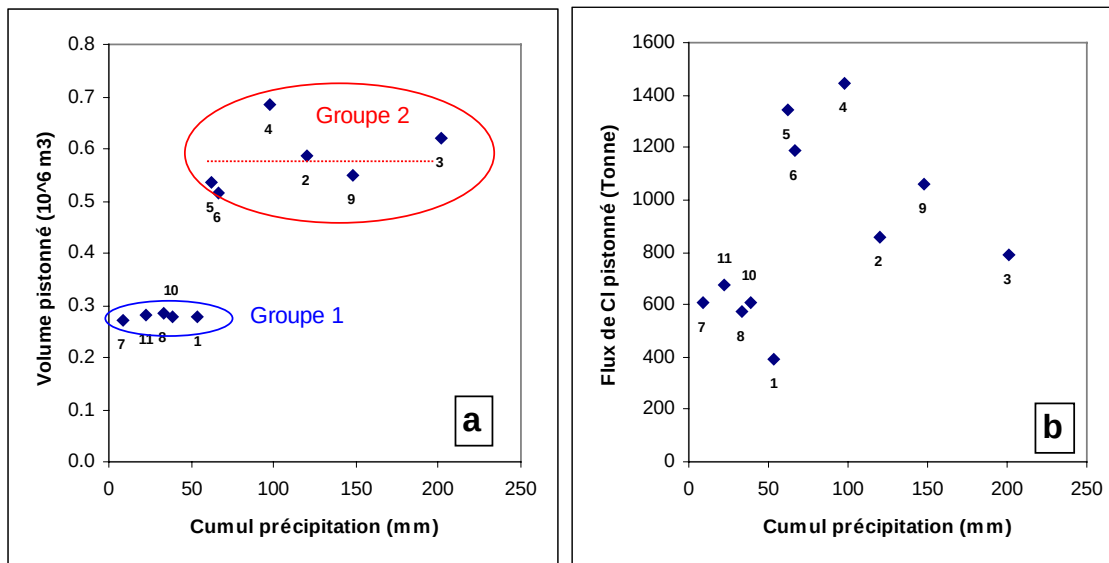


Illustration 66 - Évolution du volume d'eau et du flux de chlorure « pistonné » à la source de Font Estramar lors des crues en fonction du cumul de précipitation.

Pour résumer, le **nombre de conduits ou de fractures sollicités par l'effet piston semble donc augmenter** (du simple au double environ) **en fonction de l'importance de la mise en charge du karst par les précipitations** ($H < 60$ mm et $H > 60$ mm).

Les flux de chlorure exportés au cours des phases « pistons » sont extrêmement variables (ill. 64) et ne semblent pas vraiment corrélés au cumul des précipitations (ill. 66b), ni aux débits initiaux et finaux des phases pistons (ill. 67a, b et d), ni non plus aux débits et flux initiaux en chlorure de la source Font Estramar (avant la crue). Les flux de chlorure exportés au cours des phases « pistons » ne semblent pas corrélés au flux de chlorure instantané mesuré à la fin de la phase « piston ».

Sur l'illustration 67c, on montre que le flux exporté est globalement constant pour les crues du groupe 1 qui, rappelons le, présentent un volume « pistonné » constant de 0,28 millions de m³.

L'analyse statistique effectuée (cf. test 0 en annexe 4) indique que la variance du flux de chlorure pistonné n'est pas expliquée par la variable « flux initial » de chlorure. La quantité de chlorure exporté pendant les phases « pistons » des crues du groupe 1 ($V_p = 0,28 \cdot 10^6$ m³) est de 572 ± 106 t.

Pour les crues du groupe 2, à l'exception de la crue n° 3 qui survient 9 jours après la crue n° 2, alors que le système est encore nettement influencé par cette dernière, les flux exportés sont statistiquement bien expliqués par la variable « flux initial » en chlorure (cf. tests statistiques n° 0 bis en annexe 4). Cette variable explique 94 % de la variance du flux exporté, ce qui constitue de bons résultats. Les flux exportés des phases « pistons » lors des crues importantes (groupe 2) semblent donc directement proportionnels aux flux de chlorure initiaux de la source avant la crue.

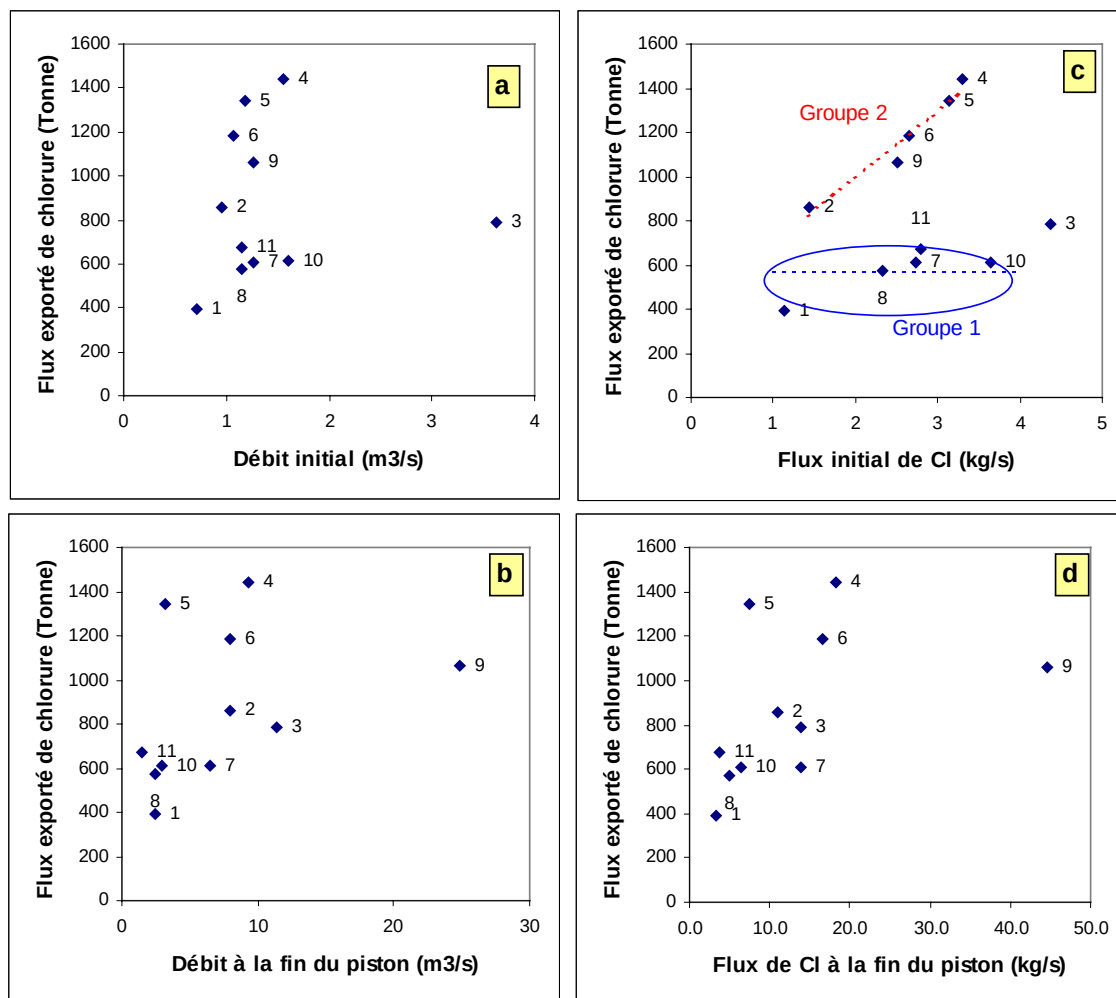


Illustration 67 - Évolution du flux de chlorure exporté à la source de Font Estramar lors des phases « pistons » des crues en fonction du débit initial et du flux initial en chlorure.

En résumé, pour les crues de faible ampleur ($< 7 \text{ m}^3/\text{s}$) générées par des épisodes pluvieux peu importants ($H < 60 \text{ mm}$ en 3 j) le système karstique expulse dans la phase piston un volume d'eau constant (0,28 millions de m^3) et une quantité chlorure constante ($572 \pm 106 \text{ t}$) et ceci indépendamment de l'état initial du système karstique (débit initial, teneur en chlorure initiale de la source).

Pour les crues de plus grande ampleur ($7 < Q < 28 \text{ m}^3/\text{s}$), générées par des épisodes pluvieux importants ($H > 60 \text{ mm}$ jusqu'à 200 mm en 3 jours), le volume d'eau expulsé par piston est globalement 2 fois supérieur ($0,58 \pm 0,06$ millions de m^3).

Les quantités de chlorure exportées apparaissent **fonction des conditions initiales du système**, et dépendent notamment des teneurs en chlorure de la source avant la crue. Plus les teneurs sont élevées, plus les flux de chlorure exportés sont importants.

d) Facteurs contrôlant les variations du flux de chlorure pendant les phases de dilution et de (re)concentration

Pour réaliser cette analyse, nous avons reporté les principales caractéristiques des différentes crues étudiées dans les illustrations 68 et 69. Le cumul des précipitations correspond à la somme des précipitations tombées sur le bassin d'alimentation au cours des trois jours qui ont précédé les différentes crues. Le volume évacué par la source pendant les phases de dilution correspond au volume compris entre le début de la première chute et la remontée de la conductivité (période D, cf. exemple de la crue n° 1 du 07 mars 2002, ill. 66).

Les flux de chlorure exportés ainsi que les valeurs instantanées en début et fin des périodes de dilution sont également reportés. Les paramètres hydrologiques des crues correspondantes sont également présentés.

n° Crue	Débit fin piston m3/s	Débit pic de de crue m3/s	Débit fin de dilution m3/s	Durée de la dilution (h)	Volume écoulé pendant dilution 10 ⁶ m3	Flux i. de Cl fin dilution kg/s	Flux de Cl exporté pendant la phase de dilution en tonne
1	2.40	2.40	1.25	65	0.40	0.82	412
2	7.98	9.74	9.29	24	0.77	1.47	375
3	11.37	15.20	14.81	23	1.09	0.67	424
4	9.31	12.50	12.04	21	0.85	2.47	651
5	3.23	3.23	2.47	37	0.38	4.19	775
6	7.92	7.92	6.40	31	0.78	5.75	1097
7	6.54	6.54	4.58	25	0.52	2.10	684
8	2.48	2.48	1.90	28	0.21	2.37	304
9	24.85	27.95	27.49	17	1.68	6.66	969
10	2.88	2.88	2.15	47	0.43	2.75	772
11	1.49	1.49	1.18	45	0.13	2.36	433

Illustration 68 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques des périodes de dilution.

n° Crue	Débit fin de Crue m3/s	Durée de la période dilution/reconcentration en heure	Flux de Cl exporté au cours de la période dilution/reconcentration en tonne	Volume écoulé 10 ⁶ m3	Flux i. de Cl fin de crue kg/s
1	0.96	361	1769	1.51	1.4
2	3.99	112	1394	2.51	4.7
3	1.73	412	8050	7.88	3.7
4	2.09	336	6873	5.73	4.5
5	1.13	430	5189	2.39	2.7
6	1.14	462	5666	3.50	2.6
7	1.34	406	4536	2.99	2.8
8	1.26	317	2911	1.75	2.5
9	1.86	464	11155	12.65	3.5
10	1.31	478	5271	2.75	3.0
11	1.15	169	1597	0.73	2.7

Illustration 69 - Caractéristiques hydrologiques et chimiques des périodes de (re) concentration.

Les durées des périodes de dilution sont relativement courtes (de 17 à 65 h) et apparaissent inversement proportionnelles au débit de pointe de crue. Plus le débit du pic de crue est important plus la période de dilution est courte et inversement (ill. 70a). De la même façon, une corrélation inverse est observée avec le débit de fin de dilution (ill. 70b). Ce résultat traduit en fait des vitesses d'écoulements différentes en fonction de l'importance des crues. Les crues importantes sont caractérisées par des vitesses d'écoulement plus importantes que les crues de moyennes ou de faibles ampleurs.

La relation qui relie les variables « durée de dilution » et débit est de type puissance ($Y = 60 * X^{-0,37}$, $R^2 = 0,599$).

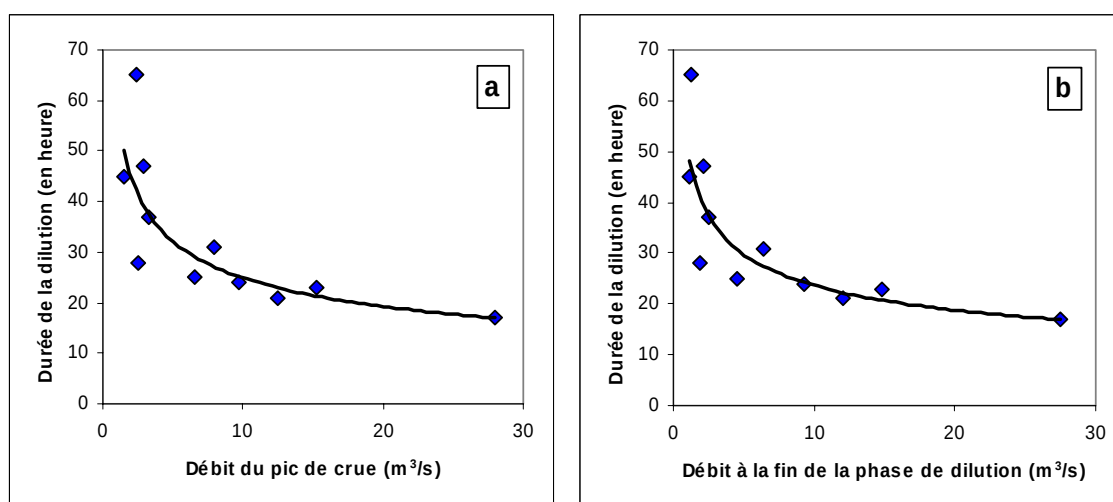


Illustration 70 - Évolution de la durée de la phase de dilution en fonction du débit.

Les durées des périodes de dilution/(re) concentration sont comprises entre 112 et 478 h, soit 20 jours au maximum. Ce temps est comparable au temps d'infiltration déterminé par l'analyse des courbes de récessions (19 jours $\pm$ 7, cf. § 1.2.6.).

Les flux de chlorure exportés lors des périodes de dilution/(re) concentration sont fonctions des variables : « pluie cumulée sur 3 jours », « débits de début et fin de piston » et volume pistonné. Ces variables expliquent 86,28 % de la variance du flux de chlorure (cf. test statistique n° 9, ann. 4).

L'évolution de la salinité de la source apparaît donc fonction de l'importance relative de chacun de ces paramètres. Ceci permet d'expliquer l'hétérogénéité de comportement de la source vis-à-vis des flux de chlorure exportés. En effet, on montre que les flux de salinité exportés par la source peuvent (ill. 71) :

- augmenter entre le début et la fin la crue (cas des crues 1, 2, 9 et 4 ; « groupe A ») ;
- rester stables (cas des crues 6, 7, 8 et 11 ; « groupe S ») ;
- diminuer entre le début et la fin la crue (cas des crues 3, 5 et 10 ; « groupe D »).

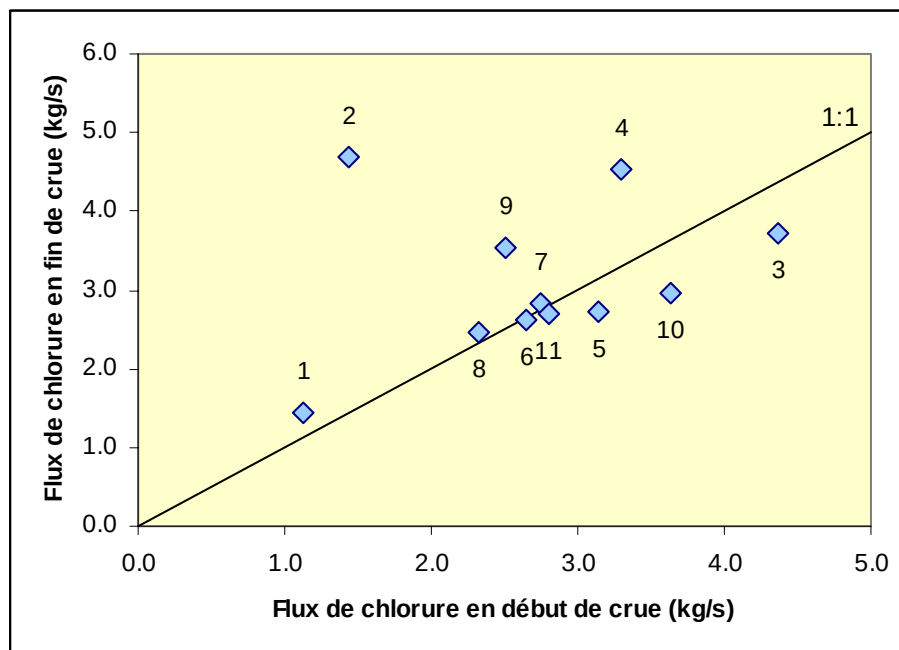


Illustration 71 - Évolution du flux de chlorure entre le début et la fin des crues.
(La droite de pente 1 représente la bissectrice).

Dans le cas du groupe « A », en fin de crue le système sollicite davantage la composante minéralisée. L'augmentation de la salinité proportionnellement au débit pourrait être expliquée par un phénomène d'aspiration d'eau de l'étang dans le karst, comparable à un effet Venturi pompant de l'eau salée (Arfib, 2001 ; Breznik, 1973 ; Williams, 1977 ; Combes & Ledoux, 1990). Ce phénomène « d'effet Venturi », s'il existe, devrait se traduire par une augmentation et non par une diminution de la salinité en période de crue (ill. 72).

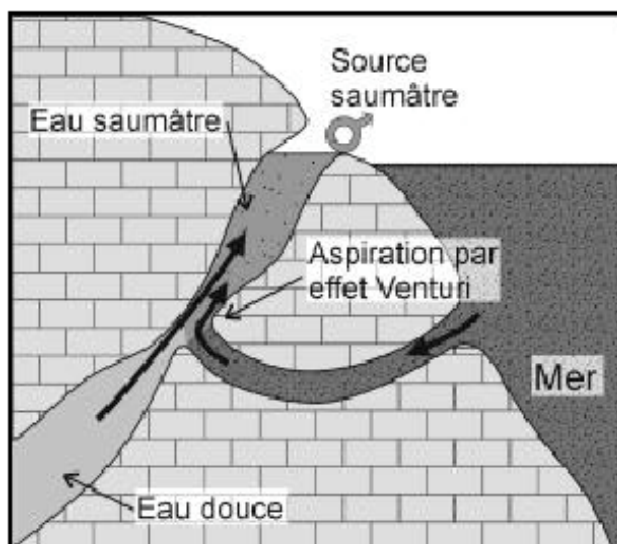


Illustration 72 - Coupe schématique d'une source salée par effet Venturi (d'après Arfib, 2001).

Une autre hypothèse peut également être proposée. L'augmentation de la salinité de la source se manifeste lorsque le karst présente des charges hydrauliques élevées et donc susceptibles d'autoriser des lignes de courant plus profondes. Elle peut être rattachée à une augmentation relative de la composante profonde de l'écoulement. Cette augmentation de la composante profonde peut être corrélée à une augmentation relative de la contribution des pertes au débit de la source. Cette hypothèse sera testée à l'aide de l'approche de modélisation globale par le logiciel Tempo. Selon cette hypothèse, l'augmentation de la salinité serait liée au mécanisme d'intrusion diffuse de salinité par différence de charge dans un ou plusieurs conduits en profondeur (ill. 73).

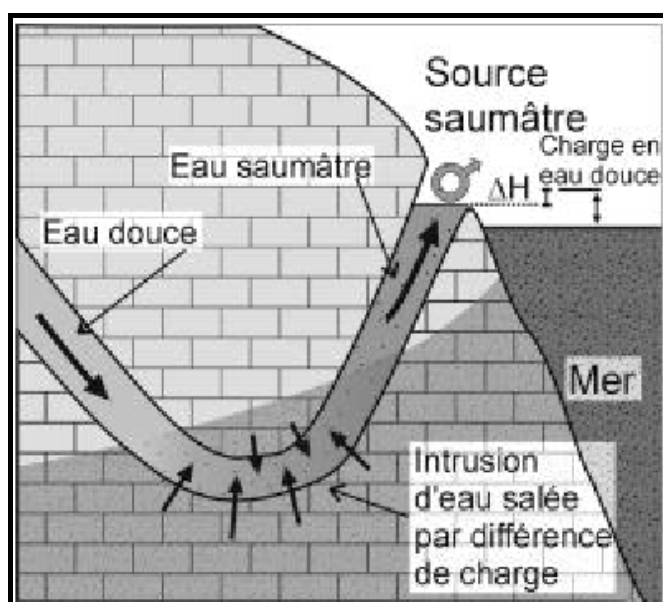


Illustration 73 - Coupe schématique d'une source salée par une intrusion diffuse d'eau marine en profondeur dans le conduit (d'après Arfib, 2001).

Dans le cas du groupe « S », le système est stationnaire. Le flux de chlorure exporté en fin de crue est similaire à celui exporté avant la crue. L'épisode de crue qui génère la crue n'affecte pas de manière durable les contributions relatives des composantes minéralisées et non salées. Ce phénomène est observé pour les crues de faible ampleur ($Q < 8 \text{ m}^3/\text{s}$) dans des contextes de basses eaux.

Dans le cas du groupe « D », le système en fin de crue sollicite moins la composante minéralisée. La diminution de la salinité peut être expliquée par le phénomène de dilution lié à une augmentation relative de la composante non salée qui contribue au débit de la source. Le système karstique n'est plus à l'état stationnaire.

e) Conclusion sur le fonctionnement de la source de Font Estramar

La source de Font Estramar présente un fonctionnement complexe lors des périodes de crue. Des effets de « seuils » contrôlent le comportement du système en fonction de l'importance relative de différents paramètres : « pluie cumulée sur 3 jours », « débits de début et fin de piston » et volume pistonné.

Le premier effet de seuil concerne le volume pistonné lors des crues. Le nombre de conduits ou de fractures sollicités par l'effet piston¹⁵ augmente brutalement en fonction de l'importance de la mise en charge du karst par les précipitations. Ainsi, les crues de faible ampleur ($< 7 \text{ m}^3/\text{s}$) générées par des épisodes pluvieux peu importants ($H < 60 \text{ mm}$ en trois jours) expulsent durant la phase piston un volume d'eau constant ($0,28$ millions de m^3) et une quantité constante de chlorure ($572 \pm 106 \text{ t}$) et ceci indépendamment de l'état initial du système karstique (débit initial, teneur en chlorure initiale de la source). Pour les crues de plus grande ampleur ($7 < Q < 28 \text{ m}^3/\text{s}$), générées par des épisodes pluvieux importants ($H > 60 \text{ mm}$ jusqu'à 200 mm en trois jours), le volume d'eau expulsé par piston est globalement 2 fois supérieur ($0,58 \pm 0,06$ millions de m^3). Contrairement aux faibles crues, les quantités de chlorure exportées sont fonction des conditions initiales du système et dépendent notamment des teneurs en chlorure de la source avant la crue. Plus les teneurs sont élevées, plus les flux de chlorure exportés sont importants.

Le second effet de seuil concerne le flux de chlorure exporté au cours des phases de dilution/(re)concentration. Trois types d'évolution sont constatés pour le flux de chlorure entre le début et la fin de crue : stabilité (groupe S), diminution (groupe D) et augmentation (groupe A). Le passage d'un état à l'autre est complexe et est fonction de l'importance relative de chacun des paramètres contrôlant le système « pluie cumulée sur trois jours », « débits de début et fin de piston », « volume pistonné » et « teneurs en chlorure de la source avant la crue ». Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas encore possible de faire la pondération pour chaque groupe.

L'évolution à long terme des flux de chlorure qui se traduit dans un premier temps par une augmentation significative après les crues importantes des périodes printanières, puis, dans un second temps, par une légère diminution en fin d'étiage suggère que le comportement global du système karstique est contrôlé par l'importance relative des deux composantes de l'écoulement, c'est-à-dire aux composantes superficielle (froide) et profonde (chaude).

La salinité du système paraît être liée à l'effet de densité, c'est-à-dire aux différences de charge entre les conduits où circule l'eau douce et la matrice calcaire qui l'entoure comparable à un milieu homogène, saturée en eau de l'étang, selon une intrusion saline classique en forme de biseau salé. L'intrusion du biseau salé est fonction de la hauteur d'eau dans l'étang, dépendant elle-même de divers paramètres tels que l'effet barométrique ou l'attraction lunaire par exemple. Deux modes d'intrusion d'eau salée de l'étang sont possibles pour le système karstique d'Opoul :

- le premier direct, dans les zones où les calcaires sont directement en contact avec l'étang (ill. 74) ;
- le second indirect, par l'intermédiaire de la faille de Leucate d'orientation NE-SO, dans le prolongement de la faille de Prades, qui passe au niveau de l'étang.

¹⁵ Le volume pistonné correspond au volume compris entre l'augmentation du débit et le début de la première chute de la conductivité (cf. ill. 65).

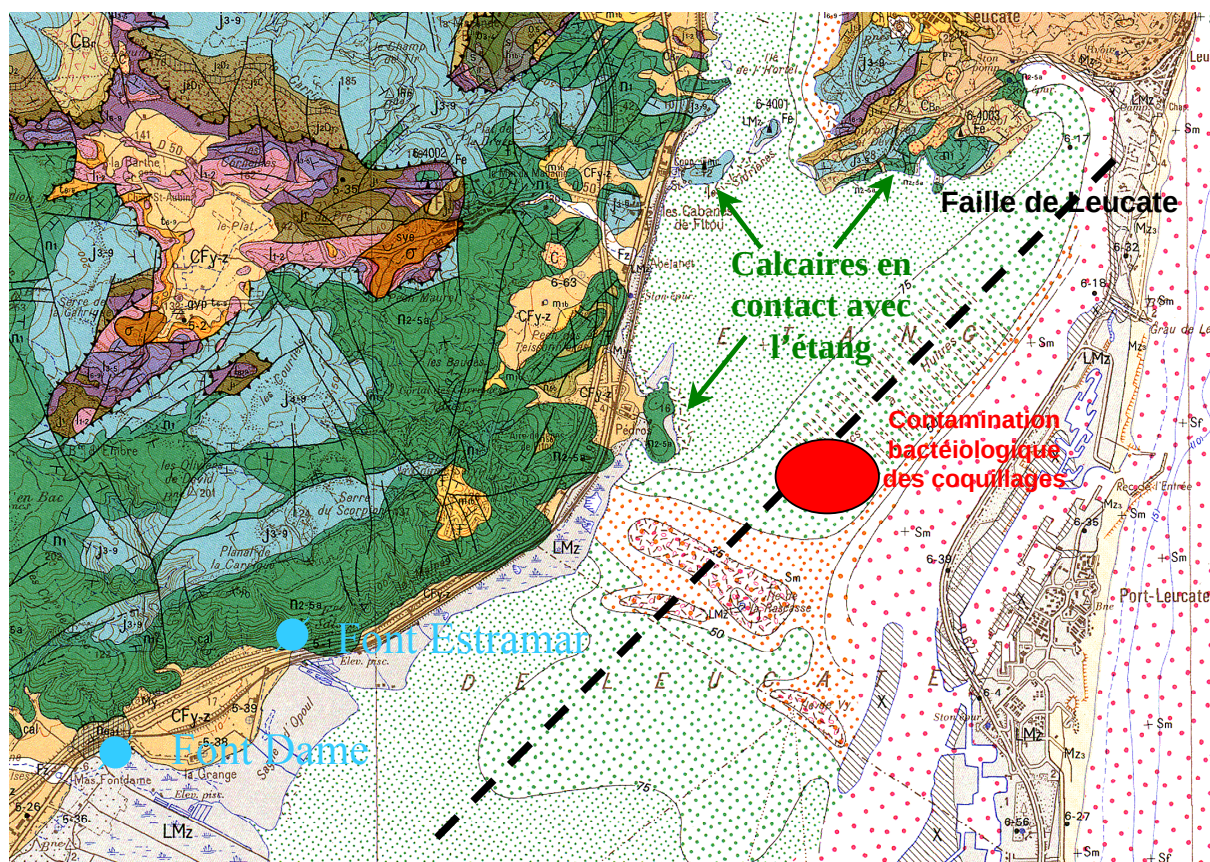


Illustration 74 - Contexte géologique au niveau de l'étang de Salses Leucate (extrait de la carte n° 1079 à 1/50 000, © BRGM copyright).

En effet, l'étude sur la recherche de la contamination bactériologique de certaines tables conchylicoles de l'étang de Salses Leucate (Ladouche *et al.*, 2000) a permis de montrer qu'une relation hydraulique existe entre le fond de l'étang et les calcaires de Leucate en période de hautes eaux lorsque le karst est en charge. En période de basses eaux, la charge dans le karst n'est pas suffisante pour observer de l'eau douce au fond de l'étang (Ladouche *et al.*, 2000) et le phénomène inverse (intrusion) n'est pas à exclure. Ce phénomène est connu et nommé dans la littérature par le terme français « inversac ».

Une représentation conceptuelle du fonctionnement du système karstique est présentée à l'illustration 75. Dans ce schéma sont reportées les différentes circulations des eaux au sein du système ainsi qu'une position « schématique » du biseau salé. Le karst alimente les chenaux fluviaux du Pliocène continental comme on l'a montré par l'étude géochimique des interactions karst/plio-quaternaire (cf. § 2.5.2.). Aucune information n'est disponible sur l'extension spatiale de l'intrusion salée, exceptée celle déterminée à l'aide des échantillons d'eau prélevés par les plongeurs (cf. localisation ill. 61). Les eaux prélevées dans le « boulevard » et la « galerie chaude » présentent la même salinité que celle de la Vasque. Les eaux de l'ensemble du réseau exploré par les plongeurs apparaissent donc salées.

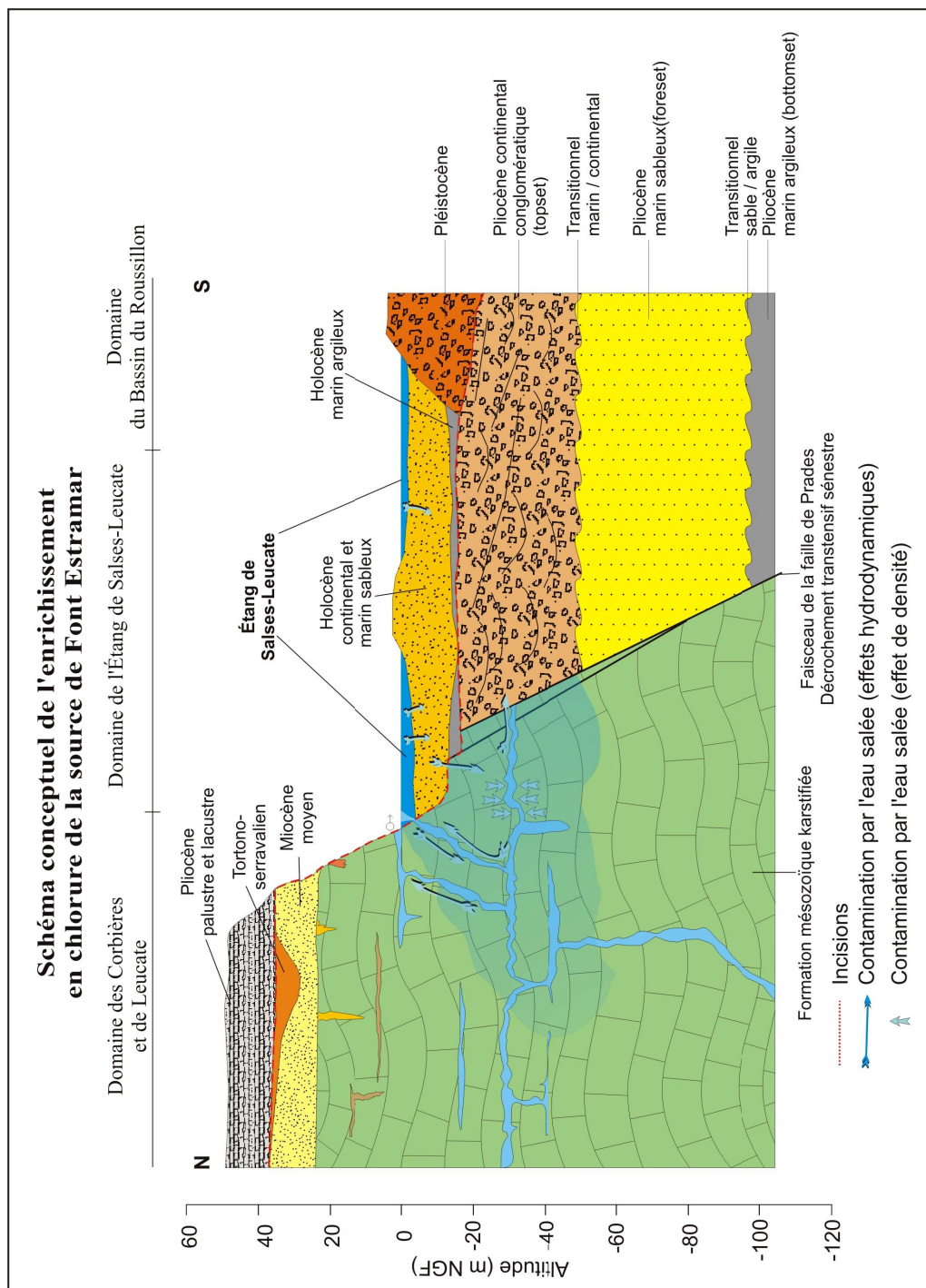


Illustration 75 - Coupe schématique interprétative du fonctionnement hydrogéologique du système karstique au niveau de la source de Font Estramar.

Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer ce résultat :

- **hypothèse 1** : la matrice calcaire qui entoure les drains karstiques reconnus par les plongeurs est affectée par l'intrusion saline, ou
- **hypothèse 2** : l'effet de densité se produit en profondeur (> 164 m) et les drains subhorizontaux situés entre - 50 et - 30 m NGF sont envahis par l'eau profonde issue notamment du « puits du loukoum géant ». La matrice calcaire qui entoure les drains karstiques reconnus par les plongeurs n'est pas significativement affectée par l'intrusion saline car elle présente une très faible porosité efficace.

Dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas en mesure de trancher entre ces deux hypothèses.

Dans le but de caractériser l'extension éventuelle en profondeur de l'intrusion marine dans le karst, il conviendrait d'échantillonner les eaux dans le Pliocène sableux marin (> 60 m) à l'aide d'un ouvrage qui serait implanté entre les sources de Font Dame et Font Estramar. En effet, le Pliocène marin sableux dans ce secteur est vraisemblablement alimenté par les eaux du karst de manière similaire aux chenaux fluviale du Pliocène continental.

2.3.4. Synthèse sur le fonctionnement géochimique

La caractérisation du fonctionnement hydrogéochimique du système karstique des Corbières d'Opoul - Synclinal du Bas-Agely a permis de mettre en évidence :

- la corrélation de la minéralisation avec la conductivité électrique des eaux des deux exutoires ;
- une différence de comportement entre les deux sources, Font Estramar et Font Dame, la minéralisation et la température des eaux de la source de Font Dame ne variant que très faiblement au cours du temps ;
- l'existence de processus de mélange d'eaux lors des crues notamment, avec une eau moins minéralisée et de plus faible température, correspondant à la contribution des eaux des précipitations ayant transité par l'épikarst ;
- l'existence d'une eau d'origine plus profonde qui se marque pendant plusieurs semaines après les épisodes pluvieux.

Le faciès chimique des eaux est de type chloruré sodique. Les eaux des sources présentent une anomalie thermique de + 2 à + 2,5 °C par rapport aux valeurs des températures attendues pour les eaux souterraines de la région (+ 15,5 °C). La composante profonde et chaude de l'écoulement est caractérisée par des eaux d'infiltrations récentes comme en témoigne les valeurs de tritium des analyses, ayant circulé à une profondeur maximale de 400 m (360 à 390 m déterminée à l'aide du géothermomètre silice). La contribution à hauteur de 10 % pour la source de Font Estramar et de 5 % pour les eaux de Font Dame, d'eau saline provenant de l'étang de Salses Leucate, a été démontrée par la signature hydrogéochimique. Les eaux des sources sont globalement toutes enrichies en calcium, sulfate et strontium par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer, indiquant une interaction eau-roche, donc avec l'encaissant géologique.

L'enrichissement en sulfates des eaux des sources par rapport aux valeurs attendues en considérant les proportions de mélange entre l'eau de l'étang (10 %) et l'eau des pluies efficaces (90 %) est lié à la participation des eaux des pertes du Verdoube et de l'Agly aux écoulements du système karstique. En effet, les eaux des pertes présentent des teneurs significatives en sulfates (de l'ordre de 150 mg/l). Les eaux des sources résultent d'un mélange d'eau issu de deux à trois pôles, variable avec le régime hydrologique. Ces trois pôles sont le pôle « étang », le pôle « pertes » et un pôle « karst » non influencé, comme on peut le caractériser au niveau des eaux du forage du Roboul.

La caractérisation du mécanisme de la salinisation de la source de Font Estramar a été réalisée en analysant l'évolution temporelle du débit, de la conductivité et des flux de chlorure, en considérant l'effet de piston (volume d'eau présent dans le conduit et expulsé avant que l'eau récente ne parvienne à la résurgence) à partir de la méthodologie développée par Arfib (2001). Le volume de l'effet piston n'est pas constant, mais montre deux seuils (0,28 et 0,68 millions de m³) expulsés par le système. Il semblerait que l'effet piston augmente en fonction de l'importance de la mise en charge du système karstique par les précipitations.

Lors des périodes de crues, le système présente un fonctionnement complexe ; des « effets de seuil » contrôlent son comportement en fonction de trois paramètres, à savoir la hauteur de pluie cumulée sur trois jours, les débits de début et de fin de l'effet piston et le volume pistonné. De plus, l'évolution à long terme des flux de chlorure est contrôlée par la recharge binaire du système (pertes et précipitations au niveau de l'impluvium karstique), influant sur l'organisation des écoulements : composante superficielle (froide) et composante profonde (chaude).

2.4. ANALYSES QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU SYSTÈME KARSTIQUE PAR L'APPROCHE DE MODÉLISATION GLOBALE DITE « BOÎTE NOIRE » À L'AIDE DU LOGICIEL « TEMPO »

2.4.1. Objectifs

Le suivi en continu d'un débit, d'un niveau piézométrique ou de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température de l'eau renseigne sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème. Ces mécanismes font intervenir la recharge, mais également la contribution des différentes connexions hydrauliques.

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles sont estimées à partir de séries chrono-

logiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

Le principe de la méthode est décrit dans le volume I « Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation », BRGM/RP-52918-FR.

2.4.2. Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système du karst d'Opoul pris dans sa globalité (QFont Dame + QFont Estramar)

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les processus qui contrôlent l'évolution des débits aux exutoires des sources karstiques littorales de Font-Dame et Font Estramar.

L'étude a porté de manière globale sur la somme des débits des sources de Font Dame et Font Estramar pour la période juin 1997-septembre 2003. Les chroniques de pluie et d'ETP utilisées sont les suivantes :

- ETP à Perpignan (données Météo France) ;
- pluie à Perpignan, Fitou, Opoul-Périllos et à La Tour de France (données Météo France) ;
- pluie à Périllos, Tautavel et Vingrau (données DAFF 66).

La première analyse a consisté à déterminer quels sont les sites pluviométriques qui permettent d'expliquer au mieux la variance des débits aux exutoires. Cette analyse a été menée à l'aide de l'option pondération des chroniques de pluie de Tempo qui consiste à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie.

Le meilleur corrélogramme croisé (pluie-débit, ill. 76) a été obtenu à partir de la combinaison linéaire suivante :

$$0,33 \cdot \text{Perpignan} + 0,19 \cdot \text{laTour} + 0,16 \cdot \text{Périllos} + 0,32 \cdot \text{Vingrau}$$

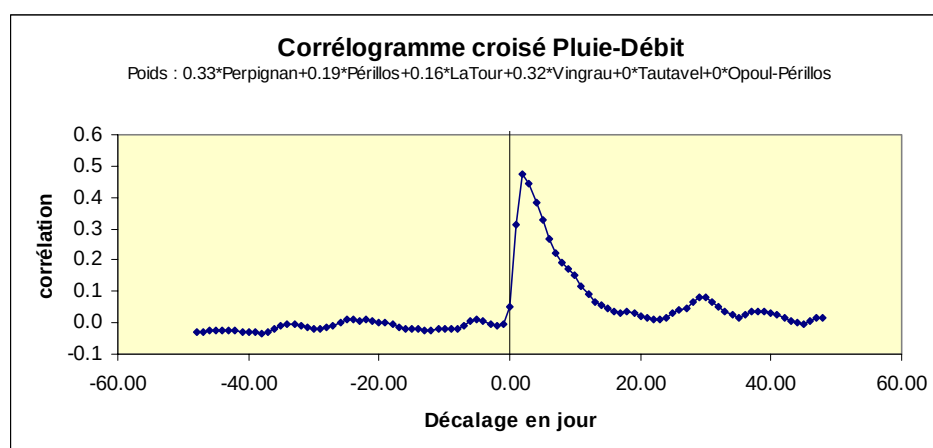


Illustration 76 - Corrélogramme croisé pluie-débit obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).

Sur la base de ces résultats et de l'ETP de Perpignan, nous avons caractérisé la réponse impulsionnelle globale du système (ill. 77a) qui permet de reproduire au mieux les débits mesurés (ill. 77b).

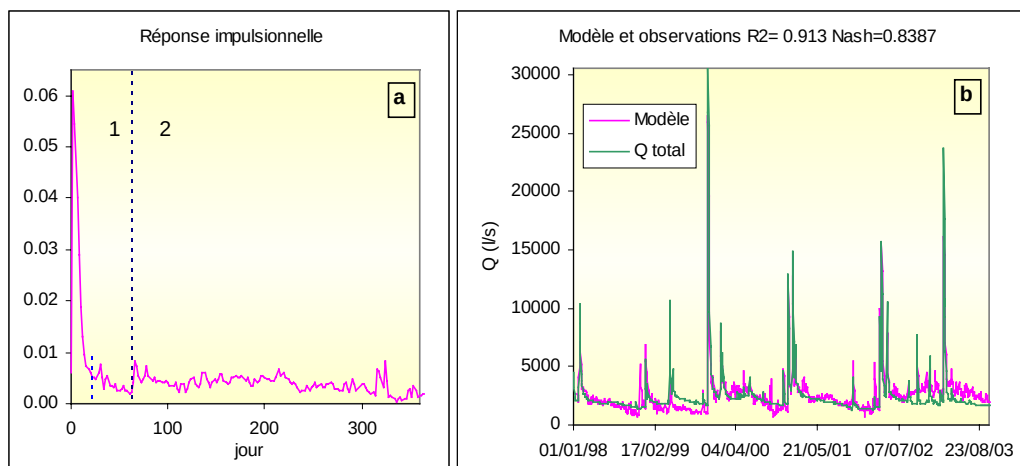


Illustration 77 - Réponse impulsionnelle (a) et comparaison du débit modélisé au débit mesuré (b) : écart-type = 888 l/s ; 91 % de la variance totale expliquée).

Le modèle permet de reproduire assez fidèlement l'évolution observée, les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits. Le modèle permet d'expliquer 91 % de la variance totale observée ce qui constitue un bon résultat. Le calcul de l'hydrogramme unitaire indique qu'il n'y a pas de composante non linéaire (« effet de chasse ») pour le système karstique pris dans sa globalité (QFont Dame + QFont Estramar). La réponse impulsionnelle de la recharge montre un maximum très prononcé le 1^{er} jour, puis décroît de manière très rapide jusqu'à ce que le décalage atteigne 20 jours puis de manière plus ou moins exponentielle pendant 60 jours environ. À cette décroissance, fait suite une légère augmentation puis un « plateau » jusqu'à ce que le décalage atteigne 320 jours environ. Le premier comportement (1) évoque la recharge, puis la vidange d'un réservoir alimenté par les précipitations, le second évoque un soutien significatif des débits par des pertes karstiques lors des étiages. Ce résultat corrobore ceux obtenus par les autres méthodes d'investigation et notamment ceux de l'approche géochimique.

Les résultats de la meilleure simulation présentée précédemment ont été obtenus à l'aide des paramètres suivants :

- contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace égale à 45 %, ce qui représente 245 mm de pluie efficace pour le cycle 2001-2002 par exemple ;
- surface du bassin d'alimentation = 274 km².

Le débit moyen cumulé à l'exutoire global du système sur la période considérée (1998-2003) est de 2 500 l/s.

La surface globale du bassin d'alimentation calculée par Tempo apparaît très nettement supérieure à la surface de l'impluvium des calcaires affleurants (166 km², cf.

§ 2.1.4.). Cette différence s'explique principalement en raison de l'alimentation du système par les pertes de l'Agly et du Verdoube.

Dans la procédure de calcul utilisée par Tempo, les débits de fuite vers le Plio-Quaternaire et les débits d'autres sources (Fort de Salses, Fitou et Malpas), ainsi que la contribution de l'eau salée en provenance de l'étang ne sont pas pris en compte. La surface de 274 km² estimée pour le bassin d'alimentation constitue donc une limite inférieure.

Les premiers résultats obtenus, exprimés différemment, permettent de mettre en évidence les points suivants selon les hypothèses considérées :

- **Hypothèse 1 :**

- si l'on suppose que toute la pluie efficace précipitée sur l'impluvium des calcaires affleurants contribue exclusivement aux débits des sources de trop-plein de Font Dame et Font Estramar, la pluie efficace contribuerait donc pour 60 % à l'écoulement total ($166/274 = 0,60$), soit pour environ 1 500 l/s ;
- par différence, l'alimentation par les pertes karstiques contribuerait donc pour 40 % à l'écoulement total du système [$(274-166)/274 = 0,40$], soit pour environ 1 000 l/s. Or, on a montré précédemment que le débit moyen des pertes (Agly + Verdoube) est de l'ordre de 1 500 l/s. Le bilan des flux entrant et sortant fait donc + 500 l/s, autrement dit il faut considérer que les débits de fuite vers le Plio-Quaternaire et les débits d'autres sources, sont au total de 500 l/s.

- **Hypothèse 2 :**

- à l'inverse, si l'on suppose que toutes les pertes (1 500 l/s, Agly + Verdoube) contribuent exclusivement aux débits des sources de trop-plein de Font Dame et Font Estramar, la part de la contribution de la pluie efficace à l'écoulement serait alors de 40 % (1 000 l/s) pour expliquer le débit moyen (2 500 l/s) des sources. La surface de l'impluvium de calcaire¹⁶ affleurant correspondante serait alors de 110 km².

Sur la base du bilan d'entrée (débit moyen des pertes : 1 500 l/s et de la pluie efficace sur l'impluvium des calcaires affleurants : 166 km² = 1 500 l/s), on montre donc qu'une part significative d'eau (500 l/s) ne contribue pas à l'alimentation des sources du littoral (Font Dame et Font Estramar). Un débit moyen de 500 l/s environ échappe donc au trop-plein de Font Dame et Font Estramar. En considérant les débits des autres sources du système (Fort de Salses : 10 à 20 l/s ; source du lavoir de Salses : 10 à 20 l/s ; Fitou et Malpas : 15 l/s ; source temporaire de Cases de Pène : débit maximum estimé de 8,6 m³/s en période de crue lorsque le trop-plein fonctionne, soit 3,8 millions de m³ écoulés entre le mars 2001 et septembre 2003¹⁷), on estime que le flux d'eau qui alimente les formations du Plio-Quaternaire est au minimum de 350 l/s (débit moyen).

¹⁶ $S = (166 \text{ km}^2 \cdot 1\,000 \text{ l/s}) / (1\,500 \text{ l/s})$.

¹⁷ Les résultats relatifs à l'estimation des débits des trop-pleins de Cases de Pène en crue sont présentés en annexe 5. Sur la période d'observation, mars 2001 à septembre 2003, les flux écoulés par les trop-pleins (3,8 millions de m³) correspondent à un débit moyen de 104 l/s (valeur indicative).

Il s'agit en effet d'une estimation par défaut car on a négligé, dans le bilan d'entrée, la contribution de l'eau salée (en provenance de l'étang) qui contribue à l'alimentation des sources de Font Dame et Font Estramar. En prenant en compte la contribution de l'eau salée (10 % pour Font Estramar et 5 % pour Font Dame)¹⁸, on estime la contribution moyenne de l'eau salée à 210 l/s¹⁹. Ce dernier résultat permet d'affiner l'estimation des débits de fuite vers les formations du Plio-quatenaire. Le flux d'eau qui alimente ces formations serait de l'ordre de 550 l/s.

Sur la base de ces nouveaux résultats, la surface du bassin d'alimentation du système karstique d'Opoul et du Bas-Agly peut être évaluée à 300 km².

Nos allons maintenant avancer dans l'analyse des phénomènes en considérant les débits des pertes de l'Agly et du Verdoble estimé au pas de temps journalier selon la méthode exposée au paragraphe 2.2.9, afin d'améliorer notre connaissance sur les modalités de transfert du système karstique.

2.4.3. Modélisation inverse du système karstique d'Opoul en intégrant les pertes de l'Agly et du Verdoble

Ce travail a pour objectif la caractérisation des réponses impulsionnelles de la pluie efficace et des pertes de l'Agly et du Verdoble à partir de la chronique des débits des sources de Font Dame et Font Estramar.

Dans cette étude, on a pris en compte le débit journalier des pertes de l'Agly et du Verdoble estimés suivant la méthode exposée au paragraphe 2.2.8.

Les calculs ont été réalisés pour la période s'étendant du 01/11/1999 au 15/08/2003, période pour laquelle nous disposons de toutes les données d'entrée et de sortie. Les données d'ETP journalières utilisées sont celles de la station de Perpignan (données Météo France). Les données de pluie sont celles estimées précédemment (cf. § 2.4.2.).

Dans cette analyse (premier scénario), nous avons cherché à évaluer le comportement du système karstique dans le cas où une part seulement (cf. hypothèse 1) des débits des pertes de l'Agly et de Verdoble contribue à l'alimentation des sources de trop-plein de Font Dame et Font Estramar. Les calculs ont donc été réalisés en considérant que toute la pluie précipitée sur l'impluvium des calcaires affleurants (166 km²) contribue exclusivement à l'alimentation des sources de trop-plein et qu'une partie seulement des pertes contribue à l'alimentation (débit moyen de 1 000 l/s contre 1 500 l/s comme estimé précédemment, cf. § 2.2.8.). La chronique de débit des pertes utilisées a donc été définie par la somme des débits de l'Agly et du Verdoble multipliée par un facteur de 0,7 (1 000/1 500), afin de satisfaire les conditions de cette hypothèse.

¹⁸ Contribution estimée à l'aide des chroniques de conductivité et des concentrations en chlorure mesurées dans les eaux.

¹⁹ $(Q_{\text{moy}} \text{ FE}) * 10 \% + (Q_{\text{moy}} \text{ FD}) * 5 \% = 210 \text{ l/s.}$

Dans ce scénario, on impose donc les contributions relatives moyennes des pertes et de la pluie efficace pour le fonctionnement du système.

La technique d'inversion consiste à calculer les réponses impulsionnelles des pertes et de la pluie efficace (ill. 78) et le seuil Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé (ill. 79).

Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et de l'ETP de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Plusieurs tests ont été réalisés, les meilleurs résultats ont été obtenus pour une surface équivalente de bassin d'alimentation égale à 270 km².

Les résultats de la modélisation (ill. 79) reproduisent globalement assez bien l'évolution observée, les pics de crue sont bien reproduits. Le modèle explique 92,5 % de la variance totale observée ce qui constitue un bon résultat (critère de Nash = 0,85). Le modèle a tendance à sous-estimer le débit de fin d'étiage de 2000. Ce résultat peut s'expliquer par une sous-estimation des débits des pertes de l'Agly et du Verdoube.

Le calcul des réponses impulsionnelles (ill. 78) indique qu'il n'y a pas de composante non linéaire (« effet de chasse ») pour le système karstique pris dans sa globalité. La réponse impulsionnelle de la recharge (pluie efficace) montre un maximum prononcé le 2^e jour, puis décroît de manière plus ou moins exponentielle pendant 60 jours environ. La réponse du système karstique à un épisode de pluie efficace se fait donc ressentir pendant 60 jours environ.

La réponse impulsionnelle des pertes est bi-modale. Elle présente dans un premier temps une décroissance rapide les premiers jours (jusqu'à 6 j), puis intervient majoritairement lorsque les décalages sont supérieurs à 60 jours.

La première partie de la réponse évoque une contribution par effet de transfert de pression, tandis que la seconde partie traduit uniquement une alimentation. Ce dernier point permet de souligner l'importance de l'alimentation par les pertes lors des périodes de récession.

Les temps de transit des deux composantes de l'écoulement calculé à partir des réponses impulsionnelles sont :

- recharge par les pluies efficaces : temps de transit moyen de l'eau = 15 jours ;
- alimentation par les pertes : temps de transit moyen de l'eau = 105 jours. Il s'agit d'une borne inférieure car la réponse impulsionnelle ne peut être calculée au-delà de 250 jours car la fenêtre d'observation ne couvre que trois cycles hydrologiques).

Les résultats précédents conduisent à réexaminer l'hydrogramme unitaire déterminé pour l'ensemble du système (ill. 77). On met en évidence, que la rupture dans l'hydrogramme unitaire que l'on observe autour de 60 jours est à attribuer à la fin de l'influence majoritaire de la recharge par les pluies efficaces.

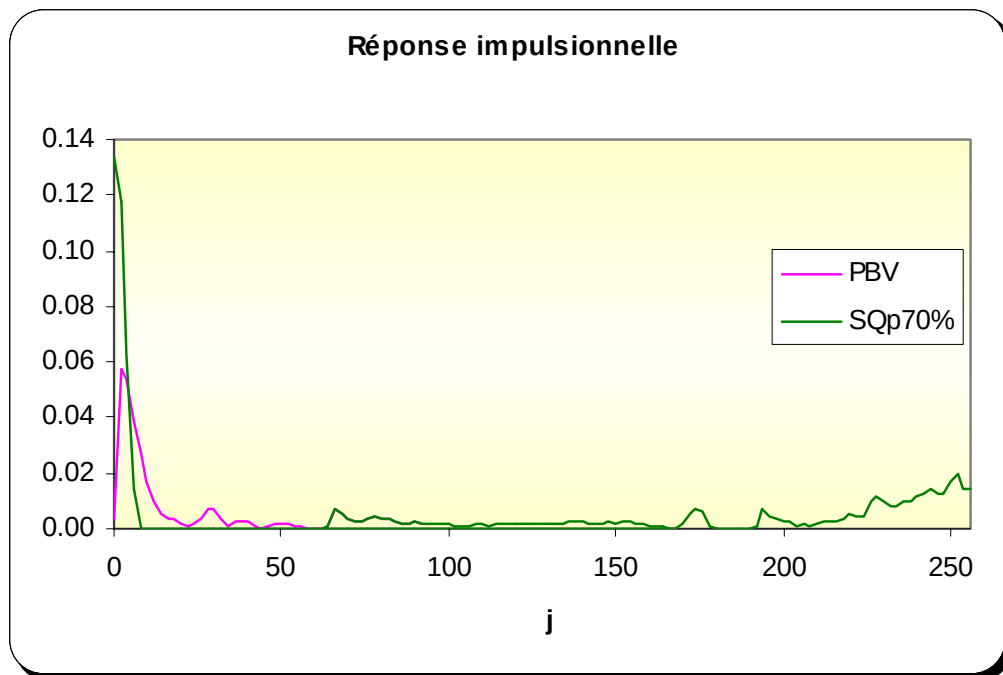


Illustration 78 - Hypothèse 1 : réponses impulsionnelles de la pluie efficace et des débits des pertes du système karstique d'Opoul.

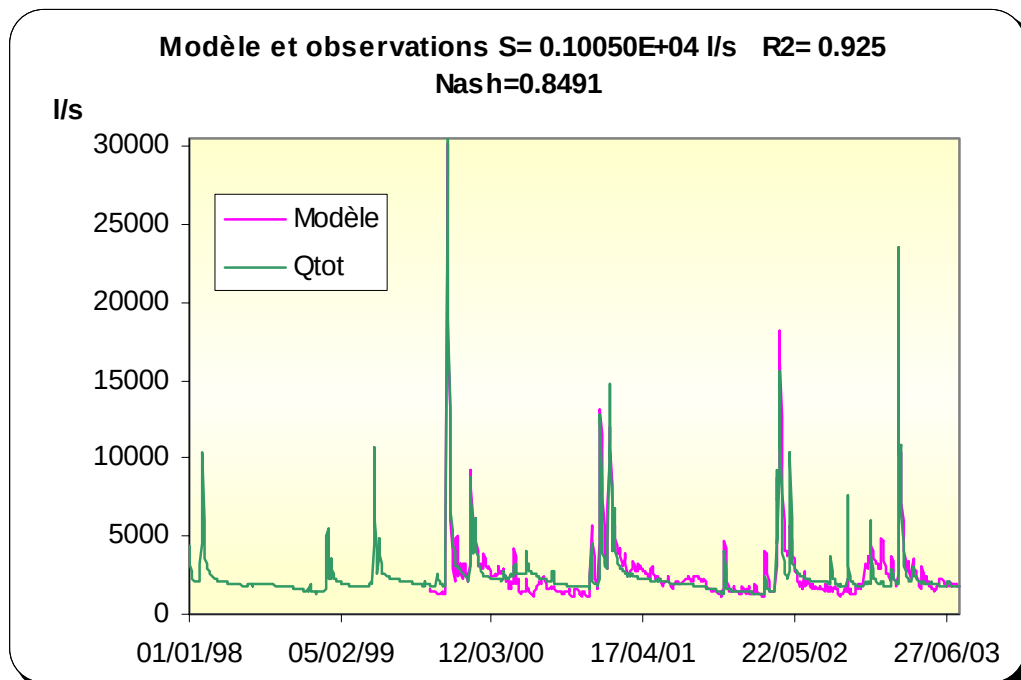


Illustration 79 - Hypothèse 1 : comparaison du débit modélisé aux débits mesurés (QFont Dame + QFont Estramar) : (93 % de la variance totale expliquée).

L'hydrogramme unitaire de l'ensemble du système karstique peut ainsi être décomposé de la manière suivante (ill. 80) :

- première partie (ill. 80) : l'essentiel de l'écoulement est assuré par la contribution de la pluie efficace (jusqu'à 26 jours) et par l'effet de transfert de pression des pertes ;
- deuxième partie (ill. 80) : l'écoulement est essentiellement assuré par l'alimentation par les pertes.

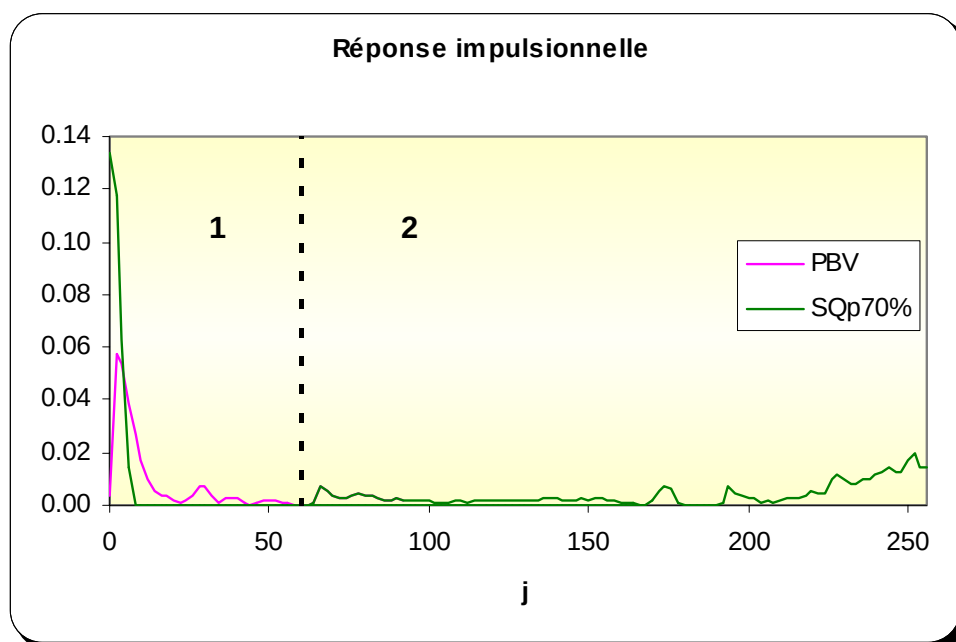


Illustration 80 - Hypothèse 1 : identification des différentes parties de l'hydrogramme unitaire du système karstique pris dans sa globalité.

L'évolution relative des contributions des pertes et de la recharge par les pluies efficaces est présentée à l'illustration 81. Lors des périodes de basses eaux, l'essentiel de l'écoulement des sources est assuré par l'alimentation par les pertes.

Dans une seconde analyse, nous avons évalué le comportement du système karstique à l'aide des paramètres de la seconde hypothèse (toutes les pertes de l'Agly et du Verdoube contribuent exclusivement aux débits des sources de trop-plein de Font Dame et Font Estramar ; la contribution de la pluie efficace à l'écoulement représente 40 %).

Les résultats en termes de fonction de transfert ne diffèrent pas de ceux obtenus précédemment (illustrations non présentées). Les caractéristiques des réponses impulsionnelles sont similaires à celles de l'illustration 80.

La seule différence se marque au niveau de la qualité de la simulation. Les débits modélisés sont légèrement moins bien restitués que précédemment (ill. 82), le coefficient de Nash étant moins bon que celui obtenu précédemment (cf. ill. 79, 0,82

contre 0,85 dans le premier scénario). Ce résultat apparaît relativement cohérent avec les résultats géochimiques dans la mesure où, la signature géochimique des eaux de Cases de Pène est très nettement influencée par l'eau des pertes, comme on l'a montré précédemment (cf. § 2.3.2.).

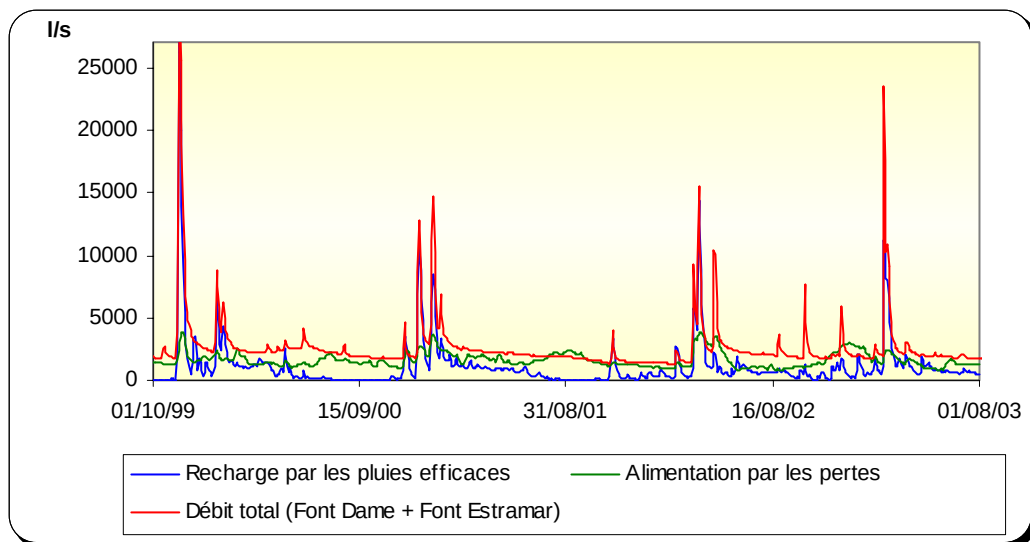


Illustration 81 - Hypothèse 1 : évolution temporelle des contributions des composantes de l'écoulement.

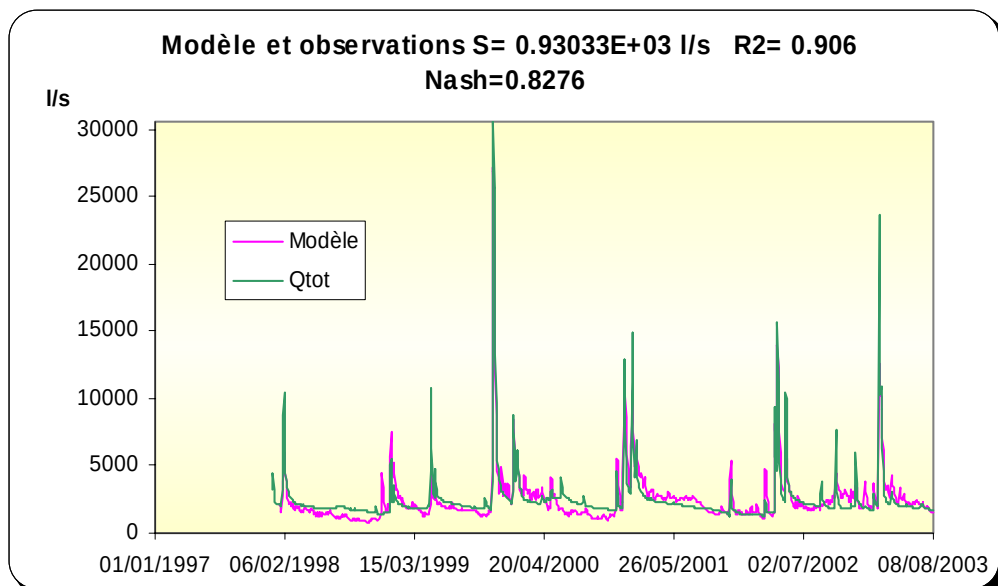


Illustration 82 - Hypothèse 2 : comparaison du débit modélisé aux débits mesurés (QFont Dame + QFont Estramar) (90 % de la variance totale expliquée).

2.4.4. Modélisation inverse des relations pluie-débit et des variations temporelles de la température et des teneurs en chlorure du système karstique de Font Estramar

a) Démarche adoptée et données utilisées

L'objectif de cette étude est d'utiliser une technique de séparation des hydrogrammes qui a été développée récemment (Pinault *et al.*, 2001). Cette méthode repose sur l'analyse des processus linéaires et non linéaires (effet de chasse) et sur la reconstruction de la composante linéaire de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison des fonctions de transfert chimiques (flux de Ca et Mg par exemple), représentant respectivement la composante événementielle et pré-événementielle²⁰.

Les eaux du système karstique de Font Estramar sont caractérisées par d'importantes variations de minéralisation et de température comme on l'a montré précédemment (§ 2.3.). Nous allons utiliser ces propriétés pour séparer les composantes de l'écoulement à partir des chroniques de température et de teneurs en chlorure que l'on estime à partir de la chronique de conductivité (cf. § b).

Dans l'approche utilisée, les teneurs en chlorure permettent de caractériser la composante pré-événementielle, c'est-à-dire la composante profonde (chaude et minéralisée) du système. La température a été utilisée, après normalisation, pour caractériser la composante événementielle, c'est-à-dire la composante liée à l'infiltration par les pluies efficaces. La variable « température normalisée » a été définie de la manière suivante :

$$T_{\text{normalisée}} = (T_{\text{sce}} - T_{\text{karst}}) / (T_{\text{profond}}).$$

Avec T_{sce} la température mesurée à la source de Font Estramar, T_{karst} la température de l'eau d'infiltration ($T = 15\text{ °C}$) et T_{profond} la température d'équilibre de l'eau du réservoir profond ($T = 30\text{ °C}$ déterminée par l'utilisation du géothermomètre à silice, cf. § 2.3.2.c). Les valeurs absolues de ces températures ne sont pas très importantes, car ce sont les variations relatives que l'on utilise principalement dans cette approche. En procédant à cette normalisation, on dispose ainsi de deux variables qui évoluent de manière opposée au cours du temps (ill. 83).

La technique de modélisation inverse utilisée permet de reconstruire l'hydrogramme unitaire à partir des réponses impulsionnelles des composantes événementielle et pré-événementielle, ces réponses impulsionnelles étant utilisées dans leur intégralité, ce qui confère à cette technique de décomposition de l'hydrogramme tant son originalité que sa robustesse.

²⁰ La décomposition des hydrogrammes à l'aide de traceur géochimique apporte des informations pertinentes lorsqu'il est possible de discriminer l'eau événementielle et pré-événementielle. Autrement dit, il faut que les paramètres observés à l'exutoire du système étudié présentent des variations significatives (contraste de concentration important entre les périodes de crue et d'étiage par exemple). Les variations observées à la source de Font Dame (cf. § 2.3.2.) ne sont pas suffisamment contrastées pour appliquer la méthodologie TEMPO à ce sous-système.

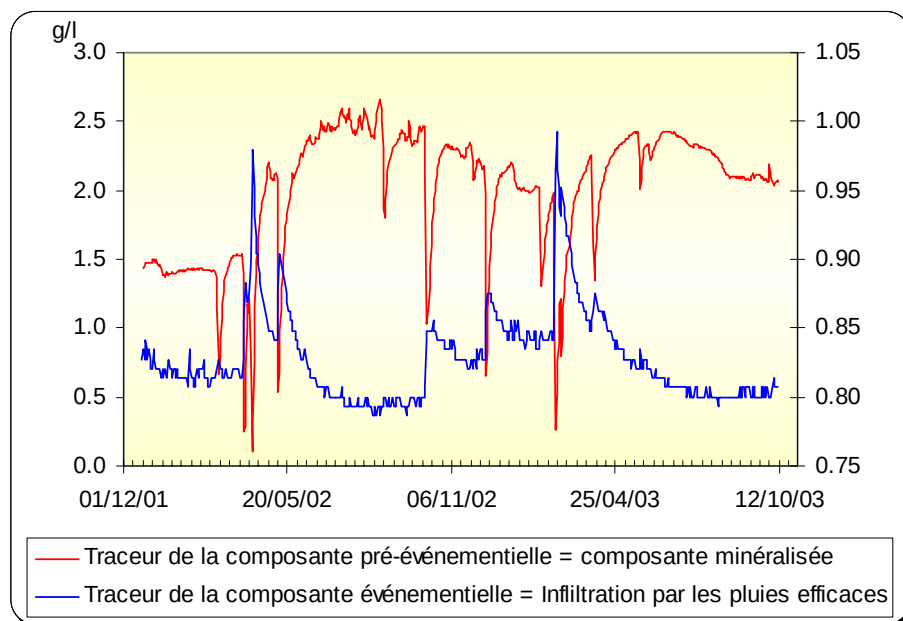


Illustration 83 - Évolution temporelle des variables caractérisant les composantes événementielle et pré-événementielle de l'écoulement.

Dans un premier temps, il convient de déterminer l'hydrogramme unitaire de la source de Font Estramar. Au préalable, nous avons utilisé la technique de pondération des pluies pour déterminer quels étaient les postes pluviométriques qui permettent d'expliquer au mieux les débits de Font Estramar. Le meilleur corrélogramme croisé (pluie-débit) a été obtenu à partir de la combinaison linéaire suivante :

$$0,17 * \text{Perpignan} + 0,25 * \text{Opoul-Périllos} + 0,33 * \text{Tautavel} + 0,25 * \text{Vingrau}.$$

L'étude a porté sur les données enregistrées et mesurées entre le 18/12/2001 et le 11/10/2003. Les données d'ETP journalières utilisées sont celles de la station de Perpignan (données Météo France).

b) Modélisation inverse (pluie-débit) du système de Font Estramar.

Dans cette étude, la contribution des pertes (débit et flux chimiques des pertes) n'est pas explicitement intégrée à l'analyse. L'étude permet de caractériser la réponse globale du système karstique (les signaux « pluie » et « pertes » sont intégrés à l'exutoire, la déconvolution de la part respective de ces composantes a été réalisée de manière globale pour l'ensemble du système (cf. § 2.4.3.).

L'étude a porté sur la période décembre 2001-septembre 2003, période pour laquelle nous disposons également des données de température et de conductivité.

La technique d'inversion consiste à calculer l'hydrogramme unitaire (ill. 84) et le seuil Oméga de pluie efficace (ill. 85) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé (ill. 86). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et de l'ETP de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère

un débit à l'exutoire. Il est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et à l'ETP (ill. 87), également obtenue par inversion.

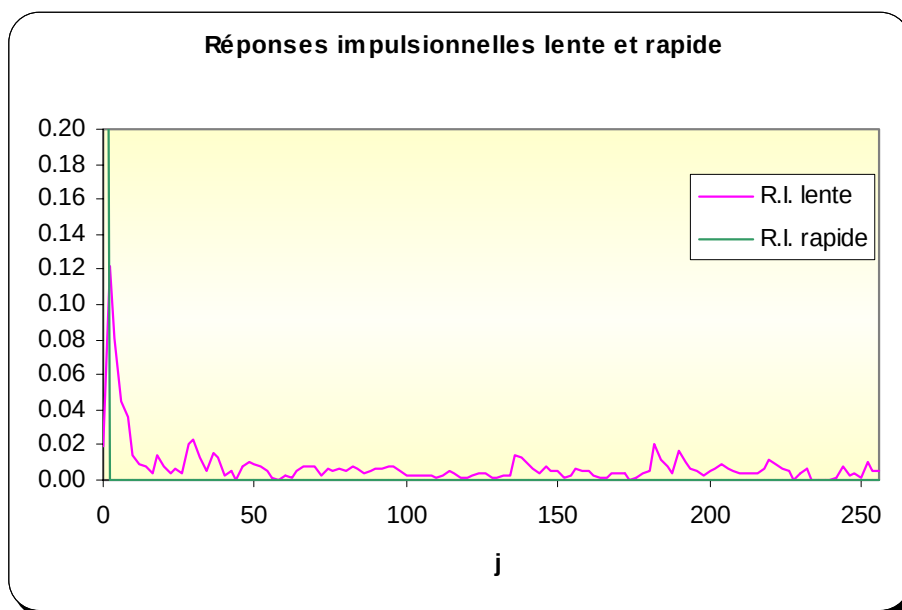


Illustration 84 - Calcul de l'hydrogramme unitaire normalisé de la source de Font Estramar.

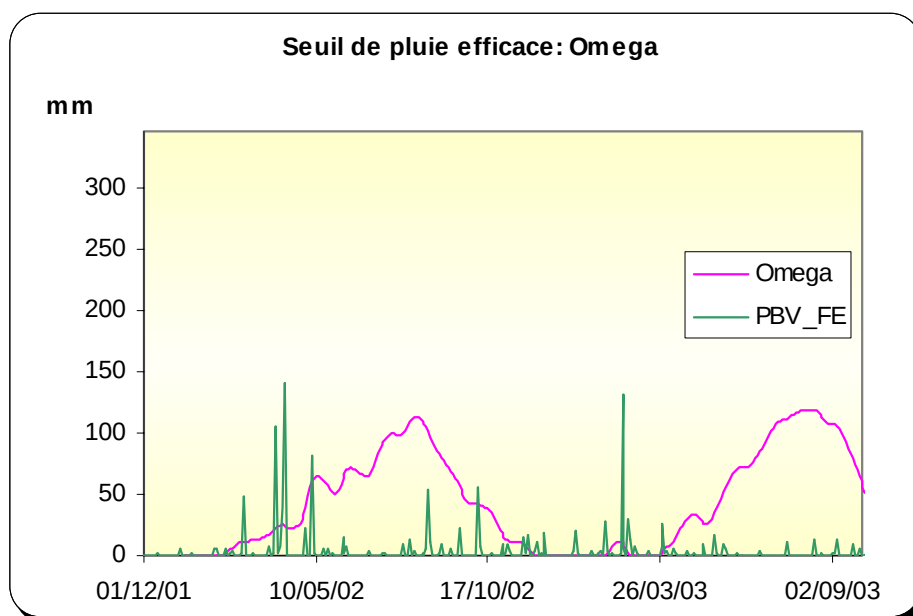


Illustration 85 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie.

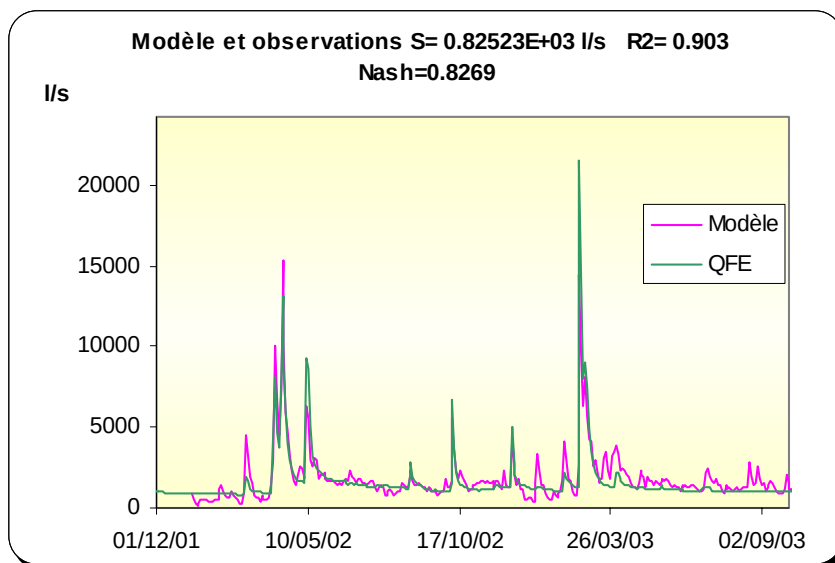


Illustration 86 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré à la source de Font Estramar : écart-type = 825 l/s (90 % de la variance totale expliquée, Nash = 0,83).

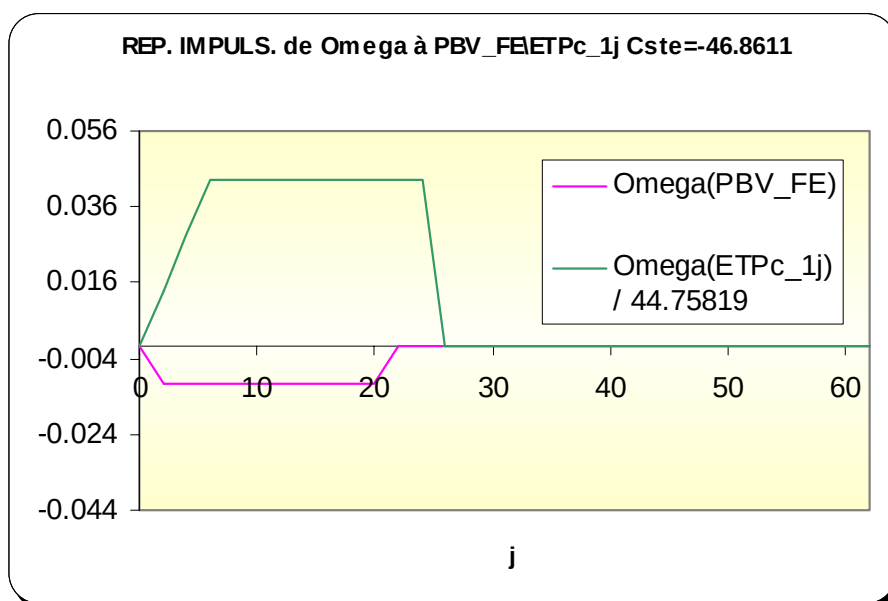


Illustration 87 - Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.

Sur l'illustration 85, qui représente l'évolution temporelle de la fonction seuil Oméga et de la pluie du bassin d'alimentation, on remarque que seuls quelques épisodes de pluie sont efficaces vis-à-vis de la recharge. Il s'agit principalement des épisodes de pluies hivernales et printanières. Au cours des périodes estivales, le seuil Oméga de pluie efficace est proche de 100 mm, valeur importante liée à la forte demande évapo-transpiratoire (ETP) de l'atmosphère. En été, on peut donc observer une réponse des aquifères karstiques aux épisodes de pluies dès lors que la quantité de pluie est supérieure à 100 mm.

À l'inverse, au cours des périodes hivernales et printanières, la demande évapo-transpiratoire est faible (quelques millimètres) ce qui, d'un point de vue hydrologique, signifie que les épisodes de pluies de faible importance peuvent entraîner une réponse plus ou moins marquée du système aquifère.

Les résultats de la modélisation sont présentés à l'illustration 86. Le modèle permet de reproduire assez fidèlement l'évolution observée, les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits. Le modèle permet d'expliquer 90 % de la variance totale observée ce qui constitue un bon résultat. Le calcul de l'hydrogramme unitaire indique qu'il y a une composante non linéaire (« effet de chasse ») pour le système de Font Estramar.

La réponse impulsionnelle de la recharge (ill. 84) montre un maximum très prononcé le 2^e jour, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 14 jours environ, puis faiblement de manière plus ou moins exponentielle pendant 50 jours environ. À cette décroissance, fait suite une légère augmentation, puis un « plateau » jusqu'à ce que le décalage atteigne 250 jours environ.

On retrouve, pour Font Estramar, la même évolution que pour le système global estimé à partir de la somme des débits de Font Dame et Font Estramar. L'allure de l'hydrogramme unitaire de Font Estramar évoque la recharge, puis la vidange de deux réservoirs dont le temps de régulation est de l'ordre de 15 jours pour le premier et beaucoup plus important pour le second (la réponse impulsionnelle ne peut être calculée au-delà de 250 jours, car la fenêtre d'observation ne couvre que deux cycles hydrologiques).

c) Calcul de la réponse impulsionnelle du flux de chlorure et de température du système de Font Estramar

Dans un second temps, nous avons cherché à décomposer l'hydrogramme unitaire en ses composantes événementielle et pré-événementielle à l'aide de traceurs « chlorure » et « température ».

Pour décomposer l'hydrogramme, on calcule dans un premier temps les flux associés à ces traceurs, puis on détermine leurs réponses impulsionnelles par inversion afin de reproduire au mieux les évolutions mesurées. Les résultats pour les composantes événementielle et pré-événementielle sont présentés respectivement aux illustrations 88 et 89.

Dans un second temps, on cherche à reconstruire l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles des flux pré-événementiel et événementiel.

La reconstruction de l'hydrogramme unitaire (ill. 90), à partir des deux composantes (ill. 91), valide *a posteriori* le modèle postulant que les variables « température normalisée » et « concentration en chlorure » sont respectivement les traceurs de l'eau événementielle et pré-événementielle.

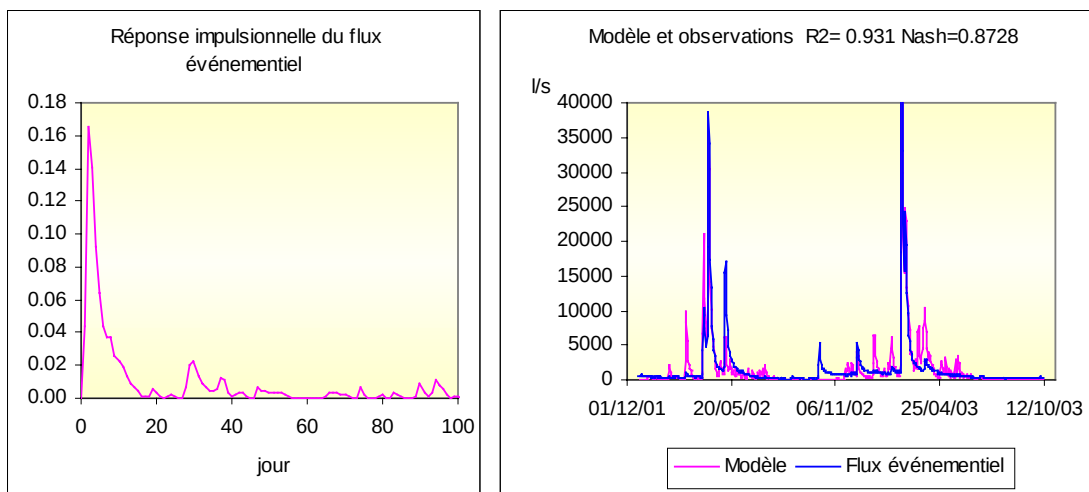


Illustration 88 - Réponse impulsionnelle de la composante événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.

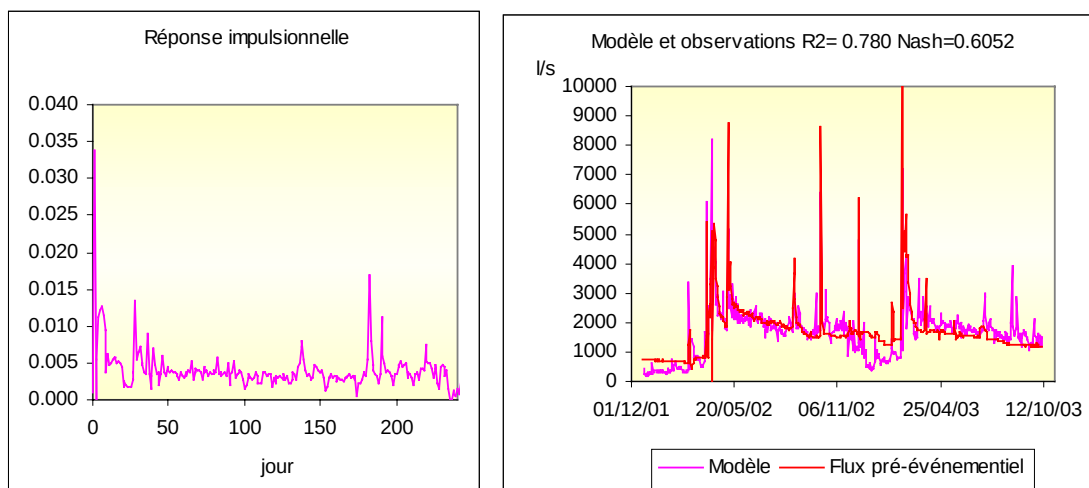


Illustration 89 - Réponse impulsionnelle de la composante pré-événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.

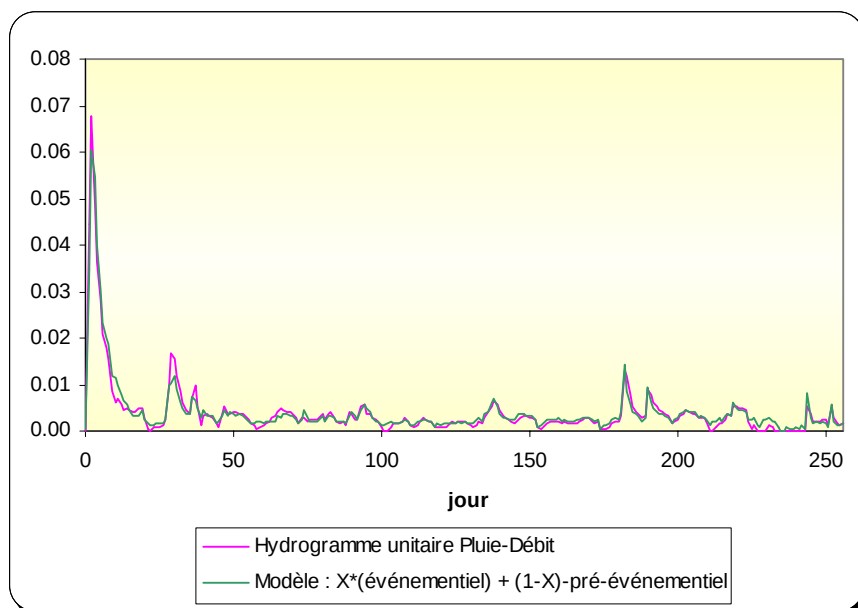


Illustration 90 - Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles événementielle (température) et pré-événementielle (teneur en Cl) : somme = 0,924.

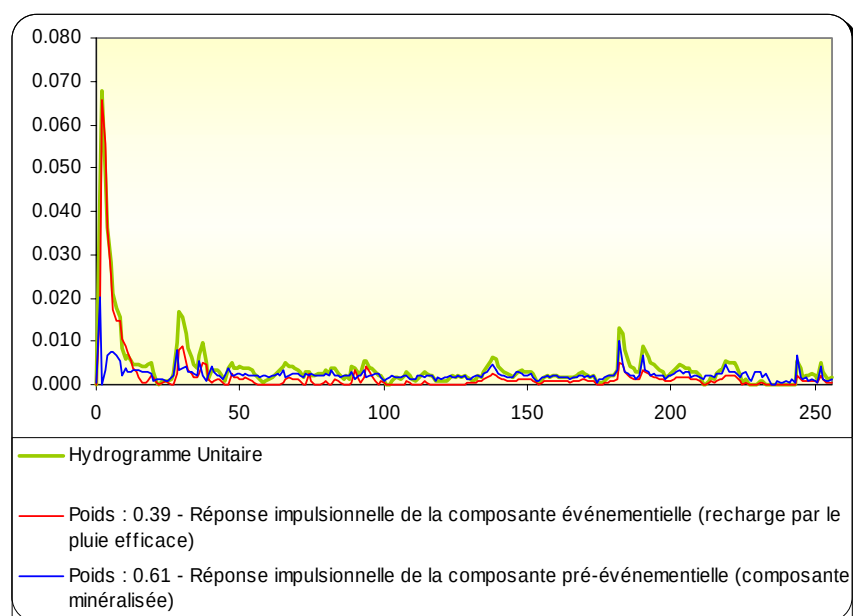


Illustration 91 - Réponses impulsionnelles du débit de Font Estramar, du flux événementiel (déterminé par la température) et du flux pré-événementiel (déterminé par les teneurs en Cl).

Les poids des deux composantes événementielle et pré-événementielle sont respectivement de 39 % (recharge par la pluie efficace) et 61 % (composante profonde chaude et minéralisée). Ces poids représentent la contribution moyenne des deux modes de transfert. Ils montrent que l'essentiel du débit de la source de Font Estramar (61 %) résulte de la contribution profonde du système, l'eau d'infiltration issue de la

vidange du réservoir froid et peu minéralisée ne représentant que 39 % du débit (ill. 92).

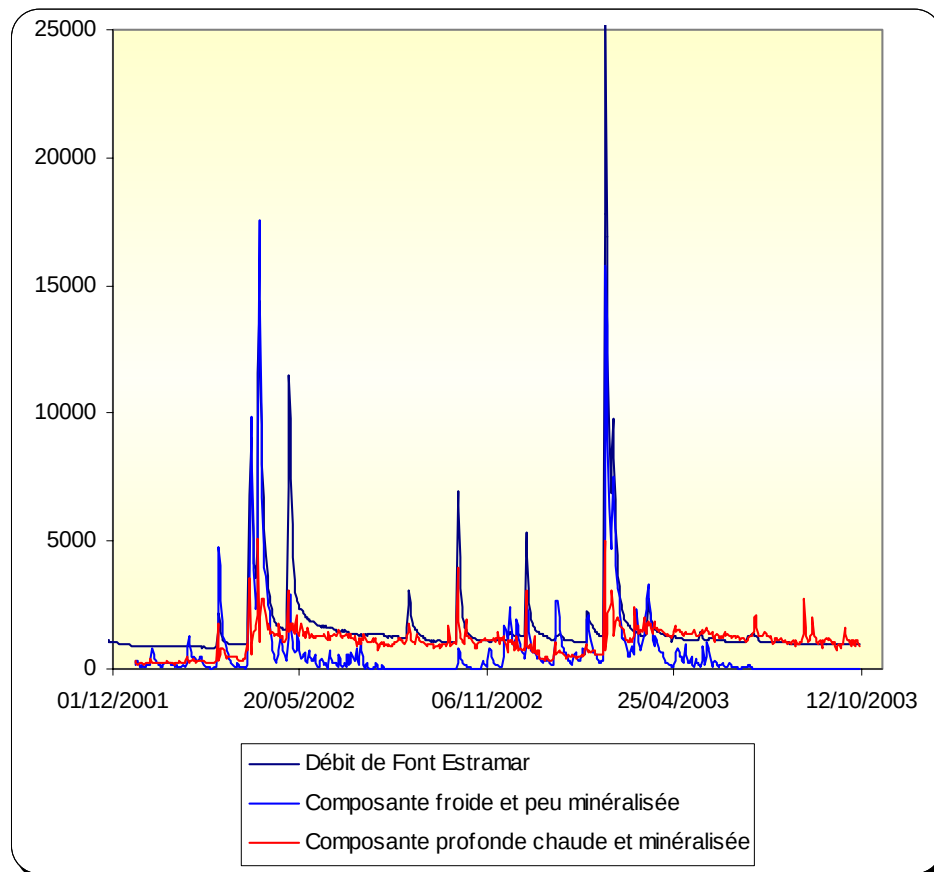


Illustration 92 - Décomposition des différentes composantes de l'hydrogramme de Font Estramar : 39 % d'eau d'infiltration issue du réservoir peu minéralisée et 61 % d'eau profonde chaude et minéralisée de la zone noyée.

Les temps de transit des deux composantes de l'écoulement calculés à partir des hydrogrammes unitaires sont :

- composante événementielle : temps de transit de 24 jours environ ;
- composante pré-événementielle : temps de transit de 185 jours environ.

Le temps de transit de la composante événementielle est à rapprocher de la valeur du temps d'infiltration estimé à partir de l'analyse des courbes de récessions (19 ± 7 jours).

Le temps de transit de la composante pré-événementiel est à rapprocher de la valeur du temps de transit des pertes estimées précédemment pour le système global (cf. § 2.4.4.).

2.4.5. Synthèse des résultats par modélisation inverse

Les modélisations inverses des relations pluie-débit et des variations temporelles des températures et des teneurs en chlorure ont apporté de précieux renseignements sur le fonctionnement hydrogéologique du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly. Les résultats obtenus permettent à la fois de mieux contraindre le schéma conceptuel de fonctionnement et de déduire des informations sur la dynamique de ces systèmes.

L'étude comparative du système karstique à l'aide de trois approches méthodologiques distinctes met en évidence les principaux points suivants :

- La surface du bassin d'alimentation est très nettement supérieure (300 km²) à la surface de l'impluvium de calcaire affleurant (166 km²). Ce résultat dénote la part importante jouée par les pertes à l'alimentation du système karstique.
- Des estimations de bilans hydrogéologiques globaux permettent de souligner que la part assurée par les pertes est importante. La part des pertes représenterait près de 40 % de l'écoulement des sources de trop-plein (Font Dame + Font Estramar), si l'on suppose que toute la pluie efficace précipitée sur l'impluvium des calcaires affleurants (166 km²) contribue à l'alimentation du débit des sources de Font Dame et Font Estramar. À l'inverse, la part des pertes représenterait près de 60 % de l'écoulement, si l'on suppose que toutes les pertes contribuent à l'alimentation des sources de trop-plein. La contribution des pertes à l'écoulement apparaît donc importante (comprise entre 40 et 60 %) et intervient très majoritairement lors des récessions.

L'hydrogramme unitaire du système karstique est complexe. On montre que :

- Le régime d'écoulement est linéaire pour le système karstique pris dans sa globalité (QFont Dame + QFont Estramar). Pour la source de Font Estramar prise séparément, il faut faire intervenir une composante non linéaire (« effet de chasse »²¹) pour expliquer la réponse hydrologique.
- Le comportement du système karstique est peu inertiel, la réponse à l'infiltration de la pluie efficace présente un pic marqué en moins de deux jours, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 20 jours environ et plus lentement pendant 60 jours environ. Ce comportement évoque la recharge puis la vidange d'un réservoir. Ces résultats corroborent ceux obtenus par les autres approches et notamment l'analyse des courbes de récession qui permet d'estimer un temps d'infiltration de l'ordre de 19 jours (± 7).
- La réponse impulsionnelle des pertes est bi-modale. Elle présente dans un premier temps une décroissance rapide les premiers jours (jusqu'à 6 jours), puis intervient majoritairement lorsque les décalages sont supérieurs à 60 jours. La première partie de la réponse évoque une contribution par effet de transfert de pression tandis que la seconde partie traduit uniquement une alimentation.

²¹ L'effet de chasse est une connexion directe, en charge, entre l'épikarst et le réseau karstique.

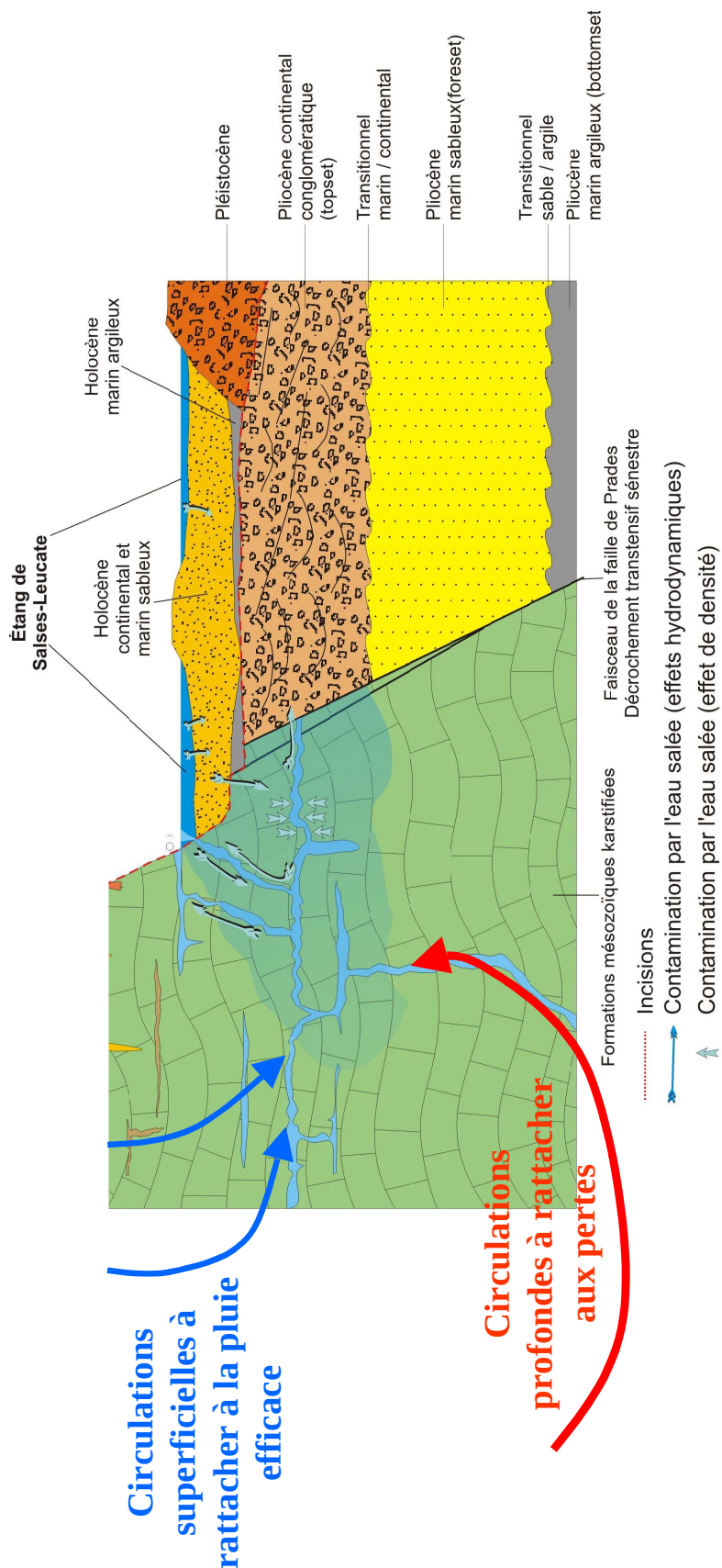


Illustration 93 - Représentation conceptuelle du fonctionnement du système karstique.

La tentative de séparation de l'hydrogramme à l'aide des données de température et de chlorure (estimées à l'aide de la conductivité) apporte des informations très pertinentes sur le fonctionnement du système karstique, bien qu'il s'agisse de résultats préliminaires puisque la période d'observation ne couvre que deux cycles hydrologiques. Les résultats obtenus ont permis de réexaminer l'hydrogramme unitaire déterminé par l'analyse hydrologique.

On met en évidence que la composante événementielle, qui est caractérisée par l'eau froide et peu minéralisée, ne représente que 39 % du débit, contribution similaire à celle de la pluie efficace.

La composante pré-événementielle, qui est caractérisée par l'eau chaude et minéralisée, contribue pour 61 % à l'écoulement, valeur similaire à celle déterminée pour les pertes.

Ces résultats suggèrent que l'eau absorbée par les pertes chemine en profondeur au sein du système karstique. L'évolution à long terme des flux de chlorure, qui se traduit dans un premier temps, par une augmentation significative après les crues importantes des périodes printanières, puis, dans un second temps, par une diminution lente en fin d'étiage apparaît donc comme contrôlée par l'importance relative des deux composantes de l'écoulement, c'est-à-dire les composantes superficielle (froide issue de la recharge par les précipitations) et profonde (chaude issue de l'alimentation par les pertes).

C'est au cours de leur remontée vers la surface que les eaux chaudes profondes se contaminent en chlorure par effet de densité principalement (ill. 93).

2.5. INTERACTION KARST ET AQUIFÈRE PLIO-QUATERNAIRE

2.5.1. Approche hydrogéologique par modèle théorique

L'histoire géologique du karst des Corbières est influencée par l'antériorité de la karstification messinienne sur le remplissage pliocène. Sur la bordure nord de la plaine de Rivesaltes, les circulations karstiques profondes participent à la réalimentation du système aquifère plio-quaternaire du Roussillon et notamment des niveaux captifs du Pliocène (Chabart, 1996 ; Gadel, 1966).

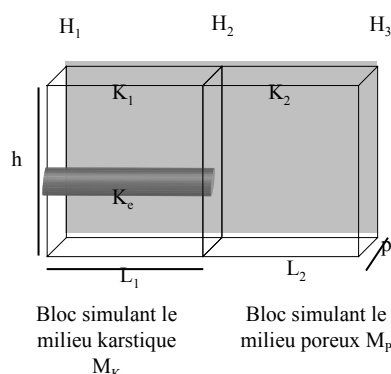
De plus, les résultats des campagnes spatiales de caractérisation hydrochimique au niveau du karst et du Plio-Quaternaire ont démontré la présence d'environ 20 % d'eau issue du karst à un kilomètre au sud de Rivesaltes (cf. § 2.4.2.).

La continuité hydraulique entre les calcaires karstifiés des Corbières et la partie nord de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon est prouvée. Reste à déterminer ou appréhender les ordres de grandeur en terme de flux ou d'échange hydraulique entre les deux aquifères.

Ainsi, la détermination des ordres de grandeur des échanges hydrauliques a été approchée par une étude de sensibilité au moyen numérique, théorique mais cependant réaliste permettant de simuler les transferts de fluide du karst vers le milieu poreux. Les principes de la modélisation réalisés à l'aide du logiciel FEFLOW d'une part, et la mise en œuvre de solutions analytiques réalisée d'autre part, sont exposés de manière synthétique ci-après, l'intégralité des développements sont présentés au sein du travail de diplôme de la formation postgrade en gestion des ressources en eau, spécialisation en hydrogéologie (université de Neuchâtel) de B. Aunay (2003).

a) Description du modèle théorique et des simulations numériques

Le système est présenté par un modèle théorique qui comprend deux blocs caractérisés par une hauteur h et une longueur L , une charge hydraulique H_i à l'entrée et à la sortie du bloc, représentant les deux milieux aquifères : (i) milieu karstique des Corbières et (ii) milieu poreux du Plio-Quaternaire. Un élément discret est introduit dans le bloc « karst », afin de représenter et de simuler l'effet d'un drain karstique ; il est défini par son ouverture, sa position, sa perméabilité (ill. 94). Cinq configurations ont fait l'objet de simulations (ill. 95).



H_1, H_3, H_2 - charge aux extrémités et au contact
 K_1, K_2 - conductivité hydraulique du karst et du milieu poreux
 K_e - conductivité hydraulique équivalente du karst
 L_1, L_2 - longueur de chaque bloc
 h - hauteur du modèle
 p - profondeur du modèle (en 2D, $p = 1$)
 b - ouverture de la fracture

Illustration 94 - Schéma du modèle théorique de simulation des échanges hydrauliques entre le karst et le Plio-Quaternaire (Aunay, 2003).

	Problème	L ou $[L_1+L_2] \times h \times p$ (m)	Description	Objectifs	Type de simulation
1	2D vertical	$[500+500] \times 100 \times 1$	2 blocs présentant un fort contraste de perméabilité $K_1 \ll K_2$	Tester l'influence des éléments discrets sur l'interaction karst/milieu poreux	Permanent
2	3D	$[300+500] \times 50 \times 100$	2 blocs présentant un fort contraste de perméabilité $K_1 \ll K_2$	Tester l'influence des éléments discrets sur l'interaction karst/milieu poreux	Permanent
3	3D	$5000 \times 200 \times 200$	conductivité hydraulique homogène	Observer la réponse d'un milieu à une augmentation de charge	Transitoire

Illustration 95 - Maillages utilisés lors des modélisations (modifié à partir d'Aunay, 2003).

b) Choix des équations

Les équations utilisées pour les simulations numériques et les solutions analytiques sont dépendantes des conditions d'écoulement ; elles sont les suivantes :

Type d'écoulement	Équation
- laminaire et dans fracture d'ouverture > 1cm	Équation d'Hagen-Poiseuille
- turbulent et dans fracture d'ouverture > 1cm	Équation de Manning-Strickler

Équation de Hagen-Poiseuille :
$$Q = \frac{r^2}{4a} \frac{\rho g}{\mu} i S$$

avec Q débit [L^3/T ; m^3/s]
 r ouverture de la fracture ou rayon du conduit [L ; m]
 ρ densité du fluide [M/L^3 ; kg/m^3]
 a paramètre de forme [-]
 g accélération de la pesanteur [L/T^2 ; m/s^2]
 i gradient hydraulique [-]
 S section du conduit ou de la fracture [L^2 ; m^2]
 μ viscosité du fluide [$M/L/T$; $kg/m/s$]

Le paramètre de forme « a » est égal à 2 dans le cas d'une conduite circulaire, à 2,65 dans le cas d'une fracture dont la hauteur vaut 10 fois la largeur et à 3 dans le cas d'une fracture de longueur infinie (Wyllie & Spangler, 1952). Les conduites circulaires ne peuvent être modélisées qu'en trois dimensions.

$$\frac{\rho g}{\mu} \approx 10^7 \quad \begin{aligned} \mu &= 10^{-3} \text{ kg/m/s} \\ \rho &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ g &= 10 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Équation de Manning-Strickler :
$$Q = K_s R_h^{2/3} i^{1/2} S$$

avec Q débit [L^3/T ; m^3/s]
 K_s coefficient de rugosité [$L^{1/3}/T$; $m^{1/3}/s$]
 R_h rayon hydraulique [L ; m]
 i gradient hydraulique [-]
 S section du conduit ou de la fracture [L^2 ; m^2]

K_s est compris entre 10 et 20 $m^{1/3}/s$ pour un torrent à lit formé de blocs et comprenant de petites cascades (écoulement libre). Jeannin et Maréchal (1995) conseillent d'utiliser la formule de Louis pour les écoulements en charge, mais ils admettent que l'utilisation de la formule de Manning-Strickler (comme Kiraly & Müller, 1979) est également valable. Il est possible d'utiliser la formule de Manning-Strickler avec K_s compris entre 20 et 50 $m^{1/3}/s$ (dépendant du coefficient de rugosité), d'autant plus grand que le tuyau est lisse (Jeannin, 1996).

Afin de simplifier les comparaisons, le coefficient de rugosité K_s a été choisi constant et égal à 25 $m^{1/3}/s$.

Les solutions analytiques permettent d'estimer le débit total sortant et la charge hydraulique H_2 au niveau du contact entre les deux blocs aquifères. Plusieurs solutions analytiques permettant de résoudre ce système à deux inconnues en fonction du type de régime (laminaire ou turbulent) et de la dimension de l'espace (2D ou 3D) ont été retenues. Le milieu saturé, ainsi que non saturé, est également considéré. Ces équations ne sont pas développées ici. Les résultats des solutions analytiques et des simulations numériques sont comparés.

c) Principaux résultats (ill. 96)

La différence de charge hydraulique entre le milieu karstique et le milieu poreux a été fixée à 40 m ($H_1 - H_3 = 40$ m), cette valeur correspondant aux données de piézométrie observées lors de crues à Baixas (50 m NGF) et dans la plaine du Roussillon (10 m NGF).

La prise en compte du milieu non saturé et de l'épikarst au niveau du bloc karstique n'est pas possible avec le logiciel FEFLOW. Cela entraînerait des problèmes de convergence numérique. Les simulations ont donc été effectuées en milieu saturé.

Les écoulements se produisant au sein du milieu poreux sont limités par ses caractéristiques physiques. Il ne peut laisser « filtrer » qu'une certaine quantité d'eau qui est fonction pour un gradient hydraulique donné, de la conductivité hydraulique et de la section de l'aquifère.

Lorsque cette quantité d'eau maximale est atteinte, on parle de **capacité maximale d'absorption** du milieu poreux. Celle-ci est calculée en effectuant le rapport entre le débit lié aux éléments discrets et le débit maximum sortant. Il est égal à 0 % lorsqu'il n'y a pas de conduit et à 100 % lorsque le débit sortant est entièrement absorbé par l'aquifère poreux.

Le **débit maximum sortant** du bloc karstique correspond au débit obtenu en appliquant la charge H_1 au contact entre le bloc représentant l'aquifère karstique (MK) et le bloc représentant l'aquifère poreux (MP). Cette opération a pour but de simuler la présence d'un bloc excessivement karstifié. Plus MK est karstifié, plus la charge au contact (H_2) augmente et tend vers la charge initiale (H_1), pertes de charge très faibles voire nulles au sein du bloc représentant l'aquifère karstique).

Le **débit minimum sortant** correspond au débit sortant obtenu lorsque MK ne présente ni fracture, ni conduit. Dans ce cas, la charge au contact (H_2) est très légèrement supérieure à la charge à l'exutoire du modèle (H_3). Le débit simulé et le débit obtenu par solution analytique sont toujours compris entre le débit maximum sortant et le débit minimum sortant.

L'illustration 97 rappelle les caractéristiques du modèle numérique utilisé en 2D (ill. 94 et 95). La partie de gauche représente le milieu karstique (MK) et la partie de droite le milieu poreux (MP). Des éléments discrets (fractures, drains ou conduits) sont placés au sein du milieu karstique afin de tester leur influence sur le débit total et sur la charge H_2 .

Type modèle	Maillage	Description	Objectifs	Conditions de simulation	Résultats	Type de simulation
1		2 blocs présentant un fort contraste de perméabilité $K1 \ll K2$	Tester l'influence des éléments discrets sur l'interaction karst/milieu poreux	H1 = 150 m et H3 = 110 m. Section du conduit : à 1 m ² Conductivité hydraulique du conduit : 8.175 E+03 à 8.175 E+09 m/s	La capacité maximale d'absorption du milieu poreux est assez vite atteinte : 10 conduits distants de 1 m et de 5 mm d'ouverture suffisent. Les éléments discrets horizontaux connectés au milieu poreux (fracture ou drain) contribuent à l'augmentation du débit total sortant ; celui-ci augmente si des drains verticaux sont connectés aux drains horizontaux. La capacité maximale d'absorption ne dépasse pas 85 %, même si on élargit les conduits indéfiniment Régime laminaire : le débit total sortant augmente même si les éléments discrets présents ne sont pas directement connectés au milieu poreux. L'augmentation du débit est proportionnelle au nombre de conduits. Régime turbulent : les pertes de charge augmentent et le débit total sortant diminue lorsque le cheminement des éléments discrets est complexe.	Permanent
2		2 blocs présentant un fort contraste de perméabilité $K1 \ll K2$	Tester l'influence des éléments discrets sur l'interaction karst/milieu poreux	H1 = 180 m et H3 = 120 m. Nombre de conduits : 1 à 20	Les commentaires sont similaires à la simulation 2D : les éléments discrets horizontaux connectés au bloc du milieu poreux contribuent principalement à l'augmentation du débit total sortant. Lorsque le nombre de conduits augmente, la capacité maximale d'absorption est atteinte. Régime laminaire : Le débit total sortant est identique quelle que soit la position de la fracture, verticale ou horizontale. Régime turbulent : La capacité maximale d'absorption est atteinte localement avec un conduit de diamètre 1 m. Au-delà de ce diamètre, le débit total n'augmente plus et la capacité maximale d'absorption est de 55 %. Pour atteindre les 100 %, l'espace entre chaque élément discret ne doit pas dépasser 15 m, soit environ 20 éléments pour la configuration du modèle.	Permanent
3		conductivité hydraulique homogène	Observer la réponse d'un milieu à une augmentation de charge		Les temps de transfert de charge sont quasiment instantanés dans le milieu karstique. Le maillage a été adapté afin de mieux observer la réponse d'un aquifère poreux à une augmentation de charge.	Transitoire

Illustration 96 - Caractéristiques des simulations 2D et 3D (FLEFLOW) et commentaires des résultats (modifié, d'après Aunay, 2003).

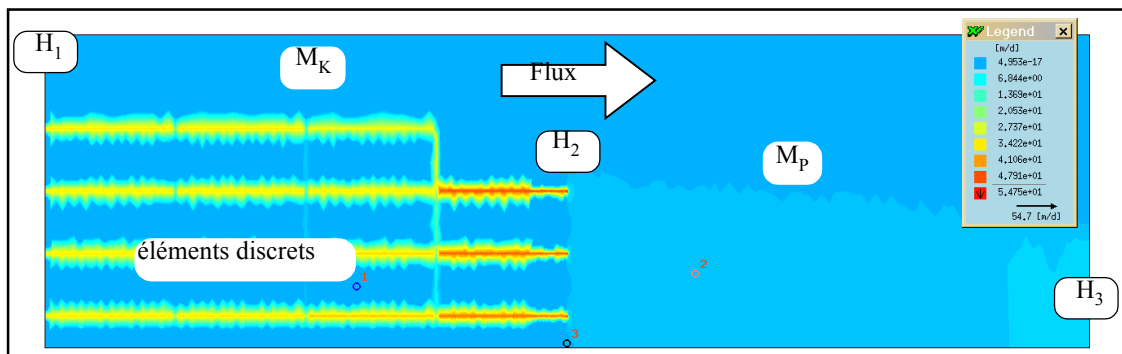


Illustration 97 - Exemple de simulation en 2D (coupe) : représentation des vitesses d'écoulement dans les éléments discrets (Aunay, 2003).

d) Estimation du transfert de flux réel

Le bassin du Roussillon a été modélisé par Chabart (1996). Le modèle (modélisation distribuée) a été calé avec des débits imposés alimentant le Pliocène de l'ordre de 90 l/s en régime permanent et avec 50 l/s en période d'étiage et 160 l/s en période de hautes eaux lors des simulations en régime transitoire. Ces débits ne prennent pas en compte les flux existant au niveau de l'étang de Salses Leucate.

Thomson (2002), quant à lui, estime à 220 l/s les sorties occultes du système karstique lors de l'interprétation de la reconstitution des hydrogrammes de Font Estramar et de Font Dame

Lorsque la capacité maximale d'absorption du milieu poreux est atteinte, la charge au niveau du contact karst/milieu poreux est égale à la charge hydraulique dans le karst.

Pour estimer les flux entre ces deux aquifères, nous avons examiné les résultats des piézomètres proches du contact karst/milieu poreux afin de déterminer le gradient hydraulique. Ensuite, à partir de la section d'aquifère poreux caractérisé par le gradient hydraulique, la loi de Darcy est appliquée afin d'obtenir un flux maximum de recharge du milieu poreux en régime permanent.

L'aquifère du Roussillon dans sa globalité atteint sa capacité maximale d'absorption au niveau des contacts karst/milieu poreux, considérant les trois points ci-dessous :

- L'ensemble du karst des Corbières présente d'une part, une fracturation très prononcée liée aux différentes phases tectoniques et d'autre part une karstification bien développée.
- D'après Duriez (2002), le Plio-Quaternaire joue le rôle de « bouchon » empêchant la vidange dynamique du karst.
- La capacité maximale d'absorption du milieu poreux est assez vite atteinte d'après les modélisations mathématiques, et surtout on le voit en période de crue comme on l'a précédemment montré à l'aide des analyses de débit classé.

Le problème majeur vient de la connaissance de la nature du contact entre les deux aquifères : existe-t-il un contact direct entre aquifère sableux et aquifère karstique ? Deux cas sont distingués, afin d'estimer au moyen de la loi de Darcy les flux maximums entre les deux aquifères : la présence d'un contact direct et une géométrie complexe.

Dans le cas d'une géométrie complexe au niveau du contact, la présence de formations de perméabilité hétérogène, telles que les brèches d'Espira-de-l'Agly, la surface de contact effective serait inférieure à celle estimée.

Les flux proposés pour les contacts directs, 180 l/s, sont donc probablement supérieurs à la réalité. Au niveau du contact avec le flanc sud du synclinal du Bas-Agly, la brèche atteinte par forage (F2 AEP Rivesaltes) est de faible perméabilité. Dans l'hypothèse de la continuité de cette brèche au niveau du contact, les flux entre le karst et le milieu poreux seraient quasiment nuls (Aunay, 2003).

En résumé, les interactions entre le milieu karstique et le milieu poreux ont été traitées à partir de simulations numériques et analytiques sur un modèle théorique. Le débit de sortie du milieu karstique vers le milieu poreux est analysé ainsi que la capacité maximale d'absorption du milieu poreux, considérant une analyse de sensibilité sur les paramètres suivants : ouverture et nombre de drains horizontaux et/ou verticaux dans le milieu karstique proche du contact avec le milieu poreux.

Nature du contact	Charge hydraulique contact	Charge hydraulique milieu poreux à distance x m du contact	Gradient hydraulique	Perméabilité du milieu poreux	Surface de contact	Débit maximum (l/s)
Direct – (1)	40 m (vers Baixas)	30 m à une distance de 1 700 m	$5,88.10^{-3}$	10^{-4} m/s	1 300 m (L) × 30 m (h)	23 l/s
Direct – (2)	40 m au nord d'Espira	20 m à 2 000 m	1.10^{-2}	10^{-4} m/s.	9 000 m (L) × 20 m (h) (à terre) 11 000 + 9 000 m (L) × 20 m (h) (à terre et sous l'étang)	180 l/s (à terre) 400 l/s (à terre et sous l'étang)

(1) Flanc sud du synclinal du Bas-Agly et aquifère du Roussillon.

(2) Flanc nord du synclinal du Bas-Agly et la plaine de la Salanque.

La capacité maximale d'absorption peut être rapidement atteinte, soit localement pour des fractures de 5 mm d'ouverture (écoulement laminaire), ou un conduit d'un mètre de diamètre (écoulement turbulent), soit régionalement, pour les conditions suivantes : l'espace entre les fractures ou les conduits ne doit pas excéder 10 à 15 m pour une conductivité hydraulique du milieu poreux égale à 10^{-3} m/s.

Les flux s'écoulant du milieu karstique vers le milieu poreux sont fonction de deux ensembles de paramètres :

- dans un premier temps, les paramètres du milieu karstique (taille, nombre, géométrie des conduits...) sont prépondérants sur ceux du milieu poreux ;

- dans un second temps, lorsque la capacité d'absorption du milieu poreux atteint son maximum, la tendance s'inverse : ce sont les paramètres du milieu poreux (conductivité hydraulique...) qui contrôlent les flux.

Une répartition la plus homogène possible des conduits ou des fractures favorise les écoulements du karst vers le milieu poreux.

Le manque de données précises sur la nature et la géométrie du contact existant entre le karst et le milieu poreux ne permet pas de modéliser les flux réels s'écoulant depuis le karst des Corbières vers l'aquifère pliocène du Roussillon.

Des ordres de grandeur ont été établis, en supposant une capacité maximale d'absorption de l'aquifère du pliocène marin sableux et du Pliocène continental : entre 200 et 420 l/s. Il s'agit de valeurs maximales, car la surface de contact réelle entre le karst et le milieu poreux est inférieure à celle estimée.

2.5.2. Approche hydrogéochimique

La problématique des interactions entre le karst et les aquifères du Plio-quaternaire peut être abordée par l'approche géochimique qui est pertinente pour mettre en évidence les phénomènes de mélanges d'eau de qualités différentes.

Dans le but de caractériser les interactions entre le karst et les aquifères poreux du Plio-Quaternaire, deux campagnes de prélèvements ont été réalisées sur une dizaine d'ouvrages. En parallèle, les eaux du karst ont été échantillonnées au niveau de six piézomètres, ainsi qu'aux sources de Font Dame, Font Estramar et du lavoir de Salses-le-Château.

Les informations géochimiques sur les eaux de l'étang (Ladouche *et al.*, 2000) et du Pliocène dans le secteur de Pia (Ladouche *et al.*, 2003) ont également été utilisées ainsi que les résultats d'une analyse d'eau prélevée dans le forage d'un particulier de la presqu'île de Leucate (forage Jardin Monté).

La localisation des points de prélèvement est reportée sur l'illustration 98. Deux campagnes de prélèvements ont été réalisées, en hautes (mai 2002) et basses eaux (mars 2003). Les paramètres chimiques analysés ont été les suivants :

- éléments majeurs et traces (Sr, B, Br, Al, Fe) ;
- rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et de l'eau (^{18}O , ^2H).

Les tableaux de résultats sont présentés dans le volume 1 (BRGM/RP-52918-FR).

Les caractéristiques des points d'eau échantillonnés dans le Plio-Quaternaire et le karst sont reportées dans les illustrations 99 et 100.

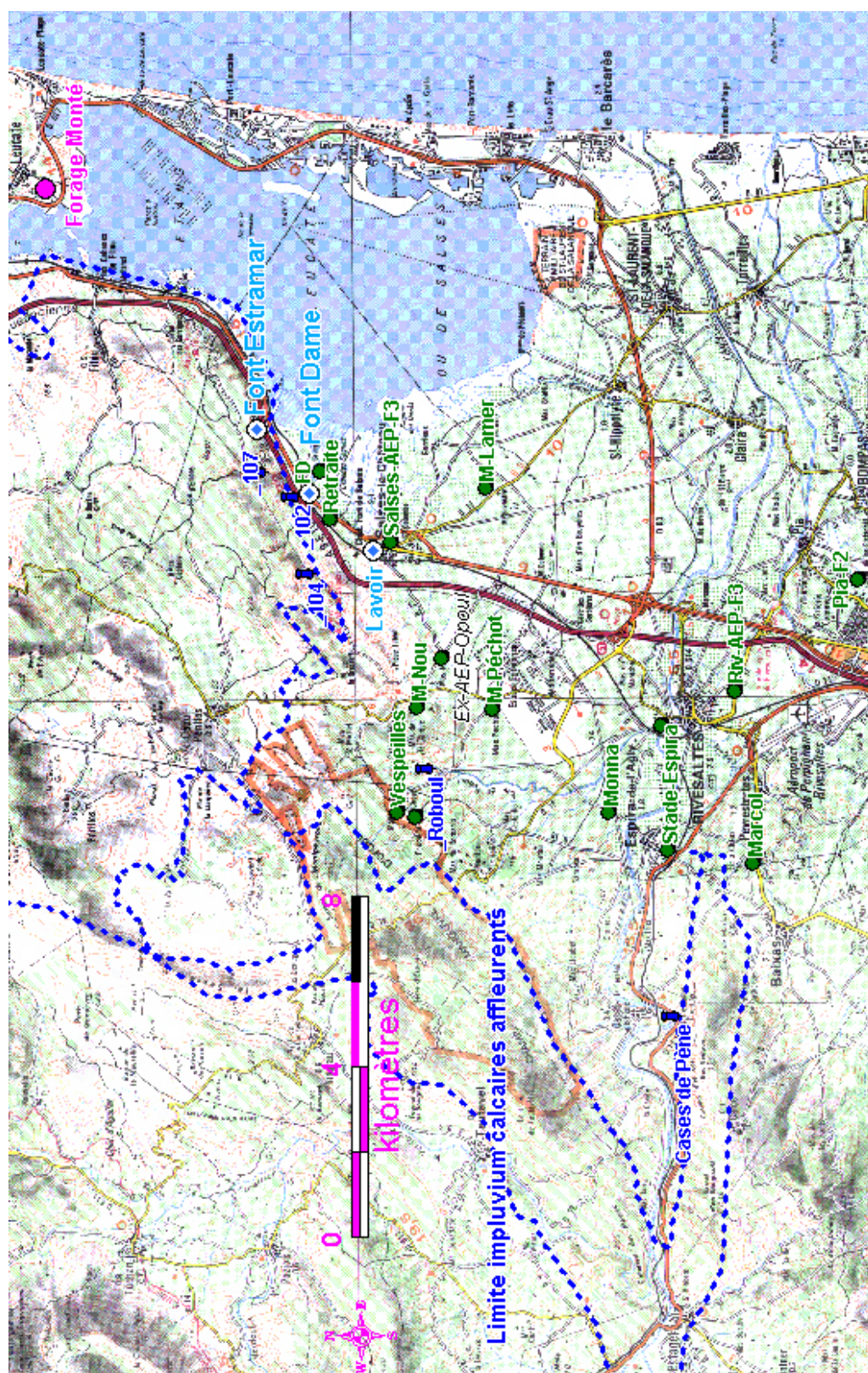


Illustration 98 - Localisation des points de prélèvement des campagnes spatiales.

Échantillonnage

Indice BSS	Désignation	X LIII Sud	Y LIII Sud	Z sol (m)	Commune	Prof. (m)	Aquifère	mai-2002	mars-2003
10904X0063	MARSOL	640,3	50,81	54	BAIXAS	53	Pliocène	non	non
10904X0011	Mas Nou	643,95	58,7	60	RIVESALTES	156	Pliocène	oui	oui
10904X0022	Mas Péchot	643,91	56,93	47	RIVESALTES	73	Pliocène	oui	oui
10904X0003	Monna	641,5	54,2	35	RIVESALTES	36	Pliocène	non	oui
10795X0050	Font Dame (ancien)	649,51	60,98	1	SALSES	34	Pliocène continental 29-34 m	oui	non
	Font Dame (nouveau)	649,35	61,38	1	SALSES		Pliocène continental	oui	oui
10911X0086	Mas Lamer	649,11	57,1	6	SALSES	72	Pliocène	oui	oui
10911X0213	AEP-F3 Village	647,85	59,33	6	SALSES	72	Pliocène	non	oui
10904X0076	Mas Sainte-Marie Vespeilles	641,39	58,76	100	SALSES	120	Pliocène	oui	oui
10795X0026	Maison de retraite (Salses)	648,37	60,75	6	SALSES	54,4	Pliocène	oui	non

Illustration 99 - Liste des points d'eau échantillonnés dans les formations plio-quaternaires lors des campagnes spatiales.

Indice BSS	Désignation	X LIII Sud	Y LIII Sud	Z sol (m)	Commune	Prof. (m)	Aquifère	mai-02	mars-03
10795X0001/S	Font Estramar	651,2	62,1	1	SALSES	-	Sce	oui	non
	Font Dame	649,34	61,38	1	SALSES	-	Sce	oui	non
	Source du Lavoir	647,70	59,90	10	SALSES	-	Sce	oui	oui
10904X0001	Mas de la Chique	642,8	58,6	65	SALSES	131,1	Aptien	oui	oui
10911X0127	Roboul	642,5	58,3	65	SALSES	100?	Aptien	oui	oui
10795X0028	P102	648,89	61,43	14,6	SALSES	13,5	Aptien	oui	oui
10795X0030	P104	647,08	61,1	42,21	SALSES	42	Aptien	non	oui
10795X0033	P107	649,48	62,19	34,57	SALSES	32	Aptien	non	oui
10903X0026	Cases de Pène	636,69	52,52	55	Cases de Pène	95	Aptien	oui	non

Illustration 100 - Liste des points d'eau échantillonnés au sein du système karstique d'Opoul et du Bas-Agly lors des campagnes spatiales.

Le premier traitement mathématique effectué a consisté à réaliser une analyse en composante principale (ACP), afin de déterminer les facteurs qui permettent d'identifier et de séparer les différents types d'eau en présence dans le secteur d'étude. L'analyse a porté sur les paramètres suivants : Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, SiO₂, B, Br et Sr.

Les deux premiers facteurs permettent d'expliquer près de 91 % de la variance totale, l'axe 1 permet de qualifier la minéralisation des eaux tandis que l'axe 2 permet de distinguer les eaux par leurs teneurs en silice (ill. 101).

La projection dans l'espace des individus permet de distinguer très nettement les différents types d'eau et d'interpréter les résultats en terme de mélange (ill. 102). On montre ainsi que les eaux du Plio-quaternaire échantillonnées au niveau du Mas Nou, Mas Péchot, Mas Sainte-Marie Vespeille, maison de retraite et du forage AEP F3 de Salses présentent des signatures très proches de celles des eaux du karst non salé. Les eaux de la source de Font Estramar se distinguent par une minéralisation plus importante et se répartissent en fonction du contexte hydrologique entre le pôle karst non salé et le pôle karst salé, tel que défini à l'aide du forage particulier de M. Monté au niveau de la presqu'île de Leucate.

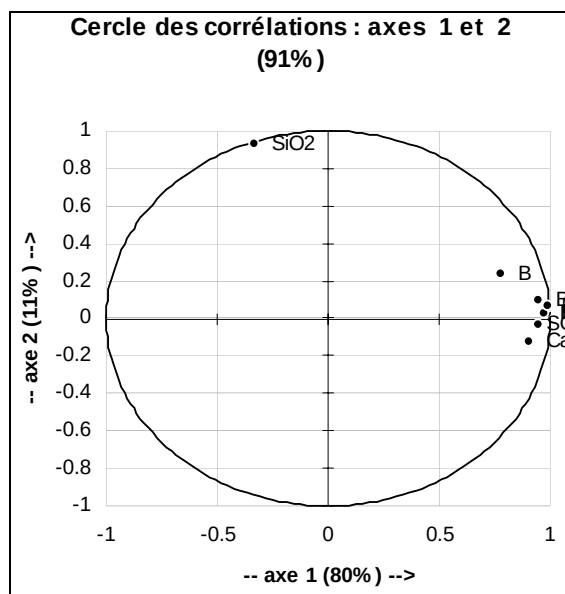


Illustration 101 - ACP : corrélation variables - facteur principal.
Projection dans le plan F1-F2 de l'espace des variables.

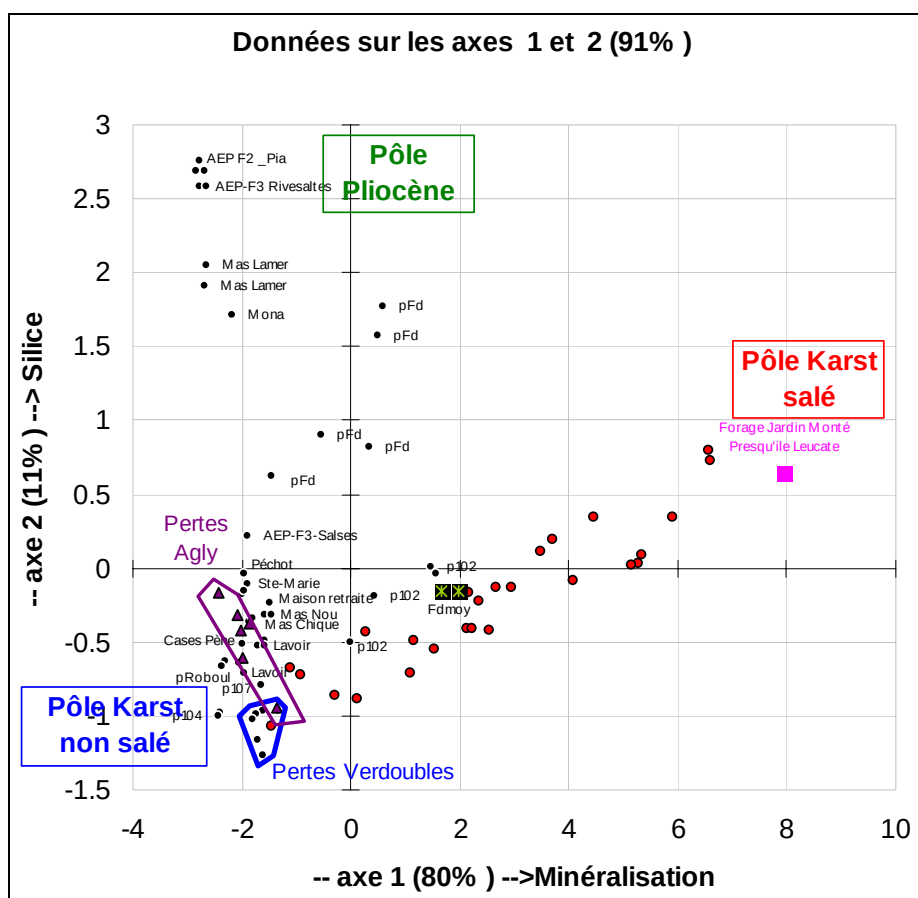


Illustration 102 - ACP-Projections des échantillons dans le plan principal F1-F2.

Les eaux du Mas Lamer et du forage Mona se positionnent entre le pôle karst non salé et le pôle pliocène, ce qui suggère une contribution possible du karst à l'alimentation des réservoirs poreux au niveau de ces points.

Les eaux du forage de Font Dame se répartissent entre le pôle pliocène et les eaux du karst salé ce qui indique une alimentation possible par les eaux du karst salé.

Ces premiers résultats suggèrent donc que le karst contribue de manière notable à l'alimentation des réservoirs du Plio-quaternaire. La vérification et la quantification des proportions de mélange ont été abordées à l'aide des isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

Nous présentons à l'illustration 103 l'évolution des rapports isotopiques du strontium en fonction de l'inverse des teneurs en strontium. Nous distinguons de nouveau dans cette représentation les différents types d'eau en présence dans le secteur d'étude.

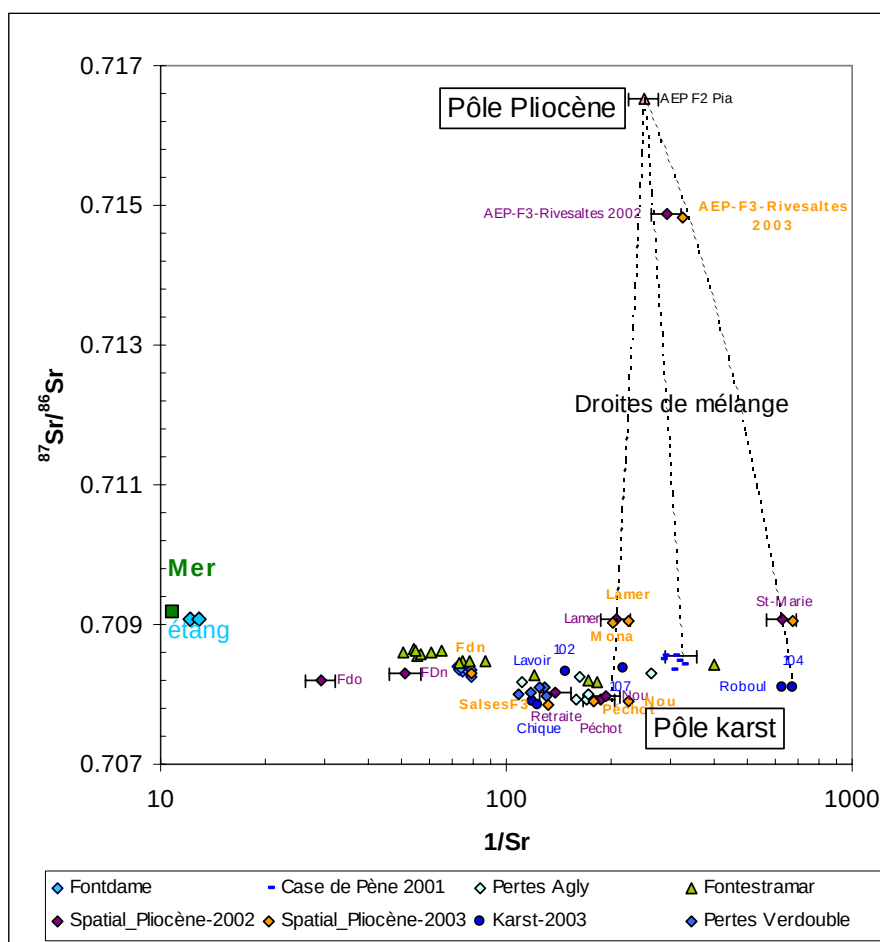


Illustration 103 - Rapports isotopiques du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse des teneurs en strontium²².

²² Dans une représentation semi-logarithmique, les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées.

On montre que les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux des forages Péchot, Mas Nou, maison de retraite et AEP F3 de Salses présentent une signature isotopique similaire à celle des eaux du karst non salé. Ce résultat confirme donc que les aquifères poreux sont quasi exclusivement alimentés par les eaux du karst dans le secteur de Salses.

Au niveau de la pisciculture, les eaux des chenaux fluviaux du Pliocène continental présentent une signature isotopique très similaire à celle des sources de Font Dame et de Font Estramar. Ce résultat indique que le karst salé contribue essentiellement à l'alimentation de ce réservoir. Ce résultat est également corroboré par le suivi hydrodynamique (ill. 104).

On montre que la signature isotopique des eaux au niveau du mas Lamer, Mona et Sainte-Marie-de-Vespeille est expliquée par une contribution de près de 90 % d'eau du karst. Au niveau du forage AEP F3 de Rivesaltes, la contribution du karst est plus faible (de l'ordre de 30 %).

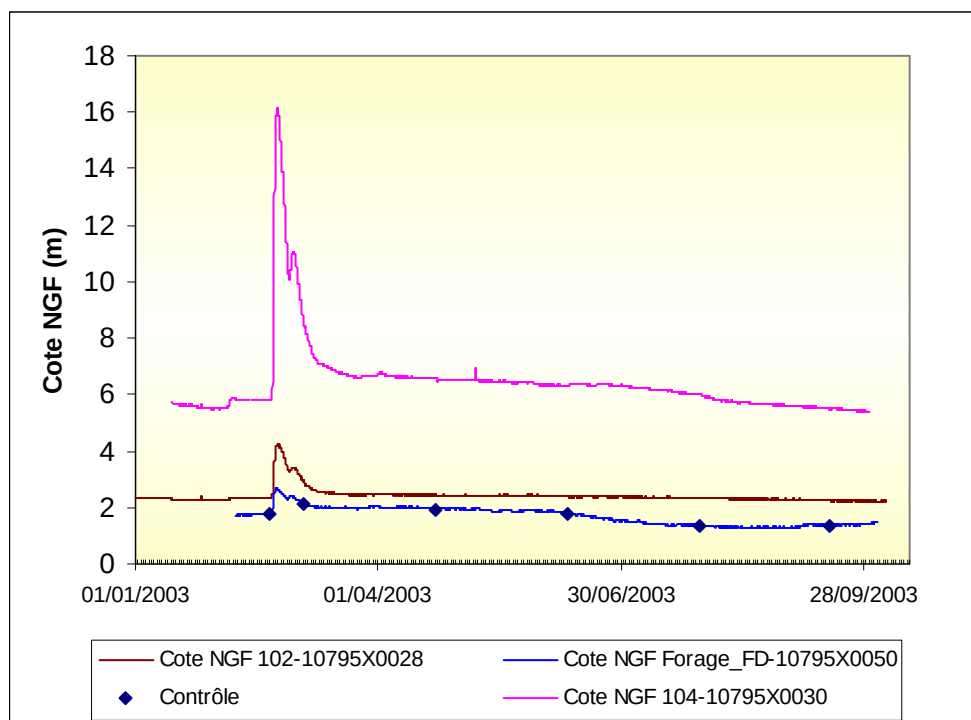


Illustration 104 - Évolution de la piézométrie dans le karst et au sein du Pliocène continental (29-34 m) dans le secteur de la pisciculture de Font Dame.

3. Schéma conceptuel du système « synclinal du Bas-Agly »

La caractérisation géologique, hydrogéologique et hydrogéochimique du système karstique des « Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly » permet, à l'issue de la première phase de ce projet, de proposer une synthèse ainsi qu'un schéma conceptuel concernant la structure et le fonctionnement de ce système.

- **Structure du système**

Le système karstique des « Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly » se développe au sein des formations de calcaire massif du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Ces formations sont structurées au sein du synclinal du Bas-Agly, présentant deux flancs dissymétriques : (i) le flanc sud très redressé, voire même avec des pendages inverses. Il affleure depuis l'ouest d'Espira-de-l'Agly et s'enneige sous les formations plio-quaternaires vers Rivesaltes, et (ii) le flanc nord avec un pendage plus faible. Il s'étend depuis Espira-de-l'Agly à l'ouest (fermeture synclinale à l'affleurement) jusqu'à l'étang de Salses Leucate à l'est. Au niveau de l'axe du synclinal, les formations calcaires sont situées à une profondeur supérieure à 1 500 m, sous les marnes albiennes, considérées comme imperméables.

Ces deux flancs synclinaux ont été karstifiés principalement lors des périodes de bas niveaux marins, au Messinien (- 1 500 m), voire au Quaternaire (- 120 m). Cette karstification a conduit au développement de réseaux karstiques orientés vers les deux principales zones d'exutoire des eaux souterraines de l'ensemble carbonaté à ces époques. Ces zones étaient situées au droit de l'intersection de chacun des flancs du synclinal avec la topographie correspondant aux conséquences de l'incision messinienne : (i) dans le secteur de Rivesaltes et (ii) à l'est et 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 (ill. 105). Cette estimation géologique de la profondeur de la karstification est corroborée par l'approche géochimique (géothermomètre à silice).

Deux axes de drainage principaux existent à priori, coïncidant globalement avec les directions des deux flancs du synclinal. L'analyse des plans de drainage selon la méthode d'Eraso à l'échelle du synclinal du Bas-Agly indique que si les plans de drainage s'orientent selon toutes les directions, deux directions paraissent privilégiées : N45°-N75° et N105°-N135°. Les plans se développent de manière prépondérante verticalement à sub-verticalement. L'inventaire des phénomènes karstiques réalisé notamment par Salvayre (1977) caractérise des cavités explorées verticales, à l'exception du réseau noyé de Font Estramar. Les deux directions de développement du réseau karstique de Font Estramar correspondent aux deux directions préférentielles, soit la direction des déformations associées à la faille de Prades et à la

faille nord-pyrénéenne. Ces observations laissent supposer l'existence d'un réseau karstique de drainage de type anastomosé.

De plus, les directions d'écoulement mises en évidence par essais de traçage suivent principalement ces deux directions également (Salvayre, 1974), soit SSW-NNE pour les essais de coloration des pertes du Verdoube et de l'Agly (non confirmé), et WNW-ESE pour les connexions hydrauliques entre le Roboul ou l'aven des Amandiers et les exutoires de Font Estramar et Font Dame.

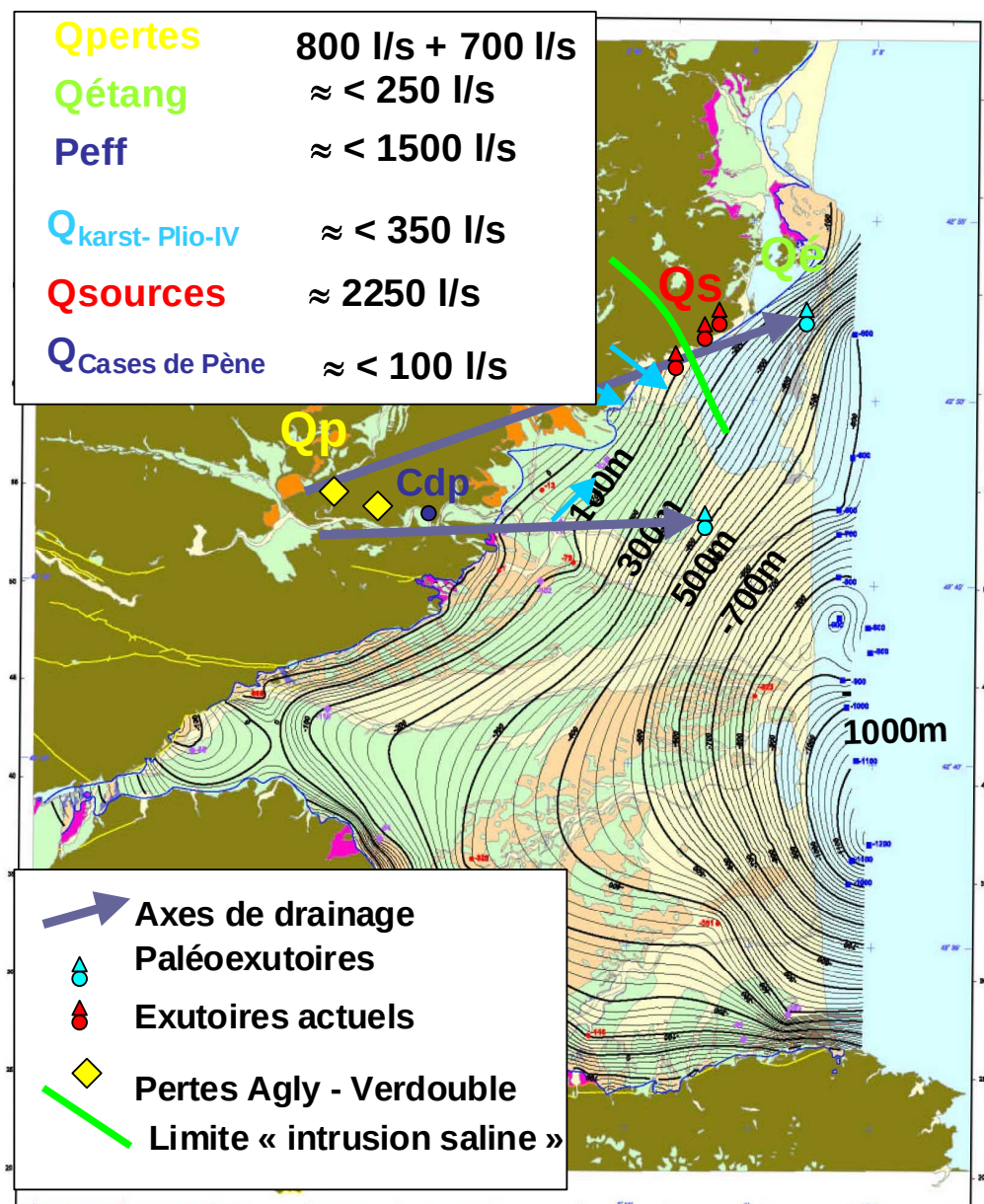


Illustration 105 - Représentation schématique en plan des axes de drainage et du bilan hydrologique du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly, sur fond de carte de la topographie de l'incision messinienne (d'après Duvail et al., 2001).

Les écoulements prennent place au sein des deux flancs du synclinal du Bas-Agly : au niveau du flanc nord comme le manifeste l'existence des exutoires du système ou sous-systèmes associés (sources de la Forteresse de Salses le Château, source du Lavoir) et au niveau du flanc sud comme le manifestent les sources de trop-plein en période de hautes eaux (aven de Baixas et Cases de Pène).

Au vu du comportement hydraulique des points d'eau du réseau de suivi sur les flancs sud et nord du synclinal (variations de hauteur d'eau) et de l'existence de sources non affectées par une salinité, des systèmes annexes au réseau de drainage principal, connectés à celui-ci, existent.

En bref, le système karstique du « synclinal du Bas-Agly et Corbières d'Opoul » est un système complexe du point de vue de l'architecture géologique. Les séries géologiques calcaires sont potentiellement karstifiées jusqu'à des profondeurs de 300 à 400 m sous le niveau de la mer actuel. Ces séries sont affleurantes sur les flancs nord et sud du synclinal (synclinal dissymétrique), affectées d'une tectonique cassante et d'un faible pendage au nord et d'un pendage très fort au sud (flanc redressé). Un doublement de série est probable au centre du synclinal, sous couverture mésozoïque et cénozoïque. Les plans de drainage se développent selon toutes les directions, laissant penser à l'existence d'un réseau de drainage de type anastomosé, avec néanmoins deux directions prédominantes N45°-75° et N105°-135°. Ces deux directions correspondent globalement aux deux directions d'écoulement souterrain mis en évidence par essai de traçage.

• **Délimitation du système karstique**

Le système karstique « des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly » est un système binaire. Il est alimenté par les précipitations sur l'impluvium des calcaires affleurant ainsi que par les pertes de cours d'eau, principalement celles de l'Agly (aval d'Estagel, amont de Mas de Jau) et du Verdoble (aval du Mas d'Alzine), et dans une moindre mesure par les pertes du Roboul.

La superficie de l'impluvium des calcaires affleurants permettant la recharge par les précipitations est d'environ 165 km². Ce bassin est délimité à partir des connaissances géologiques et des connexions hydrauliques prouvées ou supposées par essais de traçages artificiels. Les limites de l'impluvium des calcaires affleurants pour le système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly sont les suivantes (cf. ill. 11) :

- au nord-est, les fenêtres tectoniques sur le Trias ;
- au nord et nord-ouest, la limite a été établie sur le contact des calcaires avec le Lias marneux ;
- à l'ouest, les calcaires affleurant autour de Paziols sont isolés hydrauliquement par des failles les mettant en contact avec les marnes aptiennes ; le front de chevauchement et le tracé du Verdoble marquent une limite nord au bassin ;
- au sud, le flanc sud du synclinal du Bas-Agly est en contact avec les marnes du Lias ;

- et au sud-est, le karst s'enfonce sous les matériaux plio-quaternaires du bassin du Roussillon ; en outre, la formation carbonatée est cisailée et abaissée par le jeu de la faille de Prades.

L'estimation des débits moyens des pertes sur la période 1997-2003 est de l'ordre de 1 500 l/s (810 l/s pour les pertes de l'Agly et 706 l/s pour les pertes du Verdoube). En période estivale, les pertes de l'Agly sont très nettement supérieures à celles du Verdoube ; cette différence est expliquée par le soutien des débits de l'Agly par le barrage de l'Agly.

Sur la base du bilan d'entrée (débit moyen des pertes : 1 500 l/s et de la pluie efficace sur l'impluvium des calcaires affleurants : 1 500 l/s), on montre qu'une part significative d'eau (500 l/s) ne contribue pas à l'alimentation des sources du littoral (Font Dame et Font Estramar, $Q = 2\,500$ l/s sur la période considérée : 1998-2003). Un débit moyen de 500 l/s environ échappe donc au trop-plein de Font Dame et Font Estramar. En considérant les débits des autres sources du système (Fort de Salses : 10 à 20 l/s, source du Lavoir de Salses : 10 à 20 l/s ; Fitou et Malpas : 15 l/s ; source temporaire de Cases de Pène : de l'ordre de 100 l/s²³), le flux d'eau qui alimente les formations du Plio-quaternaire est au minimum de 350 l/s.

Il s'agit en effet d'une estimation par défaut car dans ce calcul de bilan d'entrée, la contribution de l'eau salée (en provenance de l'étang) qui alimente les sources de Font Dame et de Font Estramar n'est pas pris en compte. En considérant la contribution de l'eau salée (10 % pour Font Estramar et 5 % pour Font Dame)²⁴, on estime que la contribution moyenne de l'eau salée au système karstique est de 210 l/s. Ce dernier résultat permet d'affiner l'estimation des débits de fuite vers les formations du Plio-quaternaire. Le flux d'eau qui alimente ces formations serait de l'ordre de 560 l/s. **Sur la base de ces résultats nouveaux, la surface du bassin d'alimentation du système karstique d'Opoul et du Bas-Agly est donc évaluée à 300 km² (ill. 106).**

Entrées		Sorties	
Nature	(l/s)	Nature	(l/s)
- Pertes : Agly	800	- Sources : Font Estramar	1 700
Verdoube	700	Font Dame	800
- Précipitations	1 500	- Autres sources (Salses...)	60
- Eau salée (étang de Salses)	210	- Sources temporaires (Case de Pène, Baixas)	100
		- Apports diffus aux aquifères poreux du Plio-quaternaire	550
Total :	3 210		3 000

Illustration 106 - Bilan hydrologique des flux à l'échelle du système karstique des « Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly ».

²³ Les résultats relatifs à l'estimation des débits des trop-pleins de Cases de Pène en crue sont présentés en annexe 5. Sur la période d'observation, mars 2001 à septembre 2003, les flux écoulés par les trop-pleins (3,8 millions de m³) correspondent à un débit moyen de 104 l/s (valeur indicative).

²⁴ Pourcentage estimé sur la base des résultats des suivis géochimiques des sources.

L'étude de la signature hydrogéochimique des eaux prélevées dans le système karstique et l'aquifère du Roussillon (plio-quaternaire) a mis en évidence des zones de flux entre les deux aquifères (ill. 107). De plus les résultats de l'étude théorique sur les échanges hydrauliques par simulation entre le karst et l'aquifère du Roussillon a permis d'estimer des flux maximaux de l'ordre 400 l/s, valeur qui n'apparaît pas en contradiction avec les estimations du bilan hydrologique.

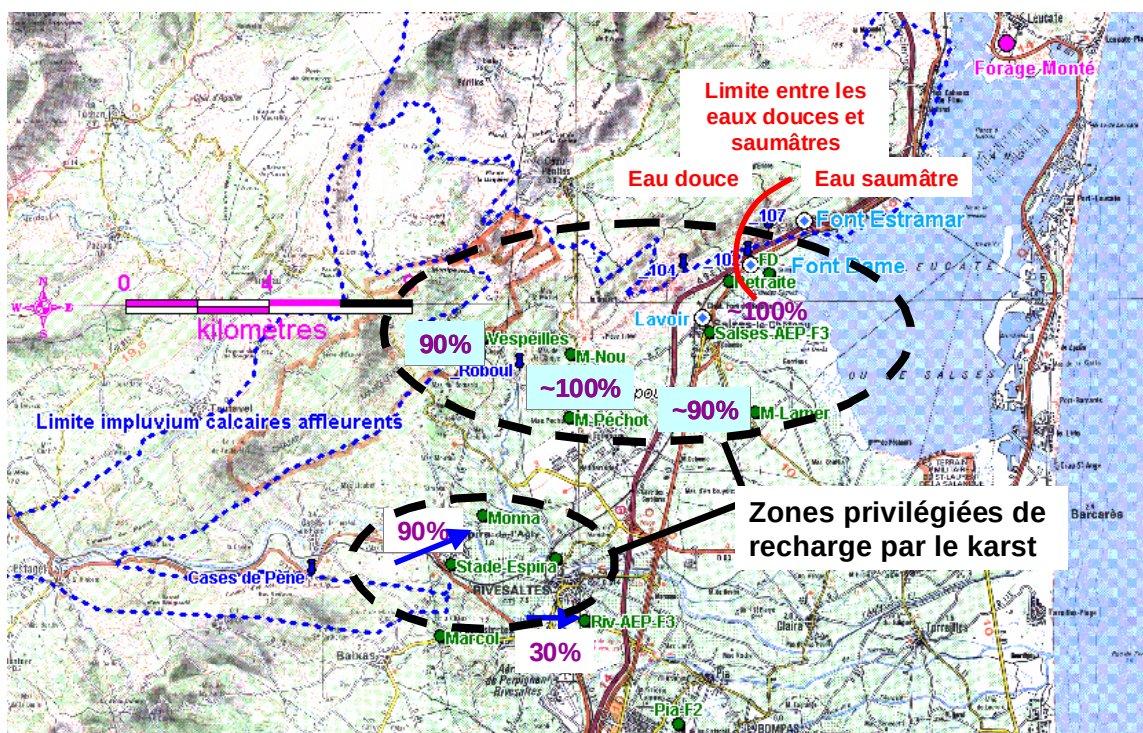


Illustration 107 - Interaction entre les aquifères karstique et plio-quaternaire : synthèse des résultats en provenance des analyses hydrogéochimiques.

• Fonctionnement du système

Les caractéristiques fonctionnelles et les réserves mobilisables du système karstique ont pu être évaluées. Les données disponibles de la source de Font Estramar ont permis d'étudier, par ailleurs, le comportement à long terme du système karstique (plusieurs cycles hydrologiques).

La zone noyée du système karstique d'Opoul apparaît bien drainée et bien connectée, d'un point de vue hydraulique d'une part, à l'épikarst qui constitue le siège de l'infiltration des pluies, et d'autre part à la zone d'alimentation par les pertes. Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 35 heures après un épisode pluvieux. Ce faible décalage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés.

La réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de 20 jours environ (durée de la recharge) pour la source de **Font Dame**, contre **40 jours** environ pour la source de **Font Estramar**.

Le **comportement hydrodynamique du système karstique est différent en période de crue et d'étiage**. Lors des périodes de crue, **le système karstique** pris dans sa globalité **devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux lorsque le débit cumulé est supérieur à 3 000 l/s**. La rupture observée sur les courbes de débits classés indique que les propriétés hydrauliques du système changent. Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (alimentation plus importante par les pertes) et également des conditions de sortie des eaux. Le comportement observé dénote donc la participation d'eau en provenance d'un autre système. Ce comportement est cohérent compte tenu de la nature binaire de ce système karstique (apport par les pertes de l'Agly et du Verdoube en plus de la recharge par les pluies efficaces).

En période de crue, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées. Ce résultat a vraisemblablement deux origines, d'une part, la capacité de stockage du karst tend vers son maximum et celui-ci ne peut pas absorber plus d'eau, d'autre part, en période de crue, le karst mis en charge utilise un réseau plus transmissif pour évacuer les eaux.

Les **formations du Plio-Quaternaire** au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources **jouent un rôle important dans la dynamique des écoulements du système karstique**. En effet, les formations du Plio-Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. Les **sources de Font Estramar** et de **Font Dame** apparaissent ainsi comme **des sources de trop-plein pour le système karstique d'Opoul et du Bas-Agly**.

En période d'étiage, les niveaux d'eau et les débits du système karstique sont influencés à court terme par les effets de marée maritime, notamment à proximité immédiate des sources de trop-plein (Font Dame et Font Estramar). Les résultats indiquent donc qu'une connexion hydraulique existe entre le système karstique et l'étang de Salses Leucate. Les résultats géochimiques confortent l'existence de cette connexion hydraulique.

L'analyse à long terme de l'hydrogramme de Font Estramar montre que le système karstique a un **comportement non homogène vis-à-vis du stockage** (recharge et décharge des réserves en fonction des conditions hydroclimatiques). Le système présente pour certaines périodes, une tendance à déstocker de l'eau à l'échelle annuelle (période 1984-1996), ou au contraire à stocker de l'eau (période 1971-1982). Pour la période 1971-1982 le volume de régularisation du système a été estimé à 68 millions de m³, ce qui constitue une valeur importante. Une valeur similaire de 67 millions de m³ a été estimée pour la période 1984-1986. Dans l'état actuel des connaissances, **la taille du réservoir peut être estimée à 70 millions de m³ environ**.

Le volume dynamique déduit de l'analyse des courbes de récession est estimé à 25 (± 6) millions de m³ (variable d'un cycle à l'autre). Le rapport des deux volumes estimés (de l'ordre de 0,36) donne une bonne image du pouvoir régulateur du système.

La période 1997-2003 contraste fortement avec les périodes précédentes (1971-1982 ; 1984-1996), le volume de régulation estimé est nettement plus faible, de l'ordre de 29 millions de m³ seulement. Le caractère nettement plus non linéaire du système mis en évidence pour la période 1997-2003 semble également se traduire par un volume de régulation plus faible. Depuis la mise en eau du barrage de l'Agly, le soutien des débits de l'Agly lors des périodes estivales notamment, a modifié les conditions d'alimentation du karst au niveau des pertes. L'écart entre les volumes minimaux et maximaux est réduit, ce qui signifie que l'état des réserves du karst s'approche de leur valeur maximale. L'effet du soutien de l'Agly par le barrage se traduit donc par un apport d'eau plus important au système karstique.

Les modélisations inverses des relations pluie-débit ont permis de quantifier l'importance du rôle joué par les pertes dans le fonctionnement du système karstique. La réponse impulsionnelle des pertes est bi-modale. Elle présente dans un premier temps une décroissance rapide les premiers jours (jusqu'à 6 jours), puis intervient majoritairement lorsque les décalages sont supérieurs à 60 jours. La première partie de la réponse évoque une contribution par effet de transfert de pression tandis que la seconde partie traduit uniquement une alimentation. La contribution des pertes à l'écoulement apparaît très importante (60 %) et intervient très majoritairement lors des récessions.

La séparation de l'hydrogramme à l'aide des données de température et de chlorure (estimées à l'aide de la conductivité) apporte des informations très pertinentes sur le fonctionnement du système karstique, bien qu'il s'agisse de résultats préliminaires puisque la période d'observation ne couvre que deux cycles hydrologiques. Les résultats obtenus ont permis de réexaminer l'hydrogramme unitaire déterminé par l'analyse hydrologique. On met en évidence que la composante événementielle, qui est caractérisée par l'eau froide et peu minéralisée, ne représente que 39 % du débit, contribution similaire à celle de la pluie efficace.

La composante pré-événementielle, qui est caractérisée par l'eau chaude et minéralisée, contribue pour 61 % à l'écoulement, valeur similaire à celle déterminée pour les pertes. Ces résultats suggèrent que l'eau absorbée par les pertes chemine en profondeur au sein du système karstique. L'évolution à long terme des flux de chlorure, qui se traduit dans un premier temps, par une augmentation significative après les crues importantes des périodes printanières, puis, dans un second temps, par une diminution lente en fin d'étiage apparaît donc comme contrôlée par l'importance relative des deux composantes de l'écoulement, c'est-à-dire les composantes superficielles (froides issues de la recharge par les précipitations) et profondes (chaudes issues de l'alimentation par les pertes). C'est au cours de leur remontée vers la surface que les eaux chaudes profondes se contaminent en chlorure par effet de densité principalement.

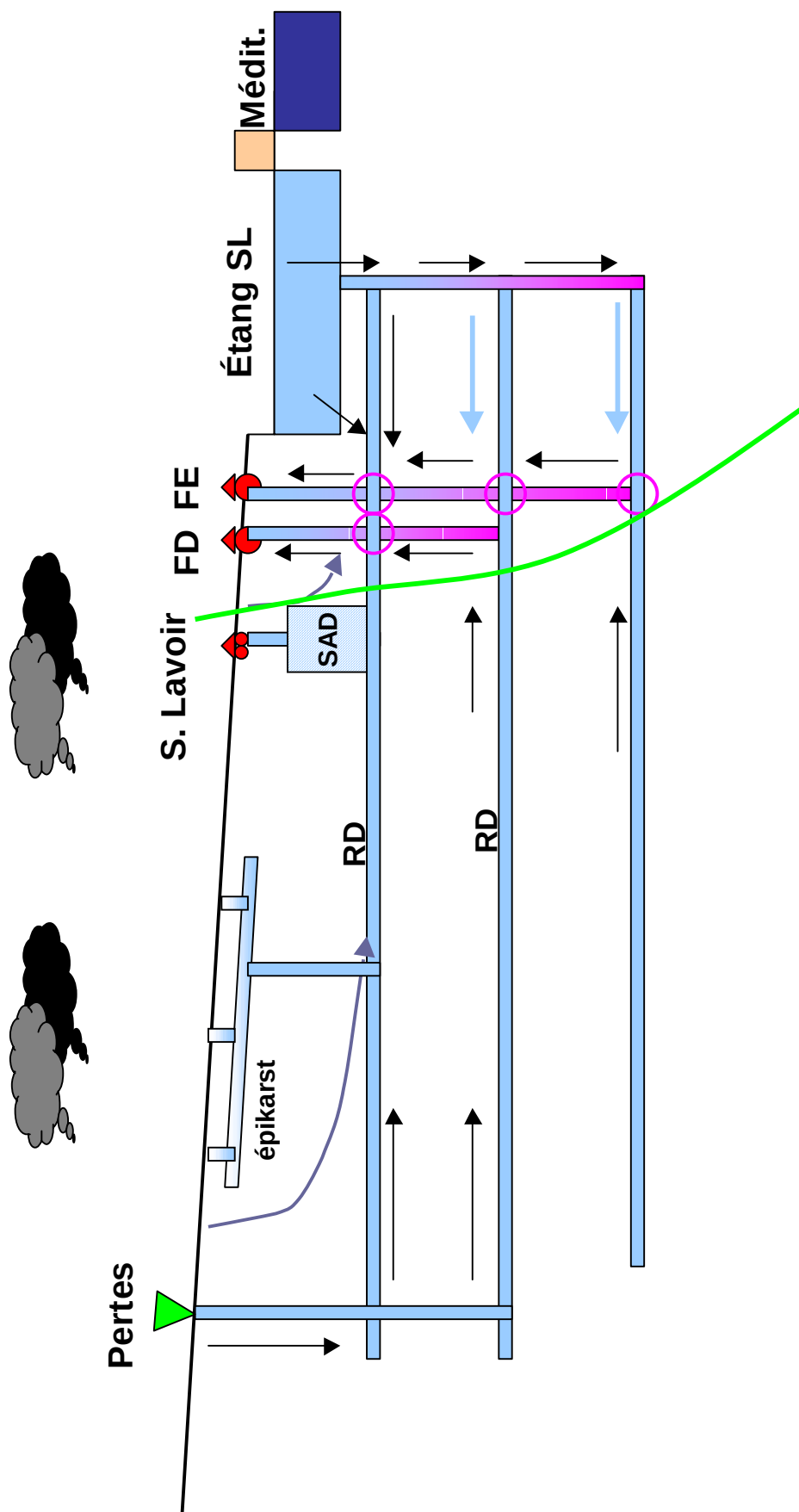


Illustration 108 - Coupe schématique du flanc nord du synclinal du Bas-Agly, expliquant le fonctionnement des sources de Font Estramar et de Font Dame, ainsi que le processus de salinisation.

Les anomalies thermiques relevées aux sources de Font Estramar et de Font Dame et également dans les piézomètres situés à proximité de ces sources de trop-plein impliquent des circulations « profondes », estimées à l'aide du géothermomètre à silice, à quelques 360-390 m. Ces profondeurs correspondent aux profondeurs estimées à l'aide du contexte géologique (interception entre massif calcaire et surface topographique de l'incision messinienne), soit 300 à 400 m.

Ainsi un schéma conceptuel schématique peut être présenté du flanc nord du synclinal du Bas-Agly (ill. 108). Deux types d'écoulement prennent place au sein de ce système : des écoulements « locaux » et des écoulements plus « régionaux ». Les écoulements « locaux » caractérisent l'eau froide et peu minéralisée infiltrée (pluie efficace) sur les calcaires affleurants. La réponse du système à l'infiltration de la pluie efficace présente un pic marqué en moins de deux jours, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 20 jours environ. Les écoulements dits « régionaux » concernent les circulations profondes, chaudes et minéralisées, en raison d'une contamination d'eau en provenance de l'étang de Salses Leucate. L'alimentation par les pertes du Verdoube et de l'Agly joue un rôle prépondérant sur l'organisation des écoulements profonds du système karstique.

Deux modes d'intrusion d'eau salée de l'étang sont possibles pour le système karstique : le premier direct, dans les zones où les calcaires sont directement en contact avec l'étang (cf. ill. 61) ; le second indirect, par l'intermédiaire de la faille de Leucate d'orientation NE-SO, dans le prolongement de la faille de Prades, qui passe au niveau de l'étang. En effet, une étude sur la recherche de la contamination bactériologique de certaines tables conchyliques de l'étang de Salses Leucate (Ladouche *et al.*, 2000) a montré qu'une relation hydraulique existe entre le fond de l'étang et les calcaires de Leucate en période de hautes eaux lorsque le karst est en charge. En période de basses eaux, la charge dans le karst n'est pas suffisante pour observer de l'eau douce au fond de l'étang (Ladouche *et al.*, 2000) et le phénomène inverse (intrusion) n'est pas à exclure.

4. Conclusions et perspectives

Au terme de cette première phase du projet « Évaluation des ressources en eaux souterraines des systèmes karstiques des Corbières orientales », le système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly a été caractérisé. Un premier modèle conceptuel de structure et fonctionnement du système a été établi.

C'est un système karstique binaire alimenté par les précipitations sur un impluvium de **165 km²** et par une contribution importante des pertes de l'Agly et du Verdouble. La surface totale du bassin d'alimentation est estimée à quelques 300 km² à l'aide du bilan hydrologique et des résultats de modélisation inverse pluie-débits considérant également le débit des pertes comme fonction d'entrée. Cette contribution selon les premiers calculs est de l'ordre de 60 % en moyenne à l'échelle de la période d'observation (1997-2003). Cette contribution est variable au cours du temps, en fonction des conditions hydrologiques et de la capacité d'absorption du karst au droit des pertes. Des incertitudes persistent sur la détermination de cette fonction d'entrée du système ; elles sont liées aux données hydrologiques disponibles sur les cours d'eau concernés. Les pertes de l'Agly sont appréciées à partir de la station de jaugeage de Mas de Jau, mais des incertitudes restent concernant l'apport du Maury. Les pertes du Verdouble sont estimées à partir de la station de jaugeage située bien en amont de la zone concernée, à Tautavel, et notamment à partir de données ponctuelles de jaugeages à la sortie des gorges à proximité de la confluence avec l'Agly. Ainsi, en terme de perspectives pour la phase II du projet (2004-2006), il paraît important de préciser cette fonction d'entrée et de caractériser la capacité d'absorption du karst au droit des pertes :

- mise en place d'une sonde de mesure de hauteur d'eau sur le Verdouble proche de la confluence ;
- mise en place d'une sonde de mesure de hauteur d'eau sur le Maury à Estagel avant la confluence avec l'Agly ;
- investigations géologiques et géophysiques pour implanter un ou deux piézomètres dans la zone des pertes afin de suivre les processus d'infiltration, et préciser la fonction de transfert entre la zone des pertes et les exutoires, ainsi que les relations avec le forage de Cases de Pène.

Ce système karstique possède une karstification bien développée avec un réseau de drainage de type anastomosé, privilégiant deux directions préférentielles d'écoulement liées aux déformations régionales. Les deux flancs du synclinal du Bas-Agly sont le siège d'écoulements souterrains, locaux et régionaux. Les eaux du flanc sud du synclinal sont drainées en direction de l'extrémité de son flanc dont la géométrie est supposée comme redressée sous une couverture plio-quaternaire. Les écoulements peuvent probablement s'inverser localement et temporellement. Ces inversions de gradient pourraient être appréciées en comparant les hauteurs d'eau mesurées à Cases de Pène (forage de Sainte-Colombe) et à l'aven de Baixas, lors de la phase II, après nivellement de ces points.

Les écoulements au sein du flanc nord sont orientés vers les exutoires actuels du système, à savoir principalement les sources de Font Estramar et de Font Dame. Ces sources sont caractérisées par leur salinité, dont l'origine a été déterminée : intrusion saline récente des eaux de l'étang (quelques dizaines d'années). Des différences de salinité sont mises en évidence entre les sources, la source de Font Estramar ayant une contribution de l'ordre de 10 % de l'eau de l'étang, alors que la source de Font Dame uniquement 5 %. Les autres sources situées au niveau de Salses-le-Château ne sont pas affectées par la salinité. L'intrusion saline par l'eau de l'étang est relativement bien circonscrite. Le Pliocène continental est marqué par une salinité, dans le secteur proche des sources, démontrée par des forages existants. Concernant le Pliocène marin sableux sous-jacent, aucune information n'est disponible. Pour affiner le modèle conceptuel d'interprétation de l'intrusion saline, et préciser la géométrie de l'interface eau douce-eau salée, l'implantation d'un forage ayant pour cible les eaux souterraines du Pliocène marin sableux pourrait être envisagée dans le cadre de la phase II du projet. Cet ouvrage n'est pas prioritaire face aux objectifs d'évaluation de la ressource du système karstique des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly.

Au vu de la ressource en eau souterraine importante telle qu'elle a été évaluée (25 millions m³ de réserve et un débit moyen de 2,5 m³/s au niveau des exutoires) et de la salinité localisée au niveau de la zone des exutoires actuels, il apparaît intéressant de procéder à des prospections géophysiques pour implanter deux à trois forages de reconnaissance :

- Zone prioritaire au niveau du flanc nord, dans le secteur Montpins-La Joliette, avec une implantation sur la base de la géologie, des forages existants et des résultats d'une prospection géophysique (sismique à haute résolution) (profondeur de l'ouvrage 500 m).
- Secteur de la Combe Française, au niveau d'un système annexe au drainage très probablement, afin de vérifier également la zone d'influence de l'intrusion saline ; ce forage pourra être implanté sur la base d'une reconnaissance géologique et géophysique (panneaux électriques).
- Secteur de Rivesaltes au niveau du flanc sud du synclinal, dans le but d'implanter un forage pour intercepter la ressource sollicitée à Cases de Pène et se rapprocher des zones à besoin en eau souterraine ; ce forage de quelques 250 m également serait implanté sur la base de la géologie, voire de la géophysique (sismique à haute résolution), dans un contexte structural de flanc redressé supposé ; des difficultés d'interprétation de la géophysique sont à envisager. Cette troisième zone sera prospectée en dernier, sur la base des résultats des deux autres forages et de l'interprétation de la géophysique sur le flanc nord.

Des essais hydrauliques seront effectués sur les ouvrages en fonction de leurs résultats, ainsi qu'une caractérisation hydrochimique et isotopique ; l'interprétation de cette dernière sera rattachée aux résultats des analyses hydrogéochimiques antérieures.

L'ensemble des points d'eau constituant un réseau de mesures, quelques 15 points, feront l'objet d'un nivellement au cours de la phase II.

De plus, au vu de la variabilité temporelle du système karstique, l'interprétation des débits classés et des courbes de récession des sources concernées sera nécessaire sur les cycles hydrologiques 2004-2005. L'interprétation à l'aide des modèles inverses et décomposition des hydrogrammes en intégrant les pertes sera mise à jour au terme de la phase II, prenant en compte les données complémentaires acquises entre 2004 et fin 2005.

5. Principales références bibliographiques

Arfib B. (2001) - Étude des circulations d'eau souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce). Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 343 p.

Aunay B. (2003) - Étude hydrodynamique d'un système karstique littoral dans les Corbières orientales (France, mémoire du Master en gestion des ressources en eau, spécialisation hydrogéologie, université de Neuchâtel, Suisse, 83 p.

Aunay B., Le Strat P., avec la collaboration de Aguilar J.P., Camus H., Clauzon G., Dörfliger N. (2002) - Introduction à la géologie du karst des Corbières. BRGM/RP-51595-FR, 22 fig., 3 tabl., 28 photos, 4 pl. h.t., 80 p.

Bakalowicz M., Le Strat P. (1997) - Étang de Salses Leucate. Contexte géologique. Implications hydrogéologiques sur les écoulements souterrains dans la partie nord de l'étang. Rap. BRGM R 39677.

Brandt C. (1997) - Font Estramar. 11 ans de recherches en plongée dans un grand réseau noyé en bordure de la Méditerranée. Symposium 4. Exploration et spéléologie, publication du 12^e Congrès international de spéléologie (La Chaux-de-Fonds, Suisse), vol. 4, p. 71-74.

Breznik M. (1973) - The origin of the brackish karstic springs and their development. Geologija, Razprave in proèila, 16. Knjiga, Ljubljana, 183 p.

Calvache M.L., Pulido-Bosh A. (1994) - Modelling the effects of salt-water intrusion dynamics for a coastal karstified block connected to a detritical aquifer. *Groundwater*, vol. 32, n° 5, p. 767-777.

Chabart M. (1996) - La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales), 1 vol., 160 p., 132 fig., 59 tabl., Document BRGM n° 257.

Combes P., Ledoux E. (1990) - Hydrogéologie de l'étang de Saint-Paul – Expérience de mise en charge de la source du Moulin, Rapport ARMINE, 19 p.

Cooper H.H. (1959) - A hypothesis concerning the dynamic balance of freshwater and saltwater in a coastal aquifer. *J. Geophys. Res.*, 64, p. 461-467.

Cotecchia V. (1997) - Karstic coastal aquifers. chap. 5. In: Seawater intrusion in coastal aquifers : guidelines for study, monitoring and control, (Food and agriculture organization of the United Nations – Rome), *Water Reports*, 11, p. 57-66.

Courtois N., avec la collaboration de Bakalowicz M., Cubizolles E., 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 Verdoble. Rapport BRGM/RP-52211-FR, 82 p., 25 fig.

Dörfliger N., Ladouche B., Le Strat P., avec la collaboration de B. Aunay, J. Cubizolles, C. Du Couëdic, J.L. Izac et P. Thomson (à paraître) - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet « Evaluation des ressources en eau des Corbières », Volume 1 - Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation, BRGM/RP-52918-FR, 109 p., 85 ill., 2 ann..

Duriez A. (2002) - Étude du fonctionnement hydrogéologique du karst de Font Estramar (Aude et Pyrénées-Orientales), mémoire de DEA Hydrologie-Hydrogéologie, Université Paris Sud XI, 128 p.

Duvail C., Le Strat P., avec la collaboration de C. Gorini, J. Lofi, G. Clauzon (2002) - Architecture et géométrie haute résolution des prismes sédimentaires plio-quaternaires au droit du Roussillon suivant un profil terre-mer. BRGM/RP-51972-FR, 71 p.

Duvail C., Le Strat P., Bourguine B. (2001) – Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées-Orientales). Rap. BRGM/RP-51197-FR. 44 p.

Eraso A. (1985) - Methodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el karst. Kobié, *Serie Ciencias Naturales*, Bilbao, N° XV, 1 222 p.

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 université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 219 p.

Gadel F. (1966) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des Corbières orientales (région est) et des plaines de Rivesaltes Lapalme - Caves et Sigean. Thèse de 3^e cycle ; univ. Montpellier. 289 p.

Glover R.E. (1959) - The patterns of fresh-water flow in a coastal aquifer. *J. Geophys. Res.*, 64, p. 457-459.

Got H. (1965) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Feuilla-Fitou (Corbières) et de la Salanque (Roussillon). Thèse de doctorat, CERGH, institut de géologie, univ. Montpellier II. 158 p.

Henry H.R. (1964) - Effects on dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. In sea water in coastal aquifers, USGS, Water supply pap., 1613-C, p. 70-84.

Howard K.W.F., Mullings E. (1996) - Hydrochemical analysis of groundwater flow and saline incursion in the Clarendon basin, Jamaica. *Groudwater*, vol. 34, no 5, p. 801-810.

Hubbert M.K. (1940) - The theory of groundwater motion. *J. Geol.*, 48, p. 785-944.

Llaneza Alonso S. (1995) - Le karst de Font Estramar et l'alimentation de l'étang de Salses Leucate (Pyrénées-Orientales), DESS Hydrogéologie et Environnement, univ. d'Avignon et des pays de Vaucluse, 56 p.

Mangin A. (1970) - Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement. *Annales de Spéléologie*, t. 25, 3, p. 581-609.

Mangin A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, thèse de Doctorat, univ. de Dijon, (*Ann. Spéol.*, 1974, 3, p. 283-332, 1974, 29, 4, p. 495-601 ; 1975, 30, 1, p. 21-124).

Moore Y.H., Stoessel R.K., Easley D.H. (1992) - Freshwater/seawater relationship within a groundwater flow system, Northeastern coast of the Yucatan Peninsula. *Groundwater*, vol. 30, no 3, p. 343-350.

Padilla A., Pulido Bosch A. (1995) - Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J. Hydrol.*, 168: p. 73-89.

Petit V., Ladouche B., Dörfliger N. (2002) – Compte rendu et interprétation du pompage d'essai de puits et 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 en hydrogéochimie. Projet Modhydro. BRGM/RP-51459-FR. 221 p.

Remenieras G. (1960) - L'hydrologie de l'ingénieur, collection du laboratoire national d'Hydraulique, Eyrolles.

Salvayre H. (1977) - Spéléologie et hydrogéologie des massifs calcaires des Pyrénées-Orientales, Conflent, 249 p.

Salvayre H. (1969) - Compte rendu des travaux du GERS, Spelunca, 3, p. 191.

Serrat P. (2000) - Genèse et dynamique d'un système fluvial méditerranéen : le bassin de l'Agly (France), thèse de doctorat en géographie, univ. de Perpignan, 653 p.

Stringfield V.T., Legrand H.E. (1971) - Effects of karst features on circulation of water in carbonate rocks in coastal areas. *Journal of Hydrology*, 14, p. 139-157.

Thomson P. (2002) - Analyse hydrogéologique du système karstique d'Opoul et du synclinal du Bas-Agly (Corbières orientales) - Modélisation globale (TEMPO) et discrétisées (MARTHE), DESS Hydrogéologie et Environnement, univ. d'Avignon et des Pays du Vaucluse, Avignon, 59 p.

Wicks C., Herman J.S. (1995) - The effect of zones of high porosity and permeability on the configuration of the saline-freshwater mixing zone. *Groundwater*, vol. 33, n°5, p. 733-744.

Williams P.W. (1977) - Hydrology of the Waikoropupu springs : a major tidal karst resurgence in the Northwest Nelson (New Zealand). *Journal of Hydrology*, 35, p. 73-92.

Annexe 1

Résultats de l'analyse des courbes de récessions de la source de Font Estramar pour la période 1971-2003

Période Récession		du	23/04/71	06/06/73	19/04/76	23/01/77	19/10/77	22/01/79	15/04/80	08/05/85	07/04/86	11/03/87	04/04/88	25/04/89
		au	18/09/71	07/10/73	20/08/76	30/04/77	13/01/78	13/08/79	25/09/80	25/10/85	30/09/86	02/10/87	05/11/88	09/08/89
Q début (m3/s)			12.4	6.4	5.9	5.3	23.5	13.9	9.7	4.7	6.6	6.2	16.2	9.9
Q fin (m3/s)			0.99	0.77	0.86	0.96	1.12	0.87	0.85	0.75	0.96	0.72	0.70	0.64
alpha (coef tarissement)			0.007	0.005	0.0065	0.007	0.0065	0.011	0.0045	0.005	0.0075	0.0075	0.008	0.004
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)			0.50	1.00	1.00	0.35	0.55	0.35	0.15	0.25	0.32	0.20	0.50	0.45
Qro (m3)			2.1	1.4	1.9	1.6	1.85	1.65	1.3	1.5	2.1	1.55	2.5	0.9
ti (tps fin d'infiltration)			20	6	15	20	15	15	23	13	30	27	25	21
QO (débit au pic de crue)			12.4	6.4	5.86	5.32	23.5	13.9	9.71	4.69	6.58	6.19	16.2	9.85
qo (débit d'infiltration à t=0)			10.3	5.0	4.0	3.7	21.7	12.3	8.4	3.2	4.5	4.6	13.7	9.0
Eta (vitesse moyenne d'infiltration)			0.050	0.167	0.067	0.050	0.067	0.067	0.043	0.077	0.033	0.037	0.040	0.048
Critère de Nash (qualité de la simulation)			93.8	99.1	94.7	99.0	97.9	88.4	82.4	96.0	94.1	76.5	88.3	99.1
Vdyn (million de m3)			25.9	24.2	25.3	19.7	24.6	13.0	25.0	25.9	24.2	17.9	27.0	19.4
Vinfil (million de m3)			3.4	0.8	0.9	1.4	6.1	4.1	4.9	1.1	2.1	2.6	4.9	3.2
Parametre i (retard à l'infiltration)			0.45	0.22	0.29	0.53	0.41	0.51	0.70	0.56	0.57	0.66	0.46	0.48
Pouvoir régulateur K			0.45	0.42	0.44	0.34	0.42	0.22	0.21	0.45	0.42	0.31	0.47	0.34

Période Récession		du	14/02/90	10/05/91	23/01/92	11/05/93	20/11/93	20/10/94	04/02/98	05/05/99	17/01/00	18/01/01	10/05/02	28/02/03
		au	10/12/90	22/09/91	18/06/92	23/09/93	22/09/94	24/04/95	02/06/98	04/10/99	21/03/00	23/03/01	24/08/02	13/10/03
Q début (m3/s)			16.4	14.5	21.3	13.6	7.2	20.6	10.1	10.1	7.8	13.5	11.5	9.8
Q fin (m3/s)			0.87	0.99	1.07	0.95	1.02	1.05	1.21	1.21	1.47	1.56	1.21	0.99
alpha (coef tarissement)			0.004	0.008	0.011	0.0085	0.002	0.0065	0.0065	0.007	0.0065	0.01	0.0095	0.005
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement)			0.55	0.45	0.10	0.45	0.33	0.65	0.60	0.65	0.160	0.400	0.750	0.650
Qro (m3)			2	2	3.3	2.3	2	2.1	2	2	2.1	2.8	2.3	1.5
ti (tps fin d'infiltration)			30	10	20	29	20	20	22	10	12	12	15	20
QO (débit au pic de crue)			16.4	14.5	21.3	13.6	7.15	20.6	10.063	10.087	7.76	13.53	11.50	9.82
qo (débit d'infiltration à t=0)			14.4	12.5	18.0	11.3	5.2	18.5	8.1	8.1	5.7	10.7	9.2	8.3
Eta (vitesse moyenne d'infiltration)			0.033	0.100	0.050	0.034	0.050	0.050	0.045	0.100	0.083	0.083	0.067	0.050
Critère de Nash (qualité de la simulation)			92.9	95.4	84.6	91.4	88.2	95.1	92.8	75.9	69.8	88.3	93.5	88.8
Vdyn (million de m3)			43.2	21.6	25.9	23.4	86.4	27.9	26.6	24.7	27.9	24.2	20.9	25.9
Vinfil (million de m3)			5.3	3.2	10.9	4.5	2.0	5.4	2.5	1.8	2.2	3.1	2.3	2.4
Parametre i (retard à l'infiltration)			0.44	0.42	0.75	0.49	0.54	0.39	0.41	0.35	0.63	0.46	0.35	0.39
Pouvoir régulateur K			0.75	0.37	0.45	0.40	1.49	0.48	0.46	0.43	0.48	0.42	0.36	0.45

Annexe 2

Estimation du débit des pertes du Verdouble

Fonction théorique : $Y = pr1 \cdot X1^{pr2}$

Fonction optimisée : $Y = 3.56504931339069 \cdot X1^{0.791113112888643}$

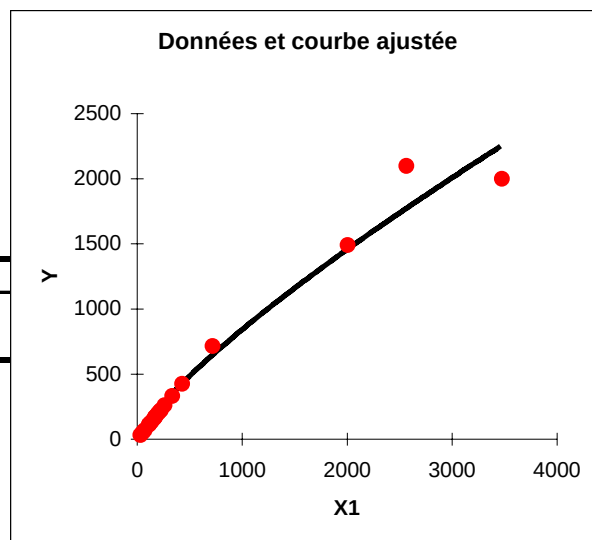
Solution pour les paramètres :

Nom	Valeur
pr1	3.56504931
pr2	0.79111311

SSR : 191427.809

$R^2 (1-SSR/(n-1)/Var(Y))$ 0.97458891

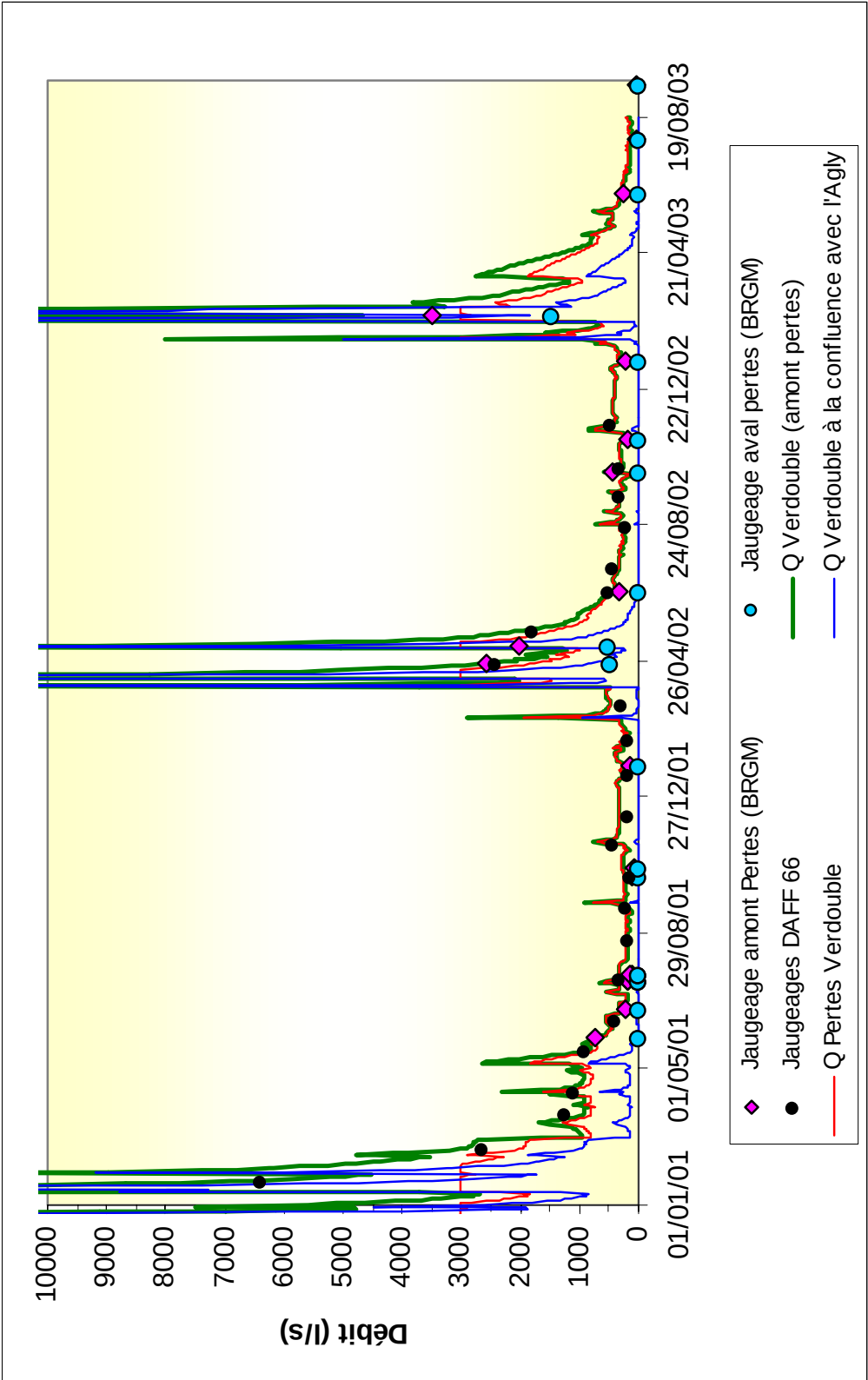
$R^2 (Y, Pred(Y))$: 0.97558984



Analyse des résidus :

Observations	Poids	Q amont		Q pertes		Résidus
		X1	Y (Données)	Y (Modèle)		
Obs 1	1	717	717	647.3		69.7
Obs 2	1	215	215	249.6		-34.6
Obs 3	1	172	172	209.1		-37.2
Obs 4	1	172	172	209.1		-37.2
Obs 5	1	114	114	151.2		-37.1
Obs 6	1	161	161	198.6		-37.6
Obs 7	1	113	113	149.7		-37.1
Obs 8	1	69	69	102.0		-32.6
Obs 9	1	134	134	171.7		-37.7
Obs 10	1	2565	2098	1774.3		323.7
Obs 11	1	2005	1492	1460.2		31.8
Obs 12	1	333	333	353.2		-19.8
Obs 13	1	427	427	429.2		-2.7
Obs 14	1	196	196	232.5		-36.0
Obs 15	1	225	225	258.5		-33.8
Obs 16	1	3475	2001	2256.1		-255.1
Obs 17	1	261	261	291.0		-30.0
Obs 18	1	31	31	53.9		-22.9
Obs 19	1	51	51	80.0		-29.0

Relation utilisée pour calculer le débit des pertes du Verdoube.



Évolution temporelle du débit calculé des pertes du Verdoube et du débit calculé du Verdoube à la confluence avec l'Agly.

Annexe 3

Diagrammes de Piper et tableaux des données hydrochimiques pour les sources de Font Estramar et de Font Dame

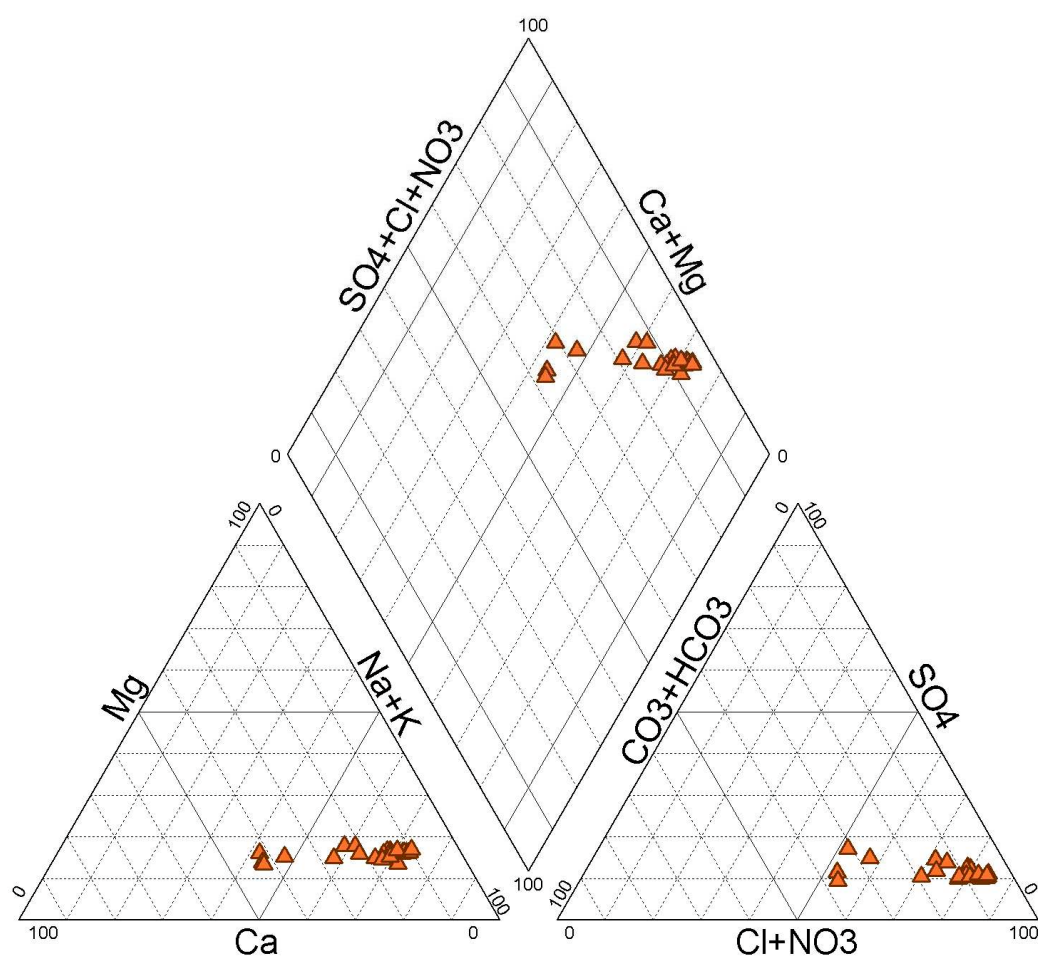


Diagramme de piper de la source de Font Estramar.

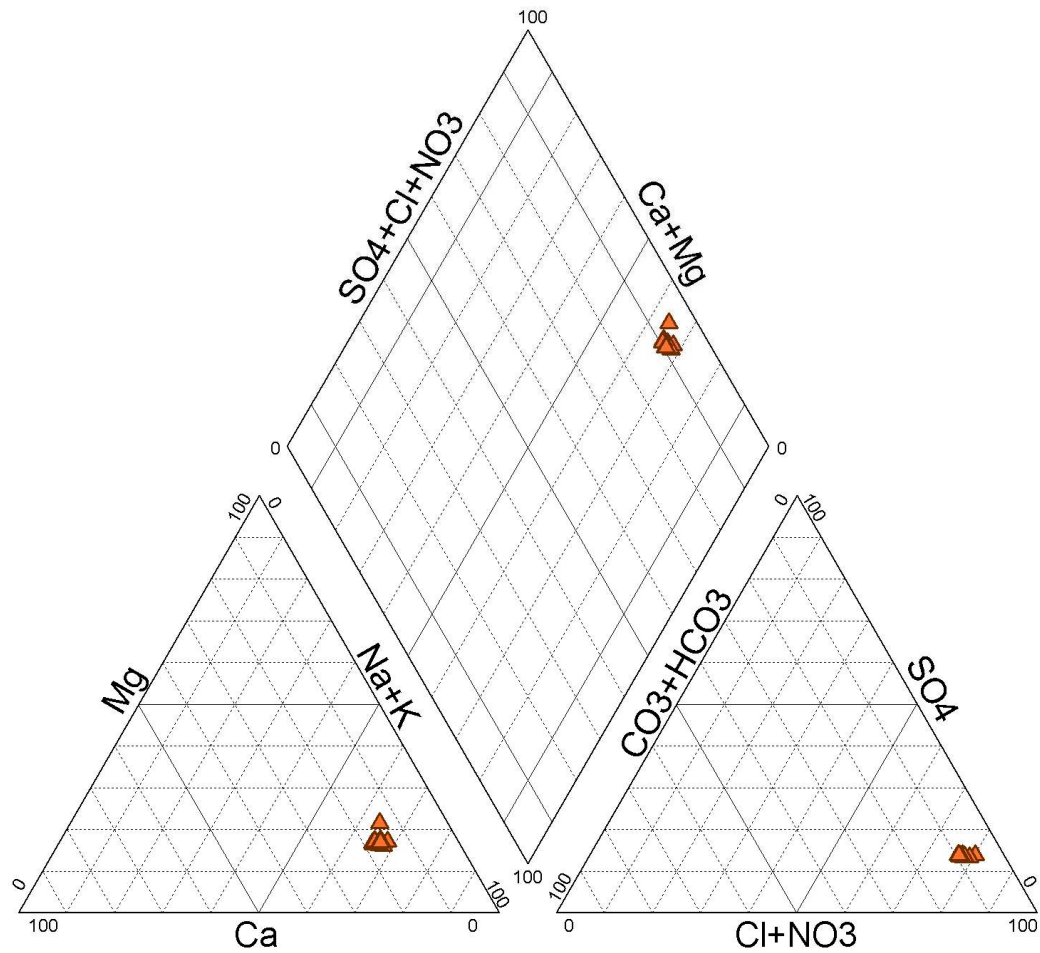


Diagramme de piper de la source de Font Dame.

Nom échantillon	pH	T °C	C mS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	87Sr/86Sr	2σ(m)
Font Estramar20/02/02	7,61	17,9	5,21	142	92,2	753	26,4	245	1355	3,4	292	7	0,19	3,63	1,2	<1	4	-6,6	-39,9	0,708445	0,000008
E24-09/03/02	7,48	17,9	2,96	133	61,1	374	14,4	238	699	4,2	193	7	0,11	1,43	0,73	<1	8	-6,8	-41,0	0,708281	0,000008
E26-11/03/02	7,45	18,1	3,45	138	70,6	457	18,7	242	866	3,3	217	7,2	0,18	2,08	0,89	<1	9				
Font Estramar19/03/02	7,62	17,8	5,35	153	106	818	29,4	250	1421	3,3	296	6,8	0,24	4,02	1,32	<1	4	-6,5	-39,2	0,708467	0,000007
E48-03/04/02	7,46	18,2	5,55	163	111	867	31,9	248	1478	4,1	301	6,6	0,28	3,73	1,12	1	10	-6,4	-38,4	0,708478	0,000008
E49-04/04/02	7,53	17,9	5,03	154	102	779	27	250	1296	2,9	272	6,4	0,24	3,42	1,01	1	9	-6,9	-39,4	0,708169	0,000007
E50-05/04/02	7,55	17,5	1,366	117	27,1	132	5,3	241	232	3,8	105	6,1	0,06	0,83	0,48	2	11				
Font Estramar09/04/02	7,74	17,7	4,26	141	82,7	658	23,6	264	1156	2,6	204	4,8	0,18	2,95	0,87	<1	5				
Font Estramar11/04/02	7,45	17,1	4,85	147	90,9	742	26,7	267	1314	2,3	243	5,1	0,23	3,47	1,01	<1	4				
E57-12/04/02	7,34	16,7	1,275	109	21,7	126	5	258	218	2,1	64	4,3	0,05	0,7	0,28	5	11				
E58-13/04/02	7,39	15,7	1,203	103	19,8	121	4,8	248	208	1,8	49	3,3	0,05	0,67	0,22	9	11	-6,5	-35,1	0,708418	0,000007
E59-14/04/02	7,32	15,9	2,83	123	41,5	298	11,2	257	553	1,4	111	3,9	0,13	1,46	0,48	12	13				
Font Estramar15/04/02	7,67	16,3	3,86	143	71	585	20,4	261	1018	1,8	174	4,2	0,16	2,47	0,72	<1	3				
Font Estramar18/04/02		16,6	5,52	156	88,6	874	31,3	274	1488	1,8	256	5	0,23	3,64	1,04	<1	5				
Font Estramar23/04/02	7,02	17,2	6,73	168	131	1093	40,3	277	1953	2,5	318	5,5	0,35	5,06	1,33	<1	4				
E75-30/04/02		17,6	7,56	188	160	1342	49	277	2332	2,1	379	5,8	0,41	4,89	1,34	<1	11	-6,0	-34,4	0,708622	0,000008
E79-04/05/02		17,7	7,23	186	154	1254	47,1	272	2279	2,9	374	5,9	0,35	6,29	1,63	2	11	-6,2	-34,5	0,708653	0,000007
E83-08/05/02		17,8	7,43	186	157	1288	49	271	2310	2,6	384	6,1	0,38	6,28	1,6	2	11	-6,2	-34,9	0,708619	0,000007
Font Estramar10/05/02	7,02	16,8	1,613	118	29,5	169	6,7	245	297	3,3	104	5,6	0,07	1,13	0,51	<1	3	-6,6	-38,8	0,708201	0,000007
E86-11/05/02		16,9	2,75	113	50,4	371	13,5	254	700	2,4	154	3	0,15	2,14	0,67	11	11				
E87-12/05/02		16,9	3,87	124	63,4	553	20,4	269	1085	2,4	195	4,5	0,24	3,06	0,81	1	10				
Font Estramar14/05/02	7,06	17	4,92	149	90,4	761	27,1	272	1412	2,1	248	5	0,25	3,34	0,94	<1	4				
Font Estramar04/06/02		18	7,74	186	163	1374	51	271	2500	3	416	6,4	0,52	6,6	1,74	1	4	-6,0	-35,2	0,708593	0,000007
Font Estramar23/07/02	7,37	18,1	8,73	186	174	1440	50,6	262	2600	2,6	468	7,8	0,575	8,79	1,85	<1	11				
Font Estramar28/08/02	7,23	18,8	5,98	150	118	918	33,2	258	1760	<3	318	6,7	0,375	6,97	1,31	<3	<20	-6,0	-36,1	0,708502	0,000008
Font Estramar08/10/02	7,08	18,7	8,32	165	171	1370	47,6	261	2460	<3	427	7,3	0,533	12,7	1,58	<3	<20	-6,1	-37,6	0,708604	0,000008
Font 15/09/03 Estramar	7,48	18,1	7,06	160	141	1110	37,4	253	2048	2,9	386,3	7,5	0,412	5,97	1,505	1,4	<20	-6,4		0,708352	0,000008
Mini=				103	19,8	121	4,8	238	208	1,4	49	3	0,05	0,67	0,22	1	3	-6,9	-41	0,70817	
Maxi =				188	174	1440	51	277	2600	4,2	468	7,8	0,575	12,7	1,85	12	13	-6	-34	0,70865	
Moyenne =				148,2	95,9	764,0	28,1	258,7	1372	2,7	257,3	5,7	0,255	4,0	1,044	4,0	7,8	-6,4	-37,3	0,708457	

Pour l'échantillon Font Estramar du 15/09/2003, une détermination des teneurs en tritium a été réalisée : 3 ± 1 UT.

Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Estramar
(analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).

Nom échantillon	pH	T °C	C mS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	B mg/l	Br mg/l	Sr mg/l	Al µg/l	Fe µg/l	δ18O ‰	δ2H ‰	87Sr/86Sr	2σ(m)
Font Dame-19/03/02	7,73	17,4	4,46	153	83,9	621	20,5	241	1140	2,8	280	7,3	0,15	2,51	1,17	<1	2	-6,8	-42	0,708329	0,000008
FDP-n°16-09/04/02		17,3	4,67	141	86,5	644	22,9	237	1232	2,6	295	6,9	0,23	3,16	1,15	<1	11				
FDP-n°17-09/04/02		17,3	4,69	148	104	770	28,3	237	1242	2,5	298	7,2	0,21	3,15	1,15	<1	13	-6,7	-42	0,708355	0,000008
Font Dame-09/04/02	7,2	18,4	4,51	152	89,3	637	21,3	241	1183	3	284	7,3	0,16	2,83	1,25	1	3				
Font Dame-11/04/02	7,54	17,1	4,57	154	87,1	631	21,4	243	1181	3	283	7,3	0,22	3,43	1,5	<1	2				
FDP-n°3-23/04/02		17,2	5,14	140	130	720	26,3	173	1359	1,9	321	7	0,24	3,45	1,17	<1	9				
FDP-n°4-23/04/02		17,4	5,44	150	105	777	27,8	236	1448	2,2	329	7,3	0,24	3,55	1,22	<1	9	-6,6	-39	0,708409	0,000007
Font Dame-15/04/02	7,83	17,9	5,02	160	96,8	721	23,6	244	1288	3	303	7,7	0,2	3,19	1,31	<1	4				
Font Dame-23/04/02	7,26	18,5	4,68	154	91,3	649	21,4	241	1230	3	290	7,1	0,14	2,87	1,2	1	4	-6,7	-41	0,708356	0,000008
FDP-n°16-14/05/02		17,4	4,35	135	89,4	629	22,7	232	1218	2,7	289	6,7	0,24	3,31	1,17	2	11				
Font Dame-10/05/02	7,22	17,3	4,84	149	87,7	650	22,1	244	1255	3,1	291	7,5	0,23	3,48	1,43	<1	4				
FDP-n°18-14/05/02		17,3	4,58	141	86,4	674	24,0	238	1282	2,2	299	6,7	0,26	3,5	1,19	<1	9	-6,6	-40	0,708373	0,000007
Font Dame-14/05/02	7,28	17,6	4,57	146	89,7	626	21,2	242	1187	3,1	280	7,1	0,19	3,05	1,26	<1	4				
Font Dame-04/06/02		17,6	4,51	142	85,2	602	20,4	243	1147	3,2	271	7,2	0,14	2,66	1,1	<1	5	-6,7	-41	0,708345	0,000007
Fondame.23/07/02	7,53	17,6	4,24	147	85	649	21,4	241	1150	3	280	8,2	0,211	4,71	1,22	1	12				
Font Dame-28/08/02	7,48	17,7	4,32	139	84,3	623	22,4	244	1150	<3	279	7,7	0,27	4,59	1,15	<3	<20	-6,7	-41	0,708329	0,000008
Font Dame-08/10/02	7,35	17,6	4,37	137	85,1	626	22,3	242	1154	<3	283	7,6	0,264	5,54	1,12	<3	<20	-6,7	-42	0,708331	0,000008
Font Dame 15/09/03	7,63	17,8	4,17	132	82,8	587	20,9	238	1090	2,2	284	7,5	0,194	3,47	1,199	1,1	<20	-6,8	-42	0,708352	0,000008
Mini=	7,2	17,1	4,17	132	82,8	587	20,4	173	1090	1,9	271	6,7	0,14	2,51	1,1	1	2	-6,8	-42	0,70833	
Maxi =	7,83	18,5	5,44	160	130	777	28,3	244	1448	3,2	329	8,2	0,27	5,54	1,31	2	13	-6,6	-39	0,70841	
Moyenne =	7,5	17,6	4,6	145,6	91,6	657,6	22,8	236,5	1219	2,7	291,1	7,3	0,21	3,5	1,22	1,2	6,8	-6,7	-41,1	0,708353	

Pour l'échantillon Font Dame du 15/09/2003, une détermination des teneurs en tritium a été réalisée : 5 ± 2 UT.

*Résultats des analyses chimiques et isotopiques de la source de Font Dame
(analyses effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM Orléans).*

Annexe 4

Tests statistiques - relation flux de chlorure et débits à la source de Font Estramar

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	1345.76923	756.942022	208	2600
Variable X1	4.83026923	2.247470019	1.203	8.73

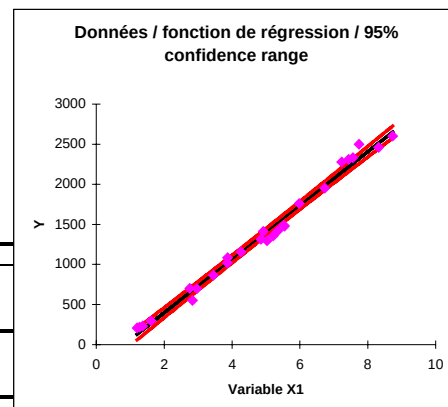
Coefficient de corrélation r : 0.9942
 Coefficient de détermination r^2 : 0.9885
 Coefficient de détermination ajusté : 0.9880

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	omme des carrés	Carrés moyen	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	14158869	14158869	2057	0.0001
Résidus	24	165162	6882		
Total	25	14324031			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyen	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	14158869	14158869	2057	0.0001



Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf. de l'intervalle à 95%	Borne sup. de l'intervalle à 95%
Constante	-271.646646	39.1941	-6.9308	0.0001	-352.5392	-190.7541
Variable X1	334.850047	7.3822	45.3591	0.0001	319.6139	350.0861

L'équation du modèle est : $Y = -271.646646349264 + 334.850046621711 \cdot X1$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	5.21	1355	1472.9	-117.9	-1.5	1425.8	1520.0
2	1	2.96	699	719.5	-20.5	-0.3	665.0	774.0
3	1	3.45	866	883.6	-17.6	-0.2	832.5	934.7
4	1	5.35	1421	1519.8	-98.8	-1.2	1472.4	1567.2
5	1	5.55	1478	1586.8	-108.8	-1.3	1538.8	1634.7
6	1	5.03	1296	1412.6	-116.6	-1.4	1365.8	1459.5
7	1	1.366	232	185.8	46.2	0.6	115.9	255.6
8	1	4.26	1156	1154.8	1.2	0.0	1107.3	1202.3
9	1	4.85	1314	1352.4	-38.4	-0.5	1305.6	1399.1
10	1	1.275	218	155.3	62.7	0.8	84.4	226.2
11	1	1.203	208	131.2	76.8	0.9	59.5	202.9
12	1	2.83	553	676.0	-123.0	-1.5	620.4	731.5
13	1	3.86	1018	1020.9	-2.9	0.0	971.9	1069.8
14	1	5.52	1488	1576.7	-88.7	-1.1	1528.8	1624.6
15	1	6.73	1953	1981.9	-28.9	-0.4	1927.1	2036.6
16	1	7.56	2332	2259.8	72.2	0.9	2197.7	2322.0
17	1	7.23	2279	2149.3	129.7	1.6	2090.3	2208.3
18	1	7.43	2310	2216.3	93.7	1.2	2155.4	2277.2
19	1	1.613	297	268.5	28.5	0.4	201.3	335.6
20	1	2.75	700	649.2	50.8	0.6	593.0	705.4
21	1	3.87	1085	1024.2	60.8	0.7	975.3	1073.1
22	1	4.92	1412	1375.8	36.2	0.4	1329.1	1422.6
23	1	7.74	2500	2320.1	179.9	2.2	2256.1	2384.0
24	1	8.73	2600	2651.6	-51.6	-0.6	2576.7	2726.5
25	1	5.98	1760	1730.8	29.2	0.4	1680.9	1780.6
26	1	8.32	2460	2514.3	-54.3	-0.7	2444.1	2584.5

Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.3933

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 98.85% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.01%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Constante.

Test_0 (groupe 1, crues n°1, 7,8,10 et 11 cf. figure 36)
Les flux de chlorure écoulés pendant les phases de "piston" sont-ils expliqués par le flux de chlorure initial (avant la crue) ?

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	571.8528	106.283873	393.048	673.2
Variable X1	2.5276	0.91578862	1.128	3.64

Coefficient de corrélation r : 0.8454
 Coefficient de détermination r² : 0.7148
 Coefficient de détermination ajusté : 0.6197

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables (H0 = Y=Moy(Y)):

	Degrés de lib.	mme des carr	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	32297.4485	32297.4485	7.5183	0.0712
Résidus	3	12887.5977	4295.8659		
Total	4	45185.0462			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	32297.4485	32297.4485	7.5183	0.0712

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	323.843929	95.0809	3.4060	0.0423	21.2539	626.4340
Variable X1	98.1203002	35.7849	2.7419	0.0712	-15.7634	212.0040

L'équation du modèle est : $Y = 323.843929287939 + 98.1203001709373 \cdot X1$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	1.128	393.048	434.5236	-41.4756	-0.7307	270.5016	598.5457
2	1	2.74	609.48	592.6936	16.7864	0.2957	486.3695	699.0176
3	1	2.33	572.616	552.4642	20.1518	0.3550	446.3730	658.5555
4	1	3.64	610.92	681.0018	-70.0818	-1.2347	536.0088	825.9948
5	1	2.8	673.2	598.5808	74.6192	1.3146	491.1476	706.0140

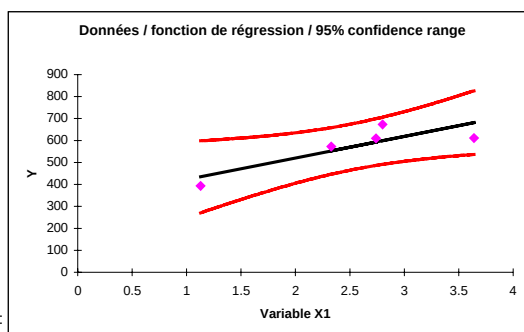
Statistique de Durbin-Watson Dw : 2.5207

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 71.48% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un résultat correct.
 Essayez d'autres variables explicatives en remplacement ou en plus de celles utilisées ici.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque de 7.12%. **Etant donné le niveau de signification choisi, le modèle est donc mauvais.**

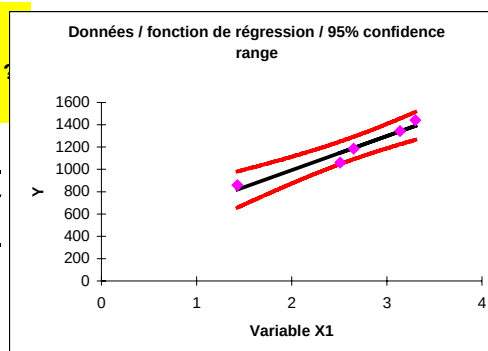
La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Constante.



Test_0 bis (groupe 2, crues n°2, 4,5,6 et 9 cf. figure 36)
Les flux de chlorure écoulés pendant les phases de "piston"
sont-ils expliqués par le flux de chlorure initial (avant la crue) ?

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	1178.4456	230.5376611	858.96	1442.16
Variable X1	2.606	0.735003401	1.43	3.3

Coefficient de corrélation r : 0.9716
 Coefficient de détermination r^2 : 0.9441
 Coefficient de détermination ajusté : 0.9254



Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	200697.2858	200697.2858	50.6250	0.0057
Résidus	3	11893.1670	3964.3890		
Total	4	212590.4528			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	200697.2858	200697.2858	50.6250	0.0057

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	384.253036	115.1172	3.3379	0.0445	17.8984	750.6077
Variable X1	304.755397	42.8320	7.1151	0.0057	168.4446	441.0662

L'équation du modèle est : $Y = 384.253036003182 + 304.755396775447 \cdot X1$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf.)	Borne sup. de la prévision (int. de conf.)
1	1	1.43	858.96	820.0533	38.9067	0.7135	658.0591	982.0474
2	1	3.3	1442.16	1389.9458	52.2142	0.9576	1264.5776	1515.3141
3	1	3.14	1343.88	1341.1850	2.6950	0.0494	1225.3276	1457.0423
4	1	2.65	1185.228	1191.8548	-6.6268	-0.1215	1091.2776	1292.4321
5	1	2.51	1062	1149.1891	-87.1891	-1.5990	1048.1901	1250.1880

Statistique de Durbin-Watson Dw : 0.7741

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 94.41% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.57%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X1.

Test_01

Les volumes écoulés pendant les phases de dilutions sont-ils expliqués par les cumuls des pluies précipitées au cours des 3 jours précédents les crues ?

Variables qualitatives : Aucune

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	0.66	0.45	0.13	1.68
Variable X1	77.41	58.84	9	201.4

Coefficient de corrélation r : 0.8042
Coefficient de détermination r^2 : 0.6467
Coefficient de détermination ajusté : 0.6075

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	1.2977	1.2977	16.4771	0.0028
Résidus	9	0.7088	0.0788		
Total	10	2.0065			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	1.2977	1.2977	16.4771	0.0028

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	0.18237563	0.1442	1.2648	0.2377	-0.1438	0.5086
Variable X1	0.00612256	0.0015	4.0592	0.0028	0.0027	0.0095

L'équation du modèle est : $Y = 0.18237562822326 + 6.12255847412052E-03 \cdot X1$

Analyse des résidus :

Observation:	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	53.6	0.39618	0.5105	-0.1144	-0.4296	0.2448	0.7763
2	1	119.7	0.77278	0.9152	-0.1425	-0.5351	0.6268	1.2037
3	1	201.4	1.09476	1.4155	-0.3207	-1.2046	0.9432	1.8877
4	1	97.7	0.85014	0.7805	0.0696	0.2614	0.5178	1.0433
5	1	62.09	0.37548	0.5625	-0.1870	-0.7026	0.3033	0.8218
6	1	66.63	0.77508	0.5903	0.1848	0.6940	0.3335	0.8472
7	1	9	0.51624	0.2375	0.2788	1.0470	-0.0986	0.5736
8	1	32.83	0.2052	0.3834	-0.1782	-0.6693	0.0914	0.6753
9	1	147.58	1.67976	1.0859	0.5938	2.2304	0.7461	1.4258
10	1	38.53	0.42516	0.4183	0.0069	0.0259	0.1348	0.7017
11	1	22.42	0.12859	0.3196	-0.1911	-0.7176	0.0100	0.6293

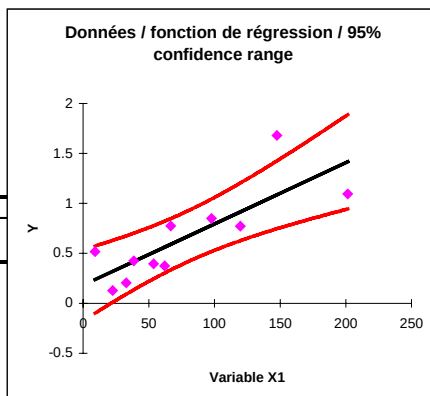
Statistique de Durbin-Watson Dw : 2.2379

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 64.67% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un résultat correct.
Essayez d'autres variables explicatives en remplacement ou en plus de celles utilisées ici.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.28%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X1.



Test_02
Les volumes écoulés pendant les phases de dilutions
sont-ils expliqués par les valeurs du débit de fin de
piston ?

Variables qualitatives : Aucune

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	0.65630618	0.44793957	0.128592	1.67976
Variable X1	7.31363636	6.68677542	1.49	24.85

Coefficient de corrélation r : 0.9707
 Coefficient de détermination r^2 : 0.9422
 Coefficient de détermination ajusté : 0.9358

Evaluation de la valeur de l'information apportée
 par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	1.8906	1.8906	146.7826	0.0001
Résidus	9	0.1159	0.0129		
Total	10	2.0065			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. > F
Variable X1	1	1.8906	1.8906	146.7826	0.0001

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	0.18073682	0.0521	3.4707	0.0070	0.0629	0.2985
Variable X1	0.06502502	0.0054	12.1154	0.0001	0.0529	0.0772

L'équation du modèle est : $Y = 0.180736822767332 + 0.06502502112566 \cdot X1$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	2.4	0.39618	0.3368	0.0594	0.5515	0.2196	0.4540
2	1	7.98	0.772776	0.6996	0.0731	0.6793	0.5964	0.8029
3	1	11.37	1.09476	0.9201	0.1747	1.6225	0.8072	1.0329
4	1	9.31	0.85014	0.7861	0.0640	0.5946	0.6807	0.8915
5	1	3.23	0.37548	0.3908	-0.0153	-0.1420	0.2778	0.5038
6	1	7.92	0.77508	0.6957	0.0793	0.7370	0.5926	0.7989
7	1	6.54	0.51624	0.6060	-0.0898	-0.8337	0.5027	0.7093
8	1	2.48	0.2052	0.3420	-0.1368	-1.2706	0.2252	0.4588
9	1	24.85	1.67976	1.7966	-0.1168	-1.0853	1.5715	2.0217
10	1	2.88	0.42516	0.3680	0.0572	0.5308	0.2533	0.4827
11	1	1.49	0.128592	0.2776	-0.1490	-1.3842	0.1551	0.4002

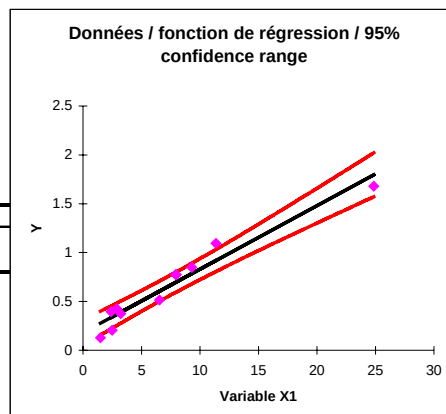
Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.2249

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 94.22% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.01%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X1.



Test_03

Les volumes écoulés pendant les phases de dilutions sont-ils expliqués par les cumuls des pluies (3 jours précédents) et les valeurs des débits à la fin de l'effet piston ?

Variables qualitatives : Aucune

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	0.65630618	0.44793957	0.128592	1.67976
Variable X1	77.4072727	58.8372017	9	201.4
Variable X2	7.31363636	6.68677542	1.49	24.85

Coefficient de corrélation r : 0.9872

Coefficient de détermination r² : 0.9745

Coefficient de détermination ajusté : 0.9681

Évaluation de la valeur de l'information apportée

par les variables (H0 = Y=Moy(Y)):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	2	1.9554	0.9777	152.9627	0.0001
Résidus	8	0.0511	0.0064		
Total	10	2.0065			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	1.2977	1.2977	203.0287	0.0001
Variable X2	1	0.6577	0.6577	102.8967	0.0001

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	0.11857267	0.0416	2.8533	0.0214	0.0227	0.2144
Variable X1	0.00190387	0.0006	3.1838	0.0129	0.0005	0.0033
Variable X2	0.05337429	0.0053	10.1438	0.0001	0.0412	0.0655

L'équation du modèle est : $Y = 0.118572670499473 + 1.90386954289645E-03 \cdot X1 + 5.33742919343733E-02 \cdot X2$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	53.6	0.39618	0.3487	0.0475	0.6637	0.2461	0.4513
2	1	119.7	0.772776	0.7724	0.0004	0.0054	0.6642	0.8805
3	1	201.4	1.09476	1.1089	-0.0141	-0.1974	0.9245	1.2933
4	1	97.7	0.85014	0.8015	0.0486	0.6803	0.7088	0.8942
5	1	62.09	0.37548	0.4092	-0.0337	-0.4713	0.3096	0.5088
6	1	66.63	0.77508	0.6682	0.1069	1.4953	0.5754	0.7609
7	1	9	0.51624	0.4848	0.0315	0.4400	0.3501	0.6194
8	1	32.83	0.2052	0.3134	-0.1082	-1.5138	0.2090	0.4179
9	1	147.58	1.67976	1.7259	-0.0461	-0.6452	1.5213	1.9305
10	1	38.53	0.42516	0.3456	0.0795	1.1120	0.2440	0.4473
11	1	22.42	0.128592	0.2408	-0.1122	-1.5690	0.1298	0.3518

Statistique de Durbin-Watson Dw : 2.2399

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 97.45% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.01%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X2.

Test 04

Les volumes écoulés pendant les phases de dilutions sont-ils expliqués par les débits de début et fin de piston ?

Variables qualitatives : Aucune

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	0.65630618	0.44793957	0.128592	1.67976
Variable X1	7.31363636	6.68677542	1.49	24.85
Variable X2	1.41072727	0.77664665	0.708	3.63

Coefficient de corrélation r : 0.9784

Coefficient de détermination r² : 0.9573

Coefficient de détermination ajusté : 0.9466

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables (H0 = Y=Moy(Y)):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	2	1.9208	0.9604	89.6824	0.0001
Résidus	8	0.0857	0.0107		
Total	10	2.0065			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	1.8906	1.8906	176.5403	0.0001
Variable X2	1	0.0302	0.0302	2.8246	0.1313

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	0.09277003	0.0707	1.3127	0.2257	-0.0702	0.2557
Variable X1	0.06297541	0.0050	12.4862	0.0001	0.0513	0.0746
Variable X2	0.07298142	0.0434	1.6807	0.1313	-0.0272	0.1731

L'équation du modèle est : $Y = 9.27700311504859E-02 + 6.29754121478019E-02 \cdot X1 + 7.29814248004891E-02 \cdot X2$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	2.4	0.39618	0.2956	0.1006	1.0868	0.1485	0.4427
2	1	7.98	0.772776	0.6646	0.1082	1.1690	0.5359	0.7932
3	1	11.37	1.09476	1.0737	0.0210	0.2273	0.8017	1.3458
4	1	9.31	0.85014	0.7922	0.0579	0.6261	0.6729	0.9114
5	1	3.23	0.37548	0.3827	-0.0072	-0.0776	0.2546	0.5107
6	1	7.92	0.77508	0.6701	0.1050	1.1346	0.5470	0.7931
7	1	6.54	0.51624	0.5966	-0.0803	-0.8680	0.4792	0.7140
8	1	2.48	0.2052	0.3329	-0.1277	-1.3794	0.2004	0.4653
9	1	24.85	1.67976	1.7497	-0.0699	-0.7553	1.4854	2.0139
10	1	2.88	0.42516	0.3909	0.0343	0.3700	0.2567	0.5251
11	1	1.49	0.128592	0.2705	-0.1419	-1.5335	0.1319	0.4091

Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.2569

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 95.73% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque qui n'est que de 0.01%. Les variables sélectionnées apportent donc une information significative au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X1.

Test_05

Les flux de chlorure exportés pendant la phase de dilution de la crue sont-ils expliqués par les cumuls des pluies précipités au cours des 3 jours précédents les crues .

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	626.94	260.329224	304.308	1097.28
Variable X1	77.4072727	58.8372017	9	201.4

Coefficient de corrélation r : 0.0129
 Coefficient de détermination r^2 : 0.0002
 Coefficient de détermination ajusté : -0.1109

Evaluation de la valeur de l'information apportée
 par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	112.6041	112.6041	0.0015	0.9700
Résidus	9	677600.4458	75288.9384		
Total	10	677713.0499			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	112.6041	112.6041	0.0015	0.9700

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	622.525243	140.9817	4.4156	0.0017	303.6023	941.4482
Variable X1	0.05703285	1.4747	0.0387	0.9700	-3.2790	3.3931

L'équation du modèle est : $Y = 622.525242667431 + 0.057032849460068 \times X1$

Analyse des résidus :

Observation:	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	53.6	411.624	625.5822	-213.9582	-0.8219	365.7555	885.4089
2	1	119.7	375.12	629.3521	-254.2321	-0.9767	347.3363	911.3678
3	1	201.4	423.972	634.0117	-210.0397	-0.8069	172.2651	1095.7582
4	1	97.7	650.952	628.0974	22.8546	0.0878	371.2222	884.9725
5	1	62.09	774.972	626.0664	148.9056	0.5720	372.6074	879.5255
6	1	66.63	1097.28	626.3253	470.9547	1.8092	375.1764	877.4743
7	1	9	684	623.0385	60.9615	0.2342	294.4382	951.6389
8	1	32.83	304.308	624.3976	-320.0896	-1.2297	338.9407	909.8545
9	1	147.58	969.12	630.9422	338.1778	1.2991	298.6990	963.1853
10	1	38.53	771.912	624.7227	147.1893	0.5654	347.5856	901.8599
11	1	22.42	433.08	623.8039	-190.7239	-0.7327	321.0100	926.5978

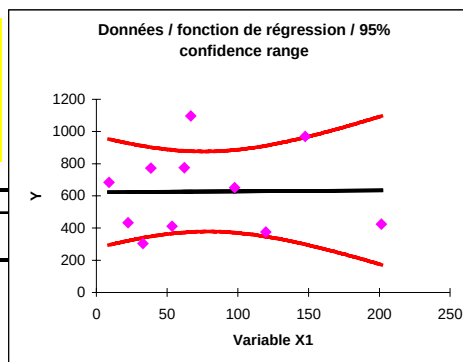
Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.5860

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées n'expliquent que 0.02% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un résultat moyen. Choisissez d'autres variables explicatives en remplacement de celles utilisées ici.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque de 97.00%. Pour le niveau de signification choisi, les variables sélectionnées apportent donc une information insuffisante au modèle.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Constante.



Test_06

Flux exporté pendant la phase de dilution est il fonction de la valeur du débit de fin de piston ?

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	626.94	260.329224	304.308	1097.28
Variable X1	7.31363636	6.68677542	1.49	24.85

Coefficient de corrélation r : 0.4479
 Coefficient de détermination r^2 : 0.2007
 Coefficient de détermination ajusté : 0.1118

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	135985.7888	135985.7888	2.2592	0.1671
Résidus	9	541727.2610	60191.9179		
Total	10	677713.0499			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	135985.7888	135985.7888	2.2592	0.1671

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	499.395015	112.5728	4.4362	0.0016	244.7374	754.0526
Variable X1	17.4393392	11.6025	1.5031	0.1671	-8.8074	43.6861

L'équation du modèle est : $Y = 499.395014538187 + 17.4393392178986 \times X1$

Analyse des résidus :

Observation:	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	2.4	411.624	541.2494	-129.6254	-0.5569	287.8347	794.6642
2	1	7.98	375.12	638.5609	-263.4409	-1.1319	415.4365	861.6854
3	1	11.37	423.972	697.6803	-273.7083	-1.1760	453.6812	941.6794
4	1	9.31	650.952	661.7553	-10.8033	-0.0464	433.8486	889.6619
5	1	3.23	774.972	555.7241	219.2479	0.9420	311.4481	800.0001
6	1	7.92	1097.28	637.5146	459.7654	1.9754	414.4944	860.5348
7	1	6.54	684	613.4483	70.5517	0.3031	390.1131	836.7835
8	1	2.48	304.308	542.6446	-238.3366	-1.0240	290.1686	795.1205
9	1	24.85	969.12	932.7626	36.3574	0.1562	446.1275	1419.3977
10	1	2.88	771.912	549.6203	222.2917	0.9551	301.6558	797.5848
11	1	1.49	433.08	525.3796	-92.2996	-0.3966	260.4833	790.2760

Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.2069

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées n'expliquent que 20.07% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un résultat moyen. Choisissez d'autres variables explicatives en remplacement de celles utilisées ici.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque de 16.71%. **Etant donné le niveau de signification choisi, le modèle est donc mauvais.**

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Constante.

Test_07

Les flux de chlorure exportés pendant les phases de dilution/reconcentration des crues sont-ils expliqués par le cumul des pluies précipités au cours des 3 jours précédents les crues?

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Y	4946.44156	3013.507129	1394.388	11154.96
Variable X1	77.4072727	58.83720168	9	201.4

Coefficient de corrélation r : 0.6000
 Coefficient de détermination r^2 : 0.3600
 Coefficient de détermination ajusté : 0.2889

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y=M$)

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	32690630.1305	32690630.1305	5.0621	0.0510
Résidus	9	58121622.0290	6457958.0032		
Total	10	90812252.1595			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	32690630.1305	32690630.1305	5.0621	0.0510

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	2567.73209	1305.7040	1.9665	0.0808	-385.9778	5521.4420
Variable X1	30.7297931	13.6583	2.2499	0.0510	-0.1674	61.6270

L'équation du modèle est : $Y = 2567.7320860915 + 30.7297931284276 \times X1$

Analyse des résidus :

Observation	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	53.6	1768.608	4214.8490	-2446.2410	-1.0147	1808.4603	6621.2377
2	1	119.7	1394.388	6246.0883	-4851.7003	-2.0125	3634.1953	8857.9813
3	1	201.4	8049.528	8756.7124	-707.1844	-0.2933	4480.2403	13033.1846
4	1	97.7	6872.7852	5570.0329	1302.7523	0.5404	3190.9798	7949.0859
5	1	62.09	5188.716	4475.7449	712.9711	0.2957	2128.3301	6823.1597
6	1	66.63	5666.04	4615.2582	1050.7818	0.4359	2289.2385	6941.2779
7	1	9	4536.36	2844.3002	1692.0598	0.7019	-199.0365	5887.6369
8	1	32.83	2911.32	3576.5912	-665.2712	-0.2759	932.8278	6220.3546
9	1	147.58	11154.96	7102.8350	4052.1250	1.6808	4025.7601	10179.9098
10	1	38.53	5271.192	3751.7510	1519.4410	0.6303	1185.0411	6318.4610
11	1	22.42	1596.96	3256.6940	-1659.7340	-0.6884	452.3641	6061.0240

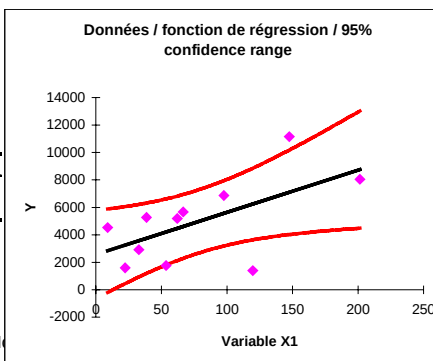
Statistique de Durbin-Watson Dw : 1.2424

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées n'expliquent que 36.00% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un résultat moyen. Choisissez d'autres variables explicatives en remplacement de celles utilisées ici.

Le rejet de l'hypothèse selon laquelle le modèle le plus simple (seulement une constante et pas de variables explicatives) serait aussi puissant que le modèle que vous proposez, se fait avec un risque de 5.10%. Etant donné le niveau de signification choisi, le modèle est donc mauvais.

La variable qui a le plus de poids dans le modèle est : Variable X1.



Test_09

Les flux de chlorures exportés pendant les phases de dilution/reconcentration des crues peuvent-ils être expliqués par un combinaison linéaire des variables : débits de début et fin de piston, cumul de pluie et du volume piston"?

		Moyenne	Ecart type	Min	Max
	Y	4946.44	3013.51	1394.39	11154.96
Cumul pluie	Variable X1	77.41	58.84	9.00	201.4
Q début Piston	Variable X2	1.41	0.78	0.71	3.63
Q fin Piston	Variable X3	7.31	6.69	1.49	24.85
Volume pistonné	Variable X4	0.44	0.16	0.27	0.68

Coefficient de corrélation r : 0.9289

Coefficient de détermination r² : 0.8628

Coefficient de détermination ajusté : 0.7713

Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables (H0 = Y=Moy(Y)):

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	4	78349983	19587496	9.4305	0.0093
Résidus	6	12462269	2077045		
Total	10	90812252			

Analyse du modèle (Type I SS) :

Source	DF	Type I SS	Carrés moyens	F de Fisher	Pr. >F
Variable X1	1	32690630	32690630	15.7390	0.0074
Variable X2	1	1272388	1272388	0.6126	0.4636
Variable X3	1	40764952	40764952	19.6264	0.0044
Variable X4	1	3622014	3622014	1.7438	0.2348

Paramètres de la régression et statistiques correspondantes :

	Valeur	Ecart-type	t de Student	Probabilité correspondante	Borne inf de l'intervalle à 95%	Borne sup de l'intervalle à 95%
Constante	-1514.20829	1804.9975	-0.8389	0.4337	-5930.8813	2902.4647
Variable X1	-41.427308	20.1835	-2.0525	0.0859	-90.8147	7.9600
Variable X2	2457.00884	889.2630	2.7630	0.0327	281.0591	4632.9586
Variable X3	469.520804	103.7787	4.5242	0.0040	215.5832	723.4584
Variable X4	6231.79252	4719.1184	1.3205	0.2348	-5315.4827	17779.0678

L'équation du modèle est : $Y = -1514.20828854533 - 41.4273079988761 \cdot X1 + 2457.00884240852 \cdot X2 + 469.520804307346 \cdot X3 + 6231.79251621785 \cdot X4$

Analyse des résidus :

Observations	Poids	Variable X1	Y	Y modèle	Résidus	Résidus réduits	Borne inf. de la prévision (int. de conf. à 95%)	Borne sup. de la prévision (int. de conf. à 95%)
1	1	53.6	1768.608	873.7355	894.8725	0.8016	-3057.1579	4804.6289
2	1	119.7	1394.388	3250.3459	-1855.9579	-1.6625	-602.2587	7102.9506
3	1	201.4	8049.528	8258.4514	-208.9234	-0.1871	3094.5004	13422.4025
4	1	97.7	6872.7852	6884.9791	-12.1939	-0.0109	2977.7254	10792.2327
5	1	62.09	5188.716	3683.7383	1504.9777	1.3481	551.0765	6816.4001
6	1	66.63	5666.04	5295.9633	370.0767	0.3315	2630.7872	7961.1393
7	1	9	4536.36	5969.6548	-1433.2948	-1.2839	2176.0717	9763.2379
8	1	32.83	2911.32	2890.2702	21.0498	0.0189	211.6672	5568.8732
9	1	147.58	11154.96	10567.8440	587.1160	0.5259	5507.5869	15628.1011
10	1	38.53	5271.192	3908.3365	1362.8555	1.2208	979.1808	6837.4923
11	1	22.42	1596.96	2827.5381	-1230.5781	-1.1023	75.4669	5579.6093

Statistique de Durbin-Watson Dw : 2.1604

Interprétation des résultats :

Les variables X sélectionnées expliquent 86.28% de la variabilité de la variable Y ce qui constitue un bon résultat.

Annexe 5

Estimation du débit de trop-plein de Cases de Pène

Lors des périodes de crue, le débit de la source temporaire de trop-plein de Cases de Pène a été mesuré dans le but d'établir une courbe de tarage hauteur-débit. Nous avons effectué deux jaugeages chimiques du ruisseau et un jaugeage à l'aide d'une perche intégratrice PIREE muni d'un micro-moulinet OTT.

Le principe du jaugeage chimique est exposé ci-après.

La méthode utilisée consiste à injecter de manière « instantanée » une solution saline de concentration et de volume connus dans une zone turbulente du cours d'eau, celle-ci assurant un bon mélange de la solution injectée. L'évolution en fonction du temps de la conductivité du ruisseau est mesurée en aval au droit d'un point représentatif. La concentration moyenne au cours du traçage est calculée à partir de la relation concentration/conductivité de la solution.

Ainsi, nous disposons de tous les éléments nécessaires pour calculer le débit à partir du principe de conservation de la masse :

$$Q = \frac{M}{CT}$$

Q = débit du cours d'eau en m^3s^{-1}
 C = Concentration moyenne au cours du traçage (kg/m^3)
 T = Temps de passage du nuage de traceur (s)
 M = Masse de traceur injectée (kg)

Nous avons effectué deux mesures en période de décrue : le 25 avril et le 14 mai 2002. Chaque mesure consistait en deux injections. La masse de sel (chlorure de sodium) a été injectée à la tête du ruisseau, en aval de la convergence des émergences. La conductivité électrique a été mesurée en aval à une distance de ~ 50 m (ill. 1).

La configuration du site ne permet pas une plus grande distance entre le point d'injection et le point de mesure, néanmoins, la turbulence du ruisseau fait que 50 m est probablement largement suffisant pour obtenir un bon mélange de traceur. La concentration totale en sels dissous dans l'eau est proportionnelle, pour les faibles concentrations, à la conductivité électrique de l'eau (ill. 2).

La relation concentration/conductivité (eau de Cases de Pène plus sel du traçage) a été établie en laboratoire (avec le même conductivimètre de terrain et du même sel). Nous avons réutilisé cette relation pour d'autres jaugeages successifs. Nous considérons que l'erreur introduite par cette approximation est négligeable.

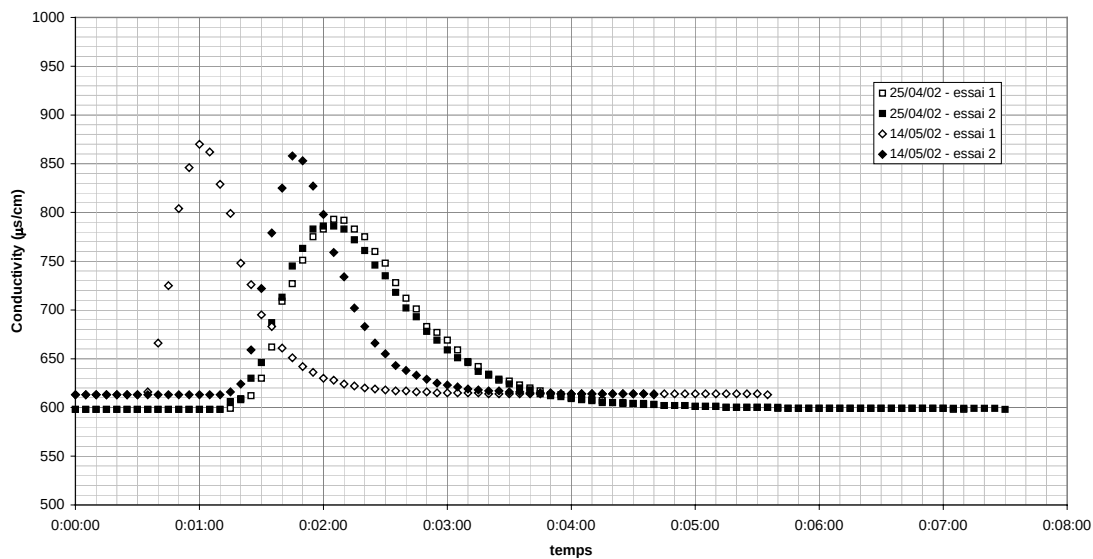


Illustration 1 - Mesures de conductivité – jaugeages chimiques de Cases de Pène (25/04/2002 et 14/05/2002).

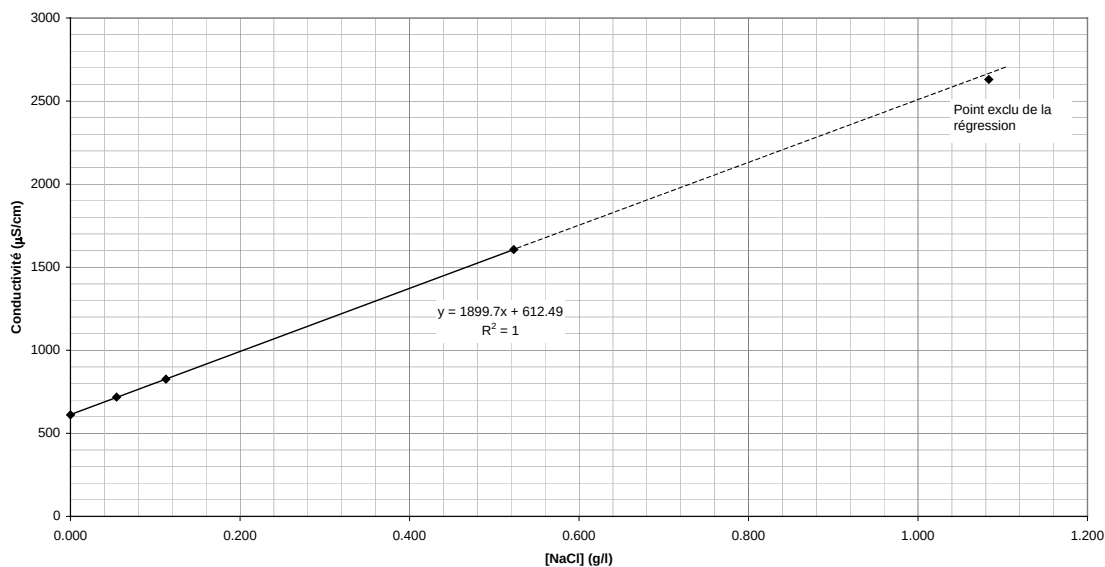


Illustration 2 - Relation [NaCl] / Conductivité – jaugeage chimique de Cases de Pène 25/04/2002 (établie en laboratoire).

Les débits obtenus sont présentés dans le tableau récapitulatif ci-dessous.

			Essai 1	Essai 2
25/04/2002	masse de sel injecté	(kg)	1	1
	concentration moyenne	(kg/m ³)	0,0221	0,0202
	temps de passage	(s)	355	380
	débit	(m ³ - s ⁻¹)	0,127	0,130
	différence	(%)	-2,55	
14/05/2002	masse de sel injecté	(kg)	2	2
	concentration moyenne	(kg/m ³)	0,0330	0,0326
	temps de passage	(s)	170	165
	débit	(m ³ - s ⁻¹)	0,356	0,372
	différence	(%)	-4,40	

Tableau 1 - Résultats des jaugeages chimiques à Cases de Pène.

date	méthode	débit (l/s)	charge dans l'aquifère (m NGF)	hauteur normalisée à la cote du sol (m)
25/04/2002	chimique (sel)	128,5	56	1
17/05/2002	estimation visuelle	25	55,3	0,3
14/05/2002	chimique (sel)	364	56,5	1,5
06/03/2003	micro-moulinet sous le pont	182	56,3	1,3

Tableau 2 - Données de jaugeages.

Sur la base des résultats de jaugeages (tabl. 2), nous avons établi la courbe de tarage suivante (ill. 3) :

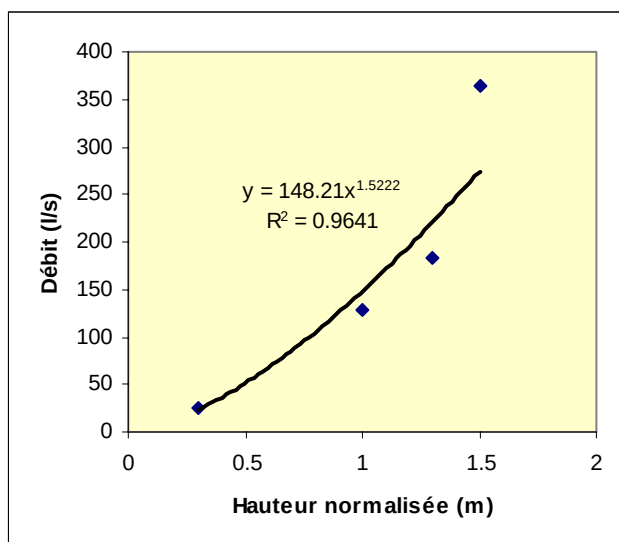


Illustration 3 - Courbe de tarage estimée de Cases de Pène.

À partir des données du suivi de la piézométrie de Baixas, la charge de l'aquifère est connue lors des périodes de crue ce qui permet de faire une estimation des débits de crue de la source temporaire de Cases de Pène (trop-plein). L'évolution temporelle des débits de trop-plein est présentée en illustration 4.

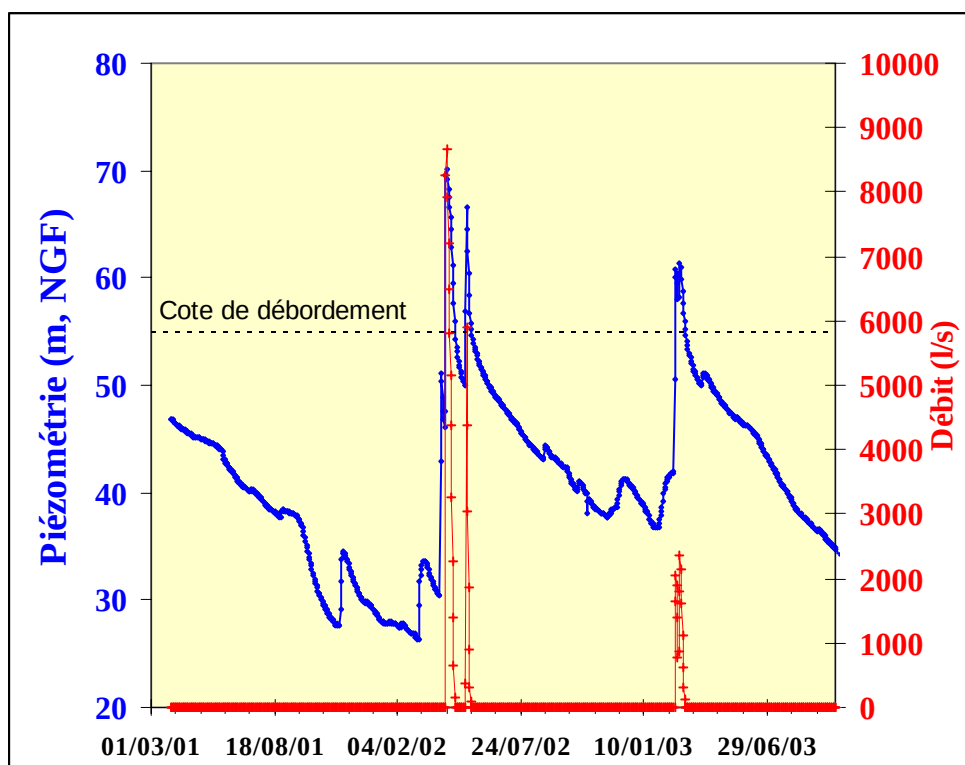


Illustration 4 - Évolution du débit de trop-plein de Cases de Pène et de la charge dans l'aquifère.

Sur la période du 28 mars 2001 au 30 septembre 2003, l'écoulement des trop-pleins de Cases de Pène s'est produit 37 jours au total, le volume total écoulé est estimé à 8,4 millions de m³, ce qui représente un débit moyen de 104 l/s pour la période considérée.



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