



HAL
open science

**Eau-Aménagement-Environnement CONTRIBUTION
DES EAUX SOUTERRAINES AUX DÉBITS ET À LA
QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE: exemple de la
Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn L.
Danneville Documents du BRGM 262 Editions BRGM**

Laurent Danneville

► **To cite this version:**

Laurent Danneville. Eau-Aménagement-Environnement CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX DÉBITS ET À LA QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE: exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn L. Danneville Documents du BRGM 262 Editions BRGM. Ingénierie de l'environnement. Université Paris XI - Orsay, 1995. Français. NNT : . tel-01420437

HAL Id: tel-01420437

<https://theses.hal.science/tel-01420437v1>

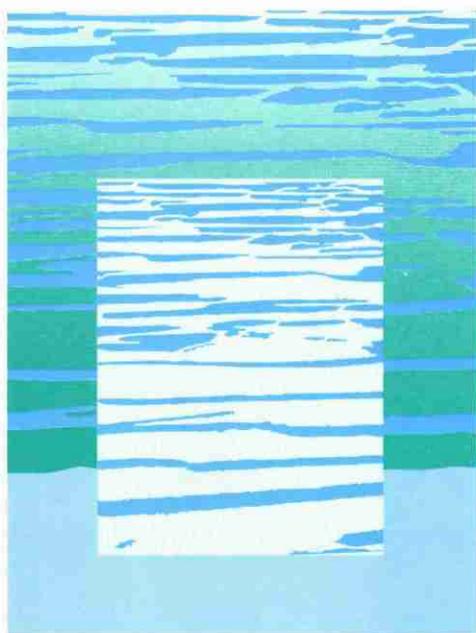
Submitted on 20 Dec 2016

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

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

**CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES
AUX DÉBITS ET À LA QUALITÉ
DES EAUX DE SURFACE :**
exemple de la Garonne,
de ses sources à la confluence du Tarn

L. Danneville



Documents du BRGM 262

**CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES
AUX DÉBITS ET À LA QUALITÉ
DES EAUX DE SURFACE :
exemple de la Garonne,
de ses sources à la confluence du Tarn**

Laurent Danneville

Documents du BRGM 262

1997

Éditions BRGM

3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009

45060 Orléans cedex 2, FRANCE

Tél. : 02.38.64.30.28

Thèse présentée pour obtenir le titre de

**Docteur ès Sciences
de l'Université Paris XI Orsay**

**Soutenu le 18 juillet 1995
devant le jury composé de :**

**M. Gian-Marie ZUPPI
M. Laurent DEVER
M. Alain MANGIN
M. Michel BAKALOWICZ
M. Pierre CHEVALLIER
M. Michel VAUCLIN
Mme Françoise GASSE**

Président
Directeur de thèse

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

© BRGM 1997

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication (ou le présent ouvrage), faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées.

(Loi du 11 mars 1957 - Art. 40 et 41 et Code Pénal Art . 425).

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier M^r MANGIN qui m'a proposé ce sujet, et sans qui ma thèse n'aurait pu commencer. Un grand merci aussi à l'Agence de l'Eau Adour-Garonne — et notamment M^r PLAUD — qui a fourni une aide financière nécessaire pour mener à bien ce travail.

M^r MANGIN, directeur de recherches au CNRS, et M^r BAKALOWICZ, chargé de recherches au CNRS, ont contribué à l'élaboration de cette étude par le biais des idées, suggestions et corrections qu'ils ont apportées à mon travail. Je leur témoigne toute ma gratitude.

Mes remerciements aussi à M^r D'HULST, l'homme qui tape plus vite que son ombre sur un clavier, informaticien du Laboratoire, et qui m'a concocté quelques programmes dont il a le secret, afin de traiter mes nombreuses données. Grâce au concours de M^{me} DAFFIS, qui m'a initié au travail de chimiste, j'ai pu élaborer certaines de ces données dans le Laboratoire de chimie du CNRS, au prix de nombreuses heures de labeur, de patience et de dextérité. Je n'oublierai pas non plus les autres membres du Laboratoire : M^{lle} MAZZONETTO et M^{me} BOINEAU, à la tête du secrétariat principal; M^r ROUCH, toujours plongé dans son monde souterrain; et M^r ANDRIEUX, célèbre aventurier de la grotte de Niaux.

Bon nombre de données m'ont été fournies par divers bureaux. Je remercie donc, pour leurs apports, M^r JUNKES, M^r MARCHET, M^r PRATS de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne; M^r BOUZIGES de la DIREN; M^r WATRIN de l'ancien SHC.

Les données isotopiques, quant à elles, proviennent de mon travail au Laboratoire d'Hydrologie Isotopique d'Orsay, et de la collaboration de M^{me} FILLY.

Les idées et les discussions font avancer la recherche, c'est bien connu. C'est pourquoi, je remercie, Bruno MARSAUD, mon compagnon de travail, et M^r RICARD, "le fameux sourcier du Larzac", pour leurs aides durant ces trois ans. Je remercie aussi M^r BISCALDI, ancien directeur du BRGM, et M^r ROZES, directeur actuel d'ANTEA Midi-Pyrénées qui m'ont fourni un bureau et les moyens informatiques dont j'avais besoin. Je tiens aussi à remercier pour sa gentillesse l'ensemble du personnel d'ANTEA et du BRGM de Toulouse.

Enfin, je voudrais penser maintenant à mes proches, et, tout d'abord à ma compagne, Bénédicte, que je remercie tendrement. Elle m'a supporté dans mon travail et elle a eu le courage de corriger mes "quelques fautes" de rédaction. Ma gratitude, également, à mes parents qui m'ont toujours soutenu et aidé, et sans lesquels, je n'aurais pu poursuivre mes études.

Je ne terminerai pas sans louer mon fidèle 486 DX 33 Mhz. Sans lui, je serais encore en train de rédiger, de dessiner et d'élaborer des graphiques. Ah, vive le progrès !

RESUME : La contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface a rarement été étudiée à une échelle régionale, telle que le bassin d'alimentation de la Garonne, en amont de son confluent avec le Tarn (15 000 km²). Ce travail est organisé en deux parties. La première partie est basée, essentiellement, sur l'analyse des hydrogrammes; la deuxième partie concerne l'hydrochimie, classique et isotopique, qui a nécessité des campagnes mensuelles de prélèvements.

Les principaux réservoirs souterrains du bassin sont les aquifères karstiques, les nappes alluviales, les formations colluviales et les petits aquifères. L'apport des aquifères karstiques au réseau de surface varie suivant la saison. Il dépend de la nature du karst, de sa dynamique et de son altitude. Pour les nappes alluviales, les échanges qui sont d'ailleurs réduits, ont lieu en période de crue. Enfin, cette thèse met en évidence l'existence de réservoirs souterrains, encore mal connus, qui ne fournissent pas de résurgence importante : les formations colluviales et les petits aquifères.

L'étude de la contribution des différents affluents montre que la Garonne, qui a un débit moyen de 199 m³/s, reçoit, indépendamment de la saison, la plus grande part des apports entre la station de Valentine et la station de Portet, par le biais de la confluence de l'Ariège et du Salat. L'étude du tarissement, basée sur la formule de Maillet, fournit une estimation des réserves souterraines de quelques affluents. Le rôle joué par ces réserves est mis en évidence par les ACS (Analyses Corrélatoires et Spectrales). Ainsi, en 1985, les réserves les plus importantes sont présentes sur les bassins de l'Ariège (142 millions de m³), du Salat (111 millions de m³), et du Ger (21 millions de m³). Ce dernier possède les plus fortes réserves spécifiques (224 l/m²) et présente une régulation importante des apports qui proviennent de nombreuses sources karstiques. Les réserves souterraines du bassin de la Garonne sont, quant à elles, comprises entre 2.1 et 2.9 milliards de m³ en 1993. Elles représentent le principal réservoir d'eau du bassin, précédant le réservoir neigeux, estimé à 371 millions de m³, les réserves à vocation énergétique, et les réserves destinées au soutien d'étiage et à l'irrigation.

La composante souterraine de l'écoulement total de la Garonne à Portet, déterminée à partir de l'extrapolation du tarissement sur l'hydrogramme résiduel (hydrogramme sans l'influence des aménagements et sans l'écoulement neigeux), est comprise entre 46 % et 60 % en 1993. Le ruissellement représente de 34 % à 48 % de l'écoulement total. La composante neigeuse est estimée à 6 %. Elle est déterminée à partir d'une comparaison d'hydrogrammes sur un cycle hydrologique, en centrant et réduisant les données.

En ce qui concerne l'hydrochimie, la minéralisation augmente d'amont en aval. Dans la partie en amont, la hausse est due à deux affluents : le Ger et l'Ourse. Parmi les nombreuses variables chimiques, la pCO₂ est caractéristique de l'importance des eaux souterraines. Enfin, l'évolution du chimisme de l'eau le long de la Garonne est fortement marquée par la pollution, dès l'aval de Montréjeau.

Au cours de l'étiage, les teneurs en ¹⁸O et en ²H montrent que la partie pyrénéenne du bassin contribue le plus à l'écoulement total. La contribution des eaux souterraines provenant de la nappe alluviale, en particulier dans la région de Toulouse, est clairement démontrée par l'évolution des teneurs en ¹³C tout le long du fleuve. Les teneurs en ³H correspondent, généralement bien, aux précipitations récentes. Elles indiquent un temps de séjour court sauf pour le bassin du Ger dont les eaux possèdent une plus faible teneur en ³H du fait de réserves importantes.

CONTRIBUTION OF GROUNDWATER TO THE DISCHARGE AND QUALITY OF SURFACE FLOW: THE EXAMPLE OF THE GARONNE RIVER, FROM ITS SOURCE TO ITS CONFLUENCE WITH THE TARN RIVER.

ABSTRACT: Very few studies have been made of the contribution of groundwater to the discharge and quality of surface flow at regional scale, such as that of the catchment area of the Garonne river upstream of its confluence with the Tarn river (15,000 km²). The first part of the present work is based essentially on hydrograph analysis, whereas the second considers the information obtained from natural tracers, such as major and minor ion contents and environmental isotopes.

The main groundwater reservoirs in the recharge area are karstic and alluvial aquifers, colluvium and local aquifers. The contribution from the karstic aquifers to surface flow varies seasonally depending on the nature, hydraulic behaviour and elevation of the karst. Minor exchange occurs between the alluvial aquifers and rivers, mainly during flooding. The work has clearly shown the contribution from groundwater reservoirs, little understood as yet, without any major springs: the local aquifers and particularly the colluvium.

The Garonne river, which has an average flow of 199 m³/s, is mainly replenished between the Valentine and Portet gauging stations by the Salat and Ariège tributaries, regardless of the season. Study of the low-water stage using Maillet's formula has given a good estimate of the groundwater storage of certain tributaries, and the role played by the groundwater is demonstrated by correlation and spectrum analysis of discharge time series. For example, during 1985, the main storage was shown to be in the river basins of Ariège (142 million m³), Salat (111 million m³) and Ger (21 million m³). The Ger, which is the smallest tributary, has the highest specific storage (224 l/m²) and presents an important buffer effect related to numerous karstic springs. The total groundwater storage of the entire recharge area is estimated at 2.1-2.9 billion m³ for 1993. It is the largest water storage of the basin, greater than the snow cover (371 million m³) and the artificial storage for electric power plants, discharge buffering and irrigation.

The groundwater contribution to the total flow of the Garonne river at the Portet gauging station has been estimated at 46-60% of total discharge in 1993 by extrapolating the low-water stage from the residual hydrograph (hydrograph without the influence of dam reservoirs and snow cover). Direct runoff is estimated at 34-48% and the snow-melt component at 6%. These estimates are calculated by comparing hydrographs from different gauging stations during the same hydrological year; data are centered with respect to their average and reduced by their variance.

Concerning water chemical contents, total dissolved solids increase downstream, but are affected in the upstream part mainly by two tributaries, the Ger and the Ourse. Of the numerous chemical variables, the partial pressure in CO₂ is characteristic of major groundwater contribution. Finally, the water chemistry evolution along the river is strongly modified by pollution downstream of the city of Montréjeau.

During the low-water stage, oxygen-18 and deuterium contents show that the Pyrenean part of the catchment area provides the main contribution to the total flow. The contribution of groundwater from the alluvial aquifers, particularly in the Toulouse area, is clearly shown by the evolution of carbon-13 contents along the river. Tritium contents generally agree well with those of very recent rainfall, indicating a very short residence time, except for the Ger river basin where the water has a lower tritium content due to a major storage effect.

SOMMAIRE

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	7
INTRODUCTION.....	13
1. PRESENTATION DU BASSIN D'ETUDE	17
1.1. LOCALISATION.....	19
1.2. DONNEES GENERALES.....	20
1.2.1. Hydrographie.....	20
1.2.2. Cadre géologique et structural.....	21
1.2.3. Climatologie.....	24
1.2.4. Données sociales et économiques	25
1.3. LES PRINCIPAUX RESERVOIRS D'EAU	26
1.3.1. Les aquifères carbonatés : fissurés et karstiques.....	26
1.3.2. Les aquifères alluviaux	27
1.3.3. Les barrages.....	28
1.4. LES EAUX SOUTERRAINES.....	29
1.4.1. Importance.....	29
1.4.2. Généralités	30
2. CONTRIBUTION DES AFFLUENTS AUX DEBITS DE LA GARONNE.....	33
INTRODUCTION.....	35
2.1. LES PERTURBATIONS APPORTEES AUX DEBITS	37
2.1.1. Les barrages à vocation énergétique	37
2.1.2. Les canaux.....	43
2.1.3. Les prélèvements sur le bassin	46

2.2. APPORTS DES AFFLUENTS A LA GARONNE.....	51
2.2.1. Apports moyens sur une longue période (1973 à 1987)	51
2.2.2. Apports par cycles hydrologiques.....	55
2.2.3. Apports mensuels.....	61
2.2.4. Comparaison entre cycle humide et cycle sec, et, mois d'étiage et mois de hautes eaux.....	67
2.2.5. Apports spécifiques en période d'étiage, exemple du mois d'août 1976.....	69
CONCLUSIONS.....	73
3. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX DEBITS DES EAUX DE SURFACE	75
3.1. COMPORTEMENT ET APPORTS DES AQUIFERES.....	77
3.1.1. Détermination et approche du rôle des aquifères alluviaux : exemple de la nappe alluviale de l'Ariège.....	79
3.1.2. Rôle des aquifères karstiques : exemples de la source du Baget et de la source de Fontestorbes.....	88
3.1.3. Comparaison du comportement dynamique des aquifères karstiques et poreux et des systèmes hydrologiques de surface à partir des analyses corrélatoires et spectrales.....	106
3.2. MISE EN EVIDENCE DES RESERVES SOUTERRAINES ET VARIABILITE DU CLIMAT SUR LES ECOULEMENTS	113
3.2.1. Evaluation des réserves de la Garonne et des différents affluents par l'analyse corrélatoire et spectrale des chroniques de débits.....	115
3.2.2. Etude de la tendance des débits à Portet (1910-1991) et sur les différents affluents.....	124
3.3. ESTIMATION DES APPORTS SOUTERRAINS ET DES RESERVES SOUTERRAINES SUR LE BASSIN.....	131
3.3.1. Etude du tarissement.....	133
3.3.2. Décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme.....	155
CONCLUSIONS DU CHAPITRE 3.....	183
4. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES A LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE	187
INTRODUCTION.....	189
4.1. GENERALITES SUR LA CHIMIE DES EAUX.....	191
4.1.1. La chimie des carbonates.....	193
4.1.2. Paramètres caractéristiques des eaux souterraines.....	198
4.2. CARACTERISATION ET EVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU BASSIN DE LA GARONNE DURANT LE CYCLE 1993 (STATION DU CNRS).....	201
Introduction.....	203

4.2.1. Le cycle hydrologique 1993 : pluviométrie et hydrologie	204
4.2.2. Critique des données.....	206
4.2.3. Caractérisation physico-chimique des eaux des différents affluents	208
4.2.4. Evolution du chimisme des eaux sur les affluents	222
4.2.5. Evolution des eaux de la Garonne, du Pont-du-Roi à Saint-Aignan, et dans le Val d'Aran	237
4.2.6. Caractérisation et évolution du chimisme des eaux dans le bassin de l'Ariège, du Salat et de la Neste	259
Conclusions.....	279
4.3. EVOLUTION PLURIANNUELLE DU CHIMISME DES EAUX SUR LE SALAT A MAZERES ET SUR LA GARONNE A GAGNAC.....	283
4.3.1. Evolution des bicarbonates sur le Salat à Mazères.....	285
4.3.2. Evolution de quelques éléments chimiques et de la température sur la Garonne à Gagnac.....	285
4.4. DECOMPOSITION CHIMIQUE DE L'HYDROGRAMME	291
4.4.1. Connaissances actuelles	293
4.4.2. Essai de décomposition sur quelques affluents et sur la Garonne à Portet, pour le cycle 1993	295
5. LES ISOTOPES DU MILIEU DES EAUX DU BASSIN DE LA GARONNE.....	299
INTRODUCTION.....	301
5.1. CAMPAGNE D'ETIAGE 1993	301
5.1.1. L'oxygène-18.....	302
5.1.2. Le deutérium.....	305
5.1.3. Corrélation 18O-2H	306
5.1.4. Le tritium	306
5.1.5. Le carbone 13.....	308
5.2. ETUDE DES VARIATIONS ISOTOPIQUES SUR TROIS BASSINS SPECIFIQUES : LE VOLP, LE GER ET LE SALAT.....	311
5.2.1. L'oxygène-18.....	311
5.2.2. Le deutérium.....	313
5.2.3. Corrélation 18O-2H	313
5.2.4. Le tritium	313
CONCLUSIONS.....	314
CONCLUSIONS GENERALES	315
1. LES ORIGINES DES EAUX SOUTERRAINES DE LA GARONNE	317
A) Selon les types d'aquifères	317
B) Selon les affluents.....	318
C) Estimation des réserves	318
D) Les données de l'hydrochimie	319

2. METHODOLOGIE.....	320
3. PERSPECTIVES	322
BIBLIOGRAPHIE.....	325
LISTE DES GRAPHIQUES, FIGURES, TABLEAUX ET CARTES.....	337
TABLE DES MATIERES.....	351
ANNEXES.....	361

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les eaux souterraines sont souvent mal connues. Parce que nous ne les voyons pas, nous avons tendance à les ignorer. Pourtant, elles représentent une grande partie des écoulements des rivières.

C'est une des raisons pour laquelle ce sujet a été choisi, il porte sur : "La contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface, exemple de la Garonne de ses sources à la confluence du Tarn".

Il a pour objet de quantifier et qualifier les apports souterrains provenant des aquifères, non seulement en période d'étiage, mais aussi durant la totalité du cycle hydrologique. La contribution des eaux souterraines est donc abordée successivement d'un point de vue hydrodynamique et hydrochimique.

Le bassin a été choisi pour la diversité de ses aquifères. Il comprend en effet, des aquifères carbonatés, fissurés et karstiques, et des aquifères alluviaux qui ont un comportement hydrodynamique totalement différent.

Les études hydrogéologiques se font généralement sur des petits bassins versants de quelques km². Cependant, ici, la superficie du bassin d'étude est d'environ 15 000 km², ce qui implique une démarche nouvelle, sans précédent.

Le réseau hydrographique converge vers l'axe de la Garonne. Les principaux affluents sont : la Neste, le Salat et l'Ariège dans la partie montagneuse; la Gimone, la Save et l'Hers mort dans la partie piémontaise.

Cette étude a nécessité l'obtention de nombreuses données, parmi lesquelles :

- des valeurs de débits moyens journaliers et de précipitations journalières fournies par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et les principaux gestionnaires des stations;
- des données chimiques provenant de nombreuses campagnes de terrain durant le cycle 1993. Au total 10 000 km parcourus sur le bassin et trois mois d'analyses en laboratoire !
- des données chimiques de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

L'ensemble des données est systématiquement critiqué, notamment par le biais d'une recherche sur la valeur absolue de chaque élément et un contrôle de la balance ionique pour les analyses chimiques.

La thèse s'organise autour de cinq parties principales. La première est consacrée à une présentation de l'étude comportant quelques éléments d'ordre général.

La seconde partie est surtout une étude hydrologique : elle a pour objet de quantifier les apports des différents affluents à la Garonne, en prenant en compte les perturbations apportées aux débits. Ces dernières ont pour origines les barrages à vocation énergétique, les canaux, les prélèvements pour l'eau potable, les prélèvements pour l'irrigation et pour les

industries. Les apports des affluents sont étudiés : sur une longue période, sur un cycle hydrologique sec et humide, au niveau mensuel et en période d'étiage.

Le contexte hydrologique étant connu, la contribution des eaux souterraines aux débits des eaux de surface est étudiée. Elle compose la troisième partie. Celle-ci est formée de trois chapitres consacrés tout d'abord aux comportements et aux apports des aquifères karstiques et alluviaux, puis à la mise en évidence des réserves souterraines et enfin à la variabilité du climat sur les écoulements. Le bassin est alors étudié en tant que système dynamique, à comportement non linéaire. Le dernier chapitre, le plus intéressant pour les gestionnaires, apporte une estimation des apports souterrains dans les écoulements, basée sur la décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme, et une quantification des réserves souterraines du bassin basée sur l'étude du tarissement.

La quatrième partie a trait à l'hydrochimie. Nous étudierons l'évolution du chimisme des eaux : le long de la Garonne, sur les principaux affluents, sur le bassin du Salat, sur le bassin de l'Ariège et le bassin de la Neste, durant le cycle 1993. Une caractérisation des eaux souterraines est faite sur la Garonne et sur l'ensemble de ses affluents. In fine, une décomposition hydrochimique est effectuée sur quelques bassins, afin d'estimer la part de l'écoulement souterrain.

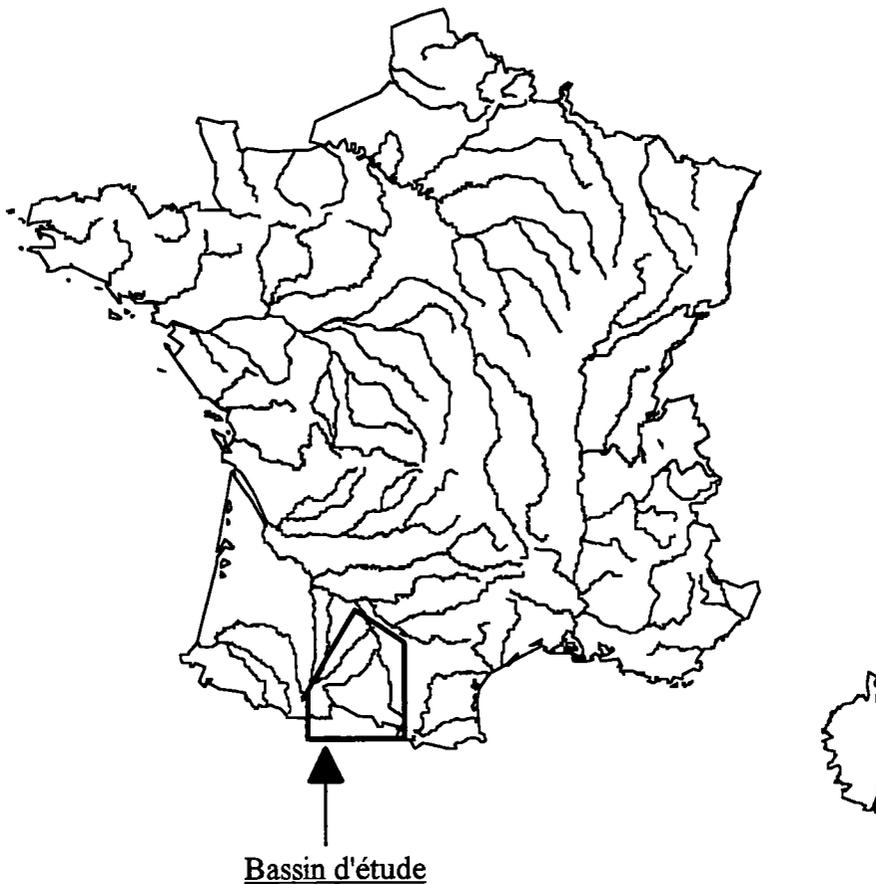
L'utilisation, en période d'étiage, des isotopes du milieu — l'oxygène 18, deutérium, carbone 13, tritium et carbone 14 — apporte, dans la dernière partie, des renseignements sur la provenance des eaux souterraines et détermine des zones d'apports privilégiées. Ces traceurs permettent aussi d'avoir une idée des temps de séjour des eaux dans les aquifères.

Ces cinq parties ne se veulent pas exhaustives. Elles ont pour objectif d'apporter une meilleure connaissance des phénomènes hydrogéologiques sur le bassin de la Garonne. Dans ce contexte, il faut signaler que ce sujet fait partie du programme ECOBAG, programme de recherche sur l'écologie des rivières et de leurs paysages dans le cadre d'un développement socio-économique à long terme du bassin Adour-Garonne.

1. PRESENTATION DU BASSIN D'ETUDE

1.1. Localisation

Le bassin est situé dans le sud-ouest de la France. Il comprend une partie du domaine montagneux pyrénéen qui s'étend jusqu'en Espagne dans le Val d'Aran (cf. carte 1-1).



Carte 1 - 1. Localisation du bassin d'étude sur le territoire français

Le bassin d'étude englobe six départements de Midi-Pyrénées (cf. carte 1-2) :

- l'Ariège,
- la Haute-Garonne,
- le Gers,
- les Hautes-Pyrénées,
- le Tarn,
- le Tarn et Garonne.



Carte 1 - 2. Position du bassin dans la région Midi-Pyrénées

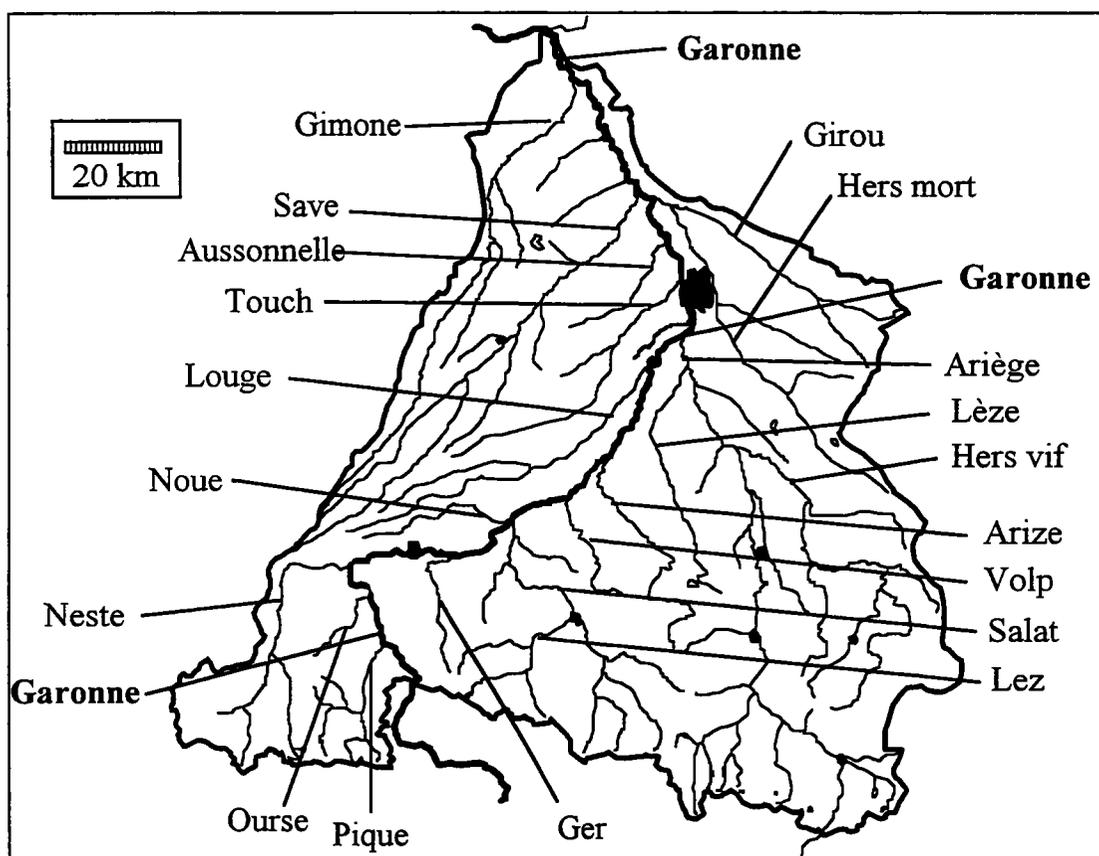
1.2. Données générales

1.2.1. Hydrographie

L'ensemble du réseau hydrographique s'oriente autour de l'axe Garonne dont le cours change, grosso modo, trois fois de direction (cf. carte 1-3) et dont la longueur est d'environ 300 km entre les sources et la confluence du Tarn. L'axe Garonne est orienté nord-sud dans la zone centrale des Pyrénées, puis nord-est sud-ouest entre Montréjeau et Toulouse (influence du cône de Lannemezan), enfin nord-ouest sud-est entre Toulouse et Castelsarrasin (influence des coteaux molassiques en rive droite).

La Garonne est grossie principalement par la Pique, la Neste, et les rivières en rive droite : le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize et l'Ariège. Ces affluents ont une direction nord-sud. Les autres affluents de la Garonne ont, soit une direction nord-ouest sud-est (cas de l'Hers mort), soit une direction sud-ouest nord-est (affluents en rive gauche de la Garonne : la Noue, la Louge, le Touch, l'Aussonnelle, la Save et la Gimone).

L'allure du réseau hydrographique en rive droite et en rive gauche est différente à cause de la géologie des terrains et du relief.



Carte 1 - 3. Bassin d'étude et réseau hydrographique

1.2.2. Cadre géologique et structural

Le bassin étudié est constitué de trois grands ensembles géologiques :

- a) les formations molassiques tertiaires;
- b) la chaîne pyrénéenne;
- c) les alluvions quaternaires.

a) **Les formations molassiques tertiaires** sont issues de l'érosion des Pyrénéens et du Massif central (partie à l'est de Toulouse). Les séries molassiques sont des dépôts continentaux, datés de l'Eocène moyen au Miocène. On y trouve à la base des marnes et des argiles à dominante jaune, plus ou moins sableuses. Ces formations sont composées de lentilles formées de grès à ciment calcaire ou marneux et de calcaires gréseux. Près de la chaîne pyrénéenne, on distingue des niveaux conglomératiques connus sous le nom de "poudingues de Palassou" constitués de blocs polygéniques. La série se termine par des marnes et des argiles versicolores à dominante rouge.

Les dépôts de piémont du Pliocène, issus de l'érosion de la chaîne pyrénéenne, recouvrent une grande partie des molasses et forment de vastes cônes de déjection (cône de Lannemezan). Ils sont formés d'argiles à galets jaune-orangé.

b) **La chaîne pyrénéenne**, érigée principalement durant le cycle pyrénéo-alpin, est formée de trois zones distinctes séparées par la faille nord pyrénéenne et le chevauchement frontal nord pyrénéen (cf. carte 1-4):

- *la zone axiale* composée de terrains sédimentaires paléozoïques et de roches cristallines, gneiss, migmatites et granites;
- *la zone nord pyrénéenne* formée de séries secondaires et des massifs anciens nord pyrénéens d'âge hercynien (Trois Seigneurs, Arize, Milhas, Barousse occidentale, Barousse orientale). Une zone de métamorphisme atteint les terrains secondaires au contact de la faille nord-pyrénéenne;
- *la zone sous-pyrénéenne* composée de séries secondaires et tertiaires, recouvertes par les dépôts molassiques;

La lithostratigraphie générale et succincte de ces trois zones est la suivante :

Au Primaire :

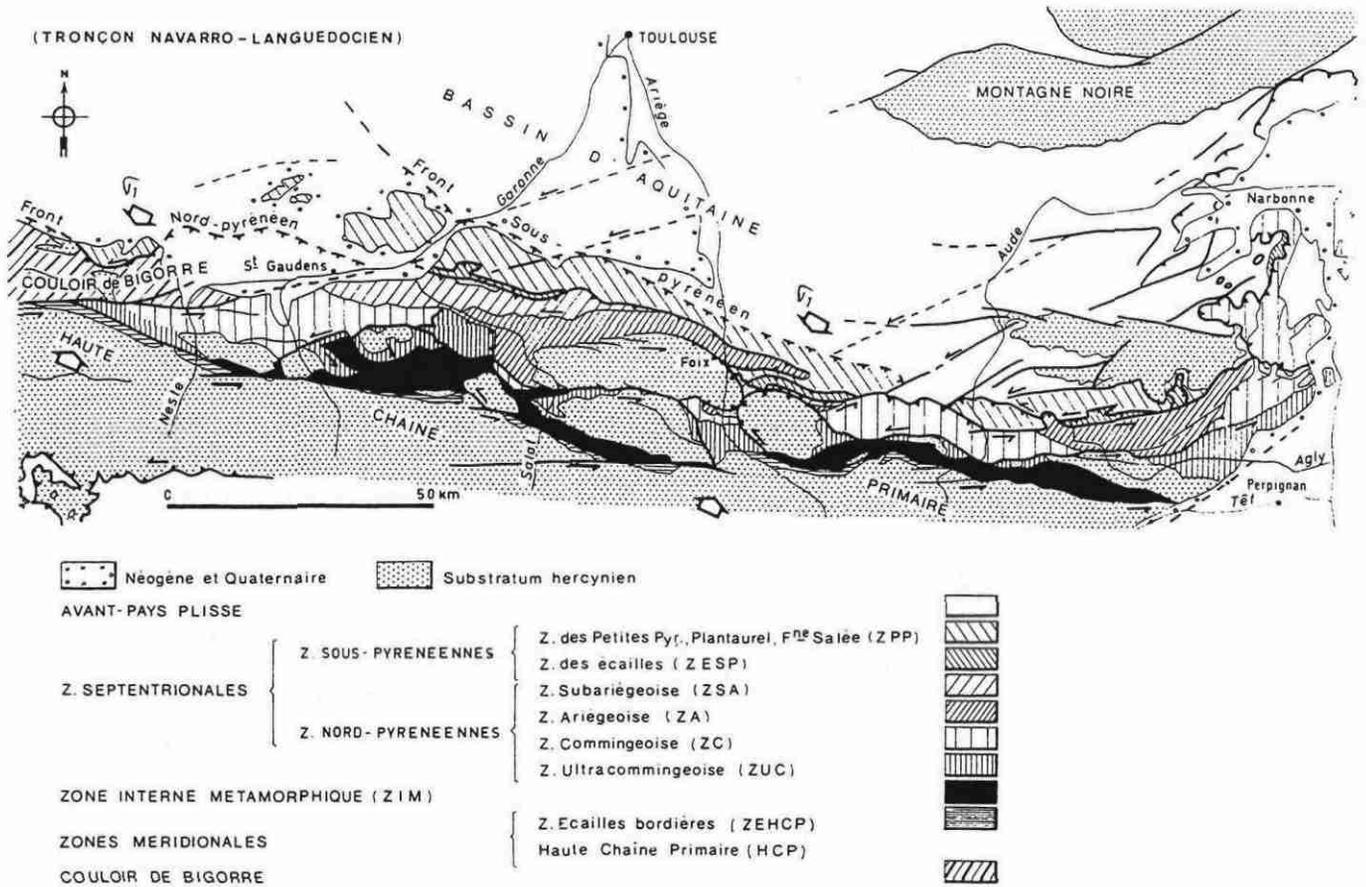
Les premiers terrains datent du Cambrien qui est composé principalement par la série de Canaveilles. Au dessus, l'Ordovicien est constitué d'une série grésopélitique de type flysch et de dépôts calcaréo-dolomitiques datés du Caradoc. Le Silurien est caractérisé par des schistes ampéliteux et pyriteux à graptolites. Au Dévonien, la sédimentation est principalement carbonatée : calchistes et schistes intercalés de barres calcaires épaisses en moyenne d'une trentaine de mètres. Le Carbonifère débute par un niveau de schistes noirs et de lydienne à nodules phosphatés. Puis au Viséen, suite à une transgression, une sédimentation carbonatée s'installe. Elle précède la sédimentation détritique de la fin du Namurien. Enfin, au Permien, on rencontre des grès, des pélites couleur lie-de-vin et des conglomérats polygéniques.

Au Secondaire :

Au Trias, la sédimentation débute par des grès bigarrés, puis fait place à une sédimentation à prédominance évaporitique liée à une transgression marine. Ce niveau évaporitique joue un rôle tectonique important au niveau des décollements. On note aussi l'intrusion de roches volcaniques (ophites). Le Jurassique est essentiellement carbonaté (puissance comprise entre 200 et 500 mètres) avec, au Lias des dolomies, des brèches dolomitiques et des calcaires oolithiques, puis des marnes et des calcaires argileux, au Dogger et au Malm, des séries calcaréo-dolomitiques. Au crétacé, une grande régression atteint l'ensemble du bassin aquitain. On distingue tout d'abord les formations néocomiennes composées de brèches calcaréo-dolomitiques, de calcaires micritiques et de marnes (marnes de Samuran). Au dessus, on trouve les calcaires bioconstruits de l'Urgo-Aptien pouvant atteindre plus de 300 mètres d'épaisseur. A l'Albien, la sédimentation est de type flysch. Au Cénomano-Turonien, la sédimentation devient carbonatée. A la fin du Crétacé supérieur, on retrouve des dépôts de type flysch.

Au Tertiaire :

Au cours de cette période, plusieurs occupations marines vont entraîner une sédimentation calcaire : calcaires sublithographiques du Dano-Montien, calcaires gréseux et calcaires compacts du Thanétien, calcaires de Mancieux de l'Ilerdien. Après l'Ilerdien, une sédimentation détritique apparaît suite au retrait de la mer (poudingues de Palassou, molasses tertiaires).



Carte 1 - 4. Schéma structural du versant nord des Pyrénées (d'après P. SOUQUET et al, 1976)

c) Les alluvions quaternaires sont situées le long de la Garonne et sur ses principaux affluents. On distingue les alluvions actuelles, les alluvions récentes et les alluvions anciennes qui forment respectivement le lit majeur, les basses plaines et les terrasses.

Le lit majeur est composé d'alluvions graveleuses ou sableuses, la basse plaine de graviers surmontés de limons, et les terrasses de sables et de graviers surmontés par des dépôts argilo-graveleux et des limons. Sur les affluents, les alluvions sont graveleuses ou sableuses.

1.2.3. Climatologie

Le climat est de type océanique. Il n'est pas régulier d'une année sur l'autre, les années sèches pouvant succéder à des années très humides.

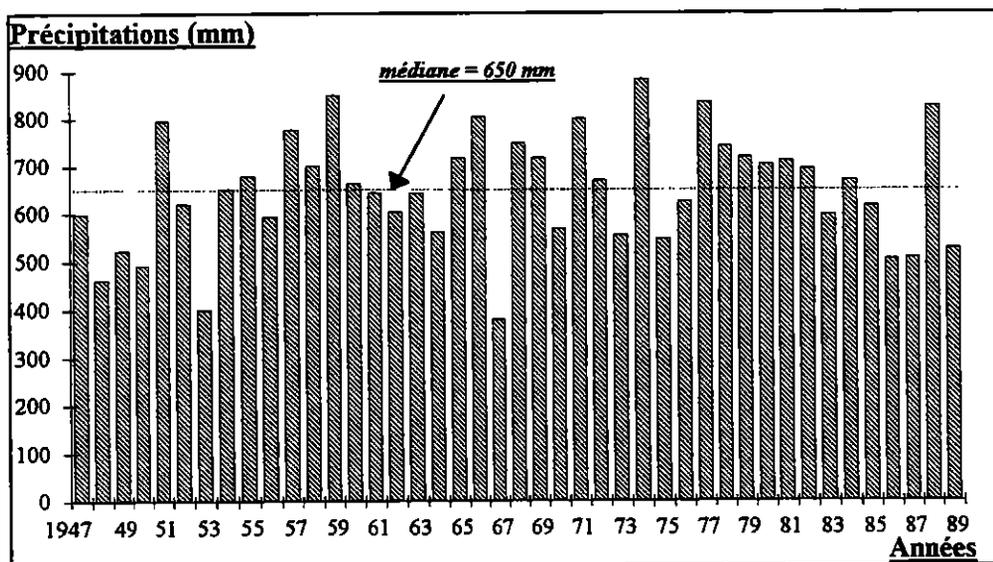
Les vents dominants viennent de l'ouest et du nord-ouest. Ils sont tempérés et humides. Occasionnellement, un vent venant du sud-est pénètre sur le bassin de la Garonne. C'est le vent d'Autan, le vent chaud, sec et fort, qui rend fou les Toulousains.

Les températures sont assez homogènes sur l'ensemble du bassin. Elles suivent un gradient d'altitude. Sur la période 1951-1980, la température moyenne annuelle à Toulouse est d'environ 12.7 °C, le maximum est en juillet (20.7 °C) et le minimum en janvier (5.1 °C).

La carte des précipitations annuelles médianes sur la période 1950-1979 (R. LAMBERT, 1984) permet de distinguer plusieurs zones pluviométriques : les zones très arrosées situées dans les Pyrénées, et les zones moins arrosées situées en aval du bassin. A Toulouse, les précipitations moyennes sont de 700 mm par an. En haute montagne, les précipitations dépassent 2500 mm par an, parfois même sur les premiers contreforts (massif d'Arbas, Baget).

La disparité des précipitations est liée à la position géographique et à l'orographie. Les massifs montagneux et les régions plus à l'ouest sont plus arrosés. Les régions déprimées, à l'ombre orographique, reçoivent des pluies plus faibles.

Durant la période 1947-1950 (cf. graphique 1-1), la valeur médiane des précipitations à la station de Toulouse Blagnac (station barycentre du bassin) est de 650 mm. Les cycles 53 et 67 ont été les plus secs. Les cycles 74, 77, 88 et 59 ont été les plus pluvieux.



Graphique 1 - 1. Pluviométrie annuelle à Toulouse Blagnac, période 1947-1989

L'étude de la pluviométrie moyenne mensuelle fait apparaître quatre périodes :

- deux périodes de fortes précipitations, une en mai et l'autre en décembre;
- deux périodes sèches dont le minimum est en juillet.

Le déficit d'écoulement moyen du bassin (D) est difficile à chiffrer du fait de l'hétérogénéité altitudinale du bassin. Une estimation a tout de même été réalisée pour le bassin en amont de Toulouse, à partir de l'équation de bilan et de la formule de Turc. L'utilisation de l'oxygène-18 (cf. chapitre 5) permet d'obtenir l'altitude moyenne de recharge des eaux de la Garonne, et, ainsi, d'évaluer les précipitations moyennes sur le bassin qui sont de 1300 mm (P).

- Avec l'équation de bilan :

$$P - D = Q ;$$

et $Q = 670$ mm (débit moyen), on trouve $D = 630$ mm;

- Avec la formule de Turc :

$$D = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{P^2}{l^2}\right)}} \quad \text{avec } l^2 = 300 + 25T + 0.05T^3$$

et $T = 10$ °C (température moyenne de l'air), on trouve $D = 550$ mm.

Le déficit d'écoulement est donc d'environ 600 mm par an.

1.2.4. Données sociales et économiques

L'activité agricole occupe une place importante dans la région Midi-Pyrénées. Les autres activités sont regroupées principalement à Toulouse, au niveau de pôles industriels, et emploient une grande partie de la population active (notamment l'industrie aéronautique). On a pu ainsi parlé de "Toulouse et son désert pyrénéen".

La région Midi-Pyrénées est composée de 2 430 599 habitants (source INSEE, 1990) qui se répartissent dans les capitales régionales : Toulouse, Foix, Auch et Tarbes, mais aussi dans de petites villes et nombreux villages. En tête, la Haute-Garonne avec sa ville rose qui détient le plus grand nombre d'habitants (cf. tableau 1-1).

Départements	Population en 1990
<i>Ariège</i>	<i>136 483</i>
Aveyron	270 064
<i>Haute-Garonne</i>	<i>925 958</i>
<i>Gers</i>	<i>174 566</i>
Lot	155 813
<i>Hautes-Pyrénées</i>	<i>224 754</i>
<i>Tarn</i>	<i>342 741</i>
<i>Tarn et Garonne</i>	<i>200 220</i>
MIDI-PYRENEES	2 430 599

en italique : département inclus dans le bassin d'étude

Tableau 1 - 1. Population en 1990 par départements (INSEE)

1.3. Les principaux réservoirs d'eau

Ils sont de deux sortes : naturels ou artificiels. Les réservoirs naturels correspondent aux aquifères du bassin : aquifères alluviaux, aquifères calcaires fissurés et karstiques, et nappes libres. Les réserves neigeuses sont aussi importantes et se situent dans la partie montagneuse (cf. chapitre 3.3.2). Les réservoirs artificiels sont représentés par les barrages à vocation énergétique, les barrages destinés au soutien d'étiage et à l'irrigation, et les retenues collinaires.

La contribution des réservoirs à l'alimentation de la Garonne se fait à différents niveaux (cf. figure 1-1). Les réservoirs neigeux et les barrages sont situés en amont du bassin. On trouve ensuite la plupart des aquifères. Les nappes alluviales sont positionnées, quant à elles au bout de la chaîne, en aval du bassin.

1.3.1. Les aquifères carbonatés : fissurés et karstiques

Ils sont présents dans la partie amont du bassin, et représentent 12 % de la superficie du bassin (cf. carte 1-5). Les formations carbonatées du paléozoïque n'ont pas été prises en compte dans ce pourcentage.

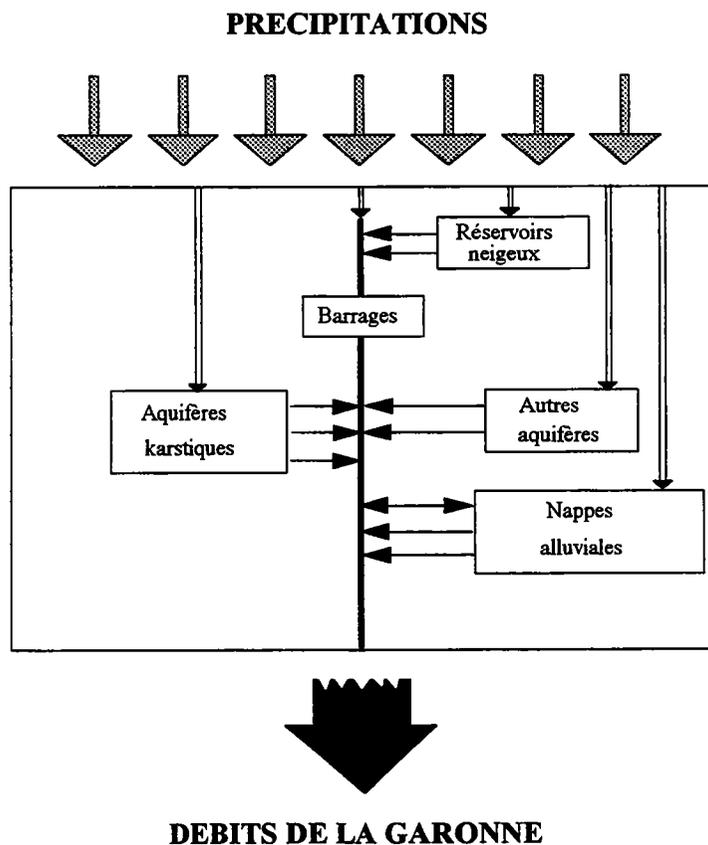
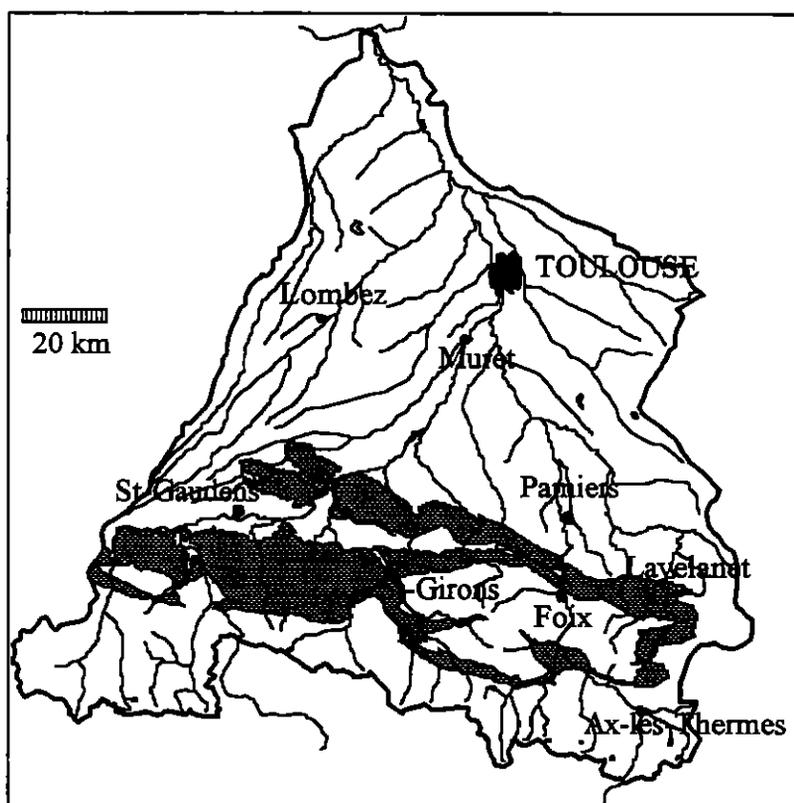


Figure 1 - 1. Réservoirs participant à l'alimentation de la Garonne



Carte 1 - 5. Aquifères carbonatés (fissurés et karstiques)

Les aquifères karstiques apparaissent dans de nombreuses formations carbonatées :

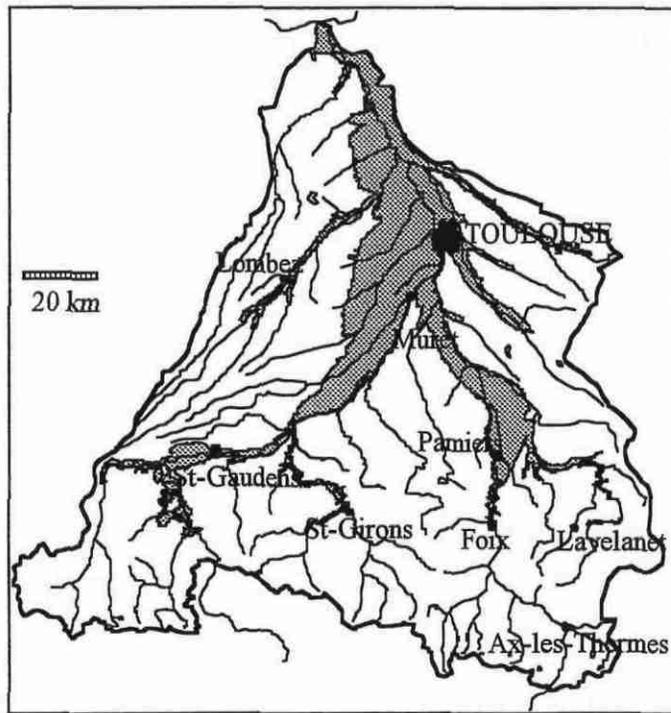
- le Paléocène-Danien;
- l'Urgo-Aptien et le Néocomien;
- le Jurassique;
- le Carbonifère;
- le Dévonien;
- le Silurien-Cambrien.

1.3.2. Les aquifères alluviaux

Ils s'étendent sur 15 % du bassin et prennent une extension intéressante au niveau des grands cours d'eau dans leur partie piémontaise et dans la plaine.

Les principaux aquifères sont :

- l'aquifère alluvial de la vallée de la Garonne;
- l'aquifère alluvial entre Montréjeau et la confluence Garonne-Salat;
- l'aquifère alluvial de la vallée de la Neste;
- les formations fluvioglaciales de la moyenne vallée de la Garonne, de Jaunac à Marignac;
- le complexe glaciaire de Mauléon-Barousse;
- les aquifères alluviaux des rivières secondaires : le Salat, l'Ariège et l'Hers vif.



Carte 1 - 6. Les nappes alluviales

1.3.3. Les barrages

Au début du XX^{ème} siècle, le développement de l'hydroélectricité dans la partie montagneuse du bassin, a été à l'origine d'une campagne de construction de barrages, conduites forcées et centrales hydroélectriques. Les principaux ouvrages de retenue sont : Lanoux et Naguilhes, situés tous deux en Ariège (cf. tableau 1-2).

<u>Nom du barrage</u>	<u>Département</u>	<u>Réserve maximale (hm³)</u>
Lanoux	Ariège	67,90
Naguilhes	Ariège	42,40
Pla de Soulcem	Ariège	29,00
Gnioure	Ariège	28,36
Laparan	Ariège	16,00
Portillon	Haute-Garonne	16,70
Lac d'Oo	Haute-Garonne	15,10
Cap de Long	Hautes-Pyrénées	67,50
Caillaouas	Hautes-Pyrénées	25,70
Oule	Hautes-Pyrénées	16,60

Tableau 1 - 2. Principaux barrages à vocation énergétique et capacité maximale de stockage

Outre les barrages à vocation énergétique, le bassin de la Garonne est doté de quelques barrages destinés au soutien d'étiage et à l'irrigation :

- le barrage de Montbel sur le bassin de l'Hers (60 Hm³);
- la "réserve Neste" (48 Hm³);

- le barrage de Lunax (25 Hm³);
- le barrage de Lestrade (22 Hm³);
- le barrage de Mondély (4 Hm³);
- le barrage de la Bure (4 Hm³).

1.4. Les eaux souterraines

1.4.1. Importance

Dans la vie de tous les jours, il est banal de voir couler de l'eau dans les rivières. La pluie est tombée sur le bassin, les rivières sont alimentées et l'eau s'écoule doucement jusqu'à la mer. Quoi de plus logique ?

Mais comment expliquer qu'en été, les rivières coulent toujours, alors qu'il n'est pas tombé de pluies depuis plusieurs mois ? Cette simple question fait prendre vraiment conscience de l'importance des eaux souterraines.

Prenons l'exemple de la Garonne à Toulouse. Le chemin maximal parcouru par l'eau depuis la source est d'environ 190 km. Si on admet une vitesse moyenne d'écoulement de 1 m/s, et si on nie l'existence des eaux souterraines — et donc la présence de terrains perméables —, au bout de 3 jours et en l'absence de précipitations, la Garonne serait à sec à Toulouse et on pourrait traverser à pied pour aller d'une rive à l'autre sans emprunter le pont neuf ! (cf. figure 1-2).

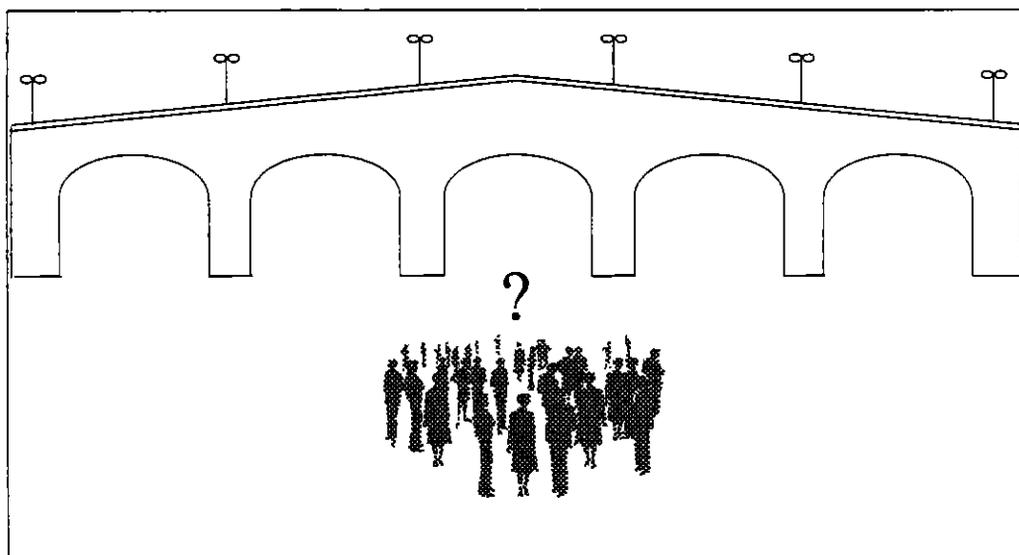
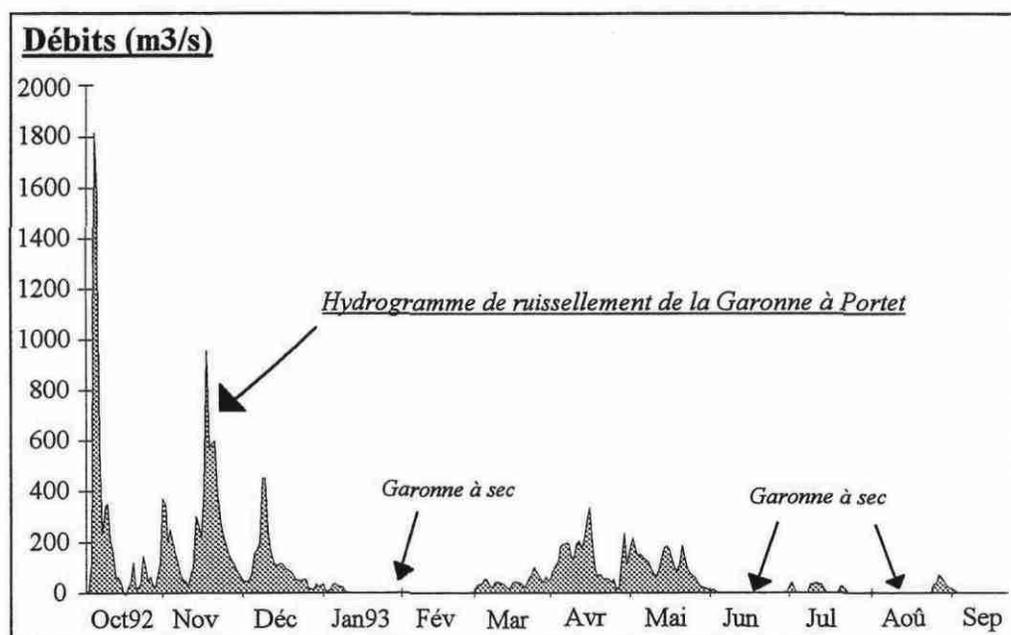


Figure 1 - 2. Le pont neuf à Toulouse sans les eaux souterraines

Les prélèvements en rivière pour l'alimentation en eau potable et les besoins de l'irrigation seraient alors tributaires des précipitations. En effet, à l'absence de pluie, la ville de Toulouse, alimentée principalement par les eaux de surface, ne pourrait plus subvenir à la demande des consommateurs.

De nombreuses activités industrielles (papeteries, industries chimiques et biochimiques, tanneries...) ne fonctionneraient pas.

L'hydrogramme de la Garonne à Toulouse aurait alors des périodes à sec, sans écoulement (cf. graphique 1-2). La Garonne pourrait alors se transformer en une voie de grande circulation.



Graphique 1 - 2. Hydrogramme de ruissellement de la Garonne à Toulouse, exemple du cycle 1993

De toute évidence, cette vision du fonctionnement de la rivière n'est pas acceptable. Il faut admettre, non seulement, l'existence des eaux souterraines, mais aussi leur importance dans l'alimentation des écoulements de surface.

1.4.2. Généralités

Les rivières et les grands fleuves sont alimentés par les eaux de pluies, communément appelées eaux de ruissellement, et par des eaux dont le chemin est différé, les eaux souterraines. D'un point de vue hydrodynamique, les eaux de ruissellement correspondent à la fonction transmissive et les eaux souterraines à la fonction capacitive.

L'eau de fonte des neiges, qui est aussi une eau différée, contribue à l'alimentation des rivières des bassins montagneux. Cette alimentation est saisonnière et elle a lieu principalement au printemps.

La définition stricto sensu de l'eau souterraine est : "eau qui circule sous terre, à grande profondeur". Certains auteurs distinguent en effet, dans l'eau souterraine, l'eau hypodermique (circulant dans les premiers mètres) et l'eau souterraine stricto sensu. Mais il est préférable de ne pas différencier ces deux composantes, car il est difficile de les isoler.

A partir du moment où l'eau devient souterraine, c'est une eau différée. Son trajet est plus long, et sa vitesse est plus faible que celle de l'eau de ruissellement. Le temps de séjour des eaux dans l'aquifère dépend de la perméabilité et de la nature des terrains traversés. La perméabilité, terme hydrogéologique, est "l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel" (cf. Dictionnaire français d'hydrogéologie, 1977, G. CASTANY, J. MARGAT). Elle est fonction de la taille des grains et s'exprime en m/s. La perméabilité d'un granite, d'un schiste, d'un grès ou d'un sable est donc différente. Par exemple, les terrains perméables ont des valeurs de perméabilité de 10^{-1} , de 10^{-2} , de 10^{-3} m/s. Les argiles ont une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s.

**2. CONTRIBUTION DES
AFFLUENTS AUX DEBITS DE
LA GARONNE**

Introduction

La Garonne est un fleuve européen qui prend sa source dans la région du Val d'Aran, en Espagne. Il traverse le sud de la France et finit sa course dans l'océan atlantique. Dans la partie française, la Garonne est grossie par plusieurs affluents dont les principaux sont : l'Ariège, le Tarn et le Lot. Sur le bassin étudié, compris entre le Val d'Aran et la confluence du Tarn, la Garonne reçoit l'apport de plusieurs affluents. Ces derniers ont une origine :

- montagnarde : la Pique, la Neste, le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize et l'Ariège;
- piémontaise : la Noue, la Louge, le Touch, l'Aussonnelle, l'Hers mort, la Save et la Gimone.

Cette partie a pour objet de quantifier les apports des différents affluents à la Garonne. Pour cela, nous utiliserons les débits moyens journaliers fournis par les différents gestionnaires du bassin.

La Garonne, comme tous les grands fleuves français, est fortement aménagée depuis le début du siècle. Le bassin comprend, aujourd'hui, de nombreux barrages à vocation énergétique, des barrages destinés à l'irrigation et au soutien d'étiage, et de grands canaux. Ces aménagements provoquent des perturbations sur le cours naturel du fleuve, et les débits mesurés sont rarement des débits naturels. Outre ces perturbations, les débits de la Garonne sont soumis à de nombreux prélèvements pour :

- l'alimentation en eau potable (l'AEP);
- les industries;
- l'irrigation en période estivale.

Pour plus de clarté, nous avons symbolisé sur un schéma, le réseau hydraulique actuel, qui est tout à fait différent du réseau naturel (cf. figure 2-1). Sur ce schéma, la Garonne figure au centre et les principaux affluents sont symbolisés par des flèches. Les aménagements sont aussi représentés : les canaux sont figurés par des traits en pointillés; les barrages destinés à l'hydroélectricité par un rectangle maillé; et les barrages destinés au soutien d'étiage et à l'irrigation, par un triangle maillé.

Il existe trois prises principales sur le bassin, permettant d'alimenter des canaux : la prise pour le canal de la Neste sur la Neste, la prise pour le canal de Saint-Martory et celle pour le canal latéral sur la Garonne. Le débit prélevé pour le canal de la Neste est en moyenne de 7.2 m³/s. Il permet la réalimentation de la Noue, de la Louge, de la Save, de la Gimone et des rivières gersoises. La prise pour le canal de Saint-Martory dérive environ 6.7 m³/s de la Garonne. Ce canal réalimente la Louge et le Touch. La dernière prise, située dans le centre même de Toulouse, dérive 6 à 7 m³/s pour le canal Latéral. A la sortie de Toulouse, au niveau de Blagnac, le débit naturel est donc amputé de 21 m³/s. Si en période de crue, ce débit représente une faible part du débit écoulé, en période d'étiage, ce n'est pas le cas, puisqu'il peut représenter jusqu'à 50 % du débit mesuré.

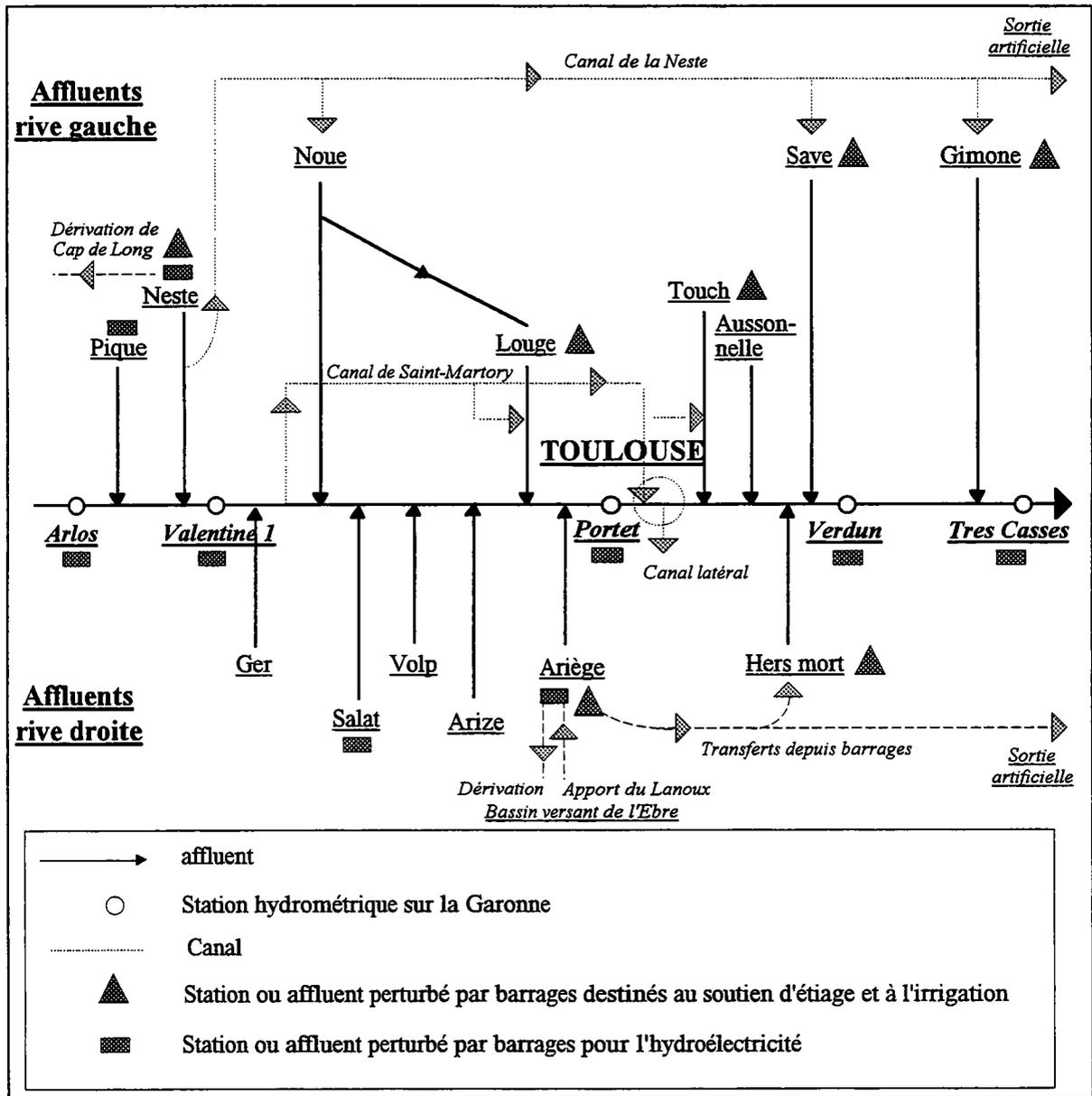


Figure 2 - 1. Schéma hydraulique du bassin de la Garonne

Un petit nombre d'affluents a gardé un régime quasi-naturel. Il s'agit du Ger, du Volp, du Salat et de l'Aussonnelle. Cependant, les autres affluents sont influencés par les aménagements. Les rivières d'origine montagnarde (l'Ariège, la Neste, la Pique, le Salat) sont perturbées par les barrages pour l'hydroélectricité. Les rivières de la rive gauche de la Garonne sont réalimentées par les canaux. Il vient se greffer, en plus de ces aménagements, les barrages destinés à l'irrigation et au soutien d'étiage. Ces barrages sont situés principalement en rive gauche, mais les plus importants sont sur l'Hers vif (Montbel), sur la Neste et sur la Lèze (Mondely).

De plus, il existe des sorties artificielles, autres que l'exutoire du bassin. Il s'agit du canal de la Neste permettant la réalimentation des rivières gersoises, des dérivations depuis Montbel vers l'Aude, de la dérivation depuis le bassin de l'Ariège vers le bassin de l'Ebre et la dérivation de Cap de Long dans les Hautes Pyrénées pour l'hydroélectricité du bassin de l'Adour. Il existe aussi une entrée artificielle : c'est l'apport du barrage de Lanoux dans le bassin de l'Ebre vers le bassin de l'Ariège pour les besoins de l'hydroélectricité. L'étude du bilan entrées-sorties montre un net déficit.

Cette partie comporte deux chapitres. Le premier est consacré aux perturbations existant sur les débits de la Garonne et sur ceux de ses affluents : influence des barrages, des canaux et des prélèvements pour l'AEP, pour l'industrie et pour l'irrigation. Le deuxième chapitre porte sur l'apport, proprement dit, des différents affluents à la Garonne. Quatre stations hydrométriques sur la Garonne sont prises comme référence : la station d'Arlos (première station sur la Garonne, après la frontière Espagnol), la station de Valentine, la station de Portet et celle de Verdun. La station de Tres Casses, pourtant située à l'exutoire du bassin, n'a pas été retenue. C'est une station vouée, principalement, à l'annonce des crues et non à l'obtention de débits.

2.1. Les perturbations apportées aux débits

Quelques rivières ont gardé un régime naturel, mais elles deviennent de moins en moins nombreuses. La plupart sont domestiquées et influencées par :

- les barrages à vocation énergétique;
- les barrages de soutien d'étiage;
- les prélèvements pour les grands canaux;
- les prélèvements pour l'AEP, les industries et l'irrigation.

Les stations hydrométriques sur la Garonne (Arlos, Valentine, Portet et Verdun) sont toutes perturbées par les aménagements. Le tableau 2-1 répertorie les influences au niveau de ces stations et au niveau de la Neste, du Salat et de l'Ariège. Les stations des affluents de la rive gauche ne sont pas notées, mais il faut savoir qu'elles sont pratiquement toutes réalimentées. A Verdun, les influences sont multiples et le débit mesuré n'est jamais le débit naturel.

2.1.1. Les barrages à vocation énergétique

L'influence des barrages est variable au cours de l'année. La différence entre le débit mesuré et le débit naturel permet d'étudier le comportement des barrages réservoirs importants.

<u>Station hydrométrique</u>	<u>Rivière concernée</u>	<u>Influences</u>
		Barrages pour l'hydroélectricité, barrages destinés au soutien d'étiage et à l'irrigation, canaux.
Arlos	Garonne	Réserve d'Arties (Espagne).
Beyrede	Neste	Dérivation de Cap de Long vers Pragnères. Réservoirs d'Aubert, d'Aumar, d'Oredon, d'Oule, de Caillaouas, de Pouchergues.
Valentine	Garonne	Influences d'Arlos et Beyrede. Réservoirs du Portillon et d'Oo. <i>Prélèvements pour le canal de la Neste.</i>
Roquefort	Salat	Réservoirs d'Araing.
Auterive	Ariège	Réservoirs de Naguilhes, Izourt, Gnioure, Majou, Riete, Fourcat et l'ensemble du Lanoux. Barrages de Montbel et de Mondély.
Portet	Garonne	Influences de Valentine, Roquefort, Auterive. <i>Dérivation de Saint-Martory.</i>
Verdun	Garonne	Influences de Portet. <i>Prélèvements pour le canal du Midi.</i>

Tableau 2 - 1. Liste des aménagements en amont des stations hydrométriques de la Garonne, de la Neste, du Salat et de l'Ariège

Electricité De France fournit, depuis 1961, les débits moyens mensuels naturels au niveau des stations d'Arlos, de Valentine, de Portet et de Verdun sur la Garonne, de Beyrede sur la Neste, de Roquefort sur le Salat, d'Auterive sur l'Ariège. Les débits moyens mensuels naturels, calculés par EDF, prennent en compte les dérivations pour les canaux et l'influence des barrages à vocation énergétique. Pour les dérivations, le débit prélevé en amont de la station est additionné au débit mesuré. En ce qui concerne les barrages, on augmente ou on diminue le débit mesuré selon l'activité. Si le barrage stocke, on ajoute au débit mesuré, un débit correspondant au volume stocké. Si le barrage déstocke, on retranche au débit mesuré, un débit correspondant au volume déstocké. On peut apprécier ce volume déstocké par le débit turbiné, mais aussi par la courbe de capacité du barrage qui exprime le volume du réservoir en fonction de la hauteur du plan d'eau (cf. figure 2-2).

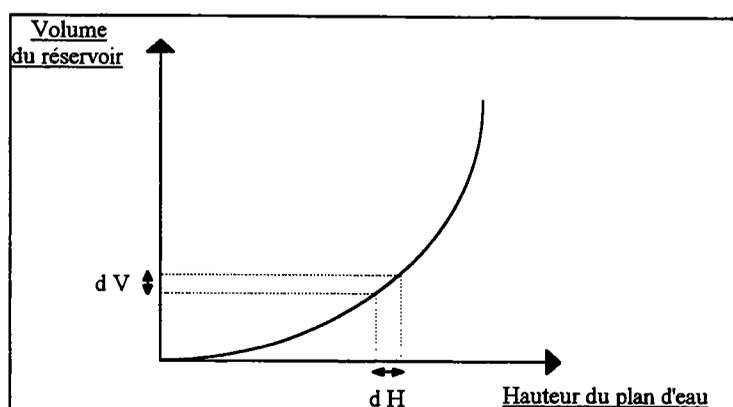
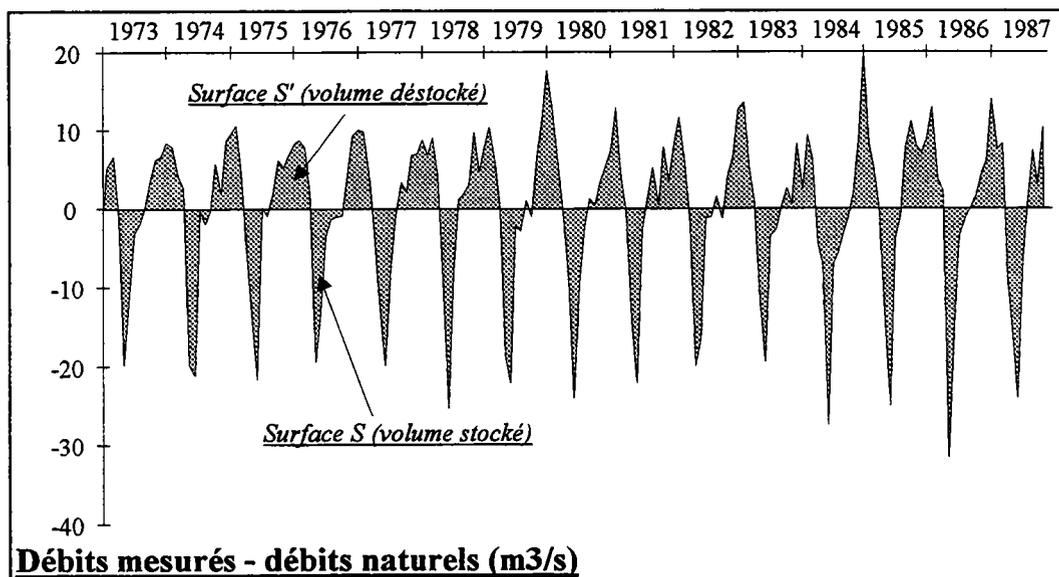


Figure 2 - 2. Exemple de courbe de capacité d'un réservoir

La courbe de la différence entre les débits mesurés et les débits naturels met en évidence le mode de fonctionnement du barrage et son influence maximale sur les débits (cf. graphique 2-1). Les valeurs au dessus de 0 correspondent à un débit mesuré supérieur au débit naturel et illustre un déstockage. Les valeurs en dessous de 0 correspondent à un débit mesuré inférieur au débit naturel et mettent en évidence un stockage. Généralement, la période de stockage à lieu au printemps et au début de l'été; la période de déstockage à lieu en automne et en hiver.



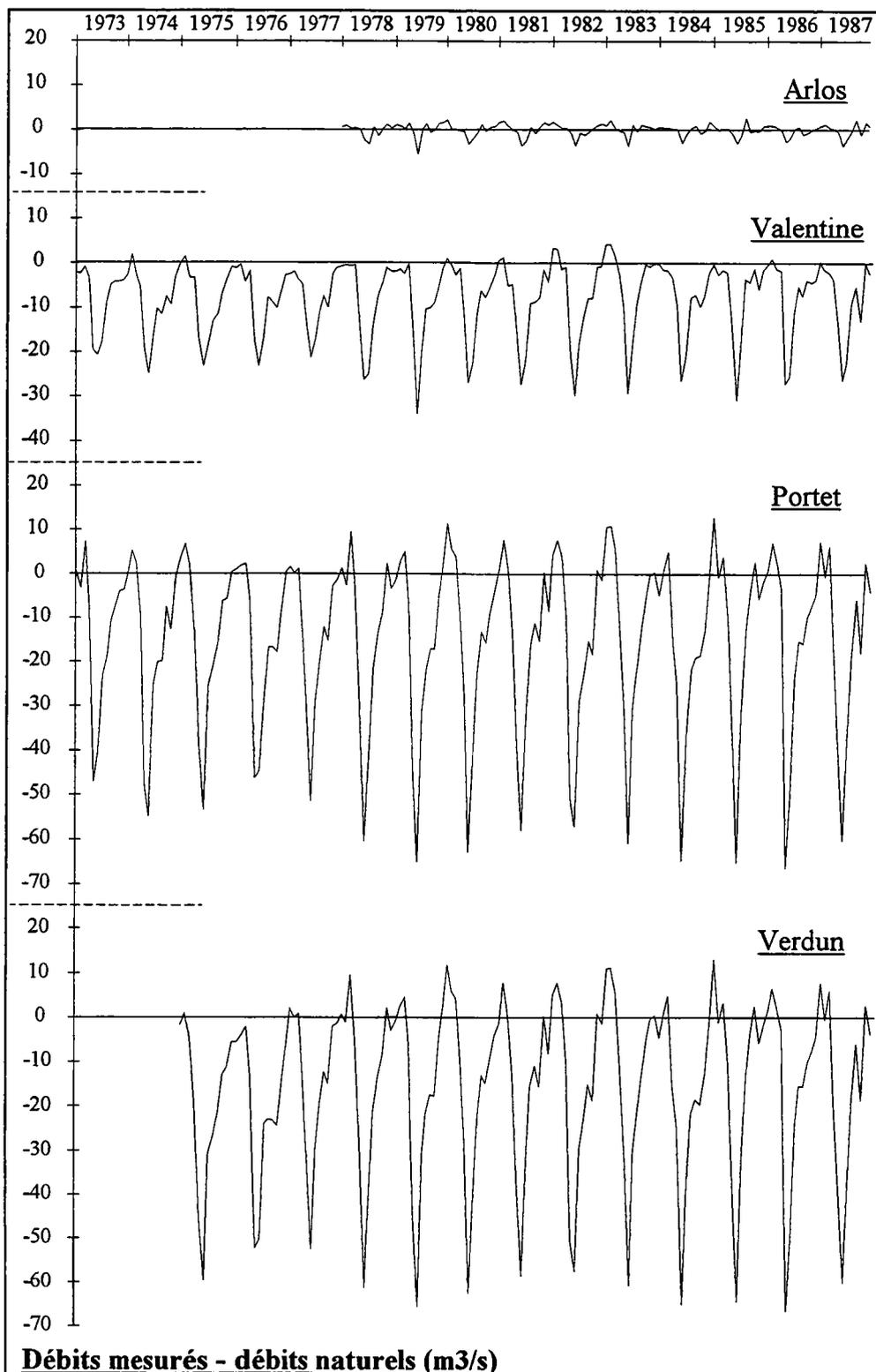
Graphique 2 - 1. Mise en évidence des stockages et déstockages des barrages à vocation énergétique à Auterive (Ariège), période 1973-1987

On remarque, sur le graphique, que la surface correspondant au volume stocké (S) est à peu près égale à la surface correspondant au volume déstocké (S'). On peut donc en déduire que, **sur un cycle hydrologique, comprenant généralement un déstockage et un stockage, l'effet des barrages est quasiment nul.** Cependant, **l'effet est nul sur une période pluriannuelle, mais il est très important au niveau mensuel.**

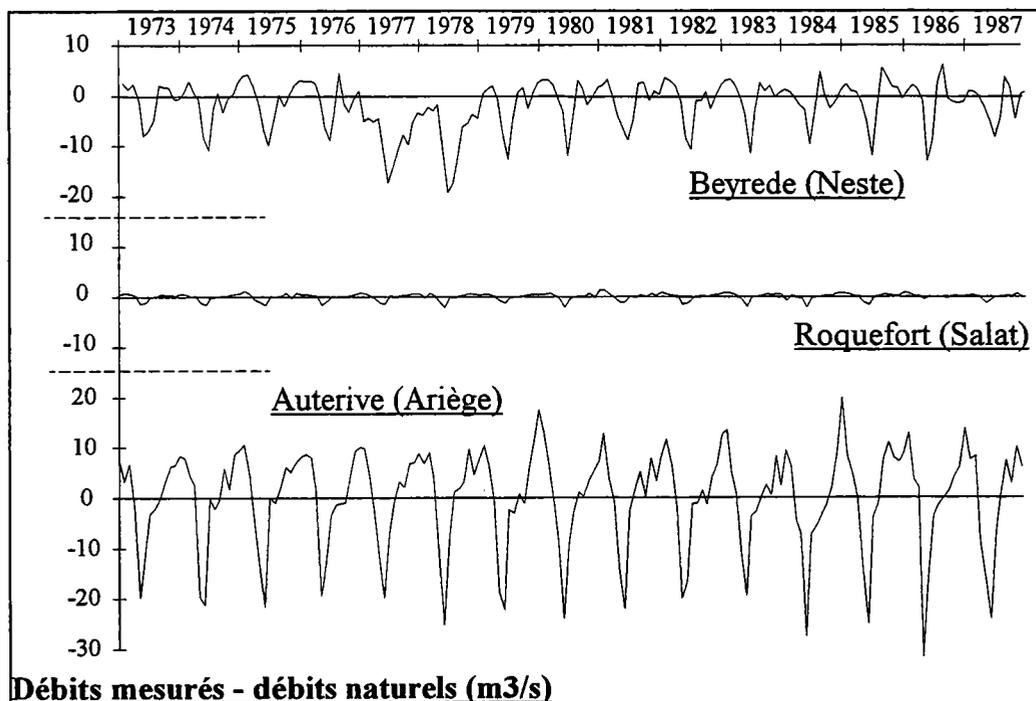
La différence entre le débit mesuré et le débit naturel sur les différentes stations de la Garonne, entre 1973 et 1987, permet d'apprécier l'évolution saisonnière et l'évolution spatiale des volumes stockés et déstockés (cf. graphique 2-2).

L'évolution des courbes est saisonnière. L'influence des barrages est faible au niveau de la station d'Arlos. Cependant, elle augmente à partir de Valentine, en même temps que celle des prélèvements pour les canaux. Il en résulte que le débit mesuré est très souvent inférieur au débit naturel. A Portet, cette différence atteint plus de 60 m³/s (au pas mensuel).

Les autres rivières (cf. graphique 2-3) présentent aussi des variations saisonnières. Elles sont perturbées essentiellement par les barrages et d'une façon moindre par des dérivations (pour la Neste et l'Ariège).



Graphique 2 - 2. Différence entre débits mesurés et débits naturels de la Garonne à Arlos, Valentine, Portet et Verdun, période 1973 à 1987



Graphique 2 - 3. Différence entre débits mesurés et débits naturels à Beyrede (Neste), à Roquefort (Salat) et à Auterive (Ariège), période 1973 à 1987

Sommairement, sur la période 1973-1987 (cf. tableau 2-2), on peut observer que, pour les stations influencées seulement par les barrages à vocation énergétique (Arlos, Roquefort), la différence, à long terme, entre le débit mesuré et le débit naturel est nulle. L'effet des barrages, sur une longue période, est donc négligeable, comme nous l'avons déjà vu. Cependant, les débits mesurés sont inférieurs, de peu, aux débits naturels pour les stations de Beyrede et Auterive, car on a des sorties artificielles.

La différence entre les débits ne cesse d'augmenter (-7.89, -14.71, -21.51 m³/s) pour les stations situées sur la Garonne. Elle est liée aux prélèvements qui sont effectués pour alimenter les canaux. **La Garonne à Portet n'a jamais son régime naturel.** Environ 15 m³/s d'eau sont détournés pratiquement en permanence.

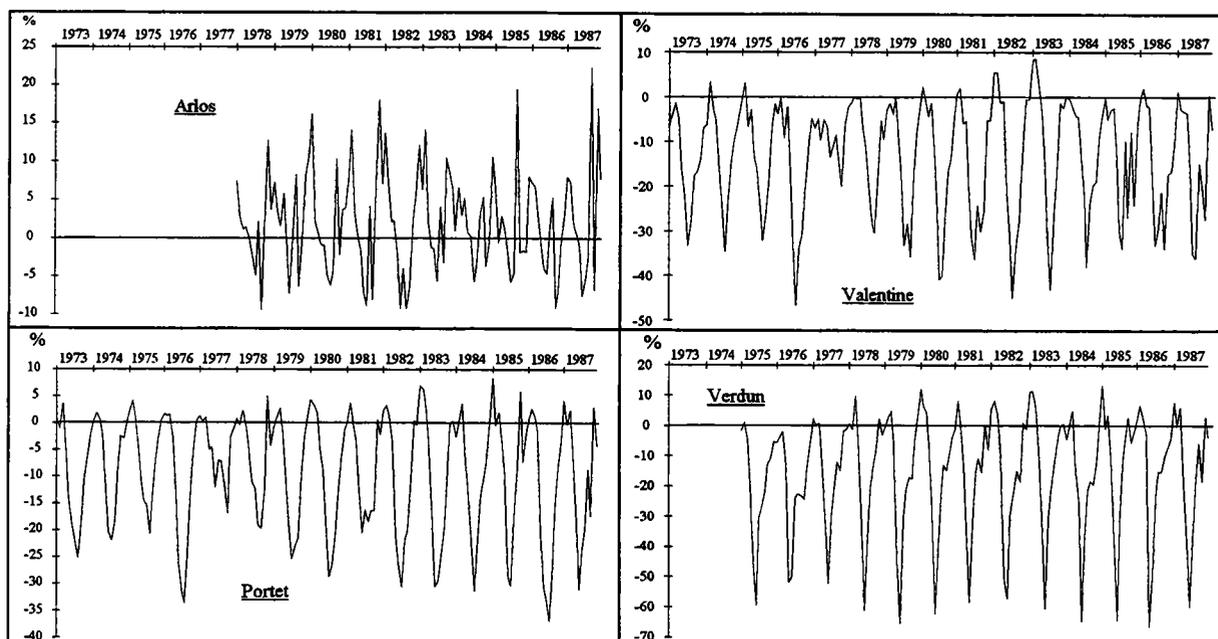
L'influence moyenne des aménagements sur les débits est de 5.3 % à Arlos, de 13.9 % à Valentine, de 10.4 % à Portet et de 14.1 % à Verdun. Au pas mensuel, l'influence peut atteindre 20 % à Arlos, 40 % à Valentine, 30 % à Portet et 60 % à Verdun (cf. graphique 2-4).

Les perturbations causées par les aménagements doivent donc être prises en compte dans toute étude hydrologique, hydrogéologique, hydrochimique et biologique le long de la Garonne.

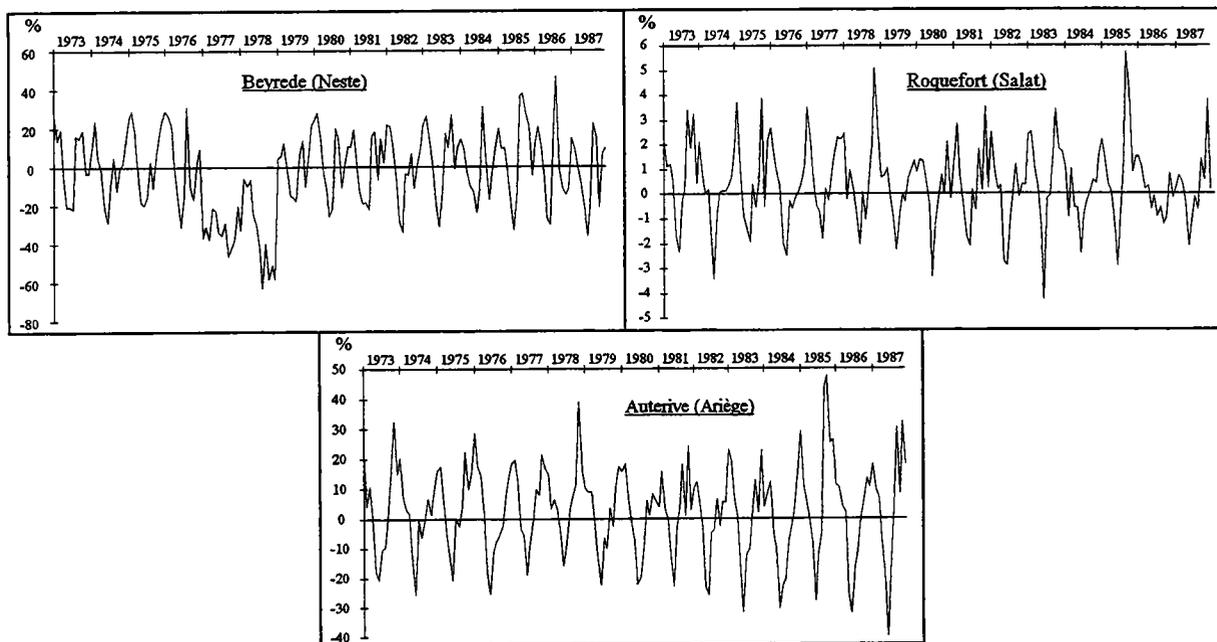
L'influence moyenne est faible sur les débits des affluents (cf. graphique 2-5). A Roquefort, elle est de 1.2 %, à Beyrede et Auterive, elle est nettement plus élevée avec respectivement 17.5 % et 12.1 %.

		<u>Débit moyen mesuré (1)</u>	<u>Débit moyen naturel (2)</u>	<u>Différence (1)-(2)</u>	<u>Influence moyenne</u>
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(%)
Stations sur la Garonne	Arlos	23.50 (1978-1987)	23.50	0	5.3
	Valentine	63.60	71.49	-7.89	13.9
	Portet	199.38	214.09	-14.71	10.43
	Verdun	220.29	241.80	-21.51	14.11
Stations sur les affluents	Beyrede (Neste)	19.94	21.61	-1.67	17.52
	Roquefort (Salat)	47.18	47.18	0	1.22
	Auterive (Ariège)	68.57	68.67	-0.10	12.06

Tableau 2 - 2. Influence moyenne des aménagements sur la Garonne, la Neste, le Salat et l'Ariège, période 1973-1987



Graphique 2 - 4. Influences des aménagements sur le débit mesuré de la Garonne à Arlos, à Valentine, à Portet et à Verdun, période 1973-1987

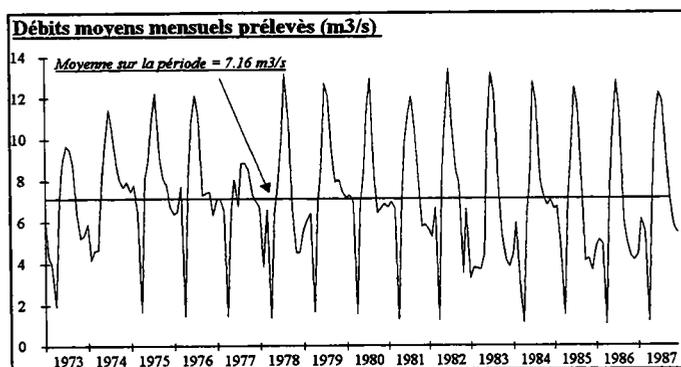


Graphique 2 - 5. Influences des aménagements sur le débit mesuré des affluents à Beyrede (Neste), à Roquefort (Salat) et à Auterive (Ariège), période 1973-1987

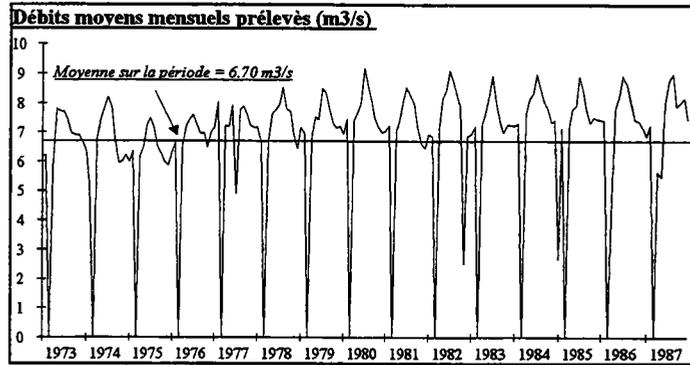
2.1.2. Les canaux

Trois grands canaux sont présents sur le bassin : le canal de la Neste, permettant l'alimentation des rivières gasconnes; le canal de Saint-Martory, utilisé pour l'irrigation; et le canal latéral, destiné à la navigation. Les débits moyens prélevés, sur la période 1973-1987, sont de 7.2 m³/s pour le canal de la Neste (cf. graphique 2-6), de 6.7 m³/s pour le canal de Saint-Martory (cf. graphique 2-7) et de 6.8 m³/s pour le canal latéral.

Les débits prélevés varient avec la saison. Sur le canal de la Neste, 8 m³/s sont prélevés en hiver, aucun au mois d'avril et de 12 à 15 m³/s en été. Sur le canal de Saint-Martory, les débits fluctuent autour de 7 m³/s lorsque le canal est en fonctionnement. Ils sont nuls au mois de mars, période d'entretien du canal, et ils augmentent en juillet et août afin de satisfaire les besoins de l'agriculture. Sur le canal latéral, le débit prélevé durant l'année est estimé à 6.8 m³/s, exception faite de la période d'entretien du canal.



Graphique 2 - 6. Débits moyens prélevés sur la Neste pour le canal de Sarrancolin, période 1973-1987

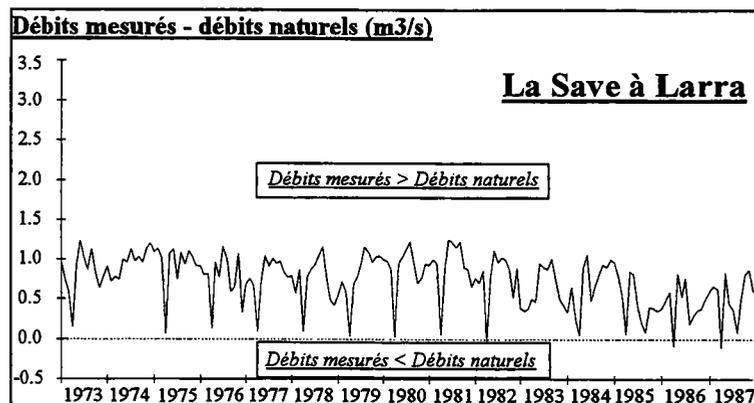


Graphique 2 - 7. Débits moyens prélevés sur la Garonne pour le canal de Saint-Martory, période 1973-1987

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est à Verdun que les débits sont les plus influencés par les canaux. Le débit mesuré est inférieur au débit naturel de 21 m³/s environ. A Portet, cette différence est de 14 m³/s.

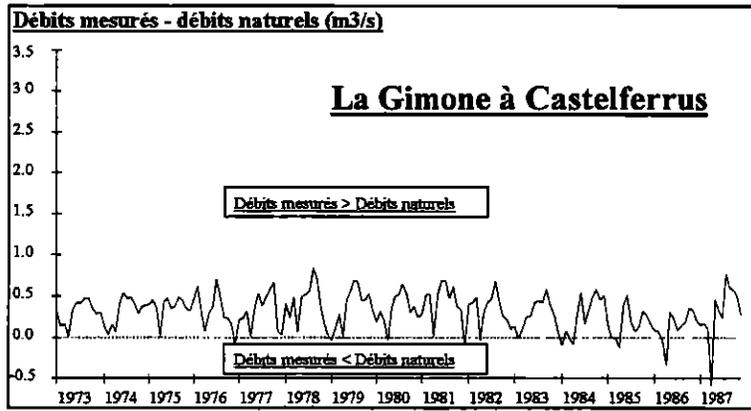
En réalité, l'influence des canaux est un peu plus faible, car une partie des débits prélevés revient à la Garonne par l'intermédiaire de la Noue, de la Louge, du Touch, de la Save et de la Gimone (cf. schéma hydraulique de la Garonne). Il est difficile d'estimer ces retours pour la Noue, la Louge et le Touch, le calcul des débits naturels n'étant pas effectué. Toutefois, l'excédent peut être évalué à plusieurs centaines de litres pour chaque rivière.

Sur la Save et la Gimone, on connaît le volume qui retourne à la Garonne. La CACG (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne), gestionnaire de ces rivières, effectue en effet le calcul des débits naturels. Les débits mesurés sont pratiquement toujours supérieurs aux débits naturels. Le débit moyen restitué s'élève donc, sur la période 1973-1987, à 0.74 m³/s pour la Save (cf. graphique 2-8) et à 0.31 m³/s pour la Gimone (cf. graphique 2-9).



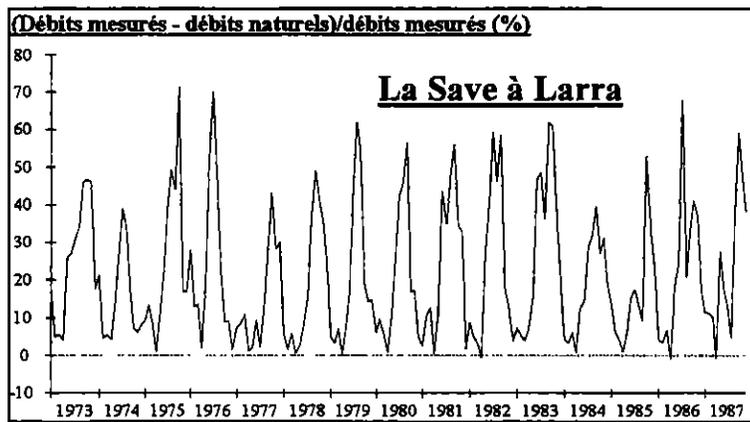
Graphique 2 - 8. Différence entre débits moyens mesurés et débits moyens naturels à Larra (Save), période 1973-1987

La part des apports artificiels provenant du canal de la Neste est plus élevée pendant la période estivale. Elle correspond à 70 % du débit mesuré à Larra, et 100 % du débit mesuré à Castelferrus. La Gimone serait donc souvent à sec en été. Le bassin de la Save et de la Gimone n'ont donc pratiquement aucune réserve d'eau souterraine.

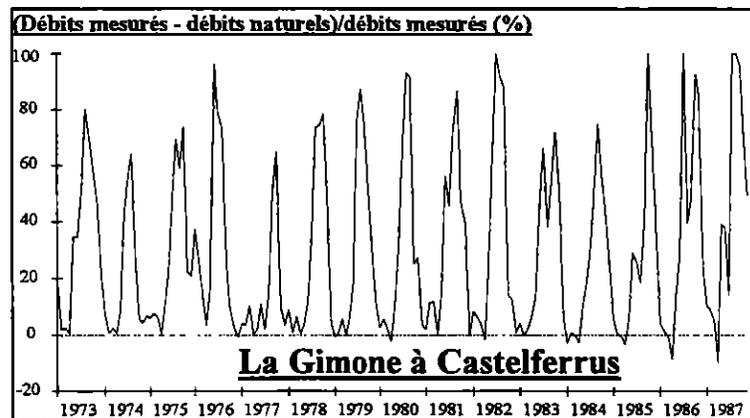


Graphique 2 - 9. Différence entre débits moyens mesurés et débits moyens naturels à Castelferrus (Gimone), période 1973-1987

Les apports moyens du canal, sur la période 1973-1987, représentent respectivement 21.5 % et 30.3 % du débit moyen mesuré à Larra (Save) (cf. graphique 2-10) et à Castelferrus (Gimone) (cf. graphique 2-11).



Graphique 2 - 10. Part des apports artificiels dans le débit mesuré à Larra (Save), période 1973-1987



Graphique 2 - 11. Part des apports artificiels dans le débit mesuré à Larra (Save), période 1973-1987

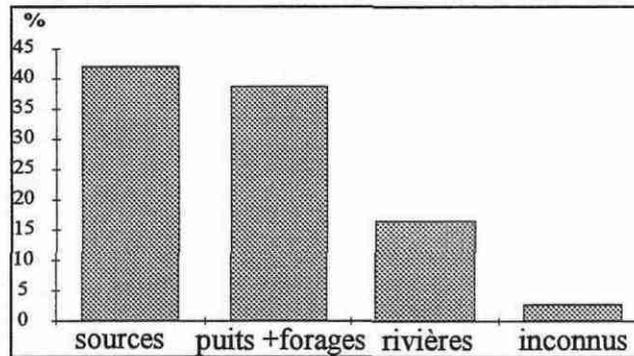
2.1.3. Les prélèvements sur le bassin

Ils ont trois usages essentiels : l'alimentation en eau potable (l'AEP), l'alimentation en eau pour les industries (papeteries, industries agro-alimentaires) et l'irrigation. Quel qu'en soit l'usage, l'origine principale des prélèvements est l'eau de surface. Cela correspond, en 1991, à 60 % des prélèvements pour l'AEP, 95.7 % des prélèvements pour l'industrie et 96.4 % pour l'irrigation. Le volume total annuel, prélevé en rivière, est de 450 millions de m³. Ce chiffre correspond à un débit de 14.3 m³/s dont **9.97 m³/s sont utilisés pour l'industrie, 2.2 m³/s pour l'AEP et 2.13 m³/s pour l'irrigation.**

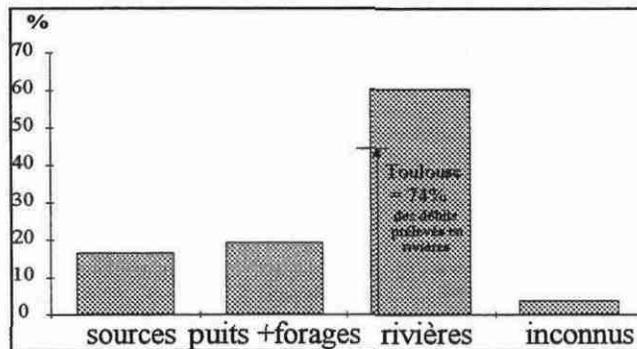
La totalité de l'eau prélevée n'est pas consommée. Suivant l'usage, une part plus ou moins importante du débit prélevé rejoint le réseau de surface. Les études de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne montrent que la partie consommée est différente suivant l'usage. Ainsi, serait consommé, 35 % de l'eau prélevée pour l'AEP, 70 % pour l'irrigation et 7 % pour les industries. Cela signifie que 2.96 m³/s des 14.3 m³/s sont effectivement consommés.

2.1.3.1. L'Alimentation en Eau Potable

En 1991, 3.67 m³/s d'eau de surface et d'eau souterraine ont été prélevés pour l'AEP. Sur 181 prélèvements répertoriés, 42 % proviennent de sources, 39 % de puits et de forages et 17 % de prises en rivières (cf. graphique 2-12). Ce sont cependant ces dernières qui fournissent l'essentiel des débits pour l'AEP (cf. graphique 2-13) avec 60 % des apports. **74 % des débits prélevés en rivière sont destinés à Toulouse et son agglomération.**



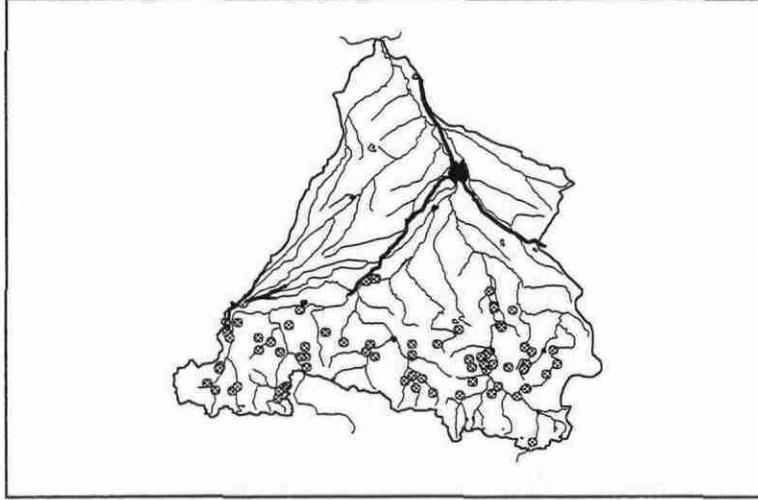
Graphique 2 - 12. Origine des prélèvements pour l'AEP en 1991 (181 prélèvements connus)



Graphique 2 - 13. Répartition des débits prélevés pour l'AEP en 1991 (débit total prélevé = 3.67 m³/s)

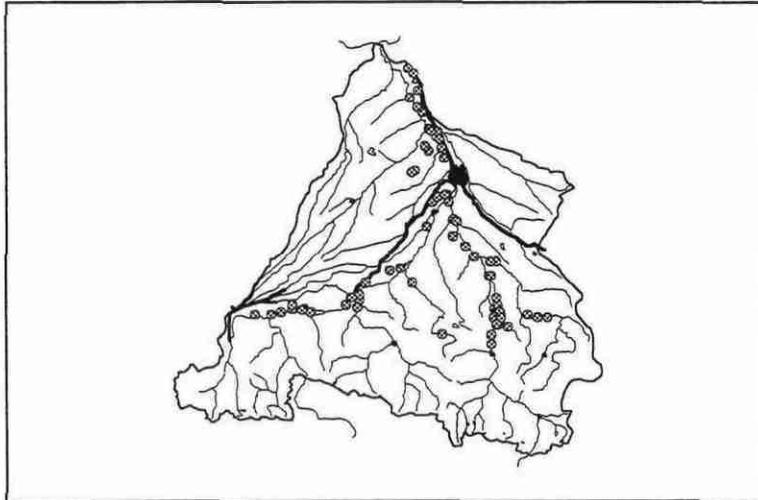
Toutes les sources exploitées, 76 au total, sont situées dans les Pyrénées et les Pré-Pyrénées (cf. carte 2-1). Elles proviennent d'aquifères karstiques et poreux, et de quelques nappes libres. Soixante-neuf sources ont un débit prélevé inférieur à 20 l/s. Les sources les plus importantes sont :

- les Rochers (St Nérée aval) avec 150 l/s : source karstique dans le bassin de l'Ourse;
- la Gourdiolle avec 60 l/s : source karstique dans le bassin de l'Ourse;
- Prat d'Albis avec 53 l/s : source dans le bassin de l'Ariège;
- Ladoux avec 44 l/s : source près de St-Girons.



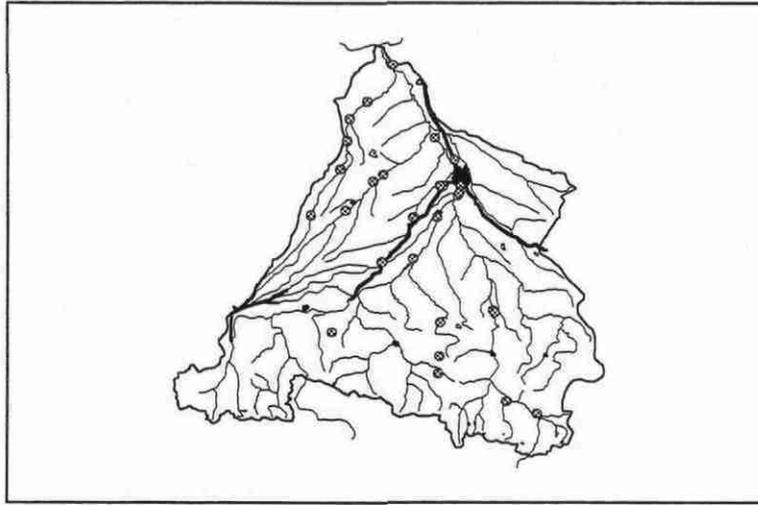
Carte 2 - 1. Localisation des sources pour l'AEP en 1991

L'eau prélevée par les puits provient des nappes alluviales : celle de l'Ariège et celles de la Garonne (cf. carte 2-2). 53 puits ont un débit prélevé inférieur à 10 l/s et 15 puits ont un débit supérieur à 10 l/s.



Carte 2 - 2. Localisation des puits pour l'AEP en 1991

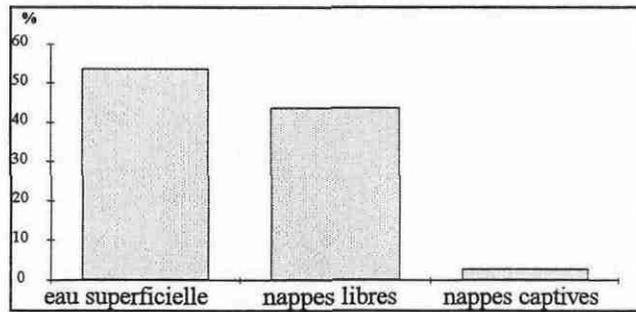
Les prises en surface sont situées sur la Garonne (cf. carte 2-3) et sur les rivières en rive gauche de la Garonne. 74 % du débit prélevé permet l'alimentation de la ville Toulouse.



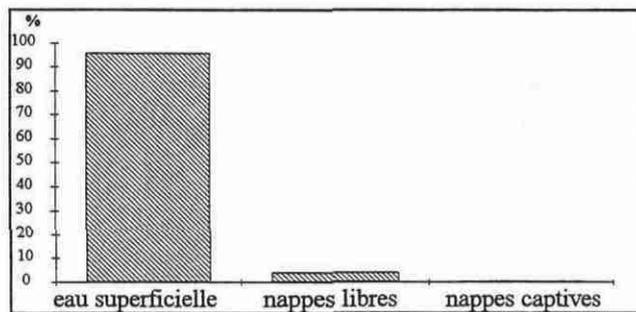
Carte 2 - 3. Localisation des prises en rivière pour l'AEP en 1991

2.1.3.2. Les industries

Les prélèvements industriels avoisinent $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1991. Bien que l'origine des prélèvements soit bien répartie entre les eaux de surface et les nappes libres (cf. graphique 2-14), c'est l'eau superficielle qui représente la quasi-totalité des débits prélevés (cf. graphique 2-15).



Graphique 2 - 14. Origine des prélèvements pour l'industrie en 1991 (110 prélèvements recensés)



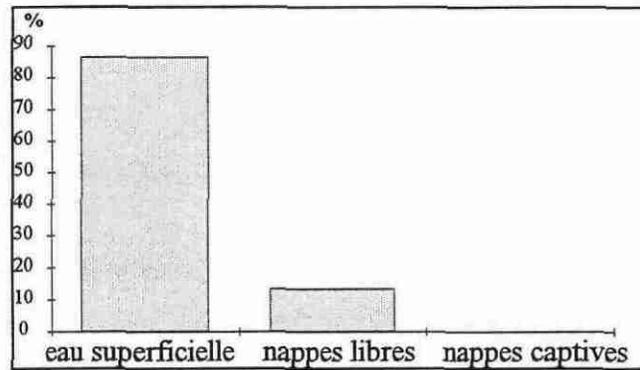
Graphique 2 - 15. Répartition des débits prélevés pour l'industrie en 1991 (prélèvements totaux = $10.4 \text{ m}^3/\text{s}$)

Sur les 10.4 m³/s prélevés, 7.3 le sont par la société chimique de la Grande Paroisse à Toulouse pour refroidir ses installations. On trouve ensuite, la société nationale des poudres et explosifs à Toulouse (SNPE) avec 0.6 m³/s de débits prélevés et l'usine de St-Gaudens (Cellulose du Rhône et d'Aquitaine) avec 0.5 m³/s. Une grande partie de l'eau prélevée revient au réseau hydrographique (93 % en moyenne).

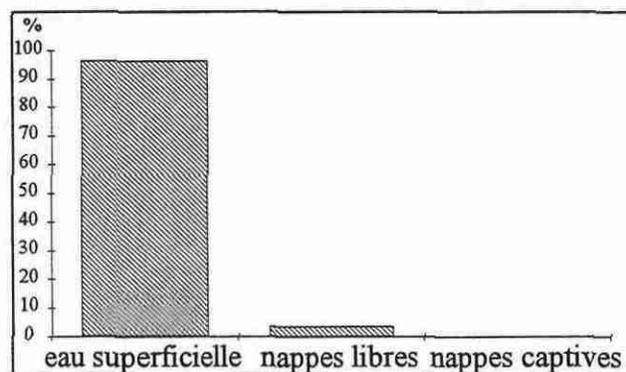
2.1.3.3. L'irrigation

Les prélèvements pour l'irrigation (installations déclarées) ont lieu à 86 % sur les rivières, contre 14 % sur les nappes libres (cf. graphique 2-16). L'ensemble des débits prélevés, sur l'année 1991, représentent 2.2 m³/s dont 2.13 m³/s proviennent des eaux de surface (cf. graphique 2-17).

L'irrigation a lieu essentiellement pendant la période estivale, sur trois ou quatre mois. Les 2.2 m³/s, moyenne annuelle, correspondent donc à 6.6 ou 8.8 m³/s prélevés sur une période plus courte. Le débit des rivières, durant cette période, est fortement diminué, d'autant plus que 70 % de l'eau est consommée en moyenne.



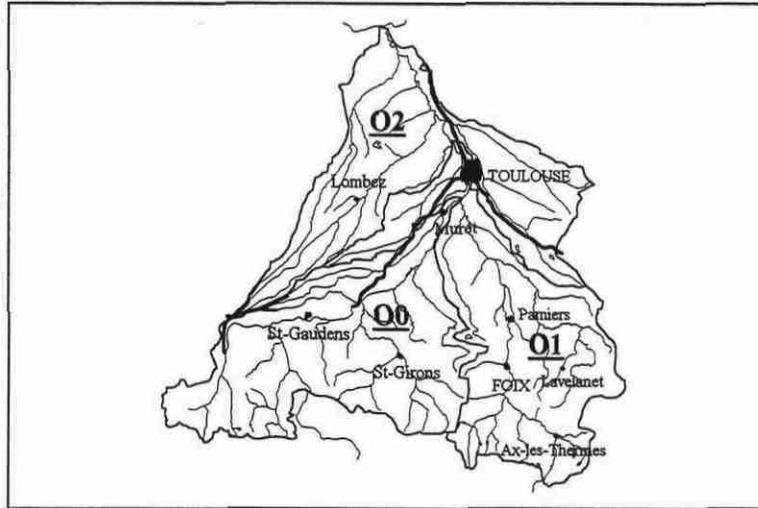
Graphique 2 - 16. Origine des prélèvements pour l'irrigation en 1991 (805 prélèvements recensés)



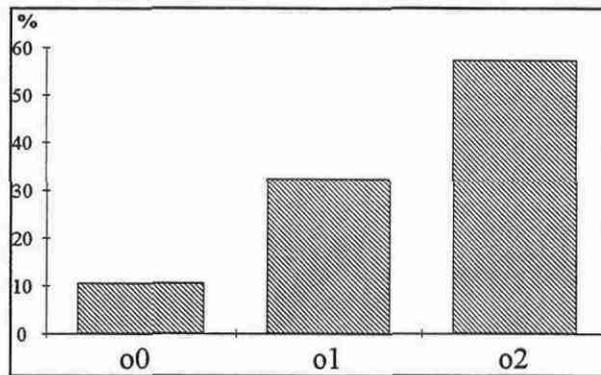
Graphique 2 - 17. Répartition des débits prélevés pour l'irrigation en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m³/s)

Les prélèvements sont importants dans le secteur hydrographique O2 (cf. carte 2-4). Ils représentent 57 % des prélèvements (cf. graphique 2-18). Malgré un petit nombre d'irrigants (cf. graphique 2-19), le secteur hydrographique O1 figure tout de même avec 32 % des

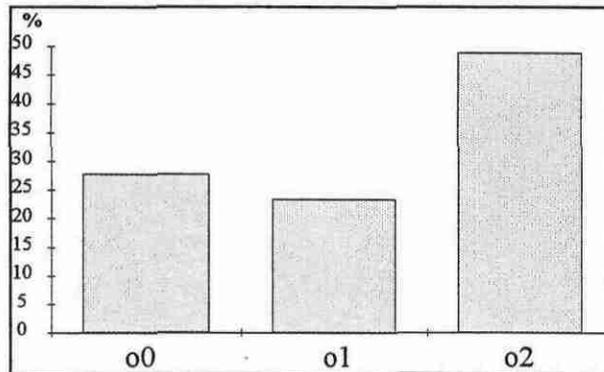
prélèvements. On trouvera en annexe, pour plus d'information, la carte des sous-secteurs hydrographiques, le nombre d'irrigants, et la répartition des prélèvements par sous-secteurs.



Carte 2 - 4. Secteurs hydrographiques

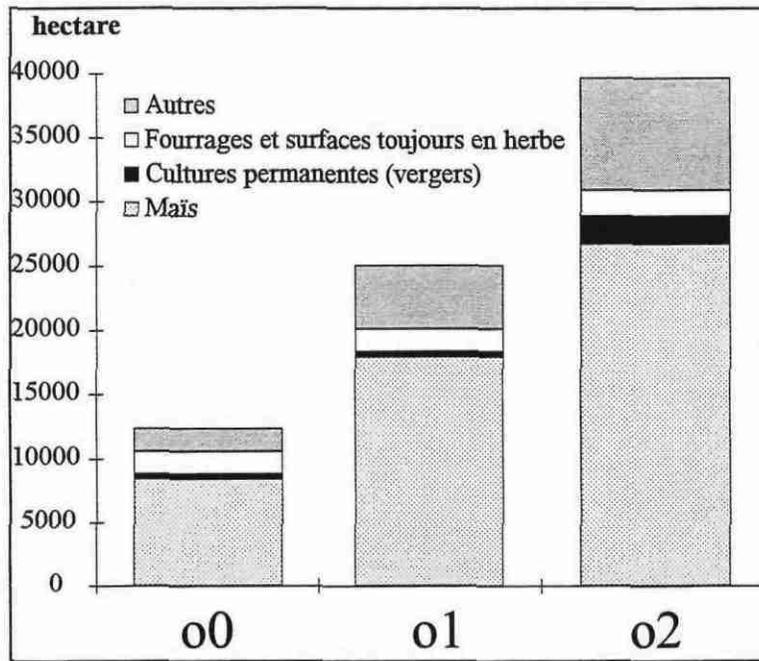


Graphique 2 - 18. Répartition des prélèvements pour l'irrigation par secteur en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m³/s)



Graphique 2 - 19. Répartition des irrigants par secteur en 1991 (788 irrigants recensés)

La répartition des prélèvements par secteurs est proportionnelle à la surface agricole utile (cf. graphique 2-20).



Graphique 2 - 20. Répartition des cultures par secteurs (RGA 1988)

Le débit prélevé pour les besoins de l'irrigation est de 2.2 m³/s en 1991 (cf. Agence de l'Eau Adour-Garonne). Mais, si on estime la quantité d'eau nécessaire pour les cultures, par la connaissance des surfaces irriguées (source RGA 1988), on trouve un débit prélevé de 3.8 m³/s. Ce calcul est basé sur l'utilisation d'un volume d'eau de 1500 m³/ha en plein champ, et de 2500 m³/ha pour l'arboriculture. Les débits prélevés seraient donc sous-estimés. Ce résultat est en effet confirmé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne qui affirme ne connaître qu'une partie des prises en rivière et en nappe.

2.2. Apports des affluents à la Garonne

L'étude est effectuée grâce aux débits moyens journaliers des affluents, et porte sur différentes échelles de temps :

- sur une longue période (1973-1987), afin de caractériser les apports moyens;
- sur un cycle hydrologique, en prenant en compte un cycle sec et un cycle humide (une année civile n'est pas représentative). Un cycle hydrologique correspond à l'intervalle de temps compris entre le début des hautes eaux et la fin des basses eaux. Il est d'une durée variable;
- au niveau mensuel, période de hautes eaux et de basses eaux;

Dans la dernière partie, nous étudierons les apports spécifiques en période d'étiage. Il est difficile de représenter les apports au niveau journalier. En effet, le bassin est très étendu, et des crues peuvent survenir en amont du bassin alors qu'en aval le régime est permanent.

2.2.1. Apports moyens sur une longue période (1973 à 1987)

Pour rendre compte des apports moyens, nous avons calculé les débits moyens journaliers pluriannuels, sur la période 1973-1987. Ces débits sont reportés sur le schéma hydraulique général dans de petites étiquettes (cf. figure 2-3).

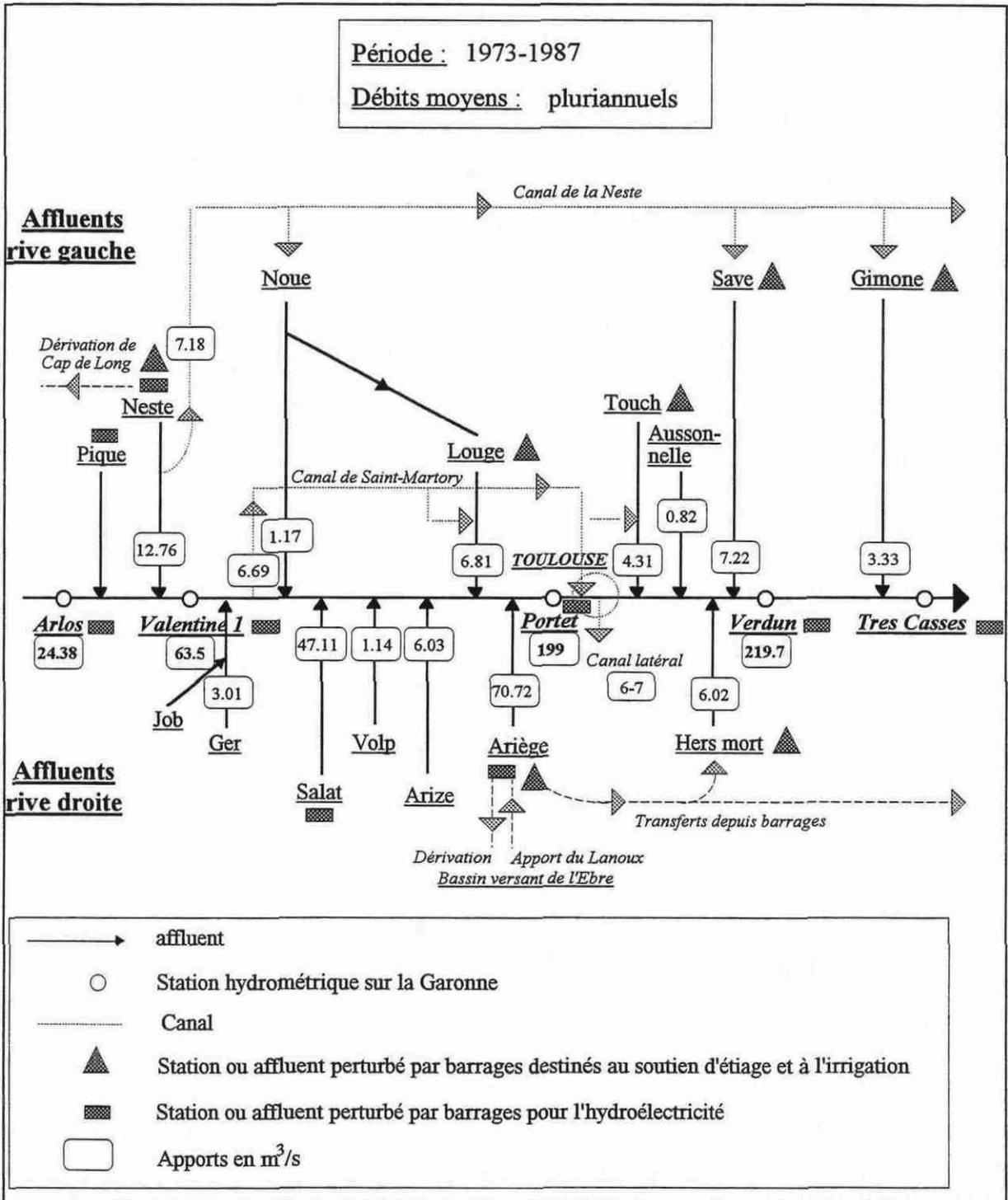
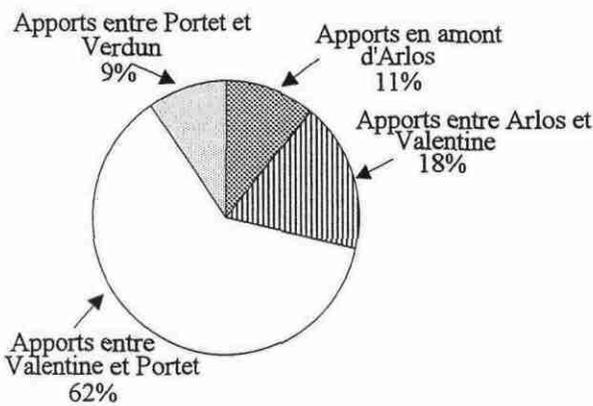


Figure 2 - 3. Débits moyens pluriannuels sur la Garonne et les principaux affluents, période 1973-1987

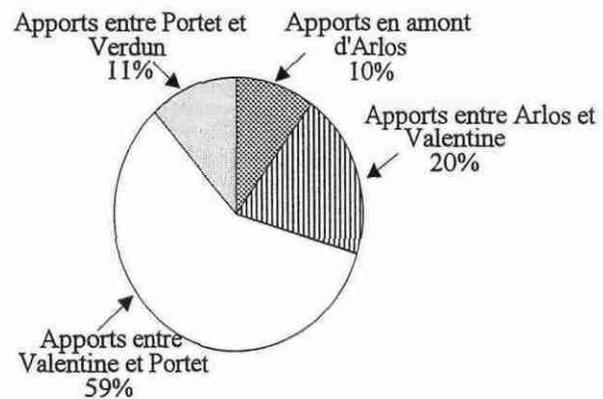
Le débit moyen à Verdun est d'environ 220 m³/s. Il doit être légèrement supérieur à la station de Tres Casses, exutoire naturel du bassin. Mais les débits de cette station ne sont pas entièrement connus. A Verdun, la part des apports (cf. graphique 2-21) est la suivante :

- 11 % des apports proviennent en amont d'Arlos;
- 18 % entre Arlos et Valentine;
- 62 % entre Valentine et Portet;
- 9 % entre Portet et Verdun.

Les apports les plus importants sont situés entre Valentine et Portet. Ils ont pour origine principale les apports respectifs du Salat et de l'Ariège, qui sont les deux plus gros affluents de la Garonne. La répartition des apports est sensiblement similaire quelque soit la nature des débits (cf. graphique 2-22). Les débits naturels prennent en effet en considération les prélèvements pour les canaux et l'influence des barrages à vocation énergétique qui ont un effet négligeable sur une longue période. Les volumes stockés et déstockés s'annulent.



Graphique 2 - 21. Origine des apports (débits mesurés) à la station de Verdun

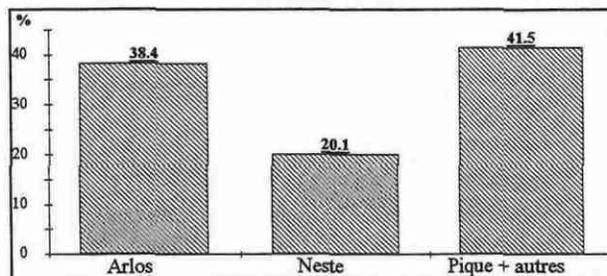


Graphique 2 - 22. Origine des apports (débits naturels) à la station de Verdun

L'origine des apports à la station de Valentine se décompose comme suit (cf. graphique 2-23) :

- 41.5 % des apports proviennent de la Pique, de l'Ourse, de la Neste et des apports intermédiaires entre les stations d'Arlos, de Beyrede et de Valentine (apports des aquifères alluviaux et des rivières secondaires);
- 38.4 % de la Garonne en amont d'Arlos;
- 20.1 % de la Neste en amont de la station de Beyrede.

L'apport de la Neste devrait être plus important mais la prise pour le canal de Sarrancolin dérive environ 7.2 m³/s.

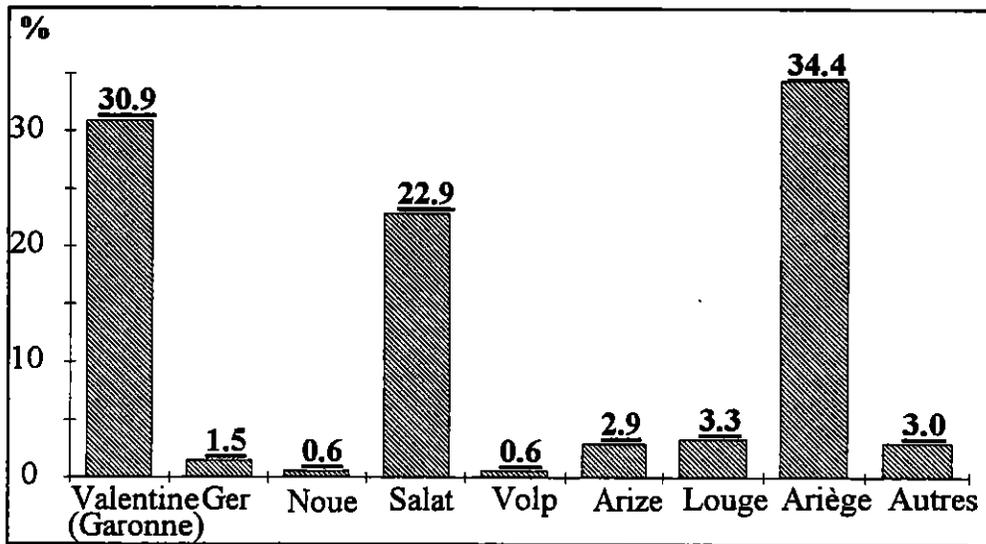


Graphique 2 - 23. Origine des apports à la station de Valentine, période 1973-1987

A Portet, les apports principaux proviennent de la Garonne en amont de Valentine (30.9 %), de l'Ariège (34.4 %) et du Salat (22.9 %) (cf. graphique 2-24). Les autres affluents participent faiblement à l'augmentation du débit :

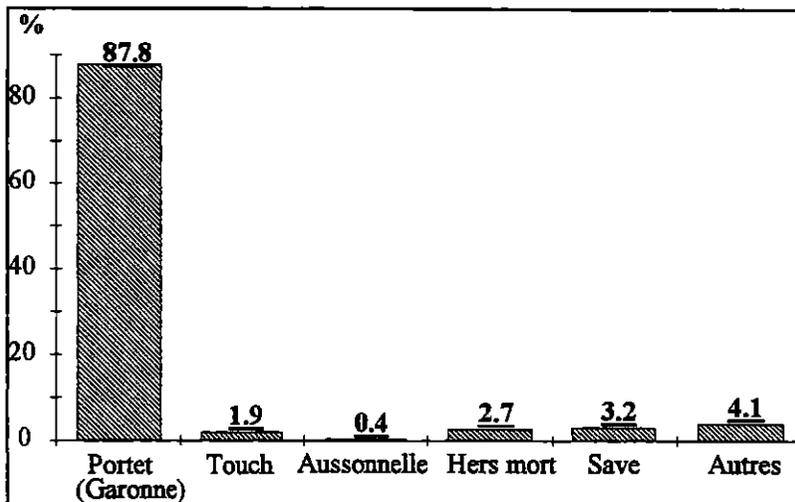
- le Ger (1.5 %);
- la Noue (0.6 %);
- le Volp (0.6 %);
- l'Arize (2.9 %);
- la Louge (3.3 %);
- autres (3 %).

La participation du Ger est sous-estimée, car la station hydrométrique ne prend pas en compte les apports du Job, principal affluent du Ger.



Graphique 2 - 24. Origine des apports à la station de Portet, période 1973-1987

A Verdun (cf. graphique 2-25), le débit est assuré par les apports de la Garonne à Portet (87.8 %). Les 12.2 % restant proviennent des apports de la Save (3.2 %), de l'Hers mort (2.7 %), du Touch (1.9 %), de l'Aussonnelle (0.4 %) et des autres apports intermédiaires (nappes alluviales et rivières secondaires) (4.1 %).



Graphique 2 - 25. Origine des apports à la station de Verdun, période 1973-1987

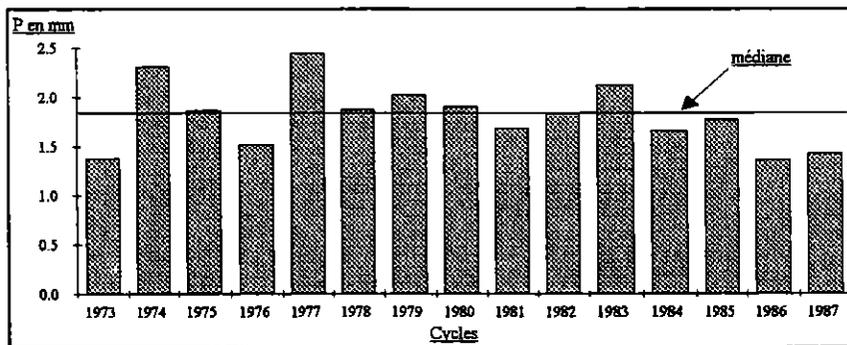
2.2.2. Apports par cycles hydrologiques

Deux cycles sont étudiés sur la période 1973 à 1987 : un cycle sec, le cycle 86, et un cycle humide, le cycle 77. Le choix de ces cycles s'appuie sur la chronique de la pluviométrie à Blagnac qui a permis d'établir la pluviométrie moyenne journalière (cf. tableau 2-3) (cf. graphique 2-26).

<u>Cycles</u>	<u>Durée (jours)</u>	<u>Pluviométrie annuelle (mm)</u>	<u>Pluviométrie moyenne journalière sur le cycle (mm)</u>
1973	308	425.1	1.4
1974	265	610.8	2.3
1975	453	846.1	1.9
1976	330	501.6	1.5
1977	400	979.2	2.5
1978	382	716.0	1.9
1979	328	665.2	2.0
1980	347	661.6	1.9
1981	416	699.7	1.7
1982	297	545.1	1.8
1983	380	807.7	2.1
1984	344	569.8	1.7
1985	416	738.8	1.8
1986	377	514.7	1.4
1987	410	586.4	1.4
<i>moyenne</i>	363.5	657.9	1.8
<i>médiane</i>		661.6	1.8

Tableau 2 - 3. Pluviométrie par cycles et moyenne journalière sur le cycle à Blagnac de 1973 à 1987

La pluviométrie respective du cycle 1977 et du cycle 86 est de 979.2 mm et de 514.7 mm. Ramenée à une moyenne journalière, elle correspond respectivement à 2.5 mm et 1.4 mm d'eau. La médiane sur l'ensemble de la période est de 661.6 mm. La pluviométrie moyenne journalière est de 1.8 mm.



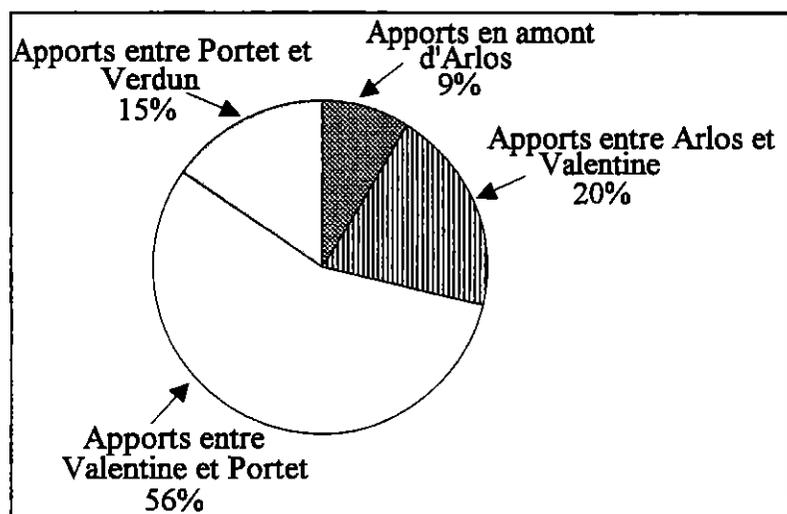
Graphique 2 - 26. Pluviométrie moyenne journalière par cycles hydrologiques à Blagnac, période 1973 à 1987

2.2.2.1. Un cycle humide, le cycle 1977

Nous avons placé, de la même façon que pour la période 1973-1987, les débits moyens de ce cycle humide sur le schéma hydraulique général (cf. figure 2-4).

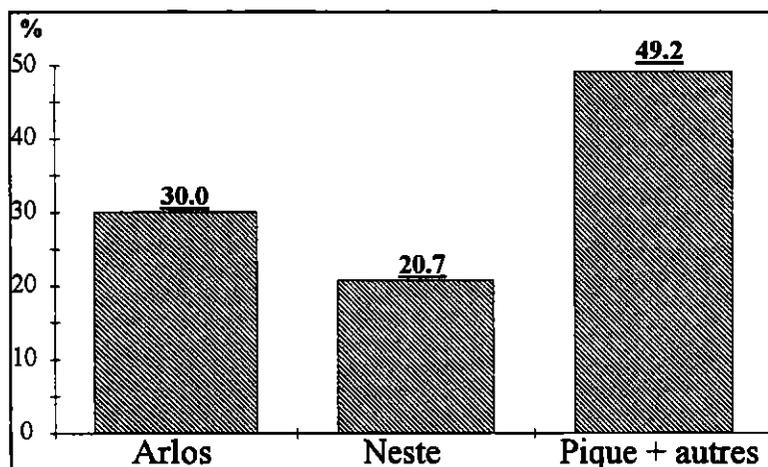
Le débit moyen à Verdun pour ce cycle est de 294 m³/s. Il est de 249.5 m³/s à Portet. La répartition des apports à Verdun est la suivante (cf. graphique 2-27) :

- 9 % en amont d'Arlos;
- 20 % entre Arlos et Valentine;
- 56 % entre Valentine et Portet;
- 15 % entre Portet et Verdun.



Graphique 2 - 27. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1977

Les principaux apports à la station de Valentine proviennent de la Pique, de l'Ourse, des petits affluents et des nappes alluviales situés entre les stations d'Arlos (Garonne), de Valentine (Garonne) et de Beyrede (Neste) (cf. graphique 2-28). L'alimentation principale à Portet provient des apports de la Garonne en amont de Valentine (32.9 %), des apports de l'Ariège (29.6 %) et du Salat (22.5 %) (cf. graphique 2-29).



Graphique 2 - 28. Origine des apports à la station de Valentine, cycle 1977

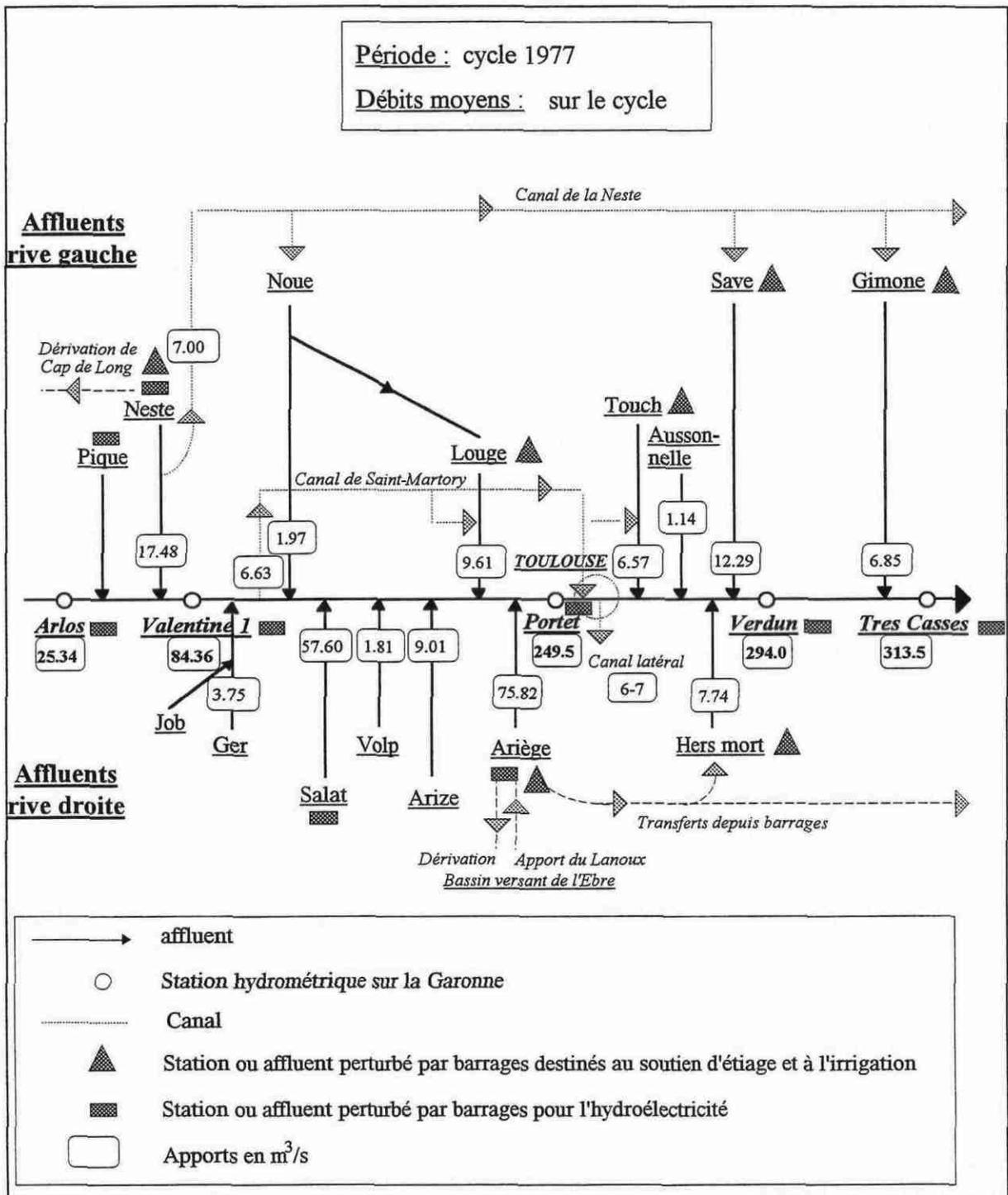
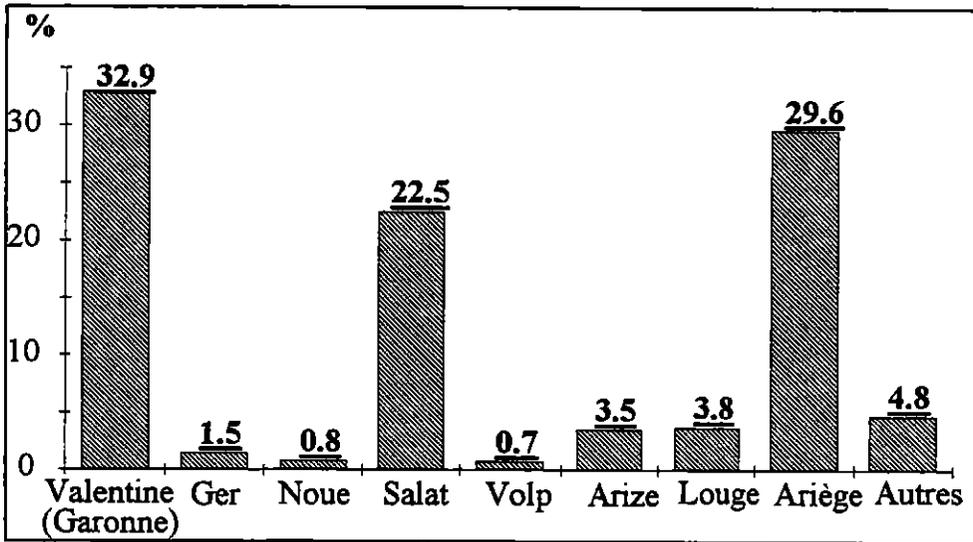
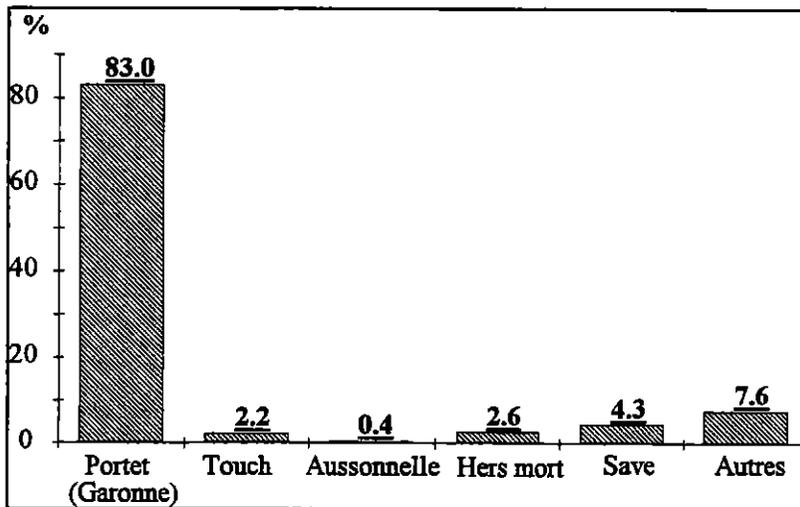


Figure 2 - 4. Débits moyens de la Garonne et des principaux affluents, cycle 1977



Graphique 2 - 29. Origine des apports à la station de Portet, cycle 1977

A Verdun (cf. graphique 2-30), le débit est assuré essentiellement par la Garonne en amont de Portet (83 %).



Graphique 2 - 30. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1977

2.2.2.2. Un cycle sec, le cycle 1986

Le débit moyen de ce cycle est de 145 m³/s à Portet (cf. figure 2-5) et de 163 m³/s à Verdun.

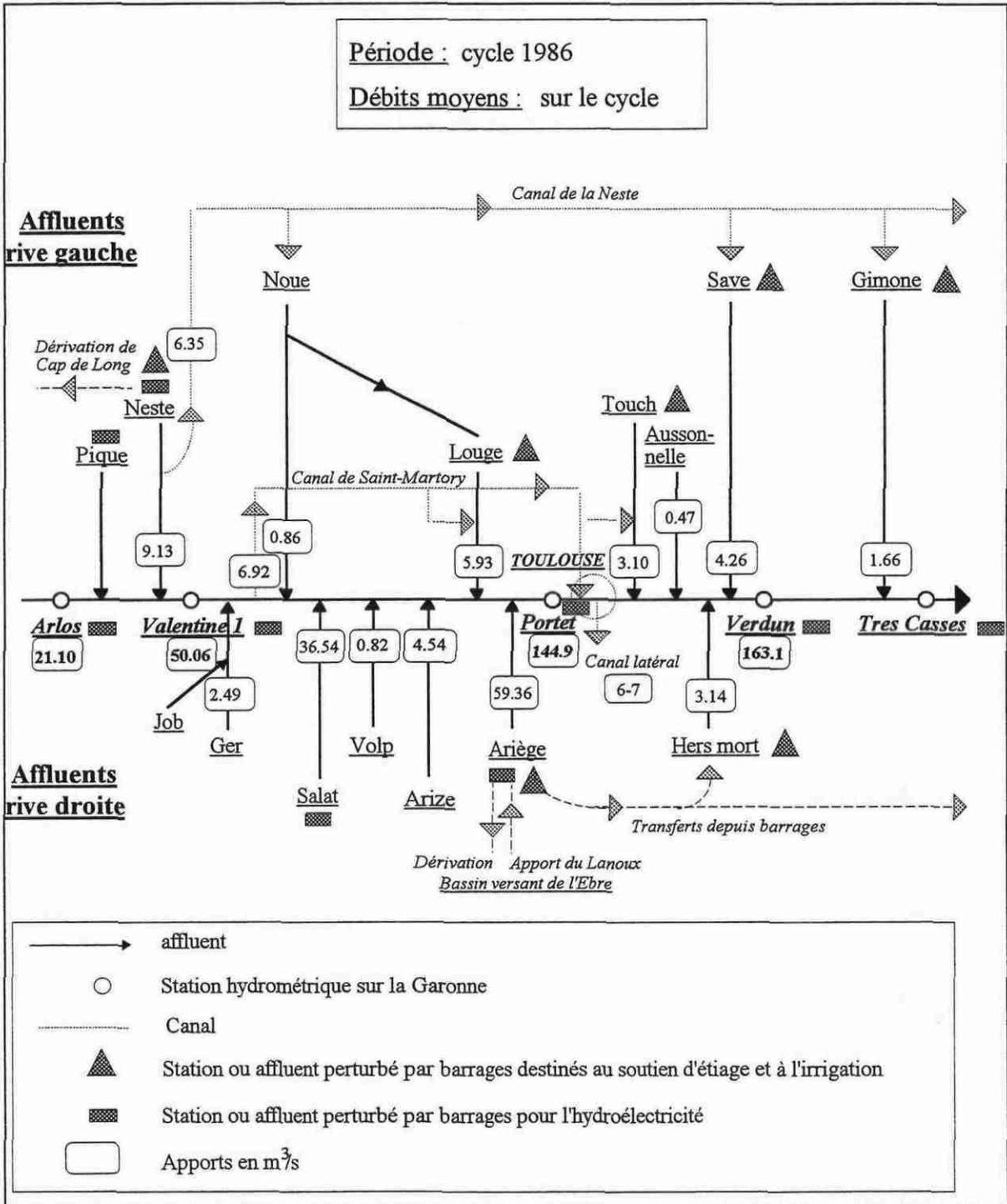
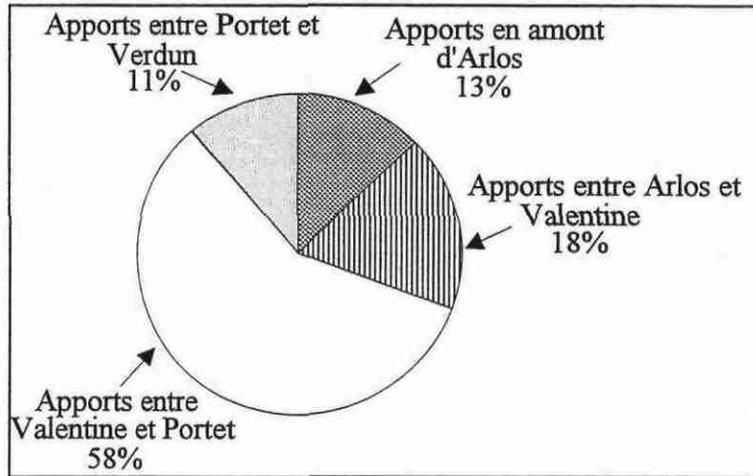


Figure 2 - 5. Débits moyens de la Garonne et des principaux affluents, cycle 1986

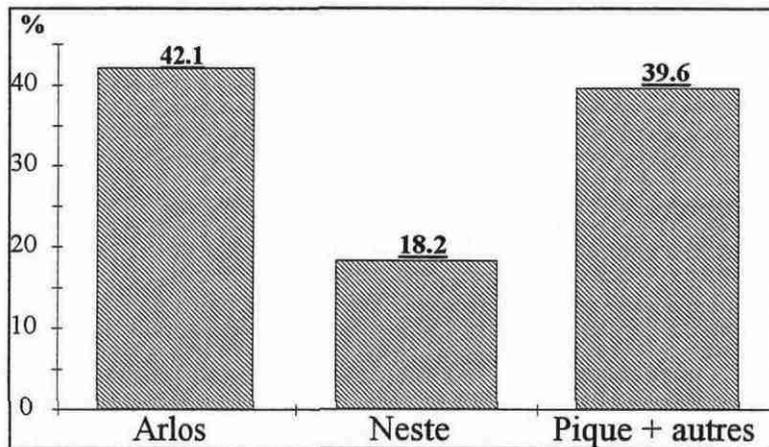
La répartition des apports à Verdun (cf. graphique 2-31) est un peu différente de celle du cycle humide :

- 13 % en amont d'Arlos;
- 18 % entre Arlos et Valentine;
- 58 % entre Valentine et Portet;
- 11 % entre Portet et Verdun.



Graphique 2 - 31. origine des apports à la station de Verdun, cycle 1986

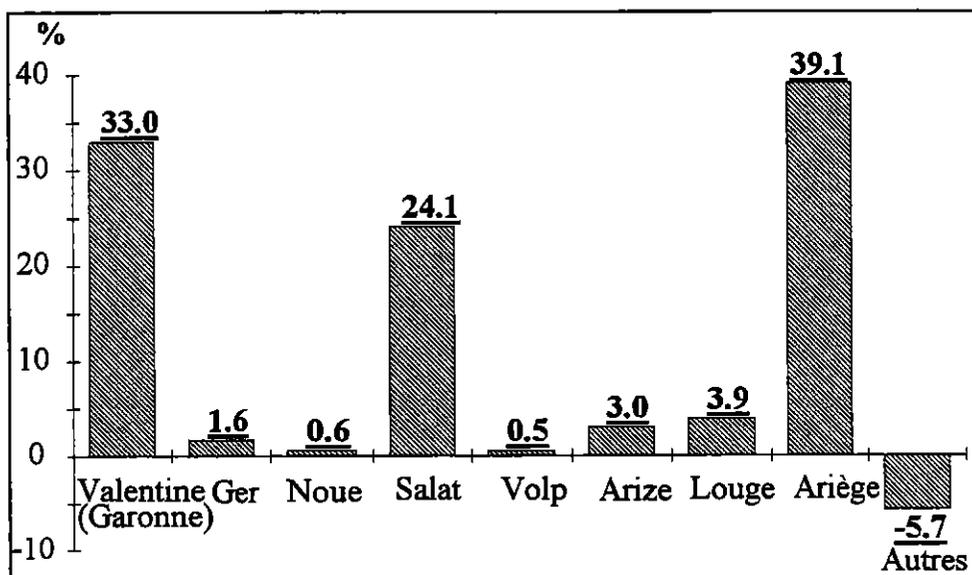
A Valentine (cf. graphique 2-32), les plus gros apports proviennent de la Garonne en amont d'Arlos (42.1 %) et du secteur compris entre Arlos-Beyrede-Valentine (39.6 %). Ce secteur détenait les apports principaux du cycle humide (49.2 %).



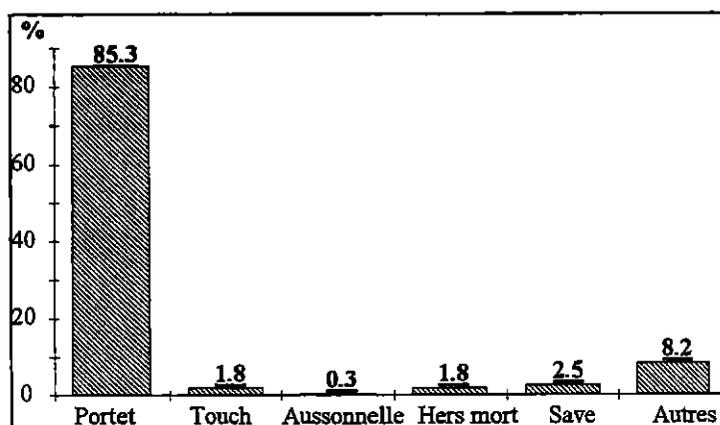
Graphique 2 - 32. Origine des apports à la station de Valentine, cycle 1986

A Portet (cf. graphique 2-33), la répartition des apports a changé par rapport au cycle 77 : la part de l'Ariège est de 39.1 % (elle occupe la première place), celle de la Garonne en amont de Valentine est de 33 % et celle du Salat est de 24.1 %. La mauvaise qualité des courbes de tarages pour les basses eaux, et les prélèvements agricoles pendant la période estivale, sont à l'origine d'un écart, d'environ 9 m³/s, entre la somme des apports des affluents et le débit mesuré à Portet. Ceci malgré l'apport d'eaux souterraines

A Verdun (cf. graphique 2-34), la participation de la Garonne en amont de Portet est plus forte (85.3 %).



Graphique 2 - 33. Origine des apports à la station de Portet, cycle 1986



Graphique 2 - 34. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1986

2.2.3. Apports mensuels

2.2.3.1. Apports en période d'étiage : exemple du mois d'août 1976

Cette période est intéressante du point de vue hydrogéologique, car les écoulements sont essentiellement souterrains, en l'absence de précipitations estivales. La distribution des apports sur le bassin révèle les principales zones de réserves souterraines.

L'évolution du débit le long de la Garonne (cf. figure 2-6) est croissant d'Arlos (7.54 m³/s) à Verdun (50.32 m³/s). Cependant, à Tres Casses, le débit moyen est de 36.93 m³/s. Ceci ne peut s'expliquer manifestement que par une erreur sur la courbe de tarage ou par des pompages pour l'irrigation.

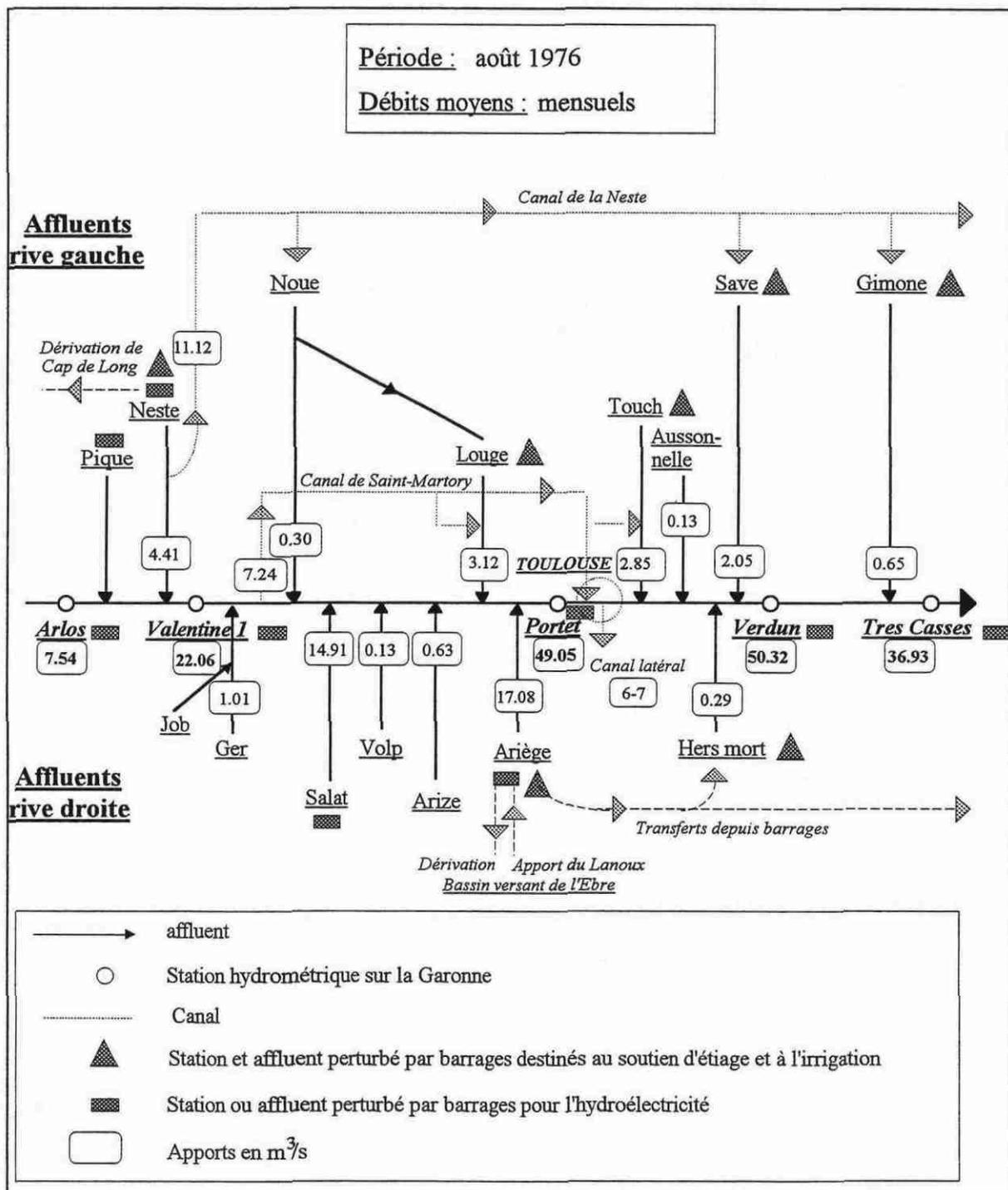


Figure 2 - 6. Débits moyens mensuels de la Garonne et des principaux affluents en août 1976

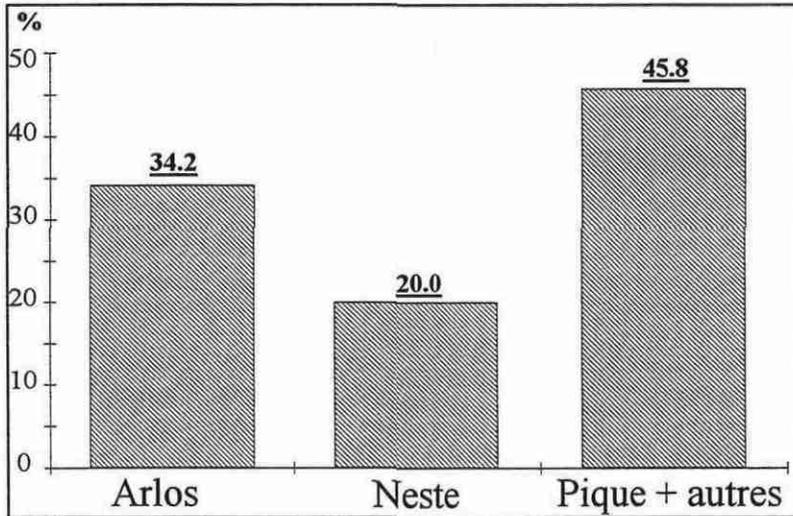
La distribution des apports à Verdun, en pourcentage, est différente suivant la nature du débit (cf. tableau 2-4) :

	Apports (%)	
	Débit mesuré	Débit naturel
en amont d'Arlos	15.0	10.4
entre Arlos et Valentine	28.9	30.3
entre Valentine et Portet	53.6	49.0
entre Portet et Verdun	2.5	10.3

Tableau 2 - 4. Distribution des apports à la station de Verdun, août 1976

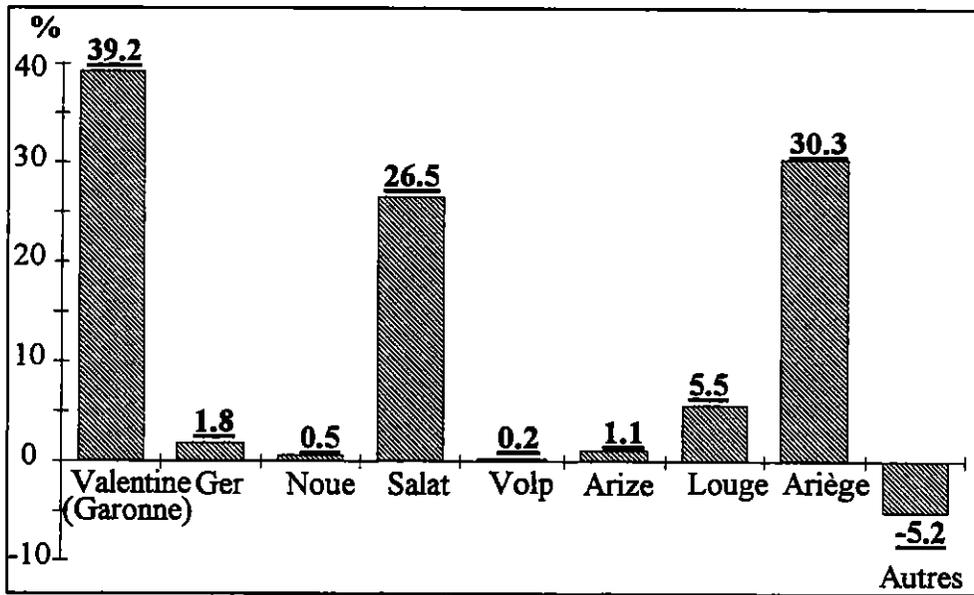
La principale zone d'apport souterrain, quel que soit le débit considéré, est située entre Valentine et Portet (apports de l'Ariège et du Salat). Les apports les plus faibles correspondent à la tranche Portet-Verdun. En ce lieu, les apports naturels, de 10.3 %, sont amputés de plusieurs m³ dérivés vers le canal latéral.

A la station de Valentine (cf. graphique 2-35), les apports principaux proviennent du secteur Arlos-Beyrede-Valentine (45.8 %) et de la Garonne en amont d'Arlos (34.2 %).



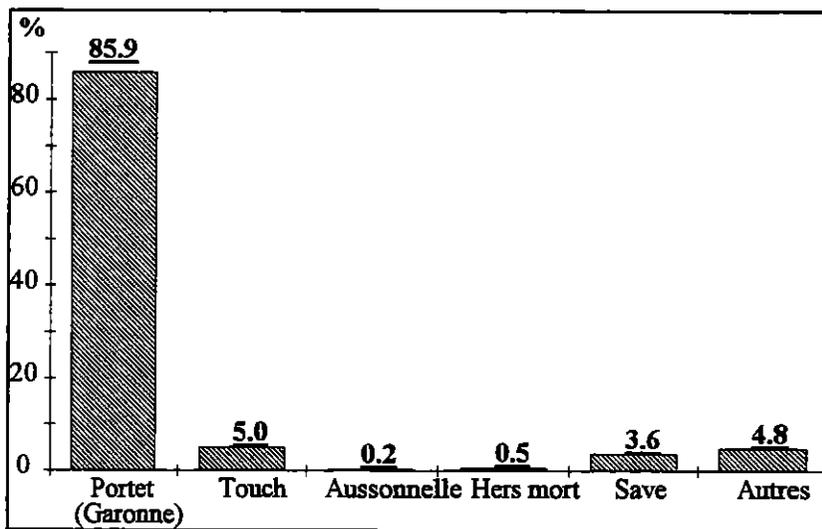
Graphique 2 - 35. Origine des apports à la station de Valentine, août 1976

Entre Valentine et Portet, le débit de la Garonne est essentiellement grossi par le Salat et l'Ariège (cf. graphique 2-36). Ces rivières représentent respectivement 39.9 % et 27 % des apports. Le reste des apports provient de la Garonne en amont de Valentine. Les affluents de la rive gauche participent faiblement, ils représentent 6 % des apports. Cette participation est encore plus faible naturellement, car ces rivières sont réalimentées.



Graphique 2 - 36. Origine des apports à la station de Portet, août 1976

En dépit des prélèvements pour le canal latéral (6-7 m³/s), le débit à Verdun est légèrement supérieur à celui de Portet, les apports naturels étant supérieurs aux débits dérivés. Il est assuré par les débits de la Garonne en amont de Portet à raison de 85.9 % (cf. graphique 2-37).



Graphique 2 - 37. Origine des apports à la station de Verdun, août 1976

2.2.3.2. Apports en période de hautes eaux : exemple du mois de novembre 1974

Les écoulements de cette période sont constitués par une partie souterraine et par une partie ruisselée. Les débits moyens sont élevés : 51 m³/s à Arlos, 126 m³/s à Valentine, 436 m³/s à Portet et 510 m³/s à Verdun (cf. figure 2-7).

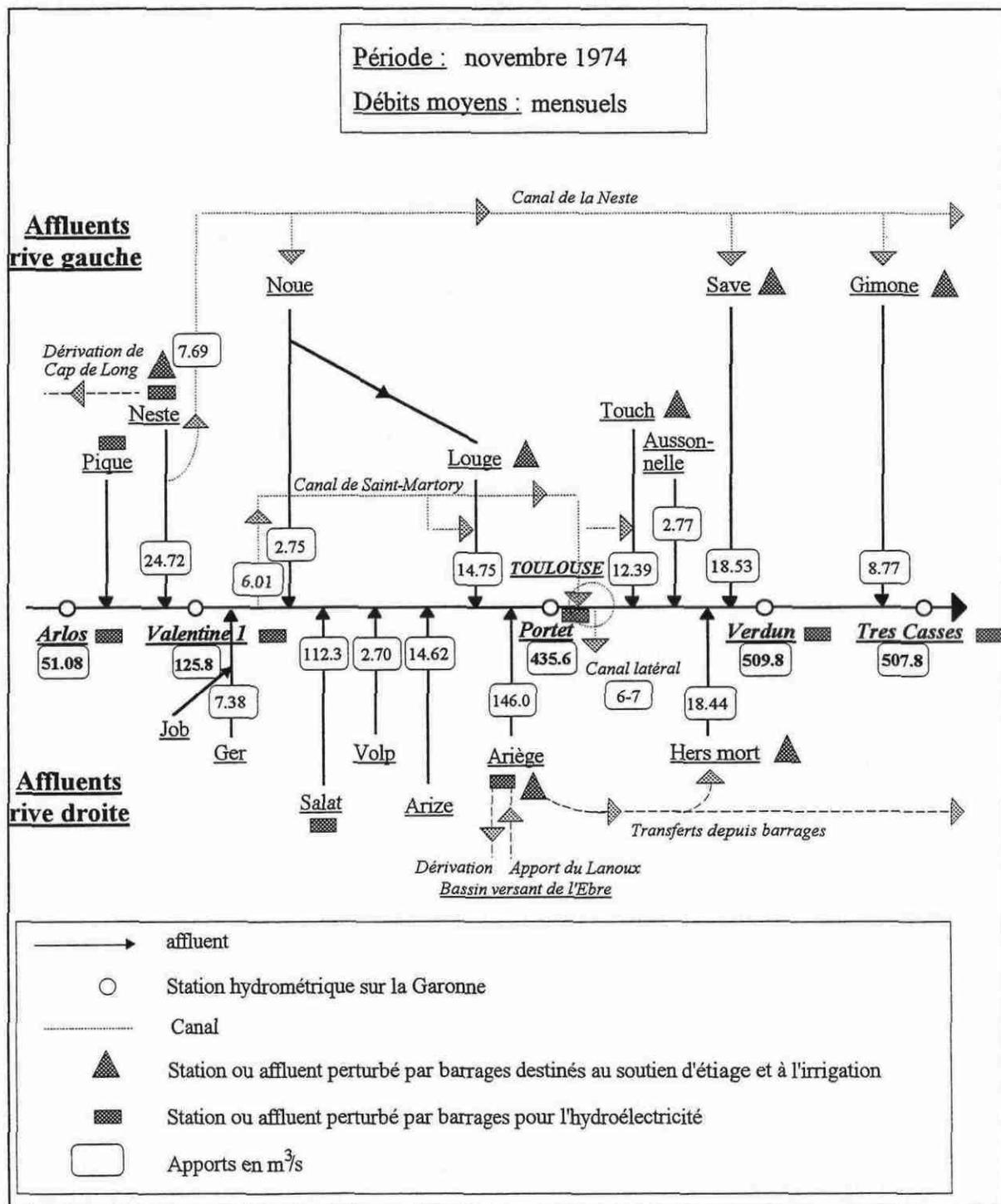
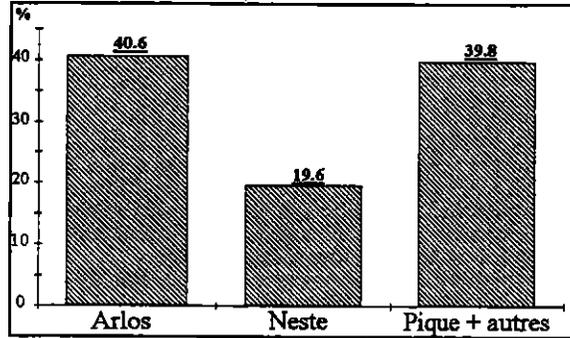
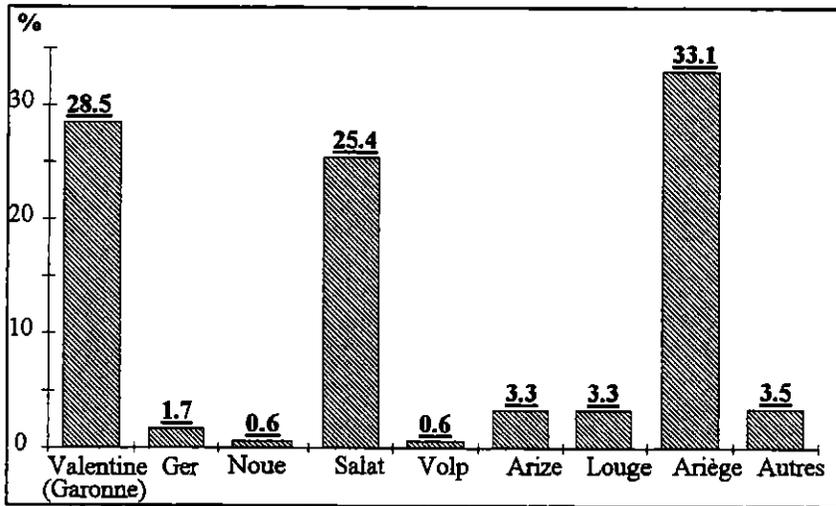


Figure 2 - 7. Débits moyens mensuels de la Garonne et des principaux affluents, novembre 1974

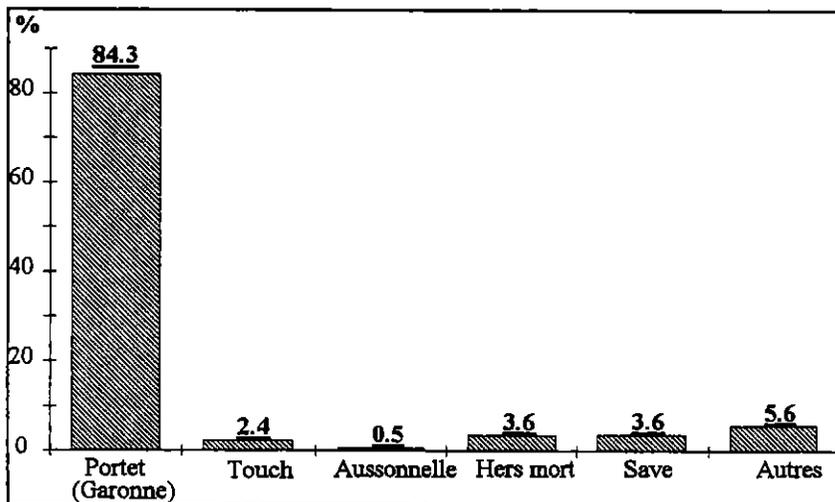
"Comme de coutume", nous avons représenté l'origine des apports à la station de Valentine, puis à la station de Portet et enfin à la station de Verdun (cf. graphique 2-38, graphique 2-39, graphique 2-40). Quelques différences sont à noter, nous le verrons dans le paragraphe suivant.



Graphique 2 - 38. Origine des apports à la station de Valentine, novembre 1974



Graphique 2 - 39. Origine des apports à la station de Portet, novembre 1974



Graphique 2 - 40. Origine des apports à la station de Verdun, novembre 1974

2.2.4. Comparaison entre cycle humide et cycle sec, et, mois d'étiage et mois de hautes eaux

Dans cette analyse, les apports sont calculés à partir des débits naturels, qui sont corrigés des prélèvements pour les canaux et de l'influence des barrages pour l'hydroélectricité. La répartition, à la station de Verdun, des apports naturels par cycles et au niveau mensuel est la suivante (cf. tableau 2-5) :

<u>Localisation</u>	<u>Apports par cycles</u>			<u>Apports mensuels</u>		
	<u>(%)</u>			<u>(%)</u>		
	<u>Cycle humide</u> <u>(1)</u>	<u>Cycle sec</u> <u>(2)</u>	<u>(1)-(2)</u>	<u>Hautes eaux</u> <u>(début de</u> <u>cycle)</u> <u>(3)</u>	<u>Etiage</u> <u>(4)</u>	<u>(3)-(4)</u>
En amont d'Arlos	7.9	11.6	↗	9.6	10.4	↗
Entre Arlos et Valentine	22.7	19.5	↘	15.9	30.3	↗
Entre Valentine et Portet	53.4	55.4	↗	59.2	49	↘
Entre Portet et Verdun	16.0	13.5	↘	15.3	10.3	↘
Débits à Verdun (m³/s)	315	184	131	530	73	457

Tableau 2 - 5. Comparaison des apports par cycles (cycles humide et sec) et des apports mensuels (période de hautes eaux et basses eaux), à la station de Verdun

Quelle que soit la période considérée, le débit à Verdun est assuré par les apports entre Valentine et Portet (50 % des apports environ), puis par les apports entre Arlos et Valentine. L'écart de débit à Verdun, entre le cycle humide de 1977, et le cycle sec de 1986, est de 131 m³/s. Les débits à Verdun peuvent donc varier pratiquement du simple au double. L'écart est encore plus fort au niveau mensuel : 457 m³/s.

La différence de la part des apports par cycles (1)-(2), et de la part des apports mensuels (3)-(4), est positive ou négative, ce qui met en évidence une augmentation ou une diminution des apports. Certaines d'entre elles sont intéressantes, car elles font intervenir le temps et rendent compte des régulations.

Par exemple, on note, entre Valentine et Portet, une augmentation de la part des apports entre cycle humide et cycle sec, et une diminution de ceux-ci entre hautes eaux et basses eaux. Ceci révèle par l'existence d'aquifères régulateurs entre Valentine et Portet. Ces derniers, comme le montre le tableau 2-6, sont situés sur le Ger, le Salat et l'Ariège. Ils sont de nature variée. Il s'agit d'aquifères karstiques, alluviaux et colluviaux.

L'augmentation de la part des apports, entre cycle humide et cycle sec, en amont d'Arlos, fait apparaître aussi la présence d'aquifères régulateurs. Ce sont les aquifères karstiques du Val d'Aran.

<u>Stations</u>	<u>Rivières</u>	<u>Apports par cycles</u> <u>(%)</u>			<u>Apports mensuels</u> <u>(%)</u>		
		<i>Cycle humide</i> <i>(1)</i>	<i>Cycle sec</i> <i>(2)</i>	<i>(1)-(2)</i>	<i>Hautes eaux</i> <i>(début de cycle)</i> <i>(3)</i>	<i>Etiage</i> <i>(4)</i>	<i>(3)-(4)</i>
Valentine	Garonne (Arlos)	27.4 (25.3)	37.2 (21.3)	↗	37.8 (51.1)	25.5 (7.54)	↘
	Pique + autres	38.8	34.6	↘	38.5	38.4	↘
	Neste	33.8	28.2	↘	23.6	36.1	↗
Portet	Garonne (Valentine)	35.1 (92.5)	36.0 (57.3)	↗	30.1 (135)	45.4 (29.6)	↗
	<i>Ger</i>	1.4	1.6	↗	1.6	1.5	↘
	Noue	0.7	0.5	↘	0.6	0.5	↘
	<i>Salat</i>	21.8	22.9	↗	25.0	23.0	↘
	<i>Volp</i>	0.7	0.5	↘	0.6	0.2	↘
	<i>Arize</i>	3.4	2.9	↘	3.3	1.0	↘
	Louge	3.6	3.7	↗	3.3	4.8	↗
	<i>Ariège</i>	28.6	37.5	↗	32.1	28.2	↘
Autres	4.6	-5.5	↘	3.4	-4.5	↘	
Verdun	Garonne (Portet)	83.7 (263.8)	86.5 (159.3)	↗	84.7 (448.6)	89.0 (65.3)	↗
	Touch	2.1	1.7	↘	2.3	3.9	↗
	Aussonnelle	0.4	0.3	↘	0.5	0.2	↘
	<i>Hers mort</i>	2.5	1.7	↘	3.5	0.4	↘
	Save	4.1	2.3	↘	3.5	2.8	↘
	Autres	7.2	7.6	↗	5.4	3.7	↘

- (en gras) : débit naturel en m³/s,
- En italique : affluents rive droite.

Tableau 2 - 6. Comparaison des apports par cycles (cycles humide et sec) et des apports mensuels (période de hautes eaux et basses eaux), à la station de Valentine, Portet et Verdun

2.2.5. Apports spécifiques en période d'étiage, exemple du mois d'août 1976

Le débit naturel, pendant cette période, provient uniquement de réservoirs souterrains et de réserves lacustres d'origine montagnarde. Le débit spécifique est le débit ramené à la surface du bassin considéré. Son utilisation permet de comparer et de localiser les plus importantes réserves.

Le débit spécifique exprimé en l/s/km² est calculé de la manière suivante :

$$Q_{\text{spécifique}} = \left(\frac{Q}{S} \right) \times 1000$$

avec :

- Q : débit en m³/s.
- S : superficie du bassin.

Les débits spécifiques du mois d'août 1976 sont placés sur la figure 2-8.

2.2.5.1. Evolution le long de la Garonne

Le débit spécifique est de 12.04 l/s/km² à Arlos, et de 13.27 l/s/km² à Valentine. A Portet et Verdun, le débit spécifique, plus faible, est respectivement de 6.54 l/s/km² et de 5.34 l/s/km².

A la station de Verdun, la distribution des apports spécifiques mensuels, et la distribution des superficies intermédiaires, sont identiques (cf. tableau 2-7 et graphique 2-41). L'apport mensuel principal et la superficie la plus élevée sont situés entre Valentine et Portet. A partir de Valentine, la part de l'apport mensuel est inférieure à la part de la superficie du secteur, ce qui n'était pas le cas en amont de Valentine. La densité la plus forte de réserves, pour le mois d'août 76, est donc présente en amont de Valentine. Ces réserves contribuent à 40 % du débit à Verdun. C'est un résultat intéressant.

<u>Secteur</u>	<u>Superficie du secteur (km²)</u>
En amont d'Arlos	626
Entre Arlos et Valentine	1604
Entre Valentine et Portet	7750
Entre Portet et Verdun	3750

Tableau 2 - 7. Superficie des bassins versants en amont des stations hydrométriques situées sur la Garonne

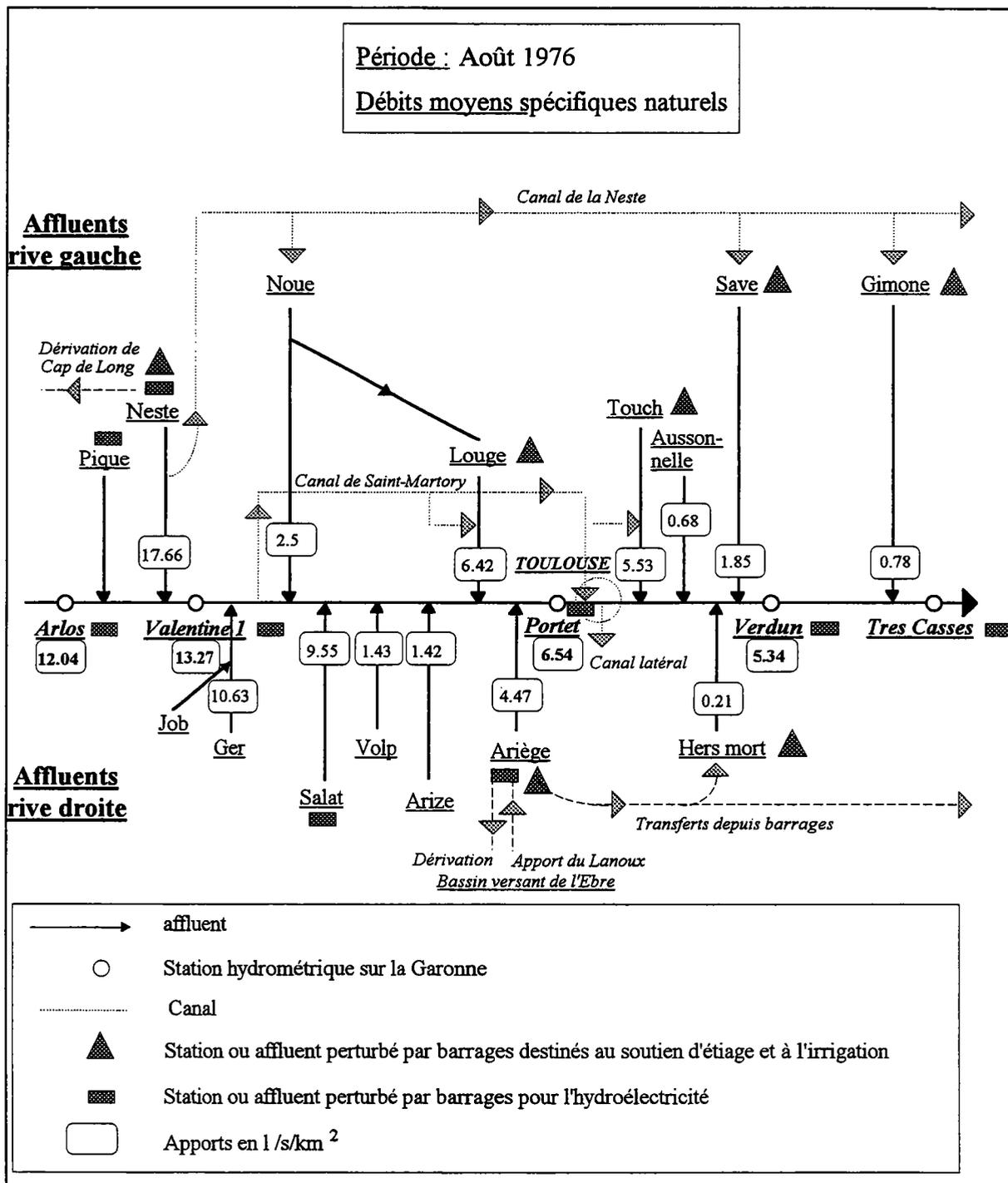
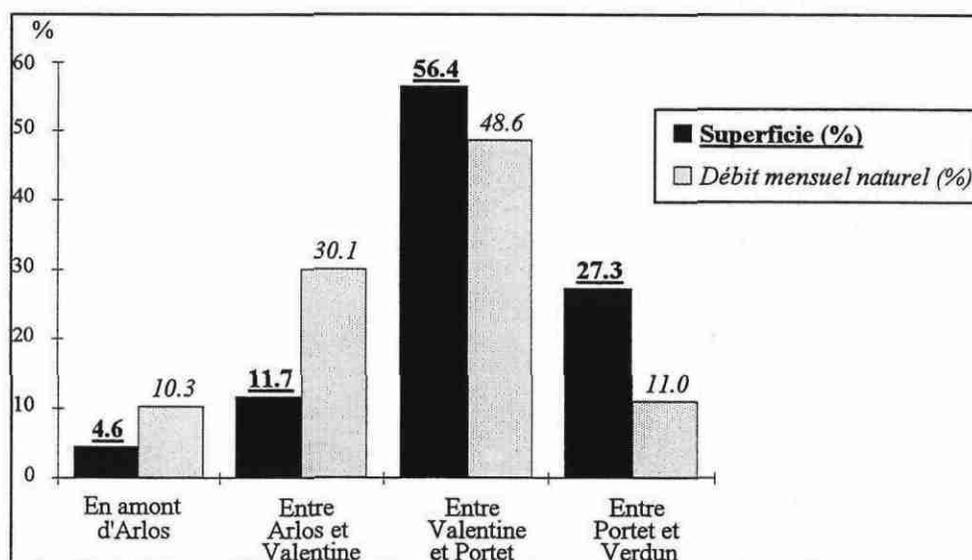


Figure 2 - 8. Débits spécifiques naturels de la Garonne et des principaux affluents, août 1976



Graphique 2 - 41. Part des Superficies et des apports mensuels naturels des bassins intermédiaires à la station de Verdun

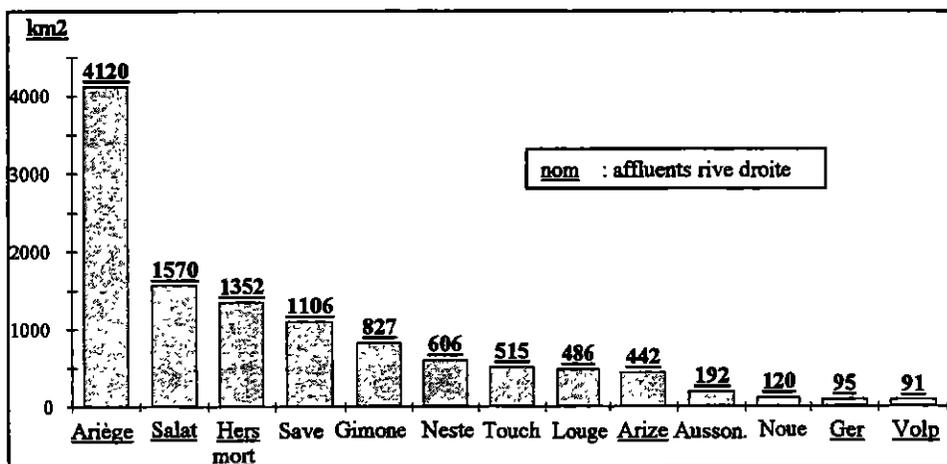
2.2.5.2. Apports des différents affluents

L'apport d'un affluent est, en théorie, proportionnel à la superficie de son bassin hydrographique. Sur le secteur étudié, les bassins les plus étendus sont : l'Ariège (4120 km²), le Salat (1570 km²), l'Hers mort (1352 km²) et la Save (1106 km²) (cf. tableau 2-8 et graphique 2-42).

<u>Rivières</u>	<u>Superficie du bassin (km²)</u>	<u>Rivières</u>	<u>Superficie du bassin (km²)</u>
Neste	606	Ariège	4120
Ger	95	Touch	515
Noue	120	Aussonnelle	192
Salat	1570	Hers mort	1352
Volp	91	Save	1106
Arize	442	Gimone	827
Louge	486		

Tableau 2 - 8. Superficie des bassins des différents affluents de la Garonne

La distribution des débits spécifiques des différents affluents de la Garonne devrait être identique à la distribution des superficies de leurs bassins versants, si les bassins étaient homogènes d'un point de vue hydrogéologique et climatique. Or, ce n'est pas le cas (cf. graphique 2-43). La distribution des débits spécifiques est tout à fait différente. L'homogénéité hydrogéologique et climatique n'est donc pas une réalité.



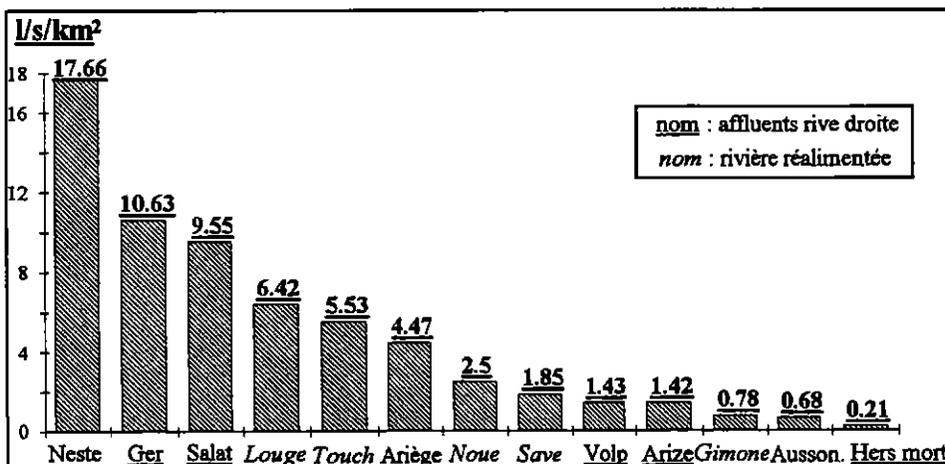
Graphique 2 - 42. Superficie des bassins des différents affluents de la Garonne

Le débit spécifique le plus élevé est celui de la Neste (17.7 l/s/km², 6^{ème} bassin en superficie). C'est un résultat étonnant, car ce bassin ne possède pas de réserves souterraines importantes connues. Par contre, il présente des réserves lacustres non négligeables, qui sont d'ailleurs utilisées pour l'hydroélectricité.

Le Ger possède le deuxième débit spécifique (10.6 l/s/km²). Il n'est pourtant que le 12^{ème} bassin en superficie. Mais c'est un bassin qui possède de fortes réserves souterraines de type karstique. Nous aurons l'occasion d'en reparler plus loin.

Ensuite, on trouve le Salat dont le débit spécifique est de 9.6 l/s/km² (2^{ème} bassin en superficie). Il possède aussi des aquifères karstiques et des formations colluviales (cf. chapitre rôle des aquifères karstiques).

L'Ariège n'arrive qu'au 6^{ème} rang avec un débit spécifique de 4.5 l/s/km². Elle est devancée par la Louge et le Touch, affluents de la rive gauche de la Garonne. En réalité, leur débit spécifique devrait être inférieur, car ces rivières sont réalimentées en été par l'intermédiaire de canaux. C'est la même chose pour les autres affluents de la rive gauche (Noue, Save et Gimone).



Graphique 2 - 43. Débits spécifiques naturels des différents affluents de la Garonne

L'Hers mort et l'Aussonnelle détiennent les débits spécifiques les plus faibles avec respectivement 0.21 l/s/km² et 0.68 l/s/km². Ce sont des bassins sans grande réserve souterraine.

Conclusions

Nous exposerons dans ce qui suit, les principaux résultats des différentes parties de ce chapitre consacré aux apports des différents affluents à la Garonne.

Indépendamment de la période étudiée, cycle hydrologique ou niveau mensuel, **la Garonne reçoit la plus grande part de ses apports entre la station de Valentine et la station de Portet, par le biais de la confluence de l'Ariège et du Salat.**

Le débit moyen de la Garonne à Portet, sur la période 1973-1987, est de 199 m³/s. Il est de 145 m³/s pour le cycle le plus sec, le cycle 1986, et de 250 m³/s pour le cycle le plus humide, le cycle 1977. Les variations climatiques interannuelles ont donc une influence importante sur le débit moyen.

Le bilan des apports, au niveau pluriannuel, est biaisé par les débits prélevés pour les canaux (Sarrancolin, Saint-Martory et canal latéral). Par contre, l'effet des barrages est négligeable. En effet, à long terme, les volumes stockés sont équivalents aux volumes déstockés. Cependant, au pas mensuel, l'influence des barrages est importante. A Portet, elle est de 30 %.

La comparaison des apports au niveau du cycle hydrologique et au niveau mensuel permet de mettre en évidence des zones régulatrices : ce sont les bassins du Ger, du Salat, de l'Ariège, et le bassin en amont de la station d'Arlos sur la Garonne.

Enfin, l'étude des apports spécifiques naturels du mois d'août 1976 montre que la répartition des réserves souterraines sur le bassin n'est pas homogène. **Le débit spécifique le plus élevé est celui de la Neste avec 17.7 l/s/km².** Les apports de cet affluent proviennent de réserves souterraines et de réserves lacustres. **Viennent ensuite, le Ger dont le débit spécifique est de 10.6 l/s/km² et le Salat, avec 9.55 l/s/km².** Tous deux sont alimentés par des aquifères karstiques et colluviaux. Ces résultats confirment l'étude sur la comparaison des apports. Enfin, l'Hers mort possède le plus faible débit spécifique (0.21 l/s/km²). Il n'a pas de réserve souterraine importante.

Cette partie concernait surtout l'aspect hydrologique du bassin, mais elle a permis de définir quelques secteurs hydrogéologiques importants. La partie suivante est consacrée entièrement à la contribution des eaux souterraines aux débits de la Garonne. Elle aura tout d'abord pour but de préciser le rôle des aquifères karstiques et celui des aquifères alluviaux. Dans un deuxième temps, elle apportera une estimation des réserves souterraines et des écoulements souterrains durant un cycle hydrologique.

**3. CONTRIBUTION DES EAUX
SOUTERRAINES AUX DEBITS
DES EAUX DE SURFACE**

3.1. Comportement et apports des aquifères

3.1.1. Détermination et approche du rôle des aquifères alluviaux : exemple de la nappe alluviale de l'Ariège.

Introduction.

Les aquifères alluviaux sont des nappes libres associées à un cours d'eau. Ils sont souvent composés d'alluvions plus ou moins grossières dont la perméabilité est variable, mais généralement comprise entre 10^{-1} et 10^{-5} m/s.

Les échanges entre la nappe et le cours d'eau peuvent avoir lieu dans les deux sens. Dans un cas, la rivière a un rôle drainant, dans l'autre, elle a un rôle d'alimentation. Les deux rôles sont aussi compatibles. Les variations du niveau piézométrique de l'aquifère sont liées à la pluviométrie et au niveau de la rivière associée.

La première partie de ce chapitre est un exposé des méthodes de quantification des apports alluviaux au réseau hydrographique. La deuxième partie est consacrée à la détermination des apports de la nappe de l'Ariège entre Foix et Saverdun, à partir des débits des stations hydrométriques.

3.1.1.1. Méthodes de détermination des apports alluviaux et critiques.

Plusieurs méthodes sont possibles :

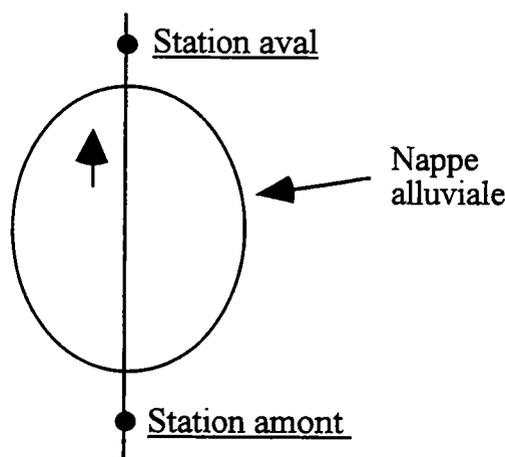
- utilisation des pluies efficaces;
- utilisation de stations hydrométriques en amont et en aval de la nappe;
- utilisation de relevés piézométriques;
- décomposition de l'hydrogramme;
- utilisation de modèles : modèle maillé, modèle pluie débit avec réservoir, modèle couplé.

3.1.1.1.1. Utilisation des précipitations efficaces.

A partir d'un bilan hydrique annuel, prenant en compte les précipitations, l'E.T.P. (Evapotranspiration Potentielle), l'E.T.R. (Evapotranspiration Réelle) et la R.F.U. initiale (Réserve Facilement Utilisable), on peut estimer les précipitations efficaces, fraction des précipitations intervenant dans la recharge de l'aquifère. Intégrée sur l'ensemble de l'aquifère et sur un cycle hydrologique, cette fraction permet de quantifier l'apport de la nappe. Il faut bien sûr supposer que la totalité des pluies, ou une quantité équivalente, reparte au réseau et que la nappe possède un comportement dynamique saisonnier. Ceci n'est pas souvent le cas dans la nature, puisqu'une partie des pluies peut servir à la recharge des nappes, suite à des cycles déficitaires. Cette méthode ne permet donc d'approcher que d'une façon grossière, l'apport de la nappe au réseau.

3.1.1.1.2. Utilisation des débits de stations hydrométriques.

La méthode consiste à soustraire les débits de deux stations hydrométriques placées en amont et en aval de la nappe alluviale. Si les stations sont assez proches on utilise le pas journalier. Sinon il est préférable de prendre un pas hebdomadaire, mensuel ou annuel en raison du déphasage entre les deux hydrogrammes.



Si la nappe alluviale comprend l'intégralité de la superficie du bassin entre les deux stations, les apports intermédiaires sont les apports de la nappe alluviale. Une partie, ruisselée, intervient tout de même pendant les épisodes pluvieux.

$$Q_{\text{station en aval}} - Q_{\text{station en amont}} = \text{apports du bassin intermédiaire} = Q_{\text{souterrain}}$$

Cette méthode nécessite bien sûr de posséder des chroniques de débits en amont et en aval de la nappe sur une période identique. Mais il faut surtout s'assurer de la sensibilité des stations. En effet, les débits ne sont pas toujours évalués avec précision et la différence de débit entre les deux chroniques (chronique résultante) peut seulement figurer les incertitudes liées aux mesures. Il est donc indispensable de traiter la chronique résultante afin de valider l'opération. Sont utilisées pour cela les analyses corrélatoires et spectrales.

3.1.1.1.3. Utilisation de niveaux piézométriques.

3.1.1.1.3.1. A un instant donné.

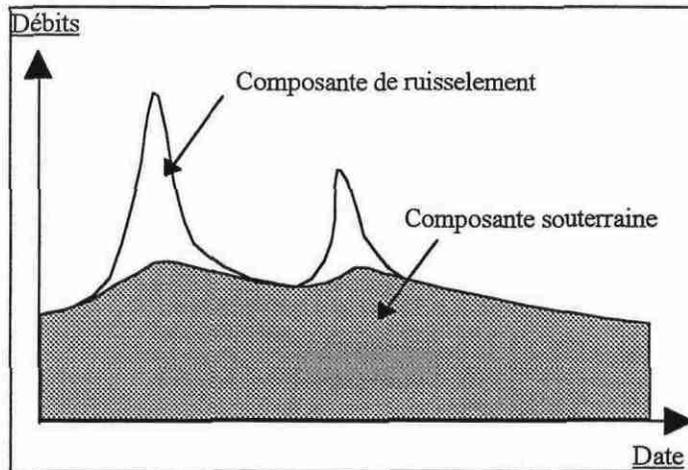
Une carte piézométrique est établie à partir de puits, de forages et de plans d'eau naturels. Généralement, une carte est dressée en période de hautes eaux, puis en période de basses eaux. Ceci dans le but de caractériser l'évolution du niveau de la nappe et la variation des réserves. Un coefficient d'emmagasinement moyen, obtenu par pompage d'essai, est nécessaire afin d'évaluer le volume des réserves. Cette méthode permet de déterminer, simplement, les apports annuels de la nappe au réseau hydrographique.

3.1.1.1.3.2. Avec un enregistrement continu.

A partir d'un enregistrement qui décrit en permanence l'évolution du niveau de la nappe, on peut déduire la variation des réserves, en extrapolant à l'ensemble de la nappe. Cette extrapolation ne peut s'appliquer qu'à un aquifère homogène, continu et possédant une transmissivité unique. Pour les aquifères alluviaux n'entrant pas dans cette catégorie, il est nécessaire de doubler l'enregistrement de plusieurs relevés piézométriques dans l'espace (en différents points de la zone d'étude) et dans le temps (au cours de plusieurs campagnes). Cette méthode permet de déterminer les apports de la nappe au réseau hydrographique de façon permanente.

3.1.1.1.4. Décomposition de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin.

En la matière, la méthode la plus utilisée, consiste à séparer graphiquement l'hydrogramme en une partie souterraine et une partie de ruissellement (cf. chapitre décomposition de l'hydrogramme). Elle nécessite une bonne connaissance du bassin hydrogéologique.



3.1.1.1.5. Utilisation de modèles.

Les modèles nécessitent généralement des paramètres physiques inhérents à l'aquifère. Ils ont pour objet essentiel de figurer le fonctionnement de la nappe et de simuler les variations futures du niveau piézométrique, à partir d'un calage réalisé avec un enregistrement piézométrique continu ou des états ponctuels de la nappe.

Il existe plusieurs modèles. Le modèle maillé est utilisé pour figurer le fonctionnement de l'aquifère et déterminer le transfert de certains polluants. Le modèle à réservoirs de type pluie-débit (modèle Gardénia) simule les variations piézométriques de la nappe à long terme. Cependant, il n'y a pas de modèle adapté à la détermination des apports de la nappe au réseau. Seul, le modèle couplé Dynania mis au point au BRGM pourrait rendre compte de cette apport.

3.1.1.2. Apports de la nappe de l'Ariège.

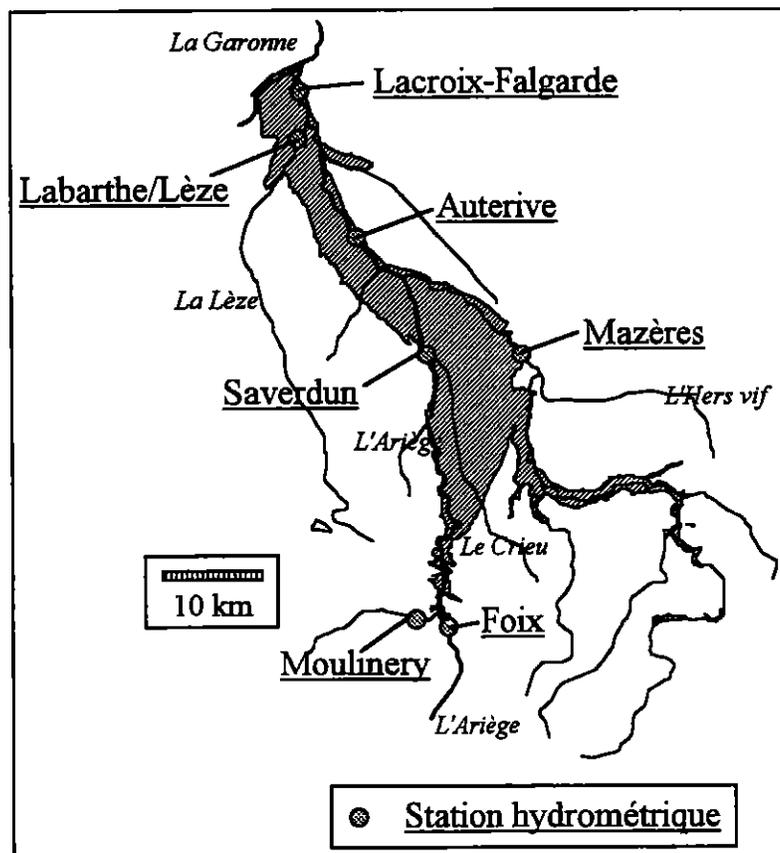
3.1.1.2.1. Présentation de la nappe

La nappe alluviale de l'Ariège s'étend sur environ 200 km²; elle est située au sud de Toulouse, entre Foix et Lacroix-Falgarde (cf. carte 3-1). C'est une nappe libre constituée de formations alluvionnaires du Quaternaire. Ces formations se répartissent en plusieurs tranches :

- les hauts niveaux;
- les hautes terrasses;
- la moyenne terrasse;
- la basse terrasse;
- la basse plaine qui contient les alluvions les plus récentes.

Les alluvions de la basse terrasse et de la basse plaine sont formées par des grains de quartz enveloppés dans une matrice argilo-sableuse. Elles présentent, avec les alluvions du

Crieu, les meilleures transmissivités, et elles constituent l'aquifère principal. L'épaisseur de la zone noyée est en moyenne de 5 m et les transmissivités sont comprises entre $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les alluvions du Crieu).



Carte 3 - 1. Nappe de l'Ariège et réseau hydrométrique

L'aquifère est alimenté par les eaux de précipitations et localement par le réseau de surface, la rivière du Crieu notamment (M.T. CUGNY, 1980) et l'Ariège dans la région de Saint-Jean-du-Falga. Plusieurs campagnes de relevés piézométriques ont montré que le sens d'écoulement de la nappe est dirigé vers l'Ariège dont le cours est très encaissé. Le coefficient de tarissement de la nappe a été mesuré à partir de quelques enregistrements dans la basse plaine. Il est proche de 0.006 j^{-1} .

3.1.1.2.2. Données existantes.

Il n'existe pas d'enregistrements continus de la nappe. Les données sont surtout ponctuelles :

- cartes piézométriques dressées par Marie Thérèse CUGNY :
 - en haute eaux (mars 1978);
 - en basse eaux (octobre 1978);
- cartes piézométriques de la nappe du Crieu établies par la CACG :
 - en mai et juin 1968;
 - en novembre 1978;
- quelques enregistrements limnigraphiques de très courte durée, à l'exception du puits du lycée agricole de Pamiers où il existe un limnigramme pluriannuel (enregistrement à partir de fin 1968 jusqu'à début 1971).

Les variations annuelles du niveau piézométrique calculées à partir des précipitations efficaces pour l'année 1978 (M.T. CUGNY, 1980), ont permis d'estimer à 20 millions de m³ les apports souterrains, le réservoir souterrain total étant de 50 millions de m³.

3.1.1.2.3. Utilisation des débits des stations hydrométriques.

La piézométrie n'étant pas enregistrée de façon continue, nous avons utilisé les débits des stations hydrométriques existantes.

3.1.1.2.3.1. Les débits disponibles.

Il existe sept stations hydrométriques entre Foix et Lacroix-Falgarde. Cependant, les années d'enregistrement ne sont pas toujours synchrones (cf. tableau 3-1). Quatre stations sont positionnées sur l'Ariège : celle de Foix, de Saverdun, d'Auterive et de Lacroix-Falgarde. Les autres stations sont sur les principaux affluents : Mazères sur l'Hers et Labarthe/Lèze sur la Lèze.

<u>Stations</u>	<u>Gestionnaire</u>	<u>Période(s) disponible(s)</u>
Foix	SHC	1906-88
Moulinery*	SHC	1918-27, 1931-38
Saverdun	SHC	1906-44, 1969-74, 1978-79
Mazères	SHC	1911-40, 1966-88
Auterive	SHC	1966-90
Labarthe/Lèze	SRAE	1968-88
Lacroix-Falgarde*	SHC	1911-40

(* : stations hors service).

Tableau 3 - 1. Périodes d'enregistrements des stations hydrométriques dans le bassin de l'Ariège

3.1.1.2.3.2. Etude entre Foix et Saverdun.

Ces deux stations ont été choisies parce qu'elles disposent d'enregistrements communs (période 1906 à 1944), et qu'elles ne subissent pas l'influence de gros affluents. De plus, les apports intermédiaires représentent pratiquement les apports de la nappe.

3.1.1.2.3.2.1. Apports durant l'année

La méthode de soustraction des débits moyens journaliers entre les deux stations s'avère inutilisable. En effet, le résultat de la différence est souvent incohérent : la résultante est négative et non structurée. Cette incohérence peut être due à :

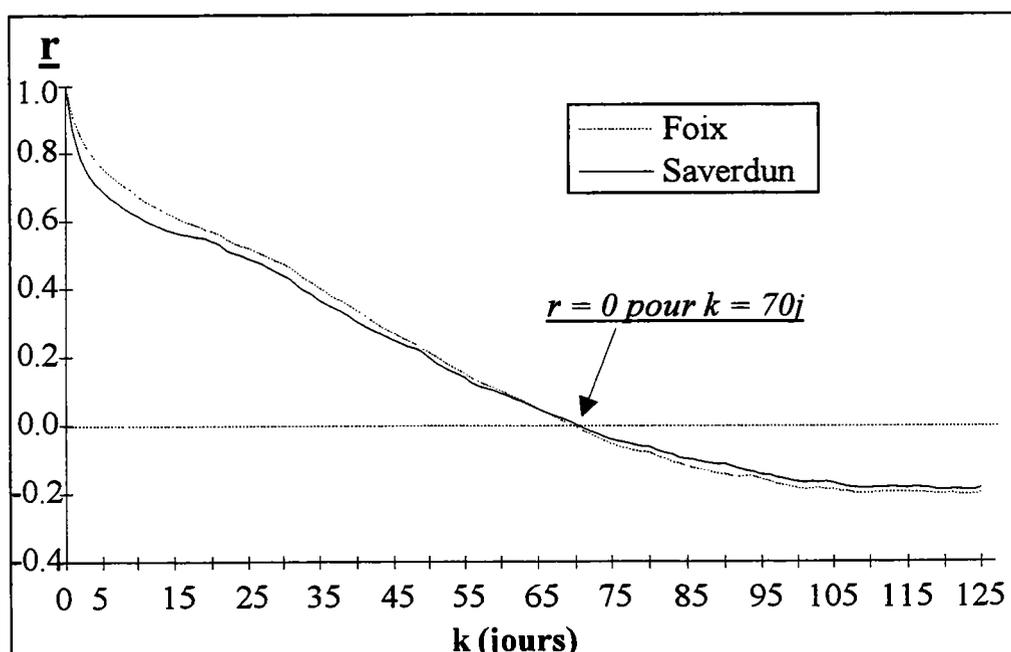
- un déphasage entre les deux chroniques lié à la distance qui sépare les deux stations;
- l'imprécision des mesures des débits moyens journaliers;
- une corrélation trop forte entre les débits des deux stations du fait de leur proximité.

Afin de palier cette difficulté, une autre méthode est proposée. Elle est basée sur l'hypothèse qu'une augmentation régulière du débit est proportionnelle à la superficie du bassin versant intermédiaire. La méthode n'apporte pas de résultats quantitatifs, mais permet de savoir s'il existe des apports intermédiaires provenant de la nappe et, dans ce cas de connaître leur distribution.

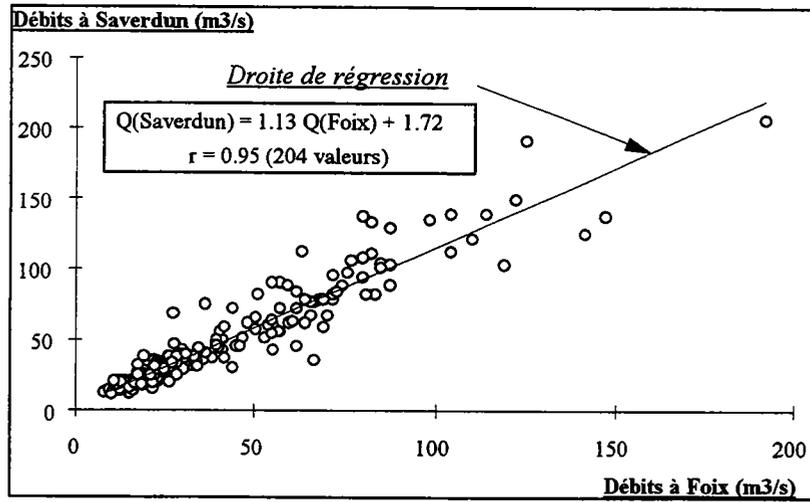
La démarche suivie pour l'étude entre Foix et Saverdun est donc la suivante :

- pour s'affranchir de la corrélation importante des débits entre les deux stations, les chroniques sont discrétisées suivant un pas précis, à partir duquel la corrélation est nulle. Ce pas est déterminé sur le corrélogramme des débits (cf. graphique 3-1);
- on calcule ensuite, la régression entre les débits des nouvelles chroniques discrétisées en prenant comme référence la station en amont, c'est-à-dire ici la station de Foix (cf. graphique 3-2);
- la régression permet ensuite de reconstituer une chronique théorique à Saverdun (cf. graphique 3-3);
- in fine, on compare les débits réels aux débits calculés. La différence entre les deux est appelé résidu (cf. graphique 3-4). Son étude permet de connaître le comportement de la nappe.

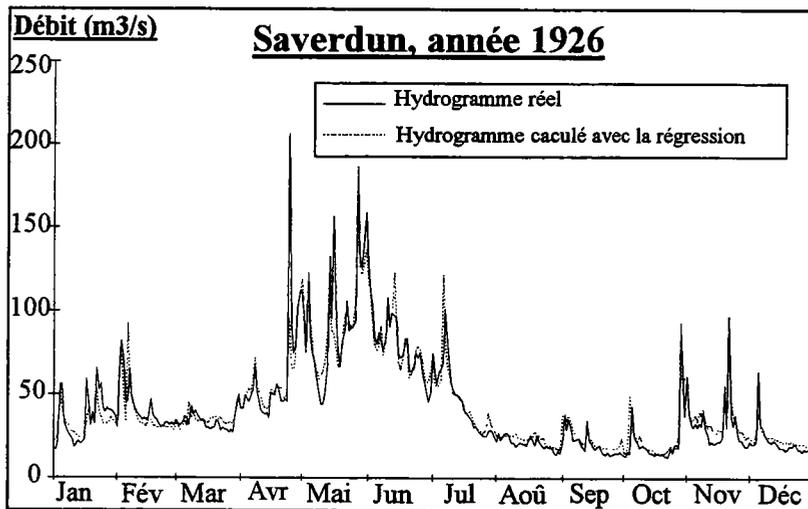
Le résultat de cette analyse, faite entre Foix et Saverdun, montre que l'on a bien une augmentation du débit. Le corrélogramme et le spectre du résidu permettent de dire que la nappe alluviale ne participe pas beaucoup à l'alimentation de l'Ariège et qu'elle ne joue aucun rôle régulateur.



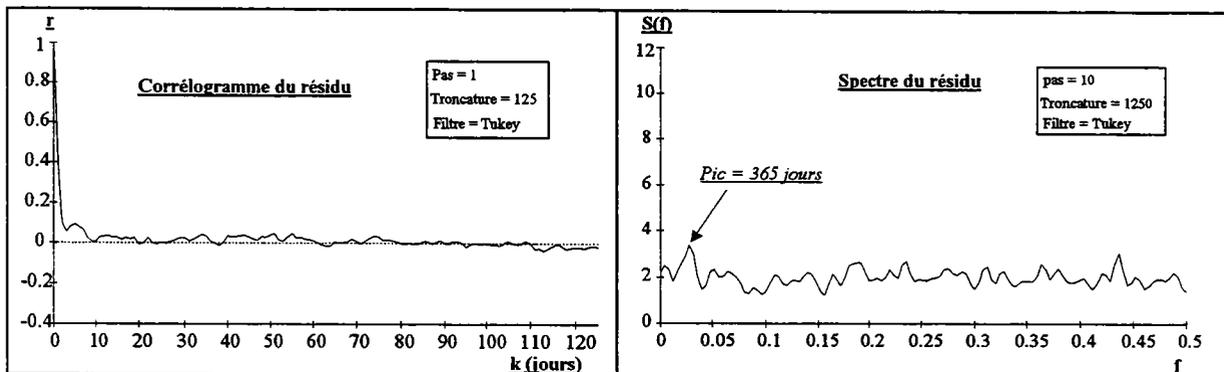
Graphique 3 - 1. Corrélogramme des débits à Foix et à Saverdun, période 1906-1944, fenêtre [1, 125] et filtre de Tukey



Graphique 3 - 2. Régression au pas de 70 jours entre les débits à Saverdun et les débits à Foix, période 1906-1944



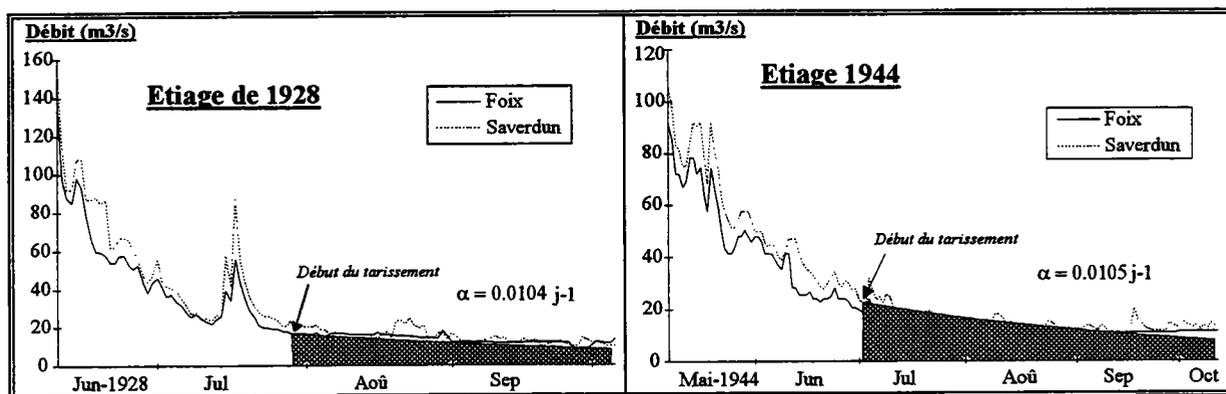
Graphique 3 - 3. Hydrogrammes réel et calculé à Saverdun, exemple de l'année 1926



Graphique 3 - 4. Corrélogramme (1, 125) et spectre (10, 1250) du résidu

3.1.1.2.3.2.2. Apport en étiage.

D'après l'analyse du tarissement de 1928 et 1944 (période où le tarissement est visible), les apports entre les deux stations sont faibles. Pour les deux périodes, le coefficient de tarissement des deux stations est proche de 0.01 j^{-1} (cf. graphique 3-5). Pourtant, on a vu qu'il existait des échanges entre la nappe et la rivière. Il est à supposer que ces échanges ont lieu en période de crues, au printemps.



Graphique 3 - 5. Tarissement de l'Ariège à Foix et Saverdun, étiage 1928 et 1944

Conclusion.

1) Rôle de la nappe alluviale de l'Ariège entre Foix et Saverdun.

L'étude des apports entre Foix et Saverdun bouleverse un peu la vision actuelle du comportement de la nappe. **La participation de la nappe à l'alimentation du cours d'eau est faible, les principaux échanges ont lieu en période de crue. De plus, la nappe ne joue pas vraiment un rôle régulateur.**

2) Données disponibles sur les autres nappes alluviales.

Le bassin de la Garonne est composé de plusieurs nappes alluviales qui se répartissent le long du fleuve principal et sur quelques uns de ses affluents. Les principaux aquifères alluviaux sont :

- l'aquifère alluvial de la vallée de la Garonne;
- l'aquifère alluvial entre Montréjeau et la confluence Garonne-Salat;
- l'aquifère alluvial de la vallée de la Neste;
- les formations fluvio-glaciaires de la moyenne vallée de la Garonne, de Jaunac à Marignac;
- le complexe glaciaire de Mauléon-Barousse;
- les aquifères alluviaux des rivières secondaires.

Ces aquifères, à partir des années 60, ont fait l'objet de plusieurs études qui ont abouti à de nombreux rapports et à des cartes piézométriques au 1/50000 concernant surtout, les nappes dans la vallée de la Garonne :

- carte de Grenade (1972);

- carte de Toulouse-Ouest (1963 à 1968);
- carte de Muret (printemps 1969);
- carte de Cazères (automne 1970);
- carte dressée au printemps 1970 par O. PAYET entre Montréjeau et la confluence Garonne-Salat.

Le réseau piézométrique actuel du bassin de la Garonne comprend en tout et pour tout deux piézomètres. Ils sont situés dans le Tarn-et-Garonne, en rive droite de la Garonne. Il s'agit du piézomètre de Saint-Porquier dans la basse plaine et du piézomètre de Finhan dans la basse terrasse. Les piézomètres, gérés par la DIREN, sont équipés d'un limnigraphe permettant, depuis 1982, de connaître le niveau de la nappe (cf. chapitre 3.1.3). Il existe certes, d'autres enregistrements piézométriques, mais ils sont peu nombreux et de courtes durées.

L'utilisation du réseau d'observation des eaux de surface ne permettant pas, non plus, d'estimer les apports — l'implantation des stations étant inadaptée pour ce problème —, il est donc très difficile d'étudier et de connaître les apports alluviaux.

Mis à part les piézométries du Tarn et Garonne, les niveaux des nappes alluviales ne sont absolument pas suivis. Et il existe là une lacune qu'il est urgent de combler. L'installation de piézomètres de référence sur les principales nappes doit être un objectif prioritaire dans les années à venir¹.

La suite de cette partie, concernant le comportement et les apports des aquifères, est consacrée à un autre type d'aquifère : le karst. Pour cela, nous avons pris deux bassins karstiques pyrénéens étudiés par le Laboratoire Souterrain du CNRS depuis plusieurs dizaines d'années. Il s'agit de la source karstique du Baget située dans le bassin du Lez, et de la source de Fontestorbes située dans le bassin de l'Hers vif. La participation du karst au réseau hydrographique de surface sera étudiée à travers les chroniques de débits.

¹ Cet appel a été entendu puisqu'une dizaine de piézomètres viennent d'être installer sur le bassin d'étude.

3.1.2. Rôle des aquifères karstiques : exemples de la source du Baget et de la source de Fontestorbes.

Introduction.

Les karsts sont réputés pour être des réservoirs intéressants. Ils représentent le tiers de la superficie de la région Midi-Pyrénées. Nous avons donc ici une ressource loin d'être négligeable.

Leur étude, basée sur une approche fonctionnelle utilisant l'hydrodynamique, la géochimie des eaux, la chimie isotopique et la biologie, apporte des résultats rigoureux et permet de connaître la structure du karst qui peut être considéré comme un véritable système (B. WALLISER, 1977). Le Laboratoire Souterrain du CNRS est l'investigateur de cette approche.

Elle a permis de distinguer trois parties dans le système karstique (cf. figure 3-1) :

- une zone avec un ruissellement de surface plus ou moins développé;
- une zone d'infiltration;
- une zone saturée représentant le karst noyé.

Si le régime dynamique de certains karsts pyrénéens est bien connu, il n'en est rien de leur contribution au réseau de surface. Est-elle la même suivant les mois, les saisons et les cycles hydrologiques ? Le comportement hydrodynamique des systèmes karstiques et des rivières de surface est-il identique ?

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi deux bassins comprenant un système karstique connu. Le premier est celui du Lez, en amont de Saint-Girons avec la source karstique du Baget. Le deuxième est celui de l'Hers, en amont de Bélesta avec la source intermittente de Fontestorbes. L'étude utilise les débits journaliers à l'exutoire du bassin et ceux des aquifères karstiques considérés. Les données relatives aux karsts proviennent du Laboratoire Souterrain du CNRS à Moulis; celles du Lez et de l'Hers, proviennent du Service Hydrologique Centralisateur à Toulouse, nouvellement nommé DIREN.

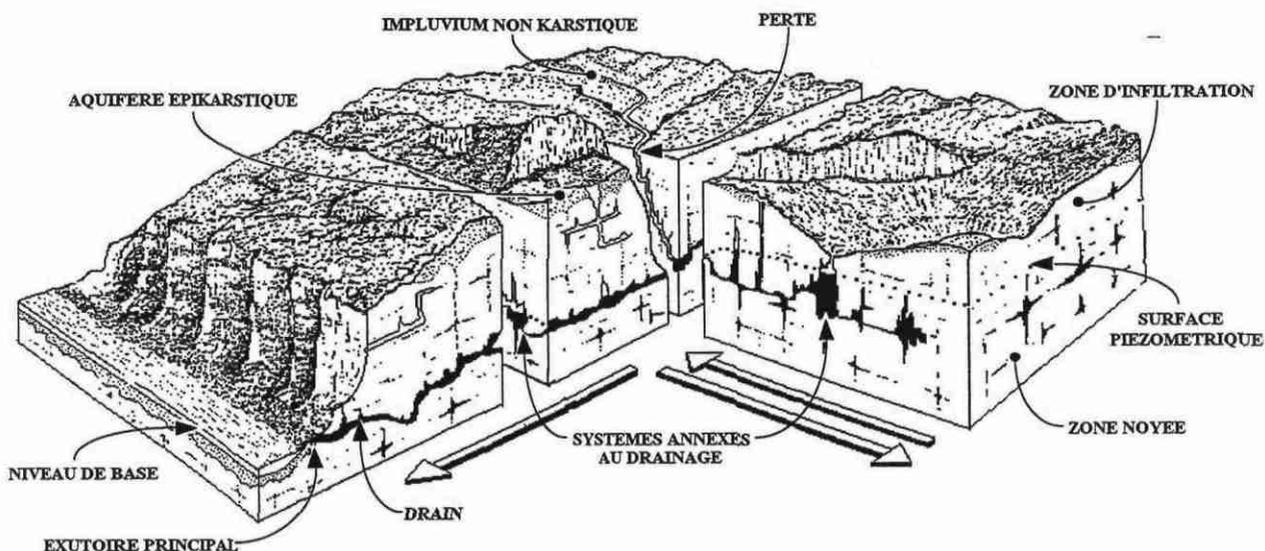
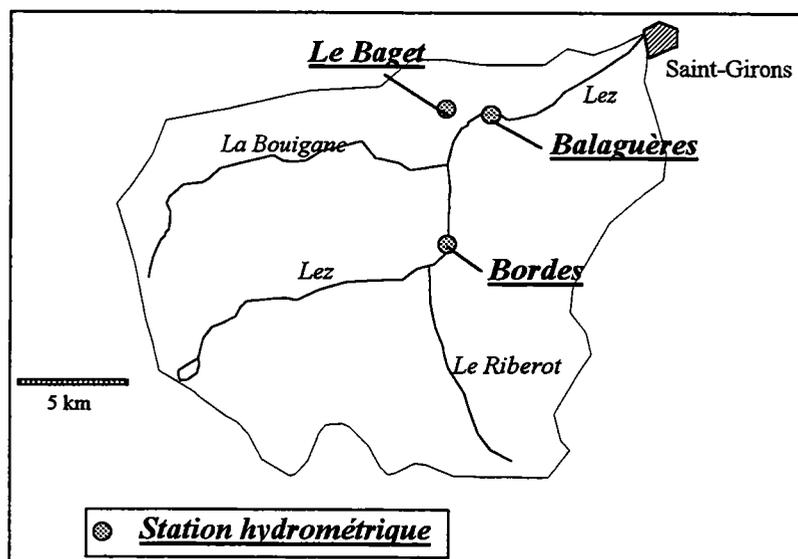


Figure 3 - 1. Représentation schématique de l'aquifère karstique par A. MANGIN (Dessin R. ROUCH, informatisation B. MARSAUD)

3.1.2.1. Présentation des bassins et des systèmes karstiques.

3.1.2.1.1. Bassin du Lez

Il est situé dans la partie montagnarde du bassin de la Garonne, plus exactement dans le département de l'Ariège à l'ouest de Saint-Girons. Ce bassin est équipé de trois stations hydrométriques en fonctionnement, le Baget (CNRS), Bordes et Balaguères sur le Lez. Au niveau de la station de Balaguères, la superficie du bassin versant est de 360 km². Les principaux affluents du Lez sont la Bouigane en rive gauche et le Riberot en rive droite (cf. carte 3-1).



Carte 3 - 1. Localisation des stations hydrométriques sur le bassin du Lez

Le bassin comprend de nombreux aquifères karstiques. Dans la partie du haut Lez, le karst s'étend dans :

- les formations calcaires du Silurien et de l'Ordovicien : karst de Bentaillou;
- les calschistes indifférenciés du Paléozoïque;
- les calcaires carbonifères et dévoniens : karst de Bethmale;

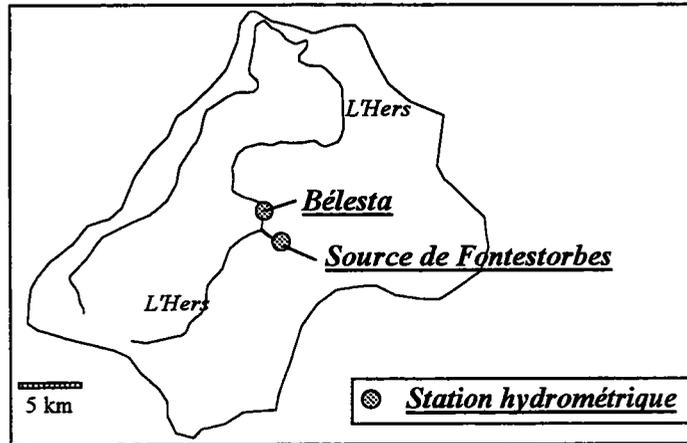
Dans la partie basse du Lez, le karst se développe dans les calcaires métamorphiques indifférenciés du Mésozoïque : karst du Baget (cf. tableau 3-2) et karst de Surgeint.

<i>Superficie du bassin versant</i>	13.25 km ² , soit 3.7 % du bassin total
<i>Coefficient de compacité</i>	1,73
<i>altitude minimale</i>	498 m
<i>altitude maximale</i>	1417 m
<i>altitude médiane</i>	930 m
<i>Volume dynamique moyen</i>	2.10 ⁶ m ³

Tableau 3 - 2. Fiche signalétique du Baget (aquifère libre)

3.1.2.1.2. Bassin de l'Hers en amont de Bélesta

Le bassin est situé dans le nord du Pays de Sault. Le système karstique de Fontestorbes est le principal aquifère de ce bassin, il occupe 85 km², soit 57 % de la superficie totale du bassin (cf. carte 3-2 et tableau 3-3). Il est composé de plusieurs séries lithologiques : une série antéhercynienne, une série mésozoïque et une série métamorphique dans lesquelles les terrains calcaires sont prédominants.



Carte 3 - 2. Localisation des stations hydrométriques sur le bassin de l'Hers

<i>Superficie du bassin versant</i>	85 km ² , soit 57% du bassin total
<i>Coefficient de compacité</i>	1,79
<i>altitude minimale</i>	510 m
<i>altitude maximale</i>	2368 m
<i>altitude médiane</i>	1295 m
<i>Volume dynamique moyen</i>	24.10 ⁶ m ³

Tableau 3 - 3. Fiche signalétique de Fontestorbes (aquifère semi-captif)

3.1.2.2. Apport quantitatif des systèmes karstiques au réseau hydrographique.

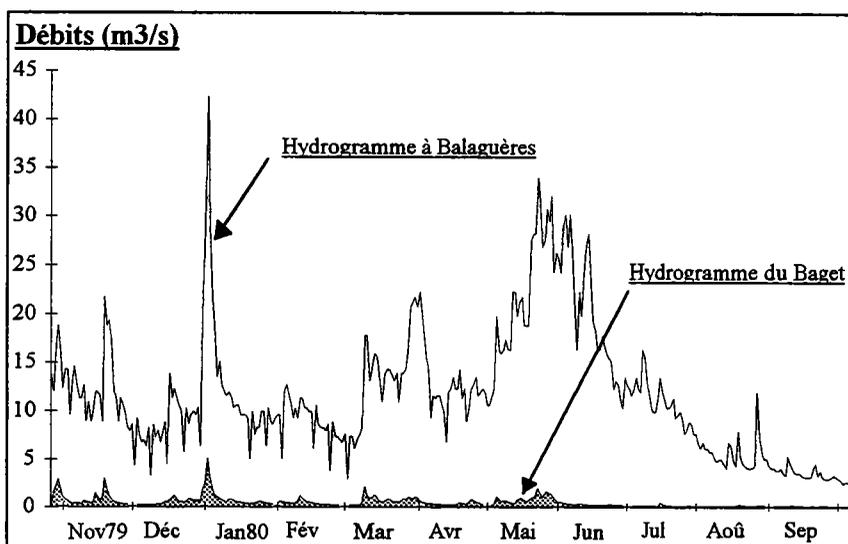
De longues chroniques sont utilisées afin de déterminer les apports moyens mensuels interannuels (Q.m.m.i.) et les apports par cycles hydrologiques. Les périodes retenues, par rapport aux données disponibles, sont :

- les cycles 1971 à 1983 pour le bassin du Lez, soit 13 cycles;
- les cycles 1973 à 1979 pour le bassin de l'Hers, soit 7 cycles.

3.1.2.2.1. La source du Baget.

3.1.2.2.1.1. Apport journalier.

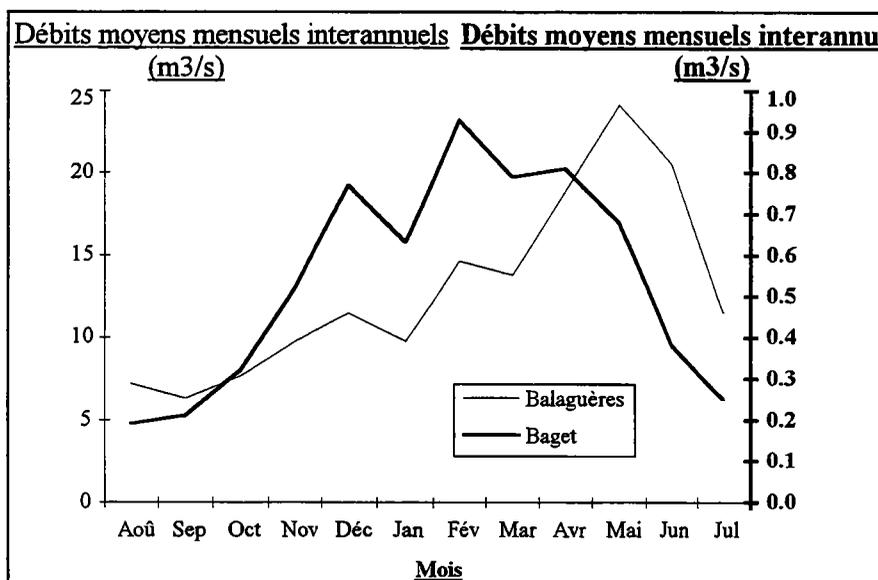
L'analyse du cycle 1980 met en évidence la faible contribution de la source du Baget au Lez à Balaguères (cf. graphique 3-6). Elle apparaît néanmoins plus importante en hiver.



Graphique 3 - 6. Hydrogrammes du Baget et du Lez à Balaguères, cycle 1980

3.1.2.2.1.2. Apport mensuel.

La courbe des débits moyens mensuels interannuels (Q.m.m.i.) du Baget (cf. graphique 3-7) permet de distinguer les périodes les plus pluvieuses. Elles sont situées au mois de décembre et de janvier à avril. En revanche, la courbe des débits moyens mensuels interannuels du Lez à Balaguères atteint son maximum en mai (24.17 m³/s). L'augmentation importante du Q.m.m.i., à partir de mars, est liée à la fonte des neiges en altitude. Sans cette différence, les deux courbes se superposent. Le comportement hydrodynamique des deux bassins varie donc sous l'influence neigeuse. Le Q.m.m.i. minimal sur le Lez est situé au mois de septembre (6.3 m³/s).

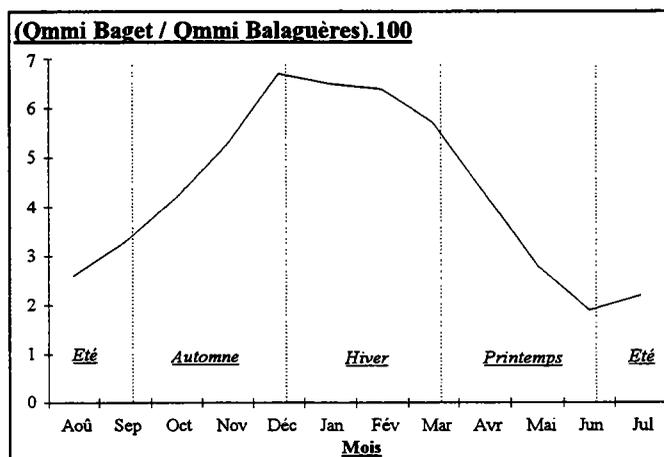


Graphique 3 - 7. Courbes des débits moyens mensuels interannuels du Lez à Balaguères et du Baget, cycles 1971 à 1983

La contribution moyenne mensuelle des eaux du Baget au débit du Lez forme une courbe en cloche centrée sur le mois de Janvier (cf. graphique 3-8). Les apports augmentent à

partir du mois de juin et croissent régulièrement jusqu'en décembre. Ils sont quasi-constants jusqu'en février, puis diminuent rapidement du fait, essentiellement, de la fonte des neiges dans la partie haute du bassin. **La part du karst dans l'écoulement du Lez est maximale, non pas en été, comme le volume des réserves aurait pu le laisser croire, mais en hiver.** Ceci est dû au régime du Lez, soumis à la neige et présentant un étiage hivernal marqué, alors que le karst du Baget possède un régime peu influencé par la neige.

Au mois de juin, la contribution est de 2 %. En décembre, elle est d'environ 7 %. **L'apport moyen est un peu au-dessus de 4 %**, ce qui correspond, grosso modo, au rapport des surfaces des bassins versants qui est de 3.7 %.

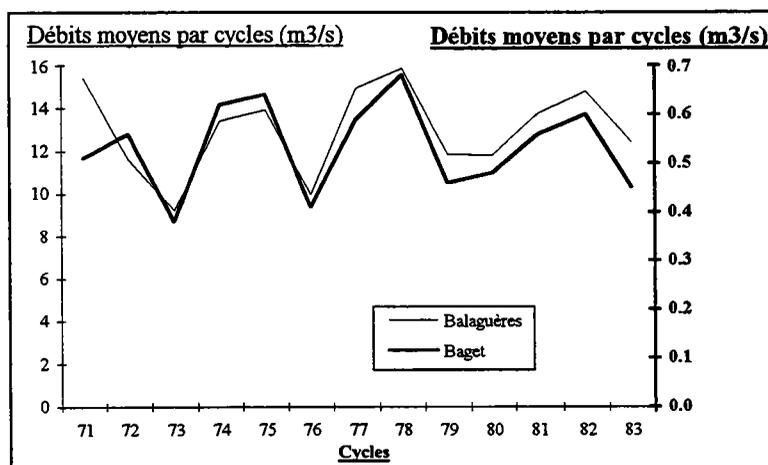


Graphique 3 - 8. Apports mensuels du Baget, système karstique, aux débits du Lez à Balaguères, cycles 1971 à 1983

3.1.2.2.1.3. Apport par cycles.

La courbe des débits moyens par cycles à Balaguères et au Baget suivent globalement les mêmes variations (cf. graphique 3-9). Toutefois, on note deux petites différences :

- en 72 et 73 le débit moyen a chuté sur le Lez, il a augmenté sur le Baget en 72;
- le débit moyen du cycle 77 est plus atténué sur le Baget.

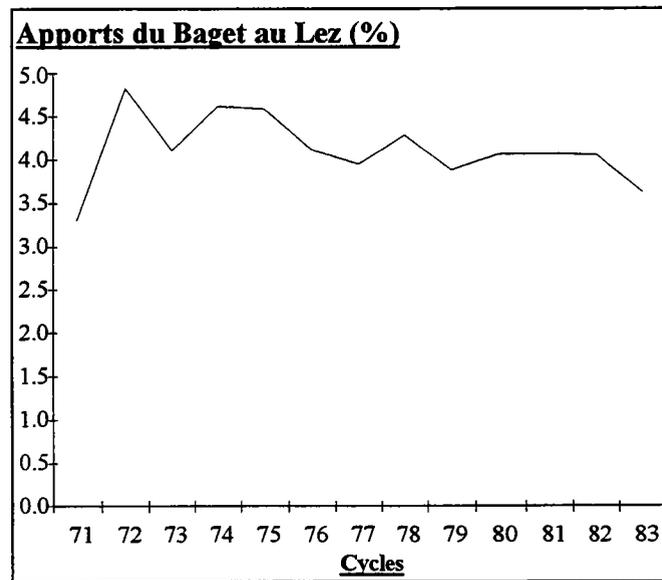


Graphique 3 - 9. Courbes des débits moyens par cycles sur le Lez à Balaguères et au Baget, cycles 1971 à 1983

Les deux bassins appartiennent pourtant à la même province géographique et climatique. L'écart entre les deux chroniques ne peut s'expliquer que par un comportement dynamique différent des deux bassins. Dans le cas du karst, ce phénomène se traduit par une régulation des apports.

Les débits moyens par cycles sont maximaux en 74, 75, 78 et 82 sur le Baget, et 71, 77, 78 et 82 sur le Lez.

Les apports moyens par cycles (cf. graphique 3-10) sont variables. Ils sont en moyenne de plus de 4 % sur la période étudiée. Les maximums sont en 72 avec 4.8 %, en 74 et 75. Ils sont du reste corrélés au volume dynamique calculé sur le même cycle, c'est-à-dire au volume des réserves souterraines. Les minimums sont en 71 (3.3 %) et 83 (3.6 %).



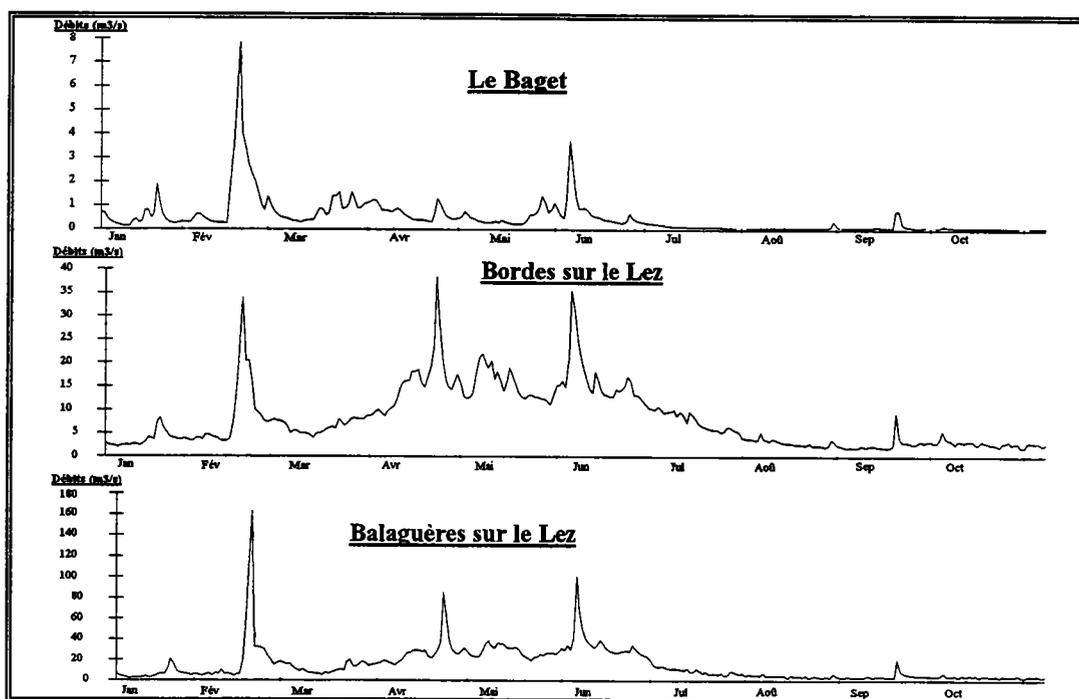
Graphique 3 - 10. Apports du Baget (système karstique) par cycles au Lez à Balaguères, cycles 1971 à 1983

3.1.2.2.1.4. Apport en étiage.

Un simple rapport des débits écoulés pendant l'étiage peut fournir une estimation de la contribution du Baget au Lez. Mais, nous avons plutôt choisi d'étudier le tarissement (cf. chapitre 3.3.1) des deux bassins afin de déterminer l'importance des réservoirs souterrains. Deux stations hydrométriques sur le Lez permettent d'étudier le tarissement : celle de Balaguères et celle de Bordes, un peu plus en amont.

Le tarissement sur le Baget commence après la décrue, et, sur le Lez, après la fonte des neiges. Ce dernier est alors drainé par les apports des aquifères souterrains provenant essentiellement du bassin de la Bouigane et par les apports de quelques réservoirs lacustres.

Le cycle hydrologique 71 est bien lisible. Il servira de référence pour notre étude. Il débute le 06/01/71 et se termine le 08/11/71. La décrue principale a lieu le 6 juin 1971 (cf. graphique 3-11).



Graphique 3 - 11. Hydrogrammes du Baget, du Lez à Bordes et Balaguères, cycle 1971

Le bassin du Lez comprend quelques aménagements hydroélectriques. Les perturbations sur les débits sont faibles, mais une correction est effectuée afin de travailler avec des débits naturels. L'analyse du tarissement (cf. graphique 3-12), à partir de la loi de Maillet, procure les résultats suivants :

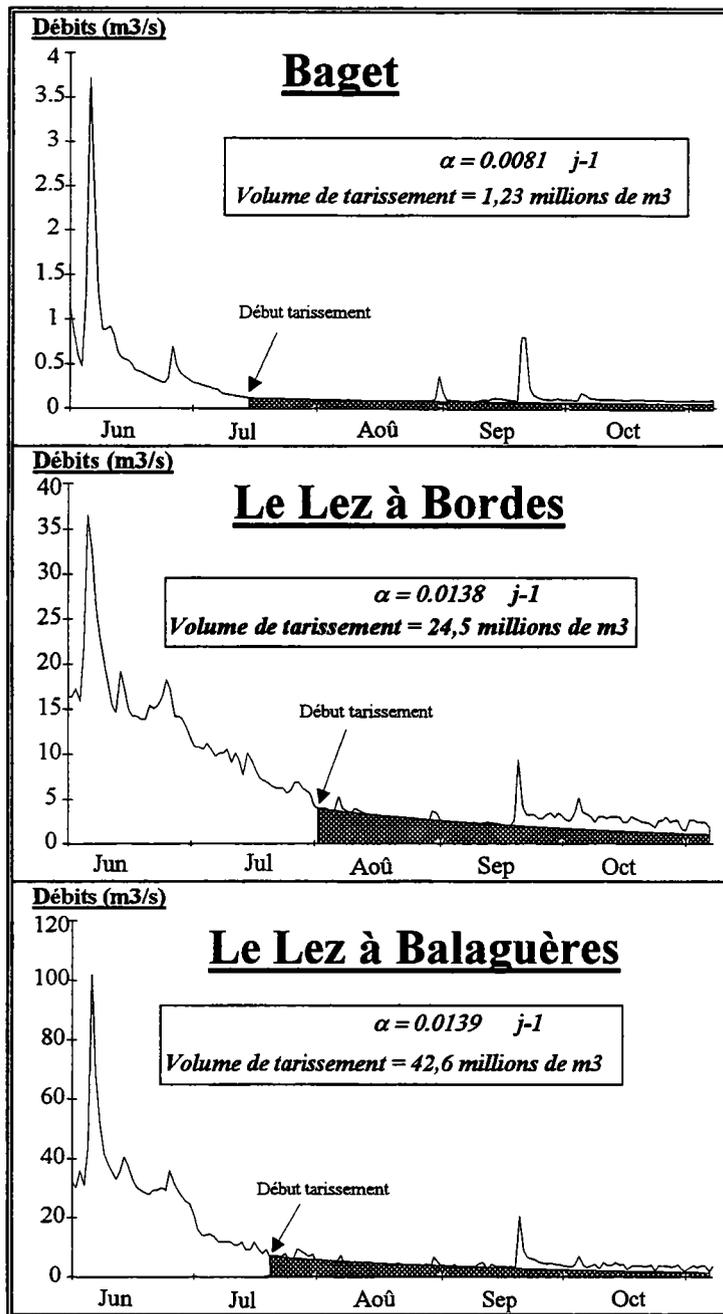
<u>Stations</u>	<u>Début du tarissement</u>	<u>Q_1 (m^3/s)</u>	<u>α (j^{-1})</u>	<u>Volume de tarissement (Millions de m^3)</u>
<i>Bordes</i>	02/08	3.93	0.0138	24.5
<i>Baget</i>	15/07	0.11	0.0081	1.23
<i>Balaguères</i>	20/07	6.85	0.0139	42.6

Le coefficient de tarissement est un peu plus faible sur le Baget ($0.0081 j^{-1}$) que sur le Lez ($0.0139 j^{-1}$ à Balaguères). la décroissance des débits est donc plus lente sur le Baget. **Le volume de tarissement du Baget (1.2 millions de m^3) apparaît insignifiant devant celui du Lez (42.6 millions de m^3).**

Le volume de tarissement (V_t) de Balaguères contient, approximativement, le V_t du Baget, le V_t du Lez en amont de Bordes et le V_t du bassin de la Bouigane. On peut donc calculer le V_t de la Bouigane avec une simple opération de soustraction, on trouve ainsi 16.9 millions de m^3 .

Les réserves se répartissent donc comme suit :

- 2.9 % au Baget ($1.23 \cdot 10^6 m^3$ avec $S = 13.25 km^2$);
- 39.6 % sur le bassin de la Bouigane ($16.9 \cdot 10^6 m^3$ avec $S = 135 km^2$);
- 57.5 % sur le bassin du Lez en amont de Bordes ($24.5 \cdot 10^6 m^3$ avec $S = 212 km^2$).



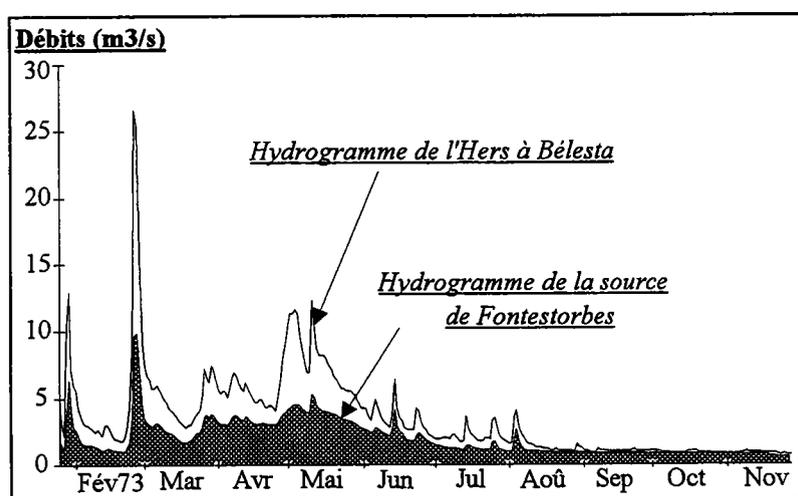
Graphique 3 - 12. Tarissement du Baget et du Lez à Bordes et Balaguères, cycle 1971

On s'aperçoit donc que **les réserves karstiques**, localisées principalement sur le Baget et le bassin de la Bouigane, **ne fournissent pas l'essentiel des apports en période d'étiage**. Il faut admettre l'**existence d'autres réservoirs souterrains** possédant des réserves importantes. D'après l'expérience de A. MANGIN à propos des formations superficielles en Ariège, **les formations colluviales²** situées dans le bas des vallées pourraient contenir des réserves non négligeables et fournir une bonne partie du débit au Lez.

3.1.2.2.2. Source de Fontestorbes.

3.1.2.2.2.1. Apport journalier.

En période d'étiage, comme le montre le cycle 1973 (cf. graphique 3-13), la source de Fontestorbes assure l'essentiel des débits. La participation est plus faible durant les autres périodes, mais la source fournit tout de même plus de 50 % des débits.



Graphique 3 - 13. Hydrogrammes de la source de Fontestorbes et de l'Hers à Bélesta, cycle 1973

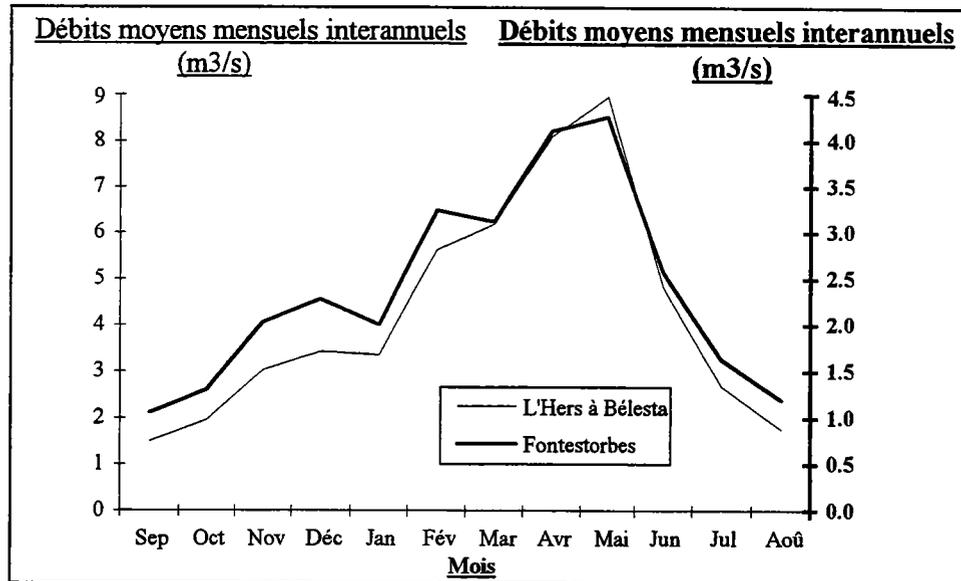
3.1.2.2.2.2. Apport mensuel.

La courbe des débits moyens mensuels interannuels (Q.m.m.i.) de Fontestorbes et de l'Hers à Bélesta est pratiquement identique (cf. graphique 3-14). Cependant, la courbe de Fontestorbes est plus atténuée, du fait de la régulation des apports par le karst. Les basses eaux apparaissent d'août à octobre, les hautes eaux en avril et mai au moment des crues et de la fonte des neiges.

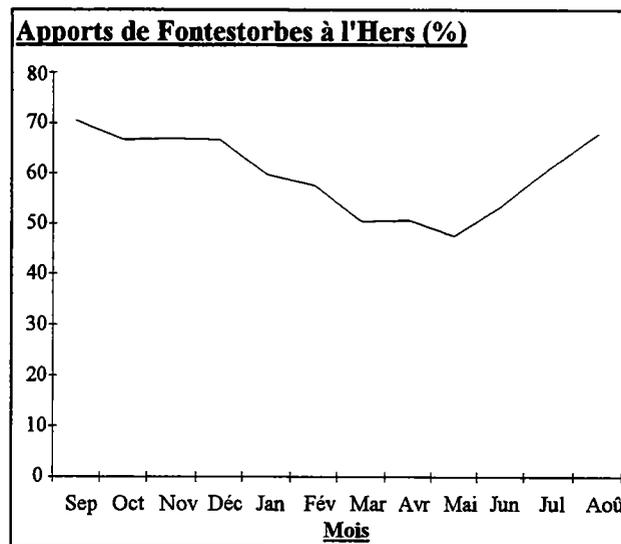
Le débit moyen pour la période 1973-1979 est de 2.4 m³/s pour Fontestorbes et de 4.28 m³/s pour l'Hers à Bélesta.

L'apport de Fontestorbes aux débits de l'Hers est maximal en août, septembre, octobre et novembre, il diminue jusqu'en mai, puis il remonte (cf. graphique 3-15). **En étiage, la contribution du karst est donc la plus élevée : elle atteint 70 %**. La diminution progressive des apports en hiver et au printemps est due aux apports de l'autre partie du bassin hydrographique (écoulements de surface). L'apport moyen est de 60 % pour la période étudiée.

² Ce sont des formations géologiques superficielles, datant du Quaternaire, de faible superficie, et qui forment de petites nappes libres de perméabilités variables.



Graphique 3 - 14. Courbes des débits moyens mensuels interannuels de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, cycles 1973 à 1979

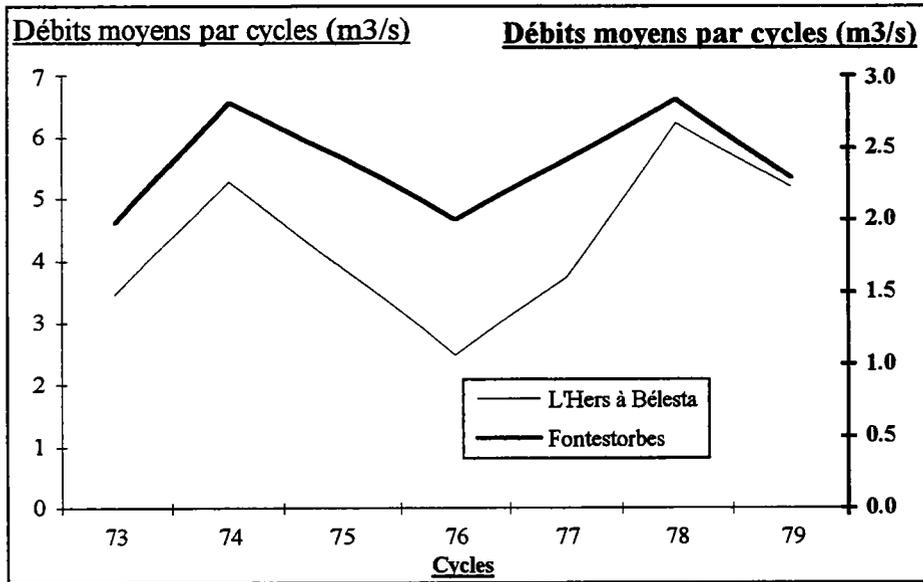


Graphique 3 - 15. Apports de Fontestorbes (système karstique) au débit de l'Hers à Bélesta, cycles 1973 à 1979

3.1.2.2.3. Apport par cycles.

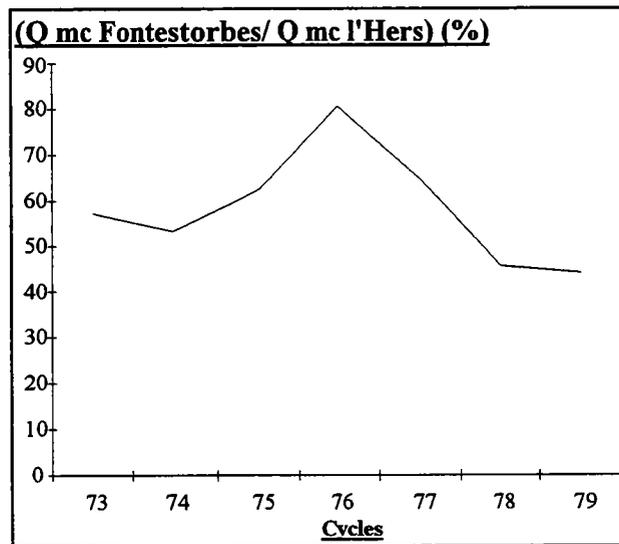
Les courbes des débits moyens par cycles (Q.m.c.) de l'Hers et de Fontestorbes présentent la même variabilité (cf. graphique 3-16). Le débit le plus faible est atteint en 73 et 76 à Fontestorbes (1.98 m³/s en 73 et 2 m³/s en 76) et en 76 à Bélesta (2.48 m³/s).

Le rapport Q.m.c. minimal / Q.m.c. maximal constitue un indice de variabilité. Pour la période de 73 à 79, il est égal à 2.5 pour l'Hers et 1.44 pour Fontestorbes. Le faible rapport pour Fontestorbes traduit encore le rôle régulateur du karst.



Graphique 3 - 16. Courbes des débits moyens par cycles sur l'Hers à Bélesta et à Fontestorbes, cycles 1973 à 1979

Malgré les mêmes variations du débit moyen par cycles, le rapport Q.m.c. Fontestorbes / Q.m.c. à Bélesta (cf. graphique 3-17) fait apparaître une contribution progressive suivant les cycles. Les apports du karst sont plus importants pour les cycles faiblement pluvieux et neigeux. Le maximum des apports est atteint en 76 avec 81 %. L'apport moyen du karst pour la période considérée est d'environ 60 %.

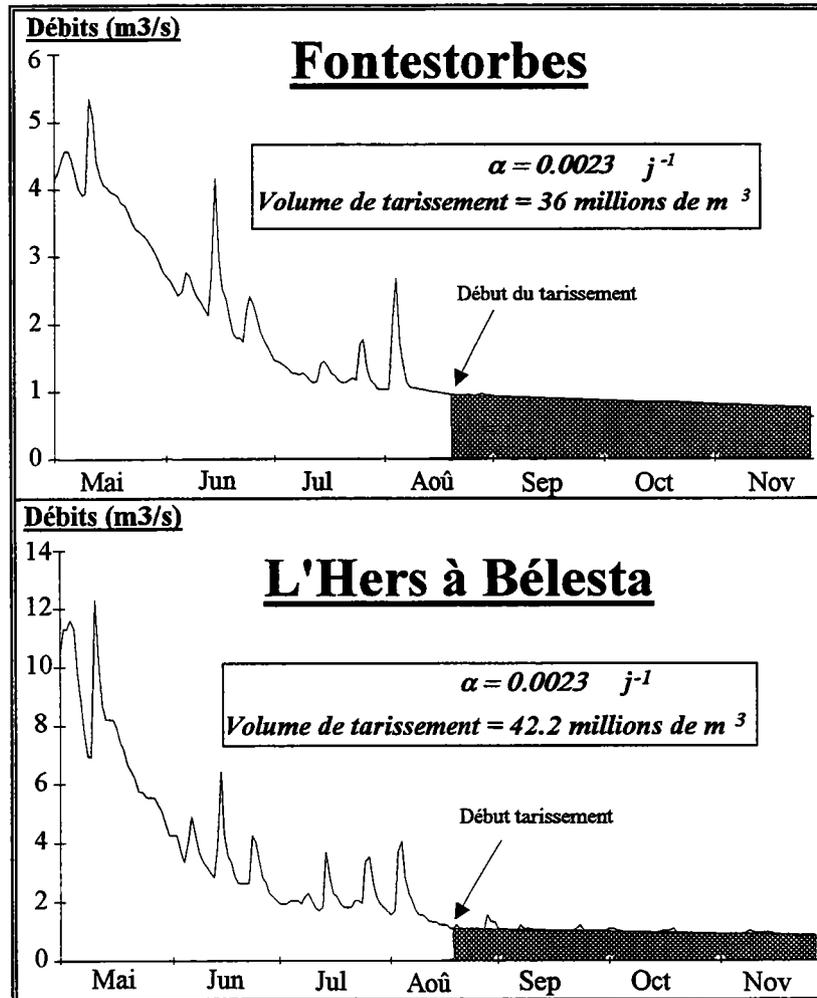


Graphique 3 - 17. Apports par cycles de Fontestorbes (système karstique à l'Hers à Bélesta, cycles 1973 à 1979

3.1.2.2.2.4. Apport en étiage.

Fontestorbes fournit l'essentiel des apports : 70 % en moyenne.

L'étude du tarissement du cycle 1973 permet de préciser l'importance des réserves souterraines sur l'ensemble du bassin (cf. graphique 3-18). La décrue principale a lieu le 11/05/73. Le tarissement a commencé vers le 20/08/73. Le coefficient de tarissement α est sensiblement le même à Bélesta et Fontestorbes (0.0023 j^{-1}). Il est plus faible que sur le Baget (0.0081 j^{-1}).



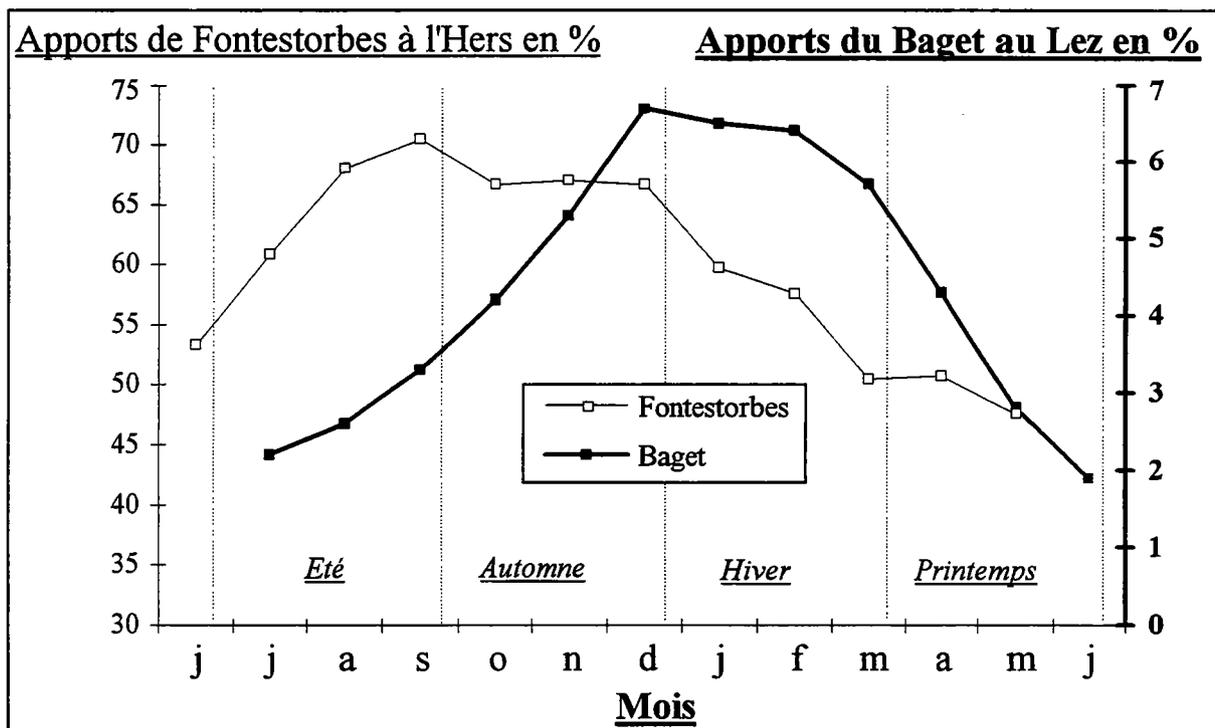
Graphique 3 - 18. Tarissement sur l'Hers à Bélesta et à Fontestorbes, cycle 1973

Le volume de tarissement à Bélesta est de 42.2 millions de m^3 ($S = 181 \text{ km}^2$). Celui à Fontestorbes est de 36 millions de m^3 ($S = 85 \text{ km}^2$). Le système karstique de Fontestorbes représente donc 85 % des réserves souterraines. C'est le principal réservoir du bassin.

3.1.2.2.3. Comparaison des apports du Baget et de Fontestorbes.

L'apport moyen mensuel du Baget au Lez est tout à fait différent de celui de Fontestorbes à l'Hers. L'apport maximal est en décembre, janvier et février pour le Baget; il est en août, septembre, octobre, novembre et décembre pour Fontestorbes (cf. graphique 3-19). On peut trouver plusieurs raisons à cette différence de comportement :

- Le fonctionnement dynamique des deux aquifères n'est pas le même. Le temps de régulation est de 22,5 jours pour le Baget et de 50 jours pour Fontestorbes (A. MANGIN, 1982);
- L'altitude : Fontestorbes est un karst d'altitude alimenté par des apports neigeux importants, alors que le Baget est un karst de basse altitude. En hiver, les précipitations sur la partie haute du Lez étant stockées sous forme neigeuse, la part des apports du Baget au Lez augmente.

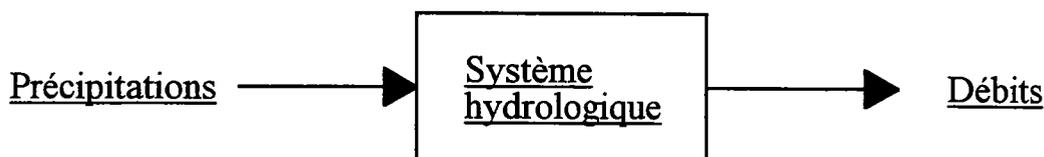


Graphique 3 - 19. Apports moyens mensuels des systèmes karstiques du Baget et de Fontestorbes au réseau de surface

Après avoir étudié la part des apports et leur distribution vers le réseau de surface, le paragraphe suivant est consacré à la mise en évidence et la comparaison des réserves des systèmes karstiques et des bassins hydrologiques, à partir des analyses corrélatoires et spectrales. Il doit confirmer les résultats précédents.

3.1.2.3. Etudes des systèmes karstiques et des bassins hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales.

Le bassin karstique et le bassin hydrographique sont étudiés en tant que systèmes hydrologiques possédant un signal d'entrée : les précipitations, et un signal de sortie : les débits.

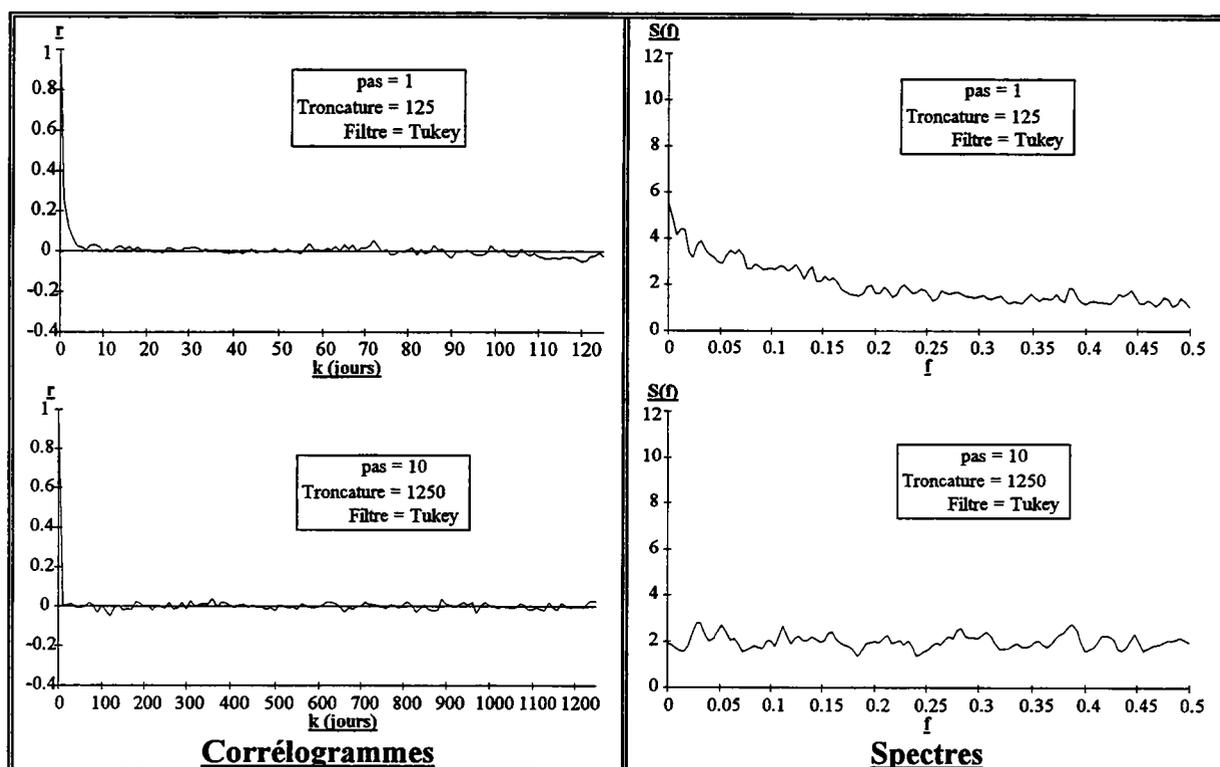


Les analyses corrélatoires et spectrales sont utilisées afin de caractériser ces signaux.

3.1.2.3.1. Analyse des précipitations.

Les résultats étant identiques pour n'importe quelle chronique pluviométrique du bassin de la Garonne, nous avons choisi, à titre d'exemple, d'étudier les précipitations à Saint-Girons.

Le coefficient de corrélation décroît très rapidement, ce qui confirme le caractère quasi-aléatoire des précipitations (cf. graphique 3-20). Les spectres ne montrent aucune périodicité remarquable. Ils font apparaître cependant, pour la fenêtre [1,125], une tendance saisonnière.



Graphique 3 - 20. *Corrélogrammes et spectres simples de la pluie à Saint-Girons, fenêtre [1, 125 jours] et [10, 1250 jours], période 1971-1983*

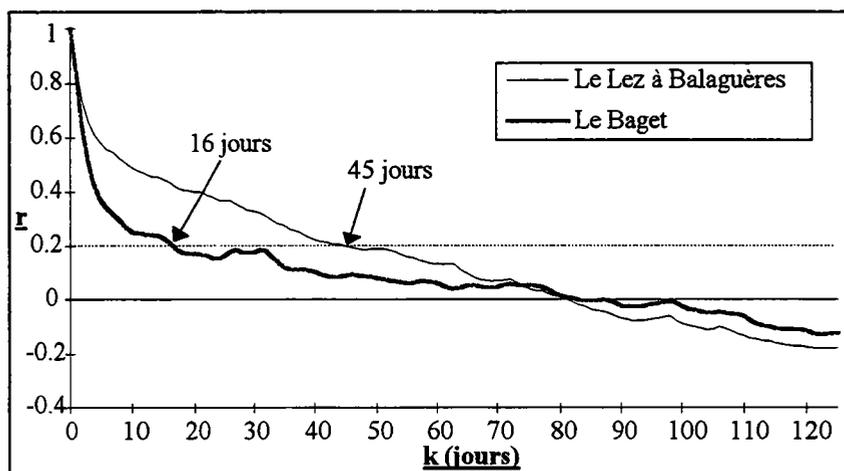
3.1.2.3.2. Analyse du signal de sortie.

3.1.2.3.2.1. Analyse des débits du Baget et du Lez à Balaguères (cycles 71 à 83).

- Analyse à court terme ($k= 1$ à 125).

L'étude des corrélogrammes des systèmes hydrologiques (cf. graphique 3-21) montrent une décroissance plus lente du coefficient de corrélation. L'effet mémoire y est plus important, et reflète le rôle régulateur des bassins.

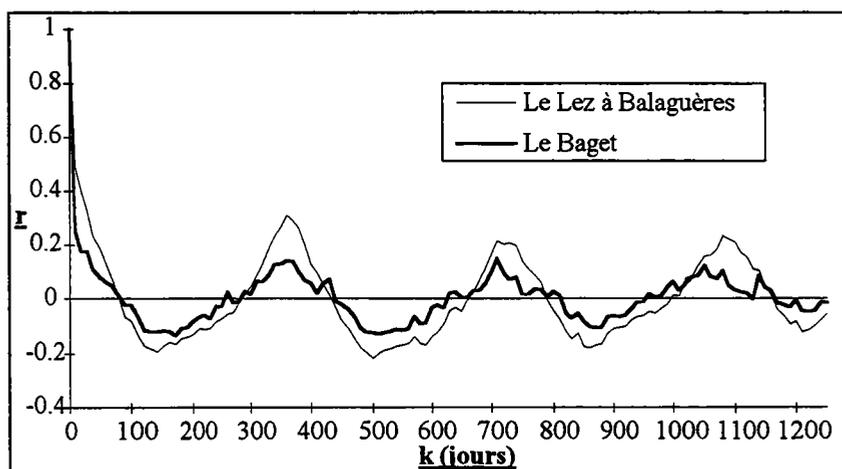
Les corrélogrammes font apparaître un effet mémoire plus élevé sur le Lez à Balaguères que sur le Baget. En effet, pour ce dernier l'effet mémoire est de 16 jours, alors qu'il est de 45 jours pour le Lez. Le bassin du Lez présente donc des réserves plus importantes qui ont une origine souterraine et neigeuse. Le temps de régulation est de 22 jours pour le Baget et de 38 jours pour le bassin du Lez.



Graphique 3 - 21. Corrélogrammes du Lez à Balaguères et du Baget, fenêtre [1, 125 jours], période 1971-1983

- Analyse à long terme ($k = 10$ à 1250).

Elle permet de voir le comportement pluriannuel des systèmes (cf. graphique 3-22). On distingue un cycle annuel de 365 jours environ. Ce sont donc les systèmes hydrologiques qui induisent ces cycles, puisque la pluie ne présente pas de périodicité marquée. La mémoire annuelle est plus grande sur le bassin du Lez que sur celui du Baget, ceci révèle encore une fois la présence de réserves plus importantes sur le Lez.



Graphique 3 - 22. Corrélogrammes du Lez à Balaguères et du Baget, fenêtre [10, 1250 jours], période 1971-1983

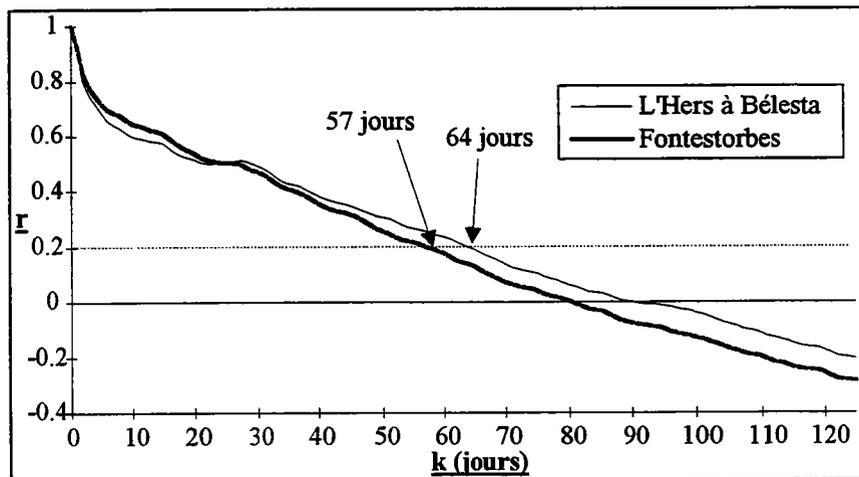
3.1.2.3.2.2. Analyse des débits de Fontestorbes et de l'Hers à Bélesta.

- Analyse à court terme (k= 1 à 125).

Les corrélogrammes sont pratiquement identiques. L'effet mémoire est de 64 jours à Fontestorbes et de 57 jours sur l'Hers à Bélesta (cf. graphique 3-23). La mémoire de ces systèmes est nettement plus élevée que sur le Lez. Les réserves y sont donc plus importantes. Le temps de régulation est d'environ 50 jours pour Fontestorbes. Ce karst est plus régulateur que celui du Baget.

Une analyse par cycles hydrologiques (A. MANGIN, 1983) confirme le caractère régulateur de Fontestorbes :

- pour les cycles excédentaires en pluie : les réserves augmentent à Fontestorbes, mais ne varient pas sur le Baget;
- pour les cycles déficitaires en pluie : les réserves sont peu modifiées à Fontestorbes. Elles diminuent nettement sur le Baget.



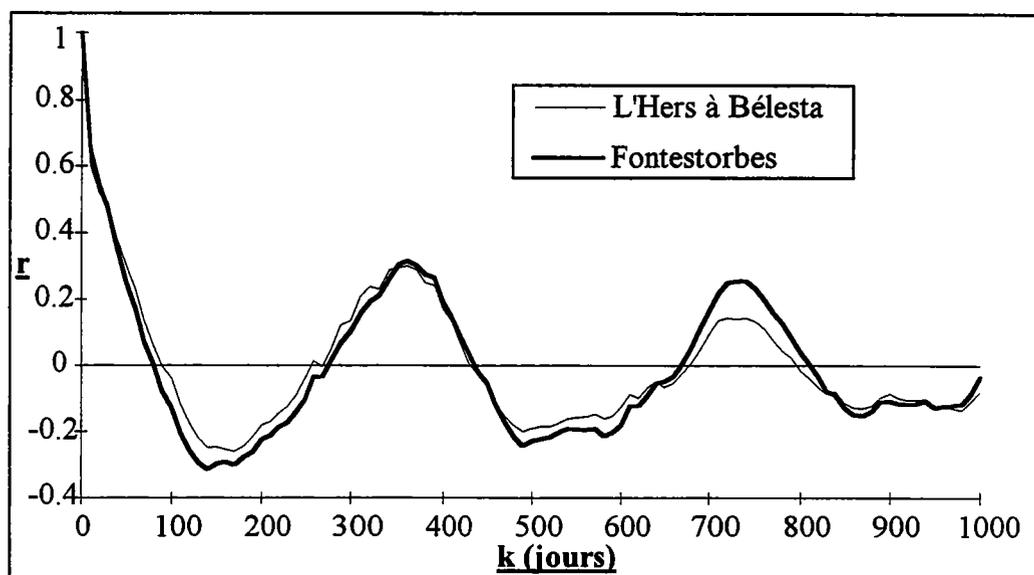
Graphique 3 - 23. Corrélogrammes de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, fenêtre [1, 125 jours], période 1971-1983

- Analyse à long terme (k = 10 à 1000).

On retrouve un cycle annuel et un effet mémoire quasi-identiques pour les deux systèmes (cf. graphique 3-24).

Conclusions.

Les apports du karst au réseau de surface varient selon la période de l'année et le cycle hydrologique. En étiage, les apports du Baget sont négligeables; ceux de Fontestorbes sont prépondérants. L'apport est maximal en hiver et au printemps pour le Baget, alors que pour Fontestorbes, c'est en hiver et en étiage.



Graphique 3 - 24. Corrélogrammes de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, fenêtre [10, 1000 jours], période 1971-1983

Ces différences proviennent :

- de la nature du karst : le Baget est plus karstifié que Fontestorbes. Son volume dynamique moyen est de 2 millions de m³ alors qu'il est de 24 millions de m³ à Fontestorbes;
- d'une dynamique différente :
 - au Baget : on a une variabilité forte (crues de 10 m³/s, débit d'étiage de 38 l/s) et un temps de régulation de 22,5 jours;
 - à Fontestorbes : on a une variabilité faible (crues de 15 m³/s, débit d'étiage de 800 l/s) et un temps de régulation de 50 jours.
- de l'altitude : Fontestorbes est un karst d'altitude alimenté par des apports neigeux importants, alors que le Baget est un karst de basse altitude. En hiver, les précipitations sur la partie haute du Lez étant stockées sous forme neigeuse, la part des apports du Baget au Lez augmente.

D'autre part, l'utilisation des analyses corrélatoires et spectrales met en évidence le caractère régulateur du karst et des bassins hydrologiques, et l'importance des réserves à Fontestorbes (l'effet mémoire est de 64 jours).

La contribution des aquifères karstiques sur l'ensemble du bassin est difficile à évaluer, faute d'études quantitatives. On sait seulement qu'ils représentent un tiers de la superficie de la région Midi-Pyrénées. L'étude du tarissement sur les affluents et la décomposition de l'hydrogramme sur quelques stations permet cependant, d'estimer les réserves souterraines et la part de l'écoulement souterrain durant l'année. Ils seront étudiés dans un chapitre suivant.

En outre, l'étude du tarissement sur le Lez fait apparaître l'existence de réservoirs souterrains encore mal connus et sous estimés. Ce sont les formations colluviales du Quaternaire. Elles ne fournissent pas de source importante, mais une multitude de petites sources dont les débits sont faibles. C'est pour cette raison qu'elles ne sont pas prises en compte dans l'établissement des ressources potentielles. Cependant, ce n'est pas pour autant qu'il faut continuer de raisonner à partir des deux réservoirs principaux que sont les aquifères karstiques

et les nappes alluviales. Au delà de l'intérêt purement théorique que représente la connaissance de ces aquifères spécifiques, **il s'avère indispensable dans l'avenir, de tenir compte de l'existence des formations colluviales dans les plans d'aménagement territoriaux.**

Dans le prochain chapitre, un examen comparatif sera fait entre les deux types d'aquifères étudiés précédemment, à partir de l'analyse respective des chroniques de piézométries et de débit. La pluviométrie à Blagnac et les débits de la Garonne serviront, également, d'élément de comparaison.

3.1.3. Comparaison du comportement dynamique des aquifères karstiques et poreux et des systèmes hydrologiques de surface à partir des analyses corrélatoires et spectrales

Introduction

La comparaison est effectuée à partir des chroniques qui proviennent de stations situées sur le bassin. Elle est réalisée sur une période commune d'enregistrement (1982-1990).

Serviront d'éléments de référence :

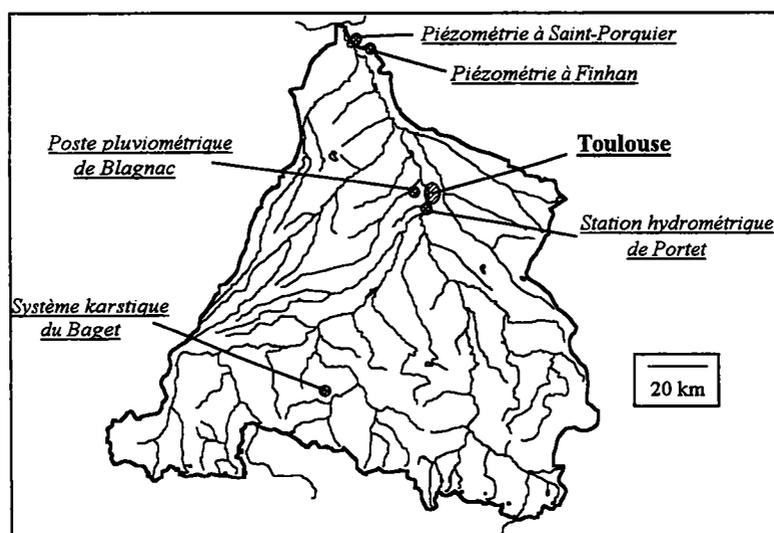
- ① *Pour les aquifères poreux* : la piézométrie de la nappe alluviale, dans la plaine de la Garonne en aval de Toulouse;
- ② *Pour les aquifères karstiques* : les débits du karst du Baget;
- ③ *Pour le système hydrologique de surface* : les débits de la Garonne en amont de Portet;
- ④ *Pour le signal d'entrée* : les pluies à Blagnac.

① La piézométrie est issue de deux piézomètres placés sur la nappe alluviale de la Garonne dans le Tarn et Garonne. L'un est situé près de Saint-Porquier, dans la basse plaine, l'autre à Finhan, dans la basse terrasse (cf. carte 3-3). Ils sont gérés par la DIREN de Toulouse, et sont utilisés comme niveau de référence depuis 1982.

② Le karst du Baget est étudié en tant que réseau hydrogéologique de référence par le CNRS. Son bassin est situé en Ariège dans le bassin du Lez (affluent du Salat).

③ La station hydrométrique de Portet est située en amont de Toulouse, après la confluence de l'Ariège avec la Garonne. Elle est gérée par la DIREN.

④ Enfin, les chroniques des pluies proviennent de la station pluviométrique de Blagnac appartenant au réseau de Météo France.



Carte 3 - 3. Localisation des éléments de référence

3.1.3.1. Les chroniques

Les pluies à Blagnac sont figurées sur un hyétogramme, les débits de la Garonne et du Baget, sur un hydrogramme et la piézométrie, sur un limnigramme (cf. graphique 3-25).

Les pluies journalières sont comprises entre 0 et 14 mm. Elles ne présentent pas de cycles saisonniers bien visibles.

Malgré une différence de superficie des deux bassins, la chronique des débits au Baget est pratiquement semblable à celle des débits à Portet. Les cycles hydrologiques, les périodes de hautes eaux et de basses eaux, et l'apparition des grosses crues sont identiques. Par contre, la phase de décrue est plus lente sur la Garonne.

La piézométrie à Finhan et à Saint-Porquier présente un cycle saisonnier évident, et une atténuation des phénomènes climatiques. Le rôle régulateur de la nappe est donc manifeste. A Finhan, la réponse de l'aquifère est plus prompt et plus marqué. Ceci est dû à une perméabilité plus forte, supérieure à $2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

3.1.3.2. Corrélogrammes et spectres

Rappels :

Ces outils permettent de déterminer les différentes composantes des chroniques : tendance, composante(s) périodique(s) et composante aléatoire (cf. annexe).

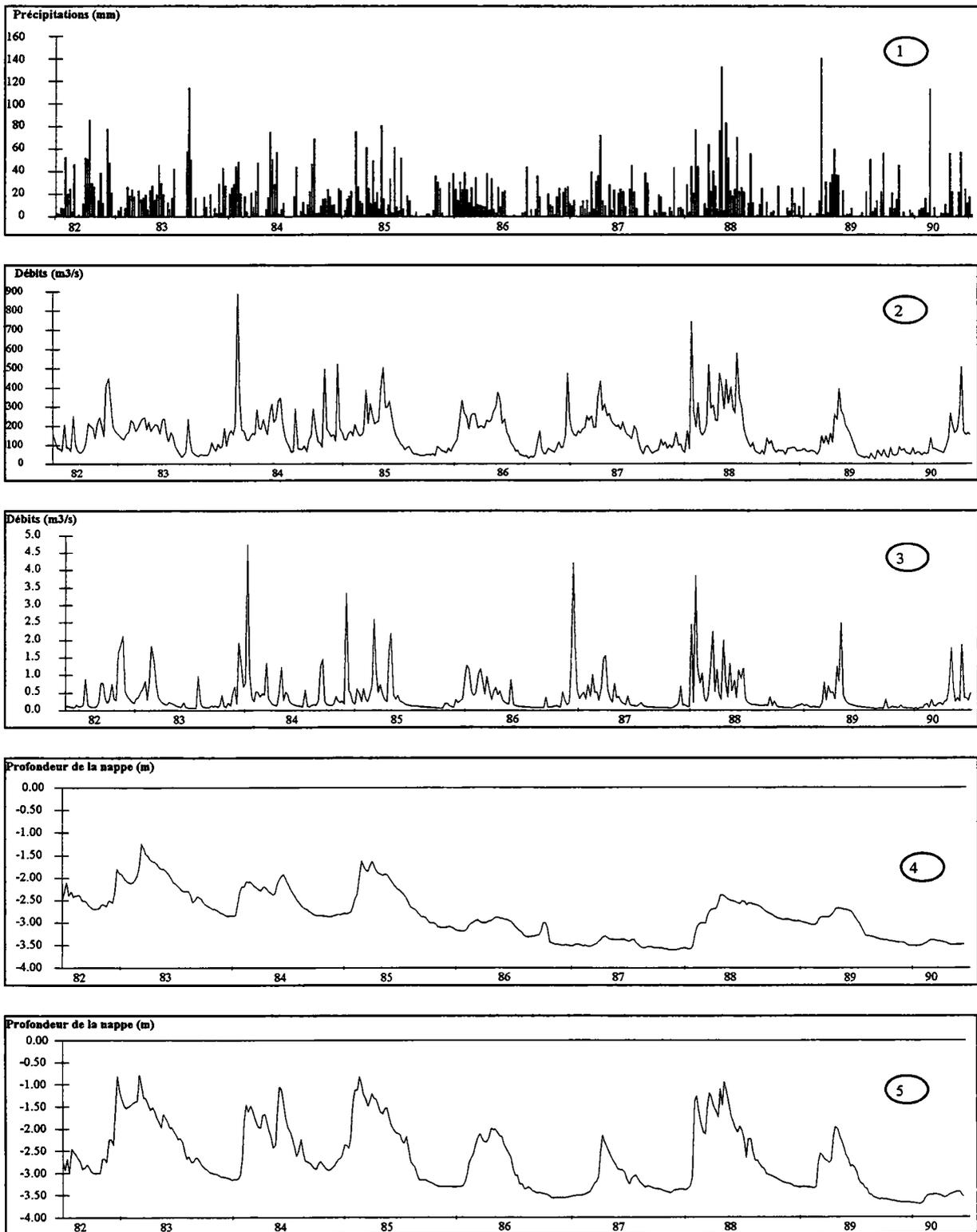
Le corrélogramme met en évidence, en outre, les liens existant entre les valeurs pour des pas de plus en plus grands (1 jour, 2 jours, 3...). Il caractérise la mémoire du système étudié et rend compte de sa régulation. Ces caractéristiques sont données par l'effet mémoire qui est le nombre de jours correspondant à un coefficient de corrélation égal à 0.2 (A. MANGIN, 1981).

Le spectre exprime les mêmes phénomènes que le corrélogramme, mais dans le domaine fréquentiel. Il met mieux en évidence les composantes de la chronique.

Résultats :

Le corrélogramme de la pluie présente la corrélation la moins bonne (cf. graphique 3-26). Au bout de deux jours, le coefficient de corrélation est presque nul. La pluie est un phénomène avec peu de mémoire. Elle a un comportement quasi-aléatoire à cette échelle.

Par contre, les débits à Portet et au Baget ont un effet mémoire plus important. Ce dernier est respectivement de 61 jours et de 17 jours. **Les bassins hydrologiques ont donc un rôle régulateur manifeste.** Celui-ci, plus accentué sur la Garonne, dénote des réserves plus importantes. La régulation entraîne aussi un cycle saisonnier, bien visible sur les spectres (pic à 365 jours).



Graphique 3 - 25. Chroniques de la pluie à Blagnac ①, des débits de la Garonne à Portet ②, des débits de l'aquifère karstique du Baget ③, de la piézométrie à Saint-Porquier ④ et à Finhan ⑤, période 1982 à 1990

La piézométrie à Saint-Porquier et à Finhan possède un effet mémoire encore plus important. Il est de 117 jours à Finhan et de 455 jours à Saint-Porquier. Les nappes ont donc un pouvoir régulateur qui est nettement plus élevé que celui des bassins hydrologiques. Le cycle saisonnier est aussi présent.

Cependant, on note l'apparition d'une tendance bien marquée qui n'est pas visible sur les autres spectres. Cette tendance, expliquée par une diminution progressive de la piézométrie, est liée, soit à une baisse naturelle, soit à une surexploitation par les agriculteurs de la nappe alluviale qui possède une densité importante de puits et forages (J.C. SOULE, 1982, rapport BRGM). L'effet conjugué de ces deux hypothèses est aussi envisageable.

3.1.3.3. Analyses croisées pluies-débits et pluies-piézométries

Rappels :

La pluie étant considérée comme quasi-aléatoire, l'analyse croisée fournit la réponse impulsionnelle du système. Cette dernière n'est autre que l'hydrogramme unitaire, pour les bassins hydrologiques, et le limnigramme unitaire, pour la piézométrie. Cette réponse unitaire est d'autant plus proche de la réalité que le système est linéaire. Une bonne linéarité est symbolisée par une valeur proche de 1 sur la fonction de cohérence.

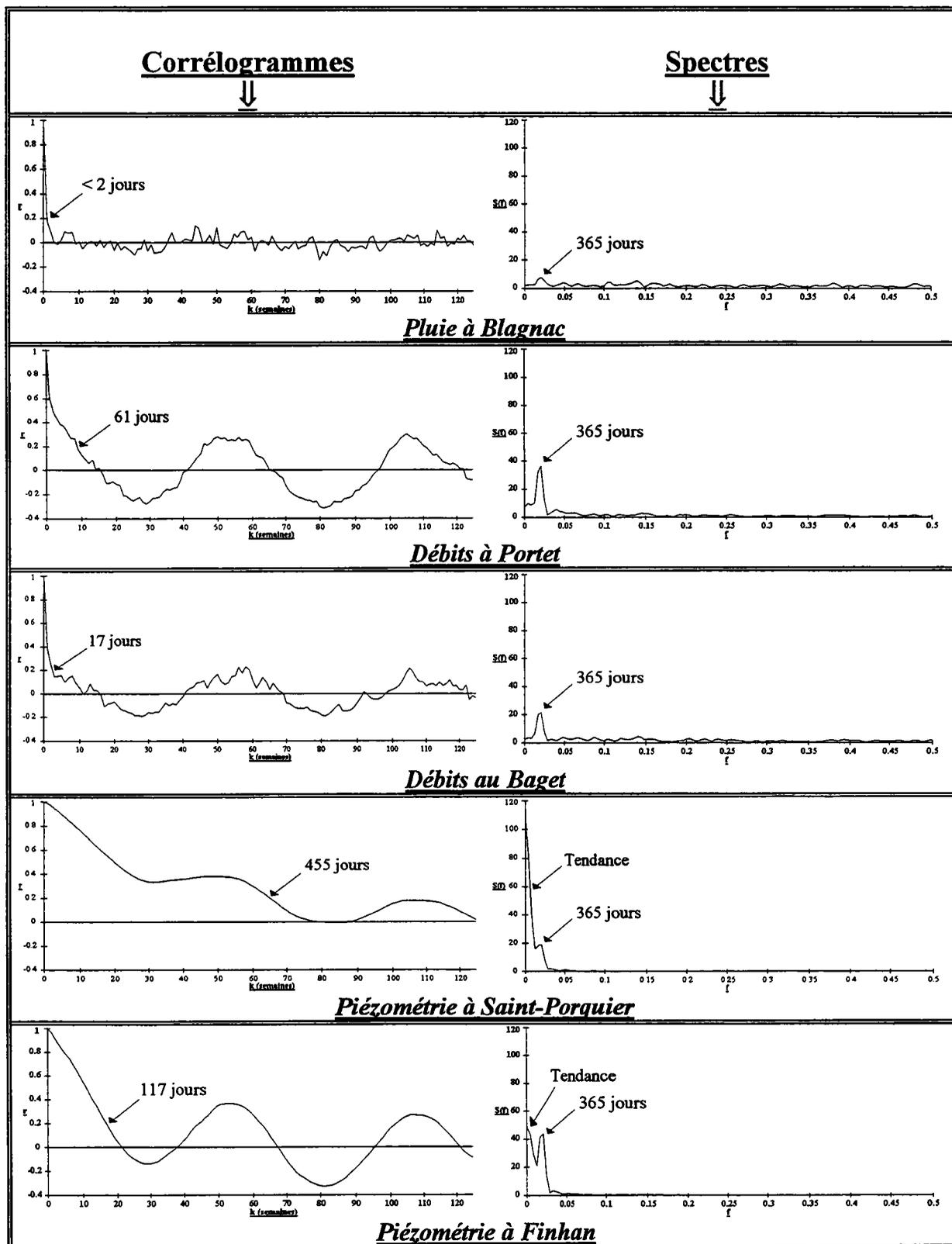
Résultats :

La réponse des bassins hydrologiques et celle de la piézométrie est tout à fait différente (cf. graphique 3-27). Dans le premier cas, la fonction de transfert, rapide, est représentée sur le corrélogramme par un pic étroit. Dans le deuxième cas, plus atténuée, plus longue, elle est symbolisée par un large dôme. Le comportement particulier du piézomètre de Finhan, qui possède de fortes amplitudes de variations, est marqué par un piézoigramme unitaire plus accentué.

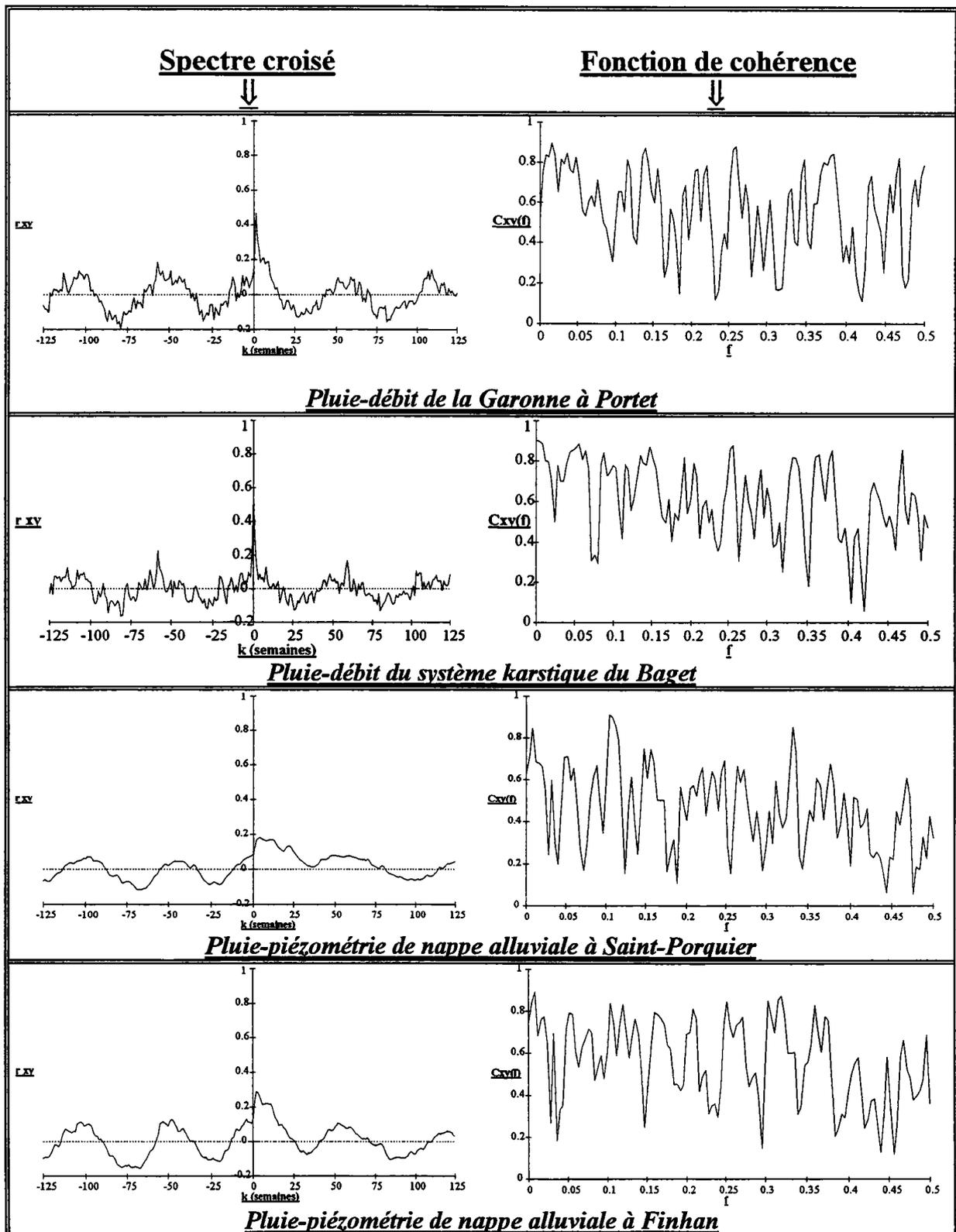
Une faible différence entre les deux hydrogrammes unitaires des bassins hydrologiques apparaît lors de la décrue. Elle représente l'effet des réserves du bassin de la Garonne (réserves naturelles et anthropiques).

Le temps de réponse moyen des systèmes hydrologiques est de quelques heures (Baget) à quelques jours (Garonne). Il est de plusieurs semaines pour la nappe alluviale (10 semaines environ).

En outre, la fonction de cohérence, symbolisant la linéarité, oscille autour de 0.7 pour les bassins hydrologiques. Elle n'est pas meilleure pour la piézométrie. Pourtant, la nappe possède une structure bien homogène. La réponse du système tient donc davantage à son fonctionnement qu'à sa structure.



Graphique 3 - 26. Corrélogrammes et spectres de la pluie, des débits et de la piézométrie, pas hebdomadaire, fenêtre [1 (7 jours) à 125 (2.4 ans)], filtre de Tukey, période 1982 à 1990



Graphique 3 - 27. Corrélogrammes croisés et fonctions de cohérence des analyses croisées pluie-débit et pluie-piézométrie, pas hebdomadaire, fenêtre [1 (7 jours) à 125 (2.4 ans)], période 1982-1990

Conclusions

Les systèmes hydrologiques et la nappe alluviale ont un rôle régulateur. Ce dernier est mis en évidence par les corrélogrammes où l'effet mémoire est nettement plus élevé que celui de la pluie.

L'effet mémoire est important pour les aquifères poreux, puisqu'il atteint 455 jours à Saint-Porquier. Il est plus faible pour les aquifères karstiques et les systèmes hydrologiques de surface : 61 jours pour le bassin de la Garonne en amont de Portet, et 17 jours pour le karst du Baget. Cependant, certains karsts ont un effet mémoire plus élevé. C'est le cas de Fontestorbes dans le bassin de l'Ariège (64 jours).

L'analyse croisée confirme le rôle très régulateur des aquifères poreux. Le piézogramme unitaire est très étalé. Le déphasage moyen est de 10 semaines.

Le cycle saisonnier, lié aussi à la régulation des apports, est bien marqué dans l'ensemble. Il est, néanmoins, caché par la tendance dans le cas des aquifères poreux.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est difficile de déterminer l'origine de la tendance (anthropique ou naturelle). Mais, cette tendance n'existe pas dans la pluie pour la même période. L'hypothèse la plus vraisemblable est donc une "vidange" pluriannuelle de la nappe, très probablement sous l'effet d'une surexploitation.

Après avoir étudié le rôle des aquifères karstiques et alluviaux et leur comportement dynamique, nous allons tenter d'évaluer l'importance des réserves souterraines sur le bassin de la Garonne, à partir de l'analyse corrélatoire et spectrale des chroniques de débits. Chaque bassin versant des principaux affluents de la Garonne est examiné séparément afin de connaître l'origine de ses réserves.

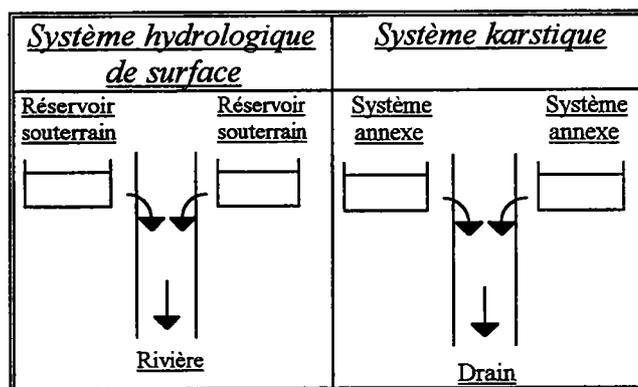
Un chapitre est consacré, ensuite, aux effets climatiques sur l'écoulement souterrain (sources karstiques) et sur l'écoulement des rivières. Pour cela, l'étude de la tendance des chroniques de débits est effectuée sur le Baget (écoulement souterrain), à Portet et sur les principaux affluents (écoulement des rivières).

3.2. Mise en évidence des réserves souterraines et variabilité du climat sur les écoulements

3.2.1. Evaluation des réserves de la Garonne et des différents affluents par l'analyse corrélatoire et spectrale des chroniques de débits.

Introduction

Appliquées à l'étude des systèmes karstiques, les analyses corrélatoires et spectrales (ACS) peuvent aussi être utilisées dans l'étude des systèmes hydrologiques de surface (bassin versant). La transposition entre les deux systèmes est simple (cf. figure et tableau infra). L'écoulement de l'eau (fonction de transit) s'effectue, pour les aquifères karstiques, par l'intermédiaire **d'un drain**. Pour les systèmes hydrologiques de surface, c'est **la rivière** qui assure cette fonction. De même, les réserves³ (fonction capacitive) sont représentées, pour les aquifères karstiques, par **les systèmes annexes**. Pour les systèmes hydrologiques de surface, les réserves sont **souterraines et neigeuses**.



	<u>Fonction de transit</u>	<u>Fonction capacitive</u>
<u>Système karstique</u>	Drain	Systèmes annexes
<u>Système hydrologique de surface</u>	Cours d'eau	Réserves souterraines et neigeuses

L'interprétation des résultats de l'ACS est rigoureusement identique. La régulation du système est évalué sur le spectre ou le corrélogramme. L'importance des réserves est estimé à partir de l'effet mémoire, tiré du corrélogramme. On rappellera que l'effet mémoire s'exprime en jours et qu'il est pris pour une autocorrélation égale à 0.2 (A MANGIN, 1981).

Les analyses des chroniques de débits, des aquifères karstiques, et des systèmes hydrologiques de surface, ont été effectuées avec deux fenêtres : une de 1 à 125 jours, et l'autre, de 10 à 1250 jours. La première fenêtre permet de voir l'évolution des débits à court terme. La seconde fenêtre caractérise le comportement pluriannuel des systèmes.

Nous avons utilisé une période commune d'enregistrement, d'une durée de 15 ans (1973-1987), afin de comparer les différents systèmes. Cette longueur d'enregistrement permet d'obtenir le comportement moyen du système considéré.

³ On entend ici par réserve, la réserve dynamique. L'essentiel de cette réserve s'écoule de façon différée à la rivière, le reste ne pouvant être mobilisé que par des moyens artificiels.

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de quelques aquifères karstiques. Ceux-ci serviront d'élément de référence pour l'étude des systèmes hydrologiques de surfaces : bassin de la Garonne et bassins des principaux affluents de la Garonne.

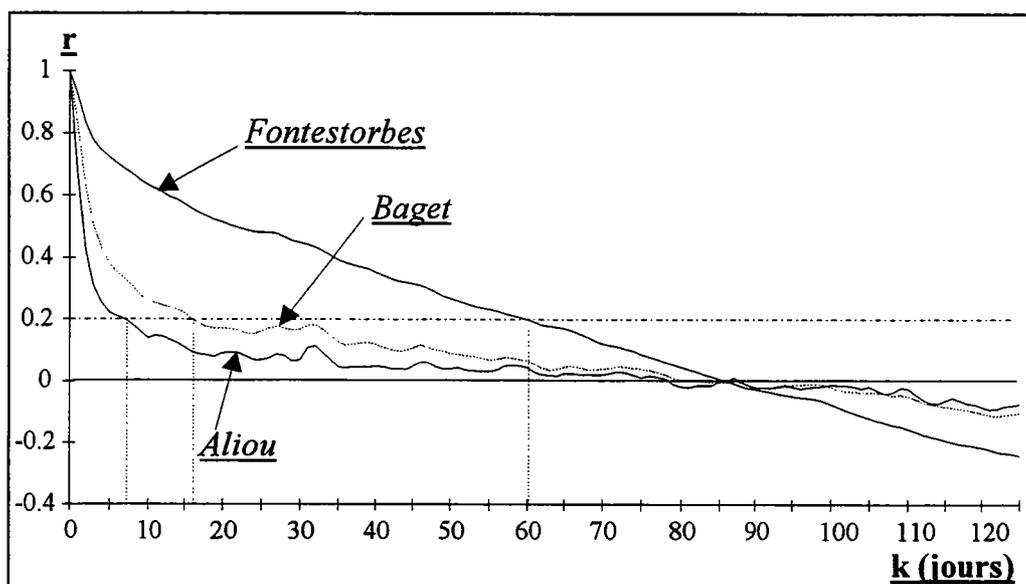
3.2.1.1. Les aquifères karstiques

Trois exemples d'aquifères ont été traités. Il s'agit d'Aliou, du Baget et de Fontestorbes, tous trois situés dans la partie pyrénéenne. Ils sont étudiés depuis plusieurs années, par le Laboratoire Souterrain du CNRS à Moulis.

3.2.1.1.1. Analyse à court terme

Les systèmes karstiques présentent une autocorrélation bien marquée, au contraire de la pluie, qui possède un caractère quasi-aléatoire. Le signal d'entrée (la pluie) est donc modulé, ce qui affirme le rôle régulateur de ces aquifères.

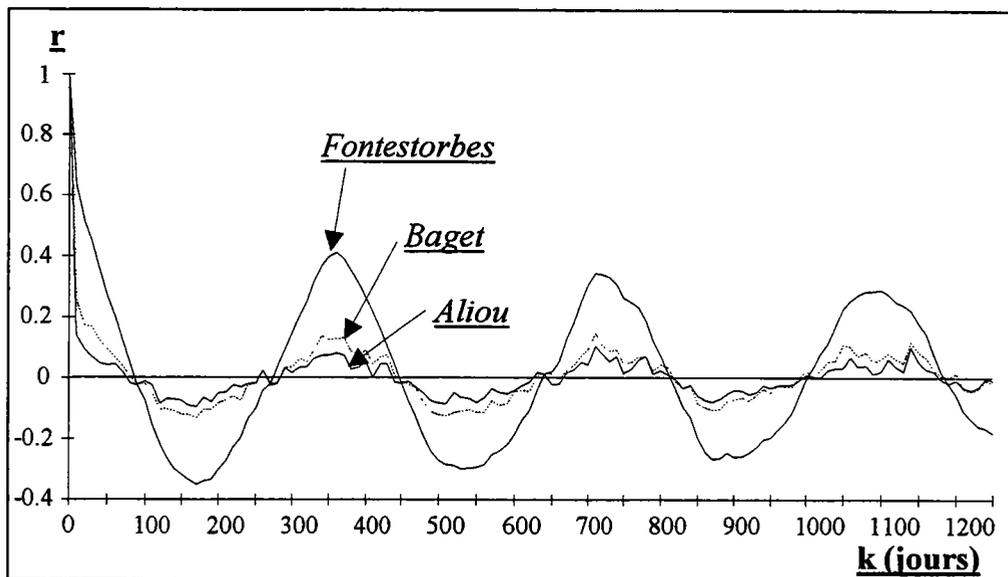
L'effet mémoire de ces aquifères karstiques est différent (cf. graphique 3-28). Il est de 60 jours pour Fontestorbes, 16 jours pour le Baget et 7 jours pour Aliou. Ceci met en évidence l'existence de réserves considérables pour Fontestorbes et des réserves plus faibles pour le Baget et Aliou. Ces résultats sont confirmés par le volume dynamique (volume des réserves) qui est d'environ 24 millions de m³ à Fontestorbes, 2 millions de m³ au Baget et 0.2 million de m³ à Aliou.



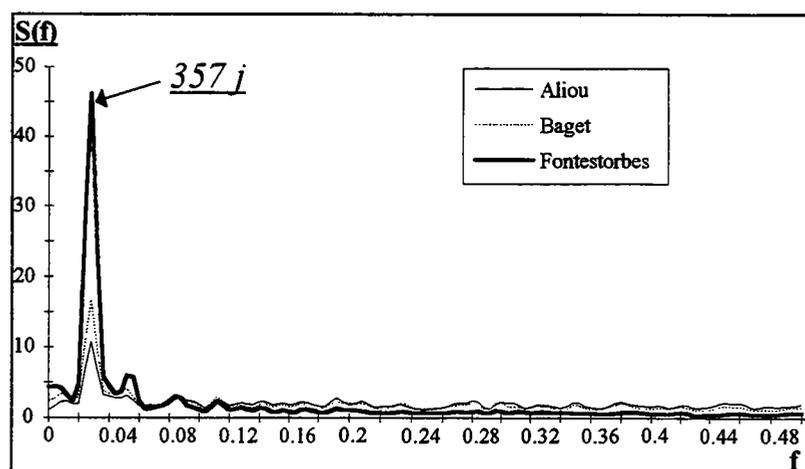
Graphique 3 - 28. Corrélogrammes simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987

3.2.1.1.2. Analyse à long terme

L'analyse à long terme met en évidence un cycle saisonnier (cf. graphique 3-29). Ce cycle est induit par les aquifères, car il n'est pas présent dans la pluie. Il est d'autant plus marqué que les réserves sont importantes et régulatrices (cf. graphique 3-30).



Graphique 3 - 29. Corrélogrammes simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987



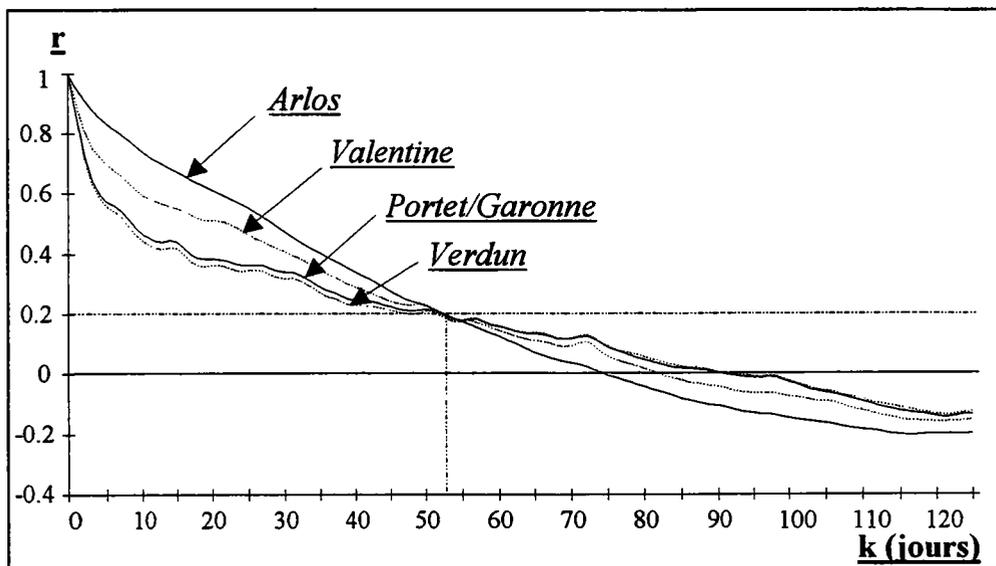
Graphique 3 - 30. Spectres simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987

3.2.1.2. La Garonne

Les débits de la Garonne proviennent de quatre stations hydrométriques. Il s'agit de l'amont vers l'aval de la station d'Arlos, de Valentine, de Portet et de Verdun.

3.2.1.2.1. Analyse à court terme

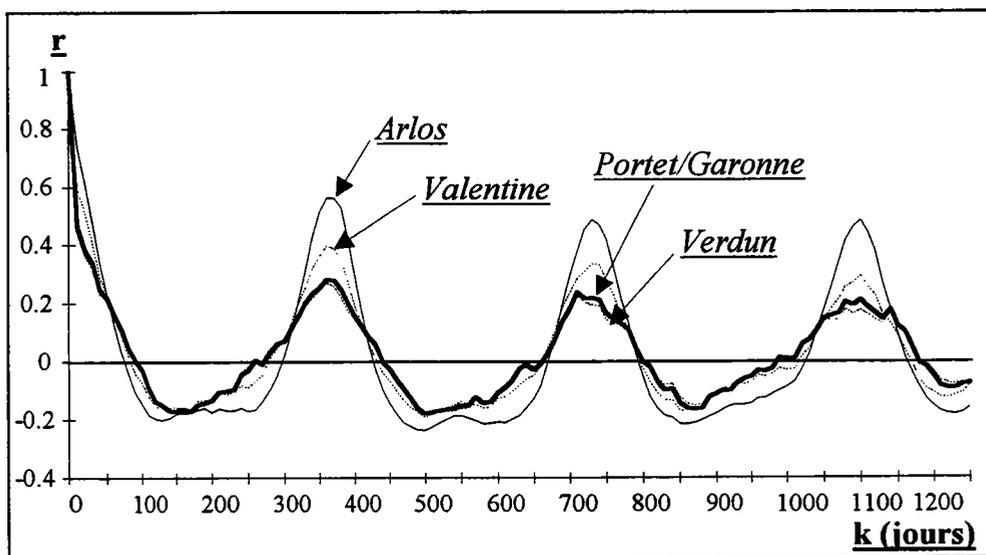
L'effet mémoire des quatre chroniques est le même (cf. graphique 3-31). Il est d'environ 53 jours, il dénote l'existence d'importantes réserves en amont des stations (réserves qui sont d'ailleurs proportionnelles à l'étendue des bassins versants). Pour k inférieur à 53 jours, la décroissance, de plus en plus rapide, des corrélogrammes des stations en aval, est due au ruissellement qui devient de plus en plus important.



Graphique 3 - 31. Corrélogrammes simples sur la Garonne, fenêtre : [1, 125], période 1973 à 1987

3.2.1.2.2. Analyse à long terme

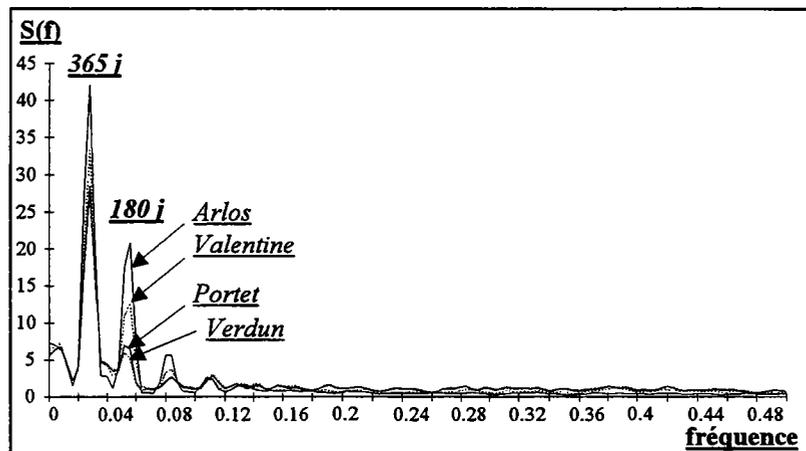
L'analyse à long terme fait apparaître un cycle annuel, comme pour les aquifères karstiques. Ce cycle est plus ou moins accentué suivant l'importance de la régulation (cf. graphique 3-32). Le coefficient d'autocorrélation (r_k) atteint, pour ce cycle, 0.6 à Arlos, 0.4 à Valentine et 0.3 à Portet et Verdun.



Graphique 3 - 32. Corrélogrammes simples sur la Garonne, fenêtre : [10, 1250], période 1973 à 1987

Sur le spectre simple (cf. graphique 3-33), le cycle annuel est bien marqué (pic à 365 jours). La valeur du spectre, pour ce cycle, est d'autant plus grande que la régulation est importante. Il apparaît d'autre part, un pic secondaire vers 180 jours, lié à la fonte des neiges. C'est un artefact dû à la méthode qui permet d'identifier les fonctions périodiques

dissymétriques (utilisation de la transformée de Fourier). Le phénomène de la fonte des neiges étant moins important en intensité et décalé par rapport au cycle des précipitations, il est représenté par un pic de périodicité égale à 180 jours. Ce dernier est présent à Arlos et Valentine et, de façon moins nette à Portet et Verdun, car le bassin reçoit des apports plus diversifiés.



Graphique 3 - 33. Spectres simples sur la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987

3.2.1.3. Les affluents de la Garonne

Nous avons examiné successivement le comportement des affluents de la rive droite de la Garonne, puis de la rive gauche. Les affluents sont les suivants (de l'amont vers l'aval du bassin) :

- *en rive droite* : le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize, l'Ariège, la Lèze et le Girou (sous affluents de la Garonne);
- *en rive gauche* : la Neste, la Noue, la Louge, le Touch, la Save et la Gimone.

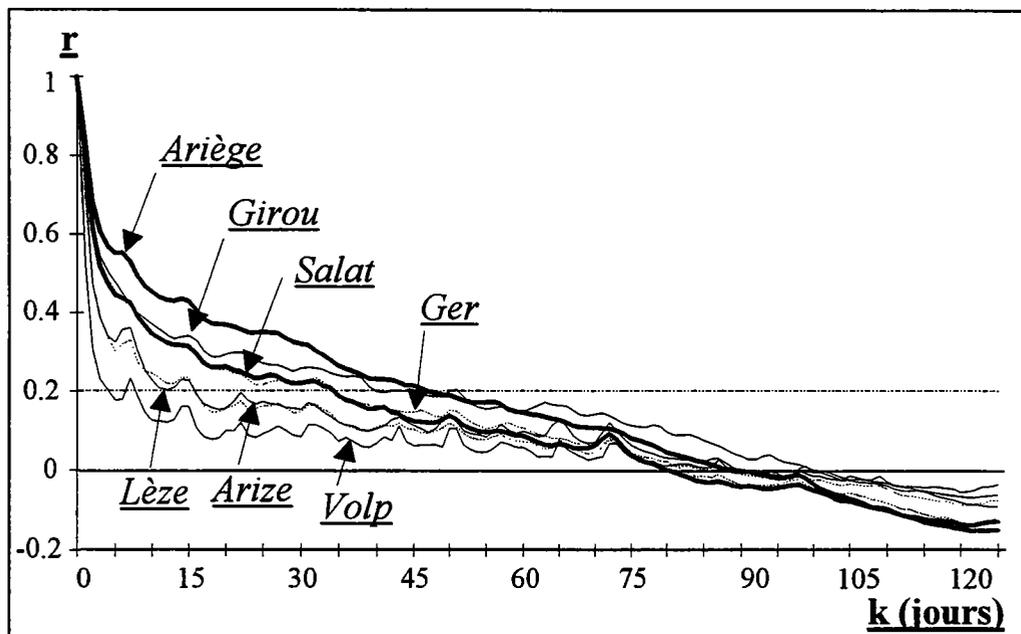
3.2.1.3.1. Affluents de la rive droite

3.2.1.3.1.1. Analyse à court terme

Nous pouvons distinguer les affluents possédant des réserves importantes : l'Ariège, le Girou, le Salat et le Ger, ceux possédant des réserves plus faibles : l'Arize et la Lèze, et enfin un affluent avec des réserves négligeables : le Volp (cf. graphique 3-34). La faible décroissance des corrélogrammes du Salat et de l'Ariège et un effet mémoire relativement important (47 jours pour l'Ariège et 34 jours pour le Salat) s'expliquent par des réserves neigeuses importantes sur ces bassins.

Par contre, l'effet mémoire important du Girou (51 jours) et du Ger (34 jours) est simplement lié aux réserves souterraines. Ces dernières proviennent de nombreux aquifères karstiques, pour le Ger, et d'une nappe alluviale assez étendue, pour le Girou.

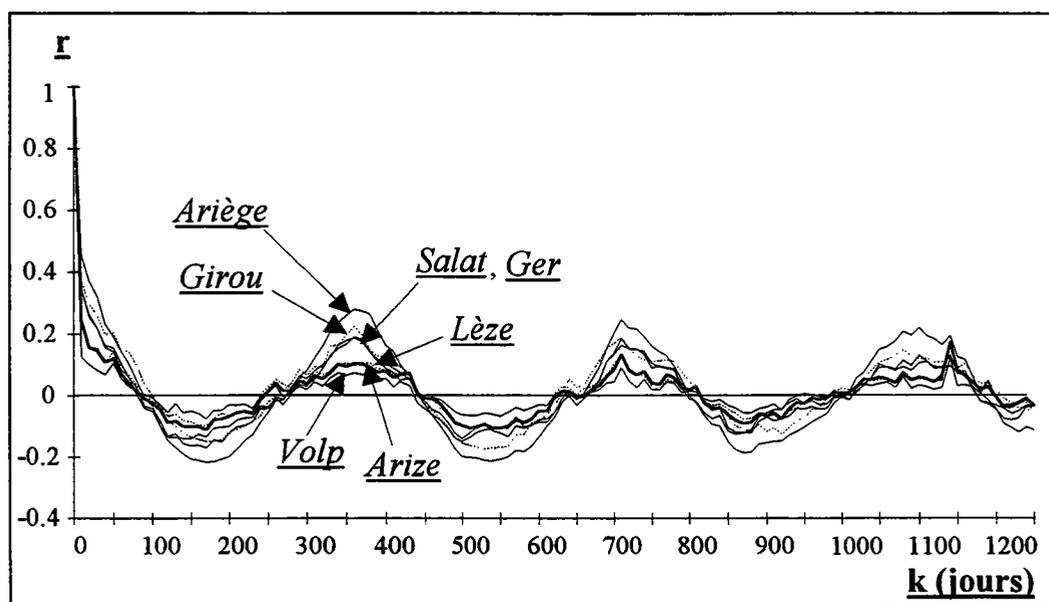
L'Arize et la Lèze ont un effet mémoire équivalent à celui du Baget (16 jours). Elles ont des réserves plus faibles. Le Volp possède un effet mémoire faible (8 jours). Il n'a pas beaucoup de réserves et les écoulements sont principalement liés au ruissellement. Par son comportement, il s'apparente au système karstique d'Aliou.



Graphique 3 - 34. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive droite de la Garonne, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987

3.2.1.3.1.2. Analyse à long terme

Le cycle annuel est prononcé pour l'Ariège, le Girou, le Salat et le Ger, c'est-à-dire pour les affluents possédant des réserves régulatrices importantes (cf. graphique 3-35). Pour les autres affluents, le cycle est peu accentué.



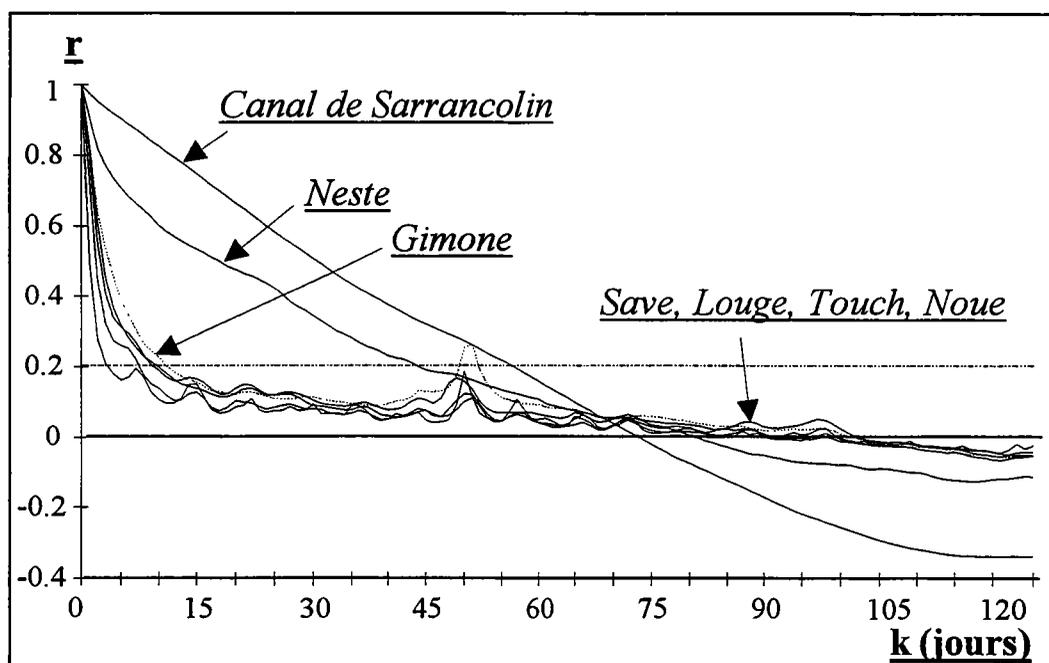
Graphique 3 - 35. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive droite de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987

3.2.1.3.2. Affluents de la rive gauche

3.2.1.3.2.1. Analyse à court terme

La Neste se distingue par son corrélogramme dont la décroissance est assez lente (cf. graphique 3-36). L'effet mémoire égal à 44 jours s'explique par la présence de réserves importantes (neigeuses, souterraines et lacustres). Tous les autres affluents ont un corrélogramme qui décroît assez rapidement. L'effet mémoire de ces derniers est faible : 11 jours pour la Gimone, 10 jours pour la Save, 9 jours pour la Louge, 8 jours pour le Touch et 3 jours pour la Noue. Ces bassins sont dépourvus de réserves et les écoulements sont liés au ruissellement.

Le corrélogramme du canal de Sarrancolin a été ajouté, afin de montrer la forte autocorrélation qui existe entre les débits prélevés. Ces derniers sont quasi-constants : ils sont d'environ 7 m³/s.

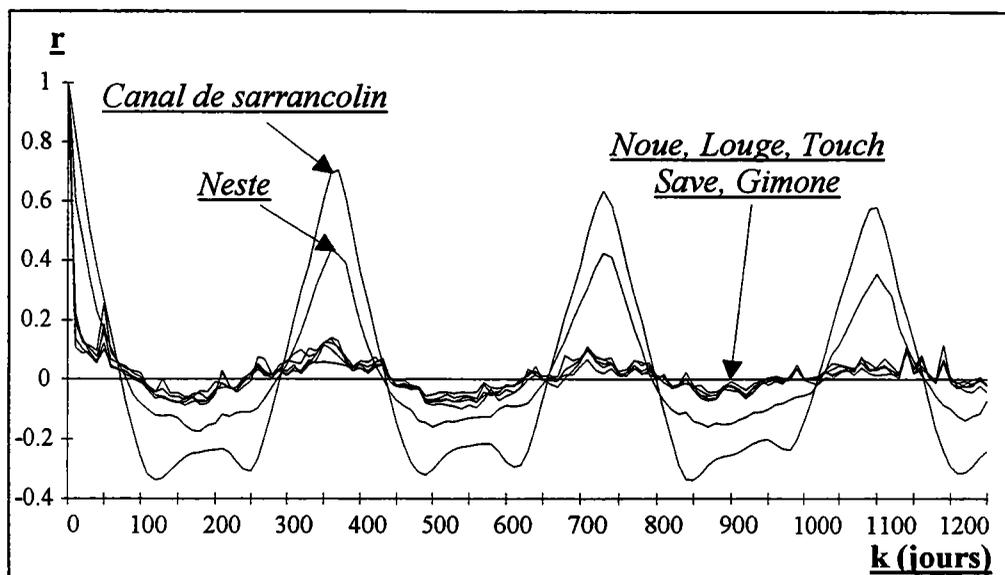


Graphique 3 - 36. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive gauche de la Garonne, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987

3.2.1.3.2.2. Analyse à long terme

A part la Neste, tous les autres affluents de la rive gauche ont un cycle saisonnier peu marqué. Ceci confirme, encore une fois, la carence de réserves sur ces bassins (cf. graphique 3-37).

Remarque : la présence d'un cycle annuel accentué pour le canal de Sarrancolin s'explique par la gestion saisonnière qui est pratiquée.



Graphique 3 - 37. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive gauche de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987

Conclusions

L'analyse des chroniques de débits a montré que les aquifères karstiques et les systèmes hydrologiques de surface ont un rôle régulateur. Celui-ci varie selon les bassins. Il est élevé pour les bassins possédant des réserves neigeuses. L'effet mémoire le plus important, tous systèmes confondus (cf. tableau 3-4), est celui de l'aquifère karstique de Fontestorbes (60 jours). Les bassins présentant des réserves sont :

- l'Ariège, le Salat, le Girou et le Ger : affluents rive droite;
- la Neste : affluent rive gauche;
- la Garonne.

On peut les classer, via le spectre et le corrélogramme, suivant l'origine et l'importance de leurs réserves :

- **les bassins avec réserves neigeuses dominantes** : type Neste (les systèmes neigeux se distinguent des autres systèmes par un pic à 180 jours bien marqué sur le spectre (cf. graphique 3-38));
- **les bassins avec réserves souterraines et neigeuses importantes** : Ariège et Salat;
- **les bassins avec réserves souterraines importantes** : Girou et Ger;
- **les bassins avec réserves souterraines plus faibles** : Arize et Lèze;
- **les bassins dépourvus de réserves** : Gimone, Noue, Touch, Save, Louge, Volp. Ce sont donc surtout des affluents de la rive gauche. Ils sont, depuis des dizaines d'années, réalimentés par le canal de la Neste et le canal de Saint-Martory.

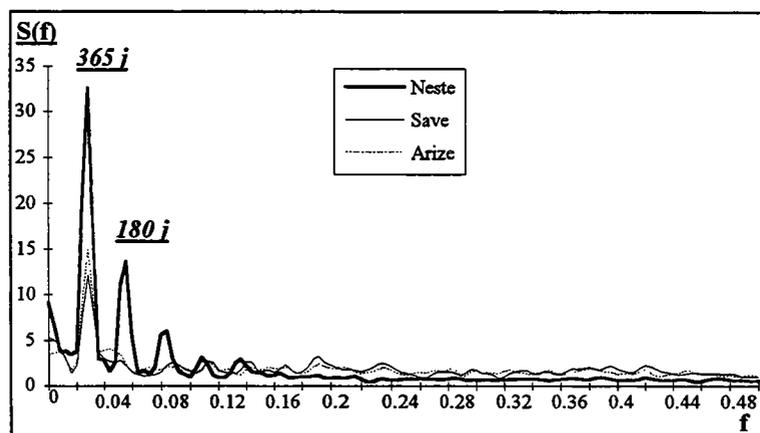
Ces résultats sont tout à fait en accord avec ceux concernant les apports des affluents à la Garonne (cf. partie 2). L'étude du tarissement, lorsqu'elle est possible, quantifiera par la suite les réserves présentes sur ces bassins.

Bassins hydrologiques	Situation	Effet mémoire (jours)
Girou	Rive Droite	51
Ariège	Rive Droite	47
<i>Neste</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>44</i>
Salat	Rive Droite	34
Ger	Rive Droite	34
Arize	Rive Droite	16
Lèze	Rive Droite	16
<i>Gimone</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>11</i>
<i>Save</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>10</i>
<i>Louge</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>9</i>
<i>Touch</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>8</i>
Volp	Rive Droite	8
<i>Noüe</i>	<i>Rive Gauche</i>	<i>3</i>

Stations sur la Garonne	Effet mémoire (jours)
Arlos	53
Valentine	53
Portet	53
Verdun	53

Systèmes karstiques	Effet mémoire (jours)
Fontestorbes	60
Baget	16
Aliou	7

Tableau 3 - 4. Effet mémoire des différents systèmes étudiés, période 1973 à 1987



Graphique 3 - 38. Spectres simples sur trois affluents de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987

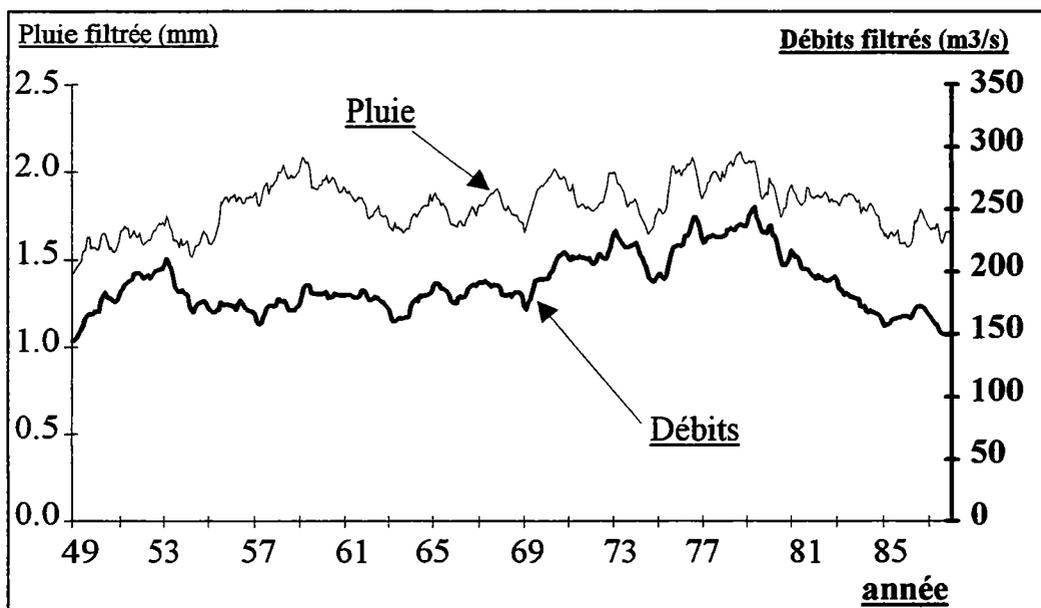
3.2.2. Etude de la tendance des débits à Portet (1910-1991) et sur les différents affluents.

Introduction

L'évolution de la pluviométrie, des réserves souterraines, et du débit des cours d'eau est intimement liée à l'évolution climatique. Ainsi, pendant les périodes sèches, les précipitations sont faibles, les réserves s'atténuent, et les rivières se tarissent rapidement. Par contre, pendant les périodes humides, les précipitations sont plus fortes, les réserves augmentent, et les débits des cours d'eau sont élevés.

L'étude de l'évolution climatique peut donc s'effectuer sur les données de l'hydrométrie ou de la pluviométrie. Pour argumenter ce fait, nous avons étudié la tendance sur la chronique des pluies à Blagnac et la chronique des débits à Portet pour une période commune, allant de 1947 à 1989.

Le résultat de cette étude montre une évolution similaire des deux courbes (cf. graphique 3-39).



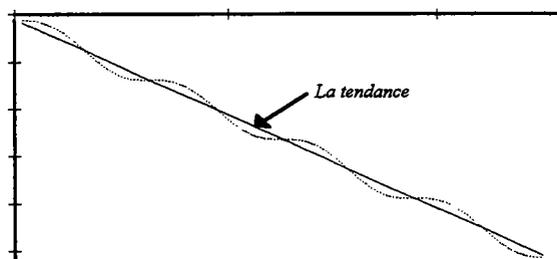
Graphique 3 - 39. Comparaison de la tendance sur la chronique des pluies Blagnac (précipitations journalières), et sur la chronique des débits à Portet (débits moyens journaliers), pour la période 1947-1989 (moyenne mobile d'amplitude 1460 jours, 4 ans)

Cependant, dans le détail, on constate pour la période la plus récente, une décroissance bien plus marquée sur les débits que sur la pluviométrie. Cette accentuation peut provenir des prélèvements en rivière, dont le nombre n'a cessé d'augmenter depuis les années 80. L'étude de la tendance climatique stricto sensu est donc préférable sur les données de pluies.

La suite de ce chapitre est exclusivement vouée à l'étude de la tendance sur les débits. Dans un premier temps, nous avons analysé la tendance sur une longue période (étude de la

chronique des débits à Portet de 1910 à 1991), afin de situer l'évolution actuelle. Puis, dans un deuxième temps, nous avons comparé la tendance sur la Garonne, à partir de quelques stations, et celle sur différents affluents de la Garonne, afin de caractériser leur comportement.

Mais avant toute chose, il faut définir la tendance. Cette dernière permet d'apprécier l'évolution d'une chronique. Elle peut être croissante, décroissante ou nulle. Elle est comparable à la tendance boursière qui permet d'apprécier l'évolution des valeurs. Sur la figure ci-dessous, la tendance de la courbe, qui montre des fluctuations, est décroissante.



Le calcul de la tendance est simple : il consiste à un filtrage linéaire de la chronique considérée à partir d'une moyenne mobile équipondérée (M. BARBUT & C. FOURGEAUD, 1971), choisie judicieusement (plus la moyenne mobile est grande, plus la chronique sera filtrée).

La valeur filtrée (Y_n) est égale à :

$$Y_n = \frac{X_{n-(mb/2)} + X_{n-(mb/2)+1} + \dots + X_n + \dots + X_{n+(mb/2)-1} + X_{n+(mb/2)}}{mb}$$

avec :

- X_n : valeur n de la chronique non filtrée;
- mb : amplitude de la moyenne mobile.

Par exemple, si on veut filtrer une chronique possédant un phénomène saisonnier, on choisira une moyenne mobile d'amplitude 365 jours. La 1000^{ème} valeur filtrée sera égale à :

$$Y_{1000} = \frac{X_{818} + X_{819} + \dots + X_{1000} + \dots + X_{1181} + X_{1182}}{365}$$

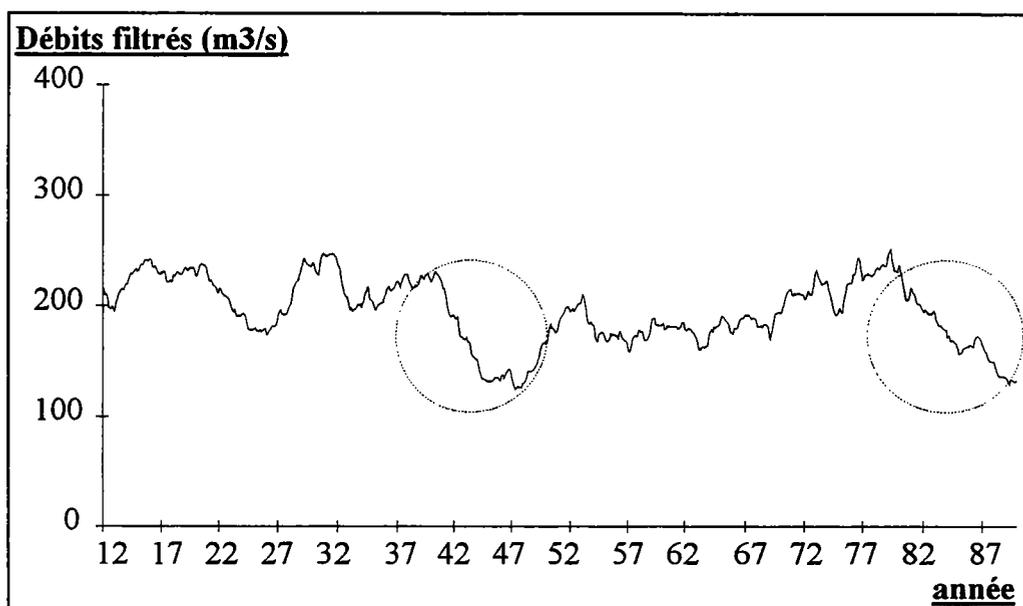
La nouvelle valeur de la chronique représentant la tendance sera donnée par : $X_{1000} - Y_{1000}$

Dans les exemples traités, nous avons choisi une moyenne mobile appropriée, d'amplitude 1460 jours (ce qui équivaut à 4 ans). Cette amplitude a été choisie pour bien distinguer l'évolution pluriannuelle des débits et pour éliminer les variations saisonnières, car 1460 est un multiple de 365.

3.2.2.1. Evolution hydrologique actuelle : étude des débits à Portet de 1910 à 1991

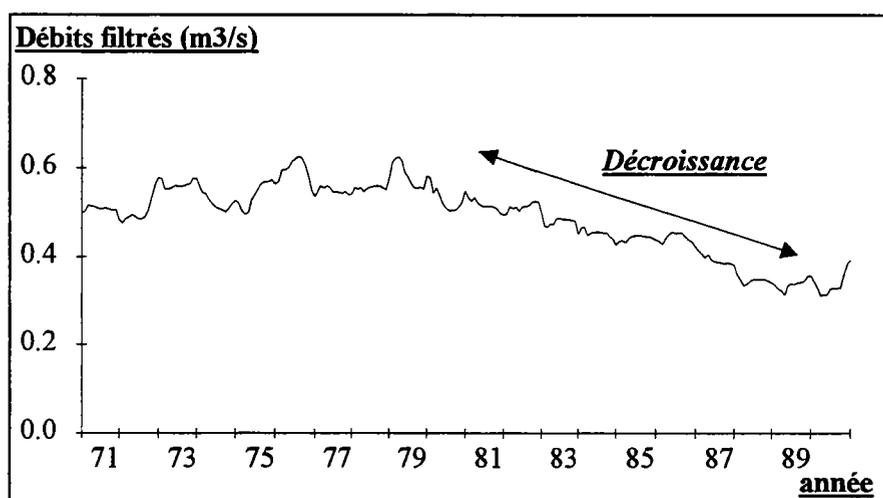
L'analyse montre (cf. graphique 3-40), en premier lieu, que l'évolution des débits à Portet est soumise à de variations notables; l'évolution est parfois croissante, parfois décroissante. Elle caractérise, en second lieu, des périodes "humides" (années 1910 et 1970, fin des années 20) et des périodes "sèches" (années 40 et années 80).

La période actuelle est figurée par une évolution décroissante. La tendance calculée sur deux autres stations hydrométriques, possédant une chronique assez longue de débits, celle de Valentine sur la Garonne et celle de Roquefort sur le Salat, présente la même évolution. Cette baisse des débits s'est arrêtée en 1992. Elle a mis en alarme les gestionnaires, mais elle était comparable à celle des années 1940 (cercles en pointillés sur le graphique).



Graphique 3 - 40. Chronique de Portet (1910-1991, débits moyens journaliers) filtrée avec une moyenne mobile d'amplitude 1460 jours (4 ans)

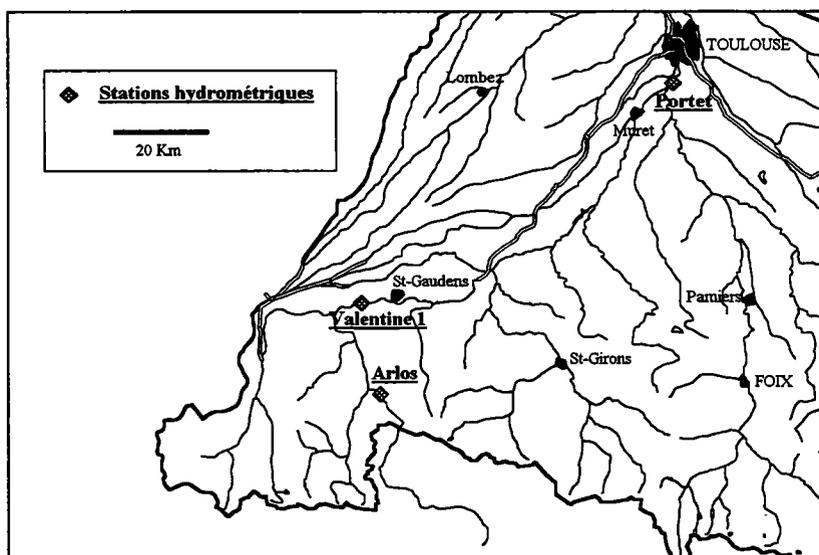
Cette décroissance actuelle est aussi présente sur les niveaux piézométriques, et sur les débits des aquifères karstiques (cf. graphique 3-41).



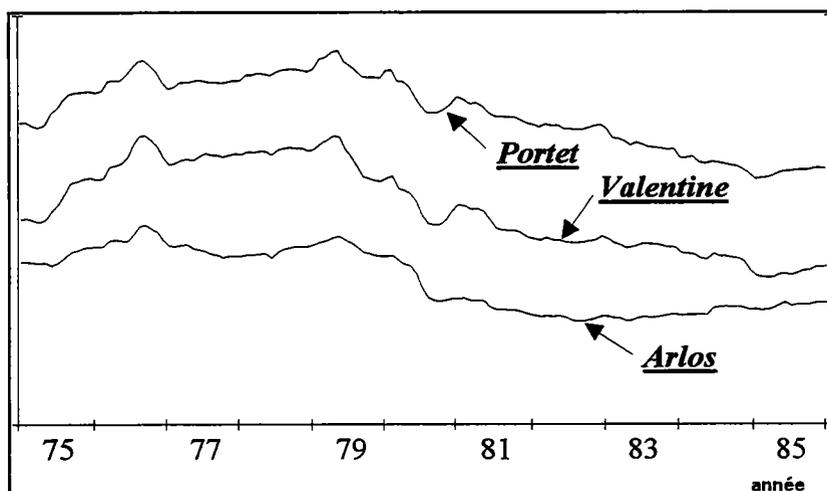
Graphique 3 - 41. Evolution de la tendance des débits de la source karstique du Baget (Ariège, 1969-1992). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours

3.2.2.2. Evolution de la tendance le long de la Garonne : période 1973 à 1987

Trois stations hydrométriques permettent d'examiner cette évolution : la station d'Arlos, la station de Valentine et la station de Portet (cf. carte 3-4). Les chroniques sont filtrées avec une moyenne mobile équipondérée d'amplitude 1460 jours, comme précédemment (cf. graphique 3-42).



Carte 3 - 4. Localisation des stations hydrométriques sur la Garonne



Graphique 3 - 42. Evolution de la tendance sur la Garonne (stations d'Arlos, Valentine et Portet, 1973-1987). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours. (L'échelle de l'axe des ordonnées n'est pas figuré afin de confronter les courbes).

L'évolution de la tendance est quasi-semblable sur les trois courbes. Une différence doit tout de même être notée : la courbe d'Arlos, à partir de 1983, est légèrement croissante alors qu'elle est décroissante sur les autres stations. Elle peut s'expliquer par une augmentation des prélèvements, pour les besoins de l'irrigation, en aval de la station d'Arlos.

3.2.2.3. Evolution de la tendance pour différents affluents de la Garonne

Les affluents sélectionnés sont les suivants :

- en rive gauche : la Neste, la Noue, la Louge, le Touch, la Save et la Gimone,
- en rive droite : le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize, l'Ariège, la Lèze et le Girou (sous affluents de la Garonne) (cf. carte 3-5).

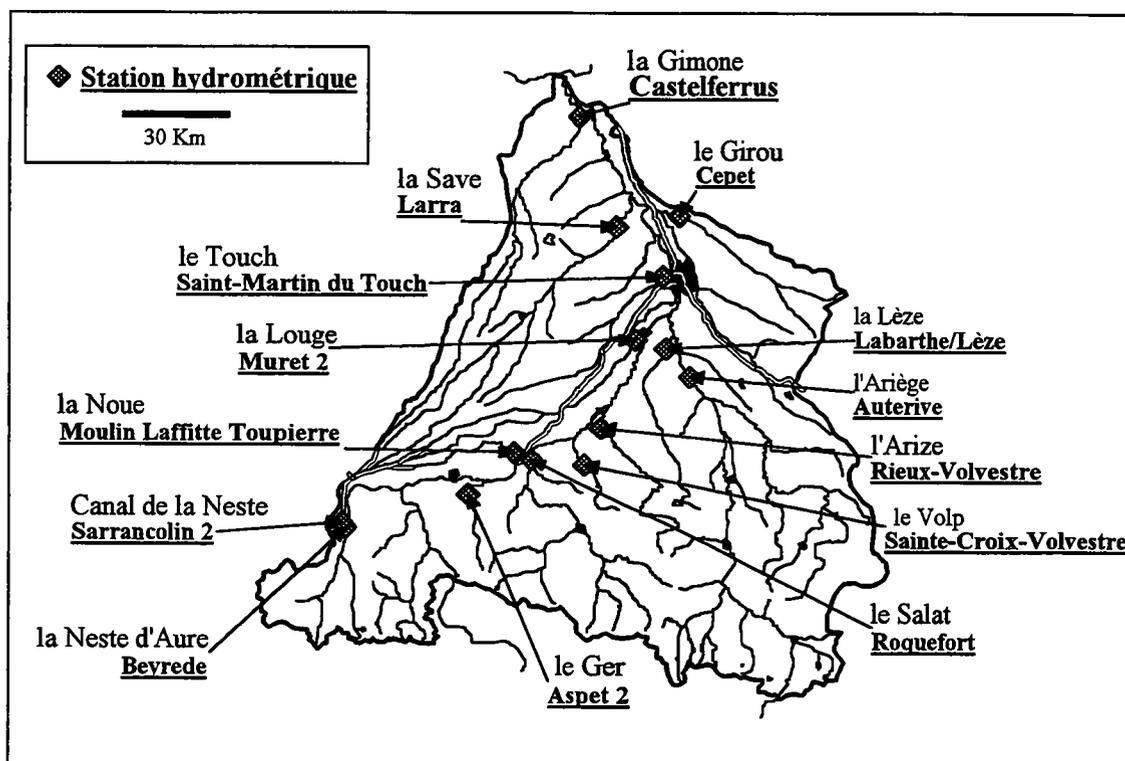
L'évolution de la tendance n'est pas la même pour l'ensemble des affluents (cf. graphique 3-43).

On peut distinguer trois groupes d'affluents dont l'évolution est quasi-semblable et fonction de la présence de réserves qui jouent un rôle de régulation :

- l'Ariège, le Salat et la Neste : affluents montagneux;
- les autres rivières de la rive gauche et de la rive droite : l'évolution est plus saccadée, car ces affluents ne possèdent pas de réserves importantes;
- le Ger : petit affluent de la rive droite. Il se distingue par **une tendance assez stable** correspondant à des débits quasi-constants. **Le Ger semble donc nettement moins sensible aux variations climatiques.** Ceci provient de la présence de nombreux aquifères karstiques dont le pouvoir régulateur est important.

La stabilité de la tendance est comparable à la tendance du canal de la Neste où les débits prélevés sont quasi-constants (cf. graphique).

Deux affluents, le Volp, en rive droite, et la Noue, en rive gauche, ont une tendance similaire, malgré leur différence de superficie (Noue : 120 km², Volp : 91 km²). Ceci s'explique par des réserves plus notables sur le Volp.



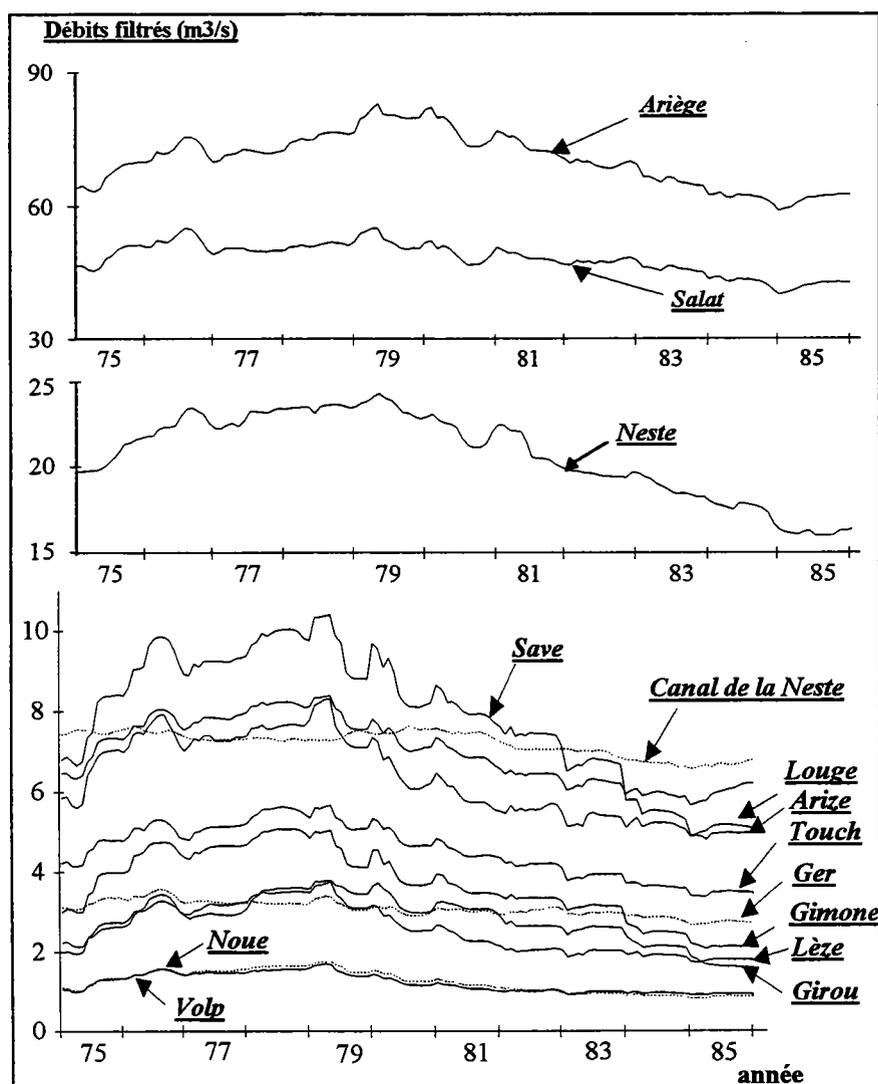
Carte 3 - 5. Localisation des affluents étudiés

Conclusions

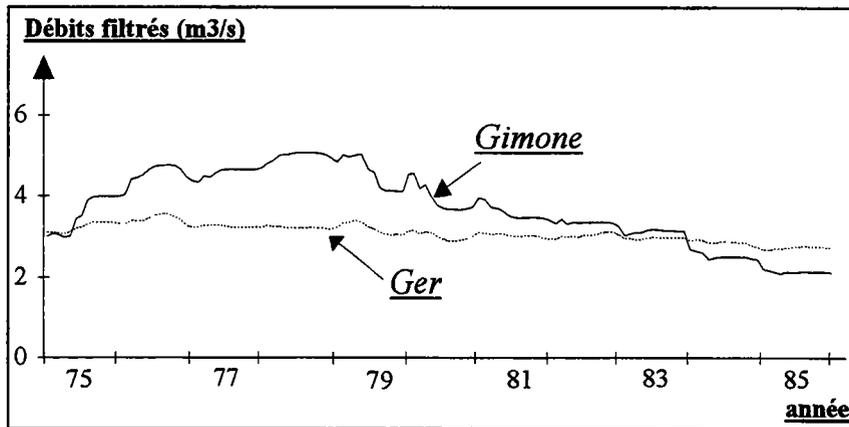
La première partie de ce chapitre, consacrée à l'évolution de la tendance sur la chronique des débits à Portet, montre, pour les années 80, une décroissance bien prononcée qui est comparable à celle des années 40.

L'évolution de la tendance sur les différents affluents décrit bien le comportement dynamique des bassins. Certains sont très sensibles aux conditions climatiques (affluents de la rive gauche), d'autres moins sensibles (le Ger (cf. graphique 3-44)). Cette sensibilité est liée au rôle régulateur des réservoirs neigeux et souterrains (cf. chapitres précédents). Les rivières peuvent donc être classées en trois groupes :

- un groupe sans réserve notable : Noue, Louge, Touch, Save, Gimone, Volp, Arize, Lèze et Girou;
- un groupe avec exclusivement des réserves souterraines : le Ger;
- un groupe possédant des réserves neigeuse et souterraine : Salat, Ariège et Neste.



Graphique 3 - 43. Evolution de la tendance sur les différents affluents de la Garonne (période 1973-1987). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours.



Graphique 3 - 44. Evolution de la tendance, pour un bassin sans réserves souterraines (la Gimone), et un bassin avec des réserves souterraines (le Ger), période 1973 à 1987, moyenne mobile d'amplitude 1460 jours

Ce chapitre et le précédent ont mis en évidence les réserves présentes sur le bassin de la Garonne. La suite de la partie hydrodynamique est maintenant consacrée, à l'estimation quantitative des réserves souterraines sur le bassin, grâce à l'étude du tarissement.

3.3. ESTIMATION DES APPORTS SOUTERRAINS ET DES RESERVES SOUTERRAINES SUR LE BASSIN

Cette partie est basée sur l'étude des hydrogrammes des rivières durant un cycle hydrologique. Elle permet d'avoir une connaissance assez précise des ressources souterraines d'un bassin. Le premier chapitre concerne l'étude du tarissement qui utilise seulement une fraction de l'hydrogramme, sa partie terminale. Une estimation est ainsi faite sur le volume des réserves souterraines du bassin. Le second chapitre est consacré à la décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme, afin de déterminer la contribution de la composante souterraine de l'écoulement.

3.3.1. Etude du tarissement

Introduction

Le tarissement se produit lorsque l'écoulement est en régime non influencé. L'hydrogramme présente alors, une décroissance progressive des débits. Le tarissement est souvent atteint à la fin du cycle hydrologique, au moment des basses eaux. Parfois, il peut apparaître durant la période hivernale, à la faveur d'un étiage important.

Le tarissement survient après la décrue. C'est la dernière partie de l'hydrogramme de crue qui comporte (cf. tableau 3-5) :

- une phase de montée (1) : la montée de crue,
- la pointe de crue (2),
- une phase de descente appelée récession (A. MANGIN, 1975) comprenant la décrue (3), et si la récession est assez longue, le tarissement (4).

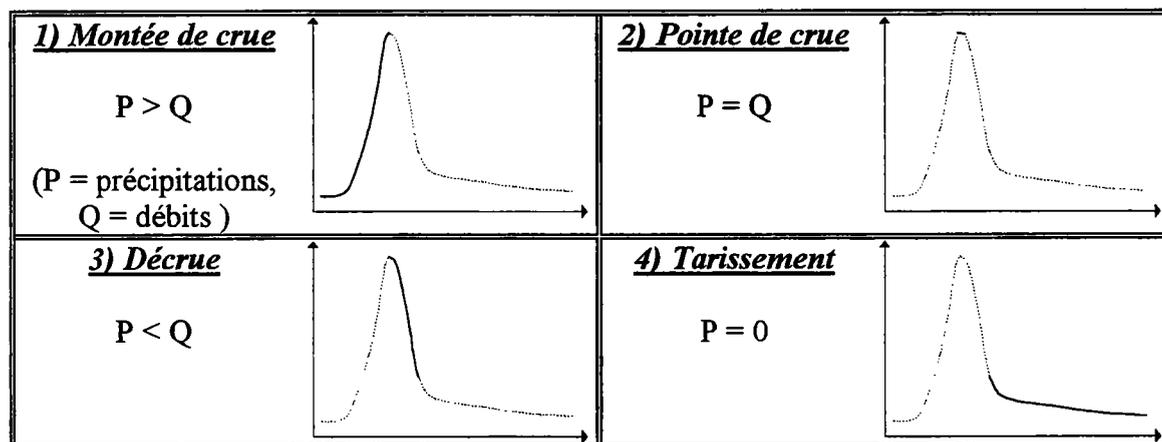


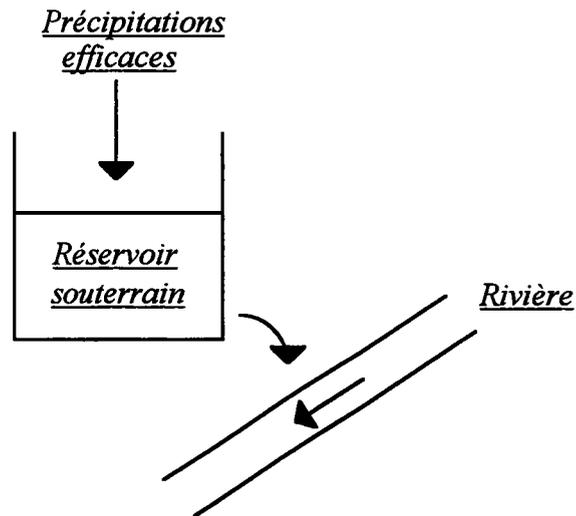
Tableau 3 - 5. Phases de la crue

Après avoir passé en revue les méthodes utilisées pour exprimer le tarissement d'un réservoir souterrain unique ou de plusieurs réservoirs souterrains, nous étudierons le tarissement des principaux affluents et celui de la Garonne à Portet, pour plusieurs cycles hydrologiques.

3.3.1.1. Connaissances actuelles

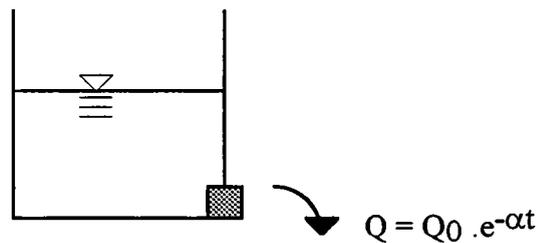
3.3.1.1.1. Cas d'un seul réservoir souterrain

Le tarissement est généralement défini par une fonction mathématique : l'équation de vidange d'un modèle physique théorique (modèle réservoir). Il a été étudié sur les aquifères, mais aussi sur les rivières (M. ROCHE, hydrologie de surface, p 267-275).



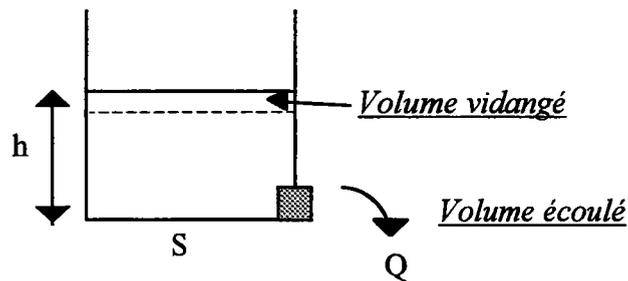
3.3.1.1.1. Modèles et fonctions mathématiques définissant le tarissement

- **Le modèle de MAILLET** : il est assimilable à la vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux.



L'équation de vidange est calculée à partir de l'équation de continuité, exprimée par la relation :

volume vidangé = volume écoulé.



On a alors :

$$-S \times dh = Q \times dt \quad (1)$$

avec :

- Q : débit écoulé,
- S : section du réservoir,
- h : niveau du réservoir,
- t : le temps.

Si on suppose que l'écoulement suit la loi de Darcy :

$$Q = C \times h \quad (2)$$

avec C : coefficient de perte de charge.

En remplaçant h de (2) dans (1), on a :

$$\begin{aligned} \frac{-S}{C} \times \frac{dQ}{Q} &= dt \\ \Rightarrow \frac{-S}{C} \times \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{dQ}{Q} &= \int_{t_1}^{t_2} dt \Rightarrow -\frac{S}{C} \times [\ln Q]_{Q_1}^{Q_2} = [t]_{t_1}^{t_2} \\ \Rightarrow Q_2 &= Q_1 \times e^{-\frac{C}{S} \times (t_2 - t_1)} \end{aligned}$$

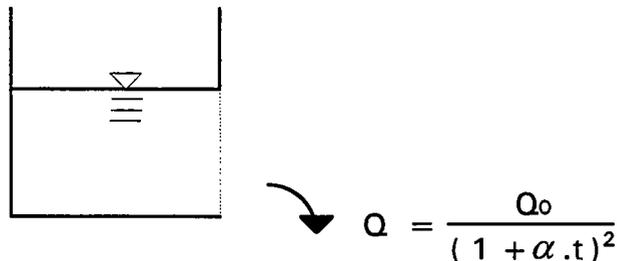
En prenant t_1 , début du tarissement, l'équation devient :

$$Q = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

avec :

- $\alpha = C/S$: coefficient de tarissement,
- Q_0 : débit au début du tarissement,
- Q : débit à l'instant t.

• Un autre modèle, celui de **TISON**, exprime la vidange d'un réservoir sableux, à travers une paroi perforée.



• D'autres formules, notamment celles de **A. BURGER (1959)**, **H. SCHOELLER (1962)**, **L. SERRA**, **A. COUTAGNE** et **J. LARRIEU** rendent aussi compte de la décroissance de l'hydrogramme.

Mais, c'est **la formule de MAILLET** que nous garderons par la suite, non pas pour des raisons physiques, mais parce qu'elle a des propriétés mathématiques intéressantes :

- α est indépendant de Q_0 ;
- la dérivée d'une exponentielle est une exponentielle;
- en unité semi-logarithmique, la fonction de MAILLET est une droite, ce qui permet d'identifier facilement le tarissement sur un graphique semi-log.

3.3.1.1.1.2. Utilisation de la formule de Maillet

Généralement, le coefficient de tarissement (α) varie selon les cycles. Son calcul doit donc s'effectuer sur plusieurs années, une vingtaine si possible, pour avoir une idée de sa valeur réelle.

Grâce à la formule de Maillet, à partir du début du tarissement, on peut calculer le volume de tarissement (pour les aquifères karstiques, on ne parle pas de volume de tarissement, mais de volume dynamique (A. MANGIN, 1970)). Ce dernier représente le volume qui est en mouvement dans la zone noyée des aquifères, ce qui permet d'estimer les réserves souterraines.

L'expression du volume de tarissement est donnée par :

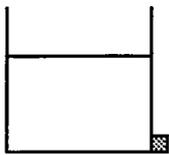
$$V_t = \left(\frac{Q_0}{\alpha} \right) \times 86400$$

avec :

- Q_0 : valeur de Q au début du tarissement,
- 86400 : nombre prenant en compte les unités pour que V_t soit exprimé en m^3 (Q_0 est en m^3/s et α en j^{-1}).

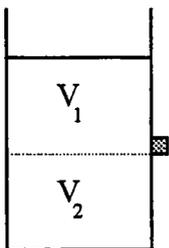
Le volume de tarissement peut, dans certains cas, être inférieur au volume de la zone noyée des aquifères. C'est le cas pour les aquifères karstiques. En effet, le volume dynamique dépend de la structure du système et de la position de l'exutoire (B. MARSAUD, 1995). Deux cas peuvent se présenter :

1) si les réserves se trouvent au-dessus de l'exutoire :



Le volume dynamique (V_d) = volume total (V).

2) s'il existe des réserves en dessous de l'exutoire :



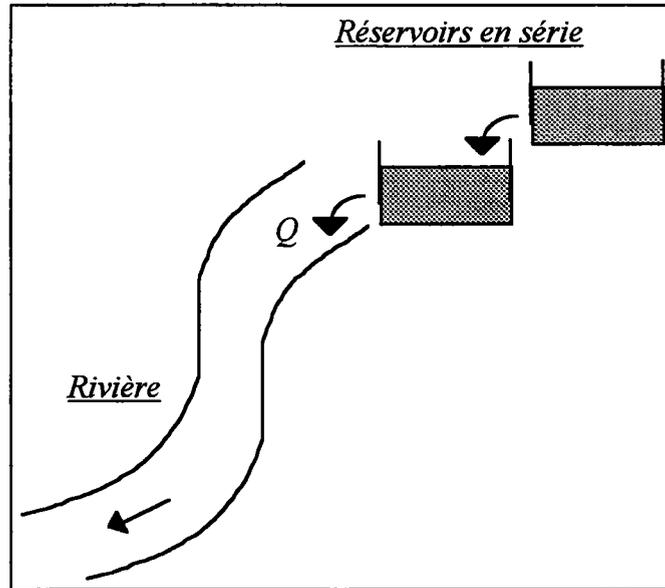
on a : $V_1 < V_d < V$, avec $V = V_1 + V_2$.

3.3.1.1.2. Cas de plusieurs réservoirs souterrains

Certaines rivières possèdent plusieurs réservoirs souterrains. La loi de Maillet est-elle, dans ce cas, toujours utilisable ? Nous étudierons successivement deux cas : une disposition des réservoirs en série, et une disposition des réservoirs en parallèle, situation la plus répandue dans la nature.

1) Réservoirs en série

On considère que les réservoirs possèdent une loi de vidange de type Maillet et qu'il n'existe pas de relation de charge entre les deux.

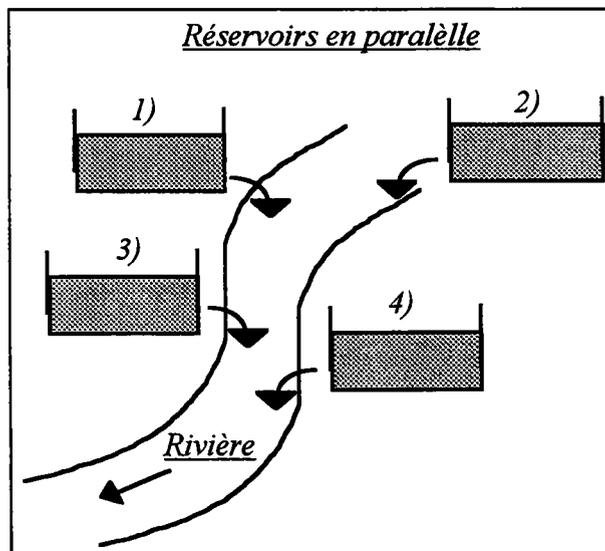


Le débit de la rivière est alimenté, durant l'étiage, par le débit du dernier réservoir. Celui-ci étant lui même alimenté par un réservoir supérieur. Dans ce cas, le débit de la rivière suit une vidange de type Maillet (A MANGIN, 1970).

La connaissance du coefficient de tarissement du dernier réservoir n'est possible que si le réservoir supérieur s'est complètement vidangé.

2) Réservoirs en parallèle

C'est le cas le plus courant. Les réservoirs peuvent être des aquifères alluviaux; des aquifères carbonatés, fissurés ou karstiques; ou des nappes libres de diverses origines.



Le débit de la rivière est la somme des débits apportés par chacun des réservoirs souterrains. On a donc ici :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

L'équation de continuité est alors la suivante :

$$(-S_1 \cdot dh_1) + (-S_2 \cdot dh_2) + (-S_3 \cdot dh_3) + (-S_4 \cdot dh_4) = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \cdot dt ;$$

en intégrant :

$$\int [(-S_1 \cdot dh_1) + (-S_2 \cdot dh_2) + (-S_3 \cdot dh_3) + (-S_4 \cdot dh_4)] = \int (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \cdot dt$$

Il existe une communication hydraulique indirecte entre les différents réservoirs, et donc une relation de charge. La baisse de niveau du réservoir (1) n'est pas indépendante de la baisse de niveau du réservoir (2), (3) et (4). Les hauteurs (h) ne sont donc pas indépendantes :

$$\int [(-S_1 \cdot dh_1) + (-S_2 \cdot dh_2) + (-S_3 \cdot dh_3) + (-S_4 \cdot dh_4)] \neq \int (-S_1 \cdot dh_1) + \int (-S_2 \cdot dh_2) + \int (-S_3 \cdot dh_3) + \int (-S_4 \cdot dh_4)$$

et le tarissement de la rivière n'est pas exprimé par :

$$Q_{0_1} \cdot e^{-\alpha_1 t} + Q_{0_2} \cdot e^{-\alpha_2 t} + Q_{0_3} \cdot e^{-\alpha_3 t} + Q_{0_4} \cdot e^{-\alpha_4 t}$$

Le tarissement peut tout de même être assimilé à une vidange de type Maillet, en considérant les différents réservoirs comme un réservoir unique.

$$Q = Q_{0_{total}} \cdot e^{-\alpha_{total} \cdot t}$$

$$\text{mais avec } \alpha_{total} \neq \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$$

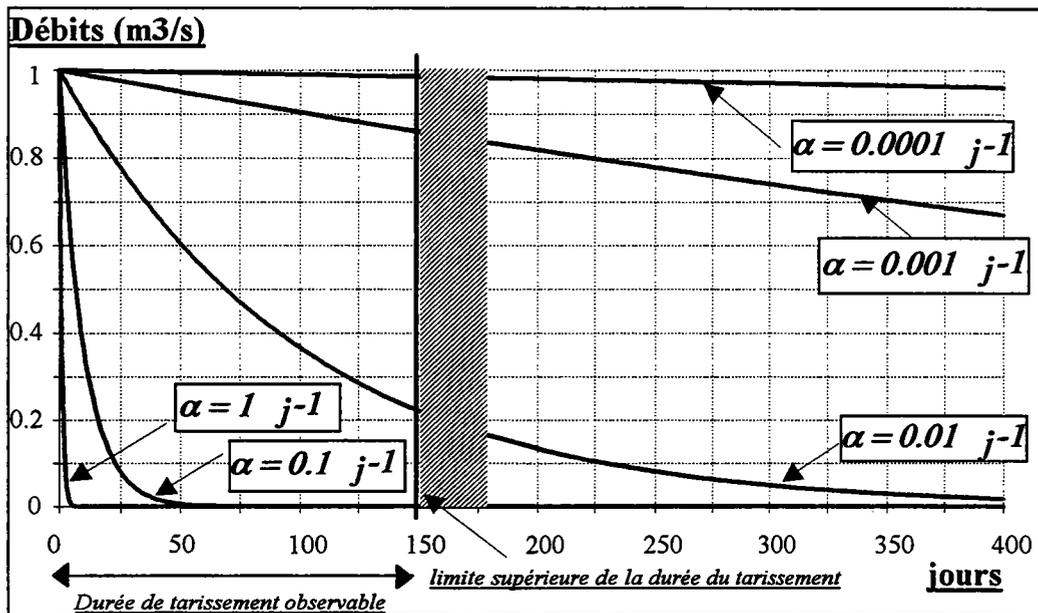
3.3.1.1.3. Les coefficients de tarissement

Ils sont fonction de la structure du réservoir, du coefficient de perte de charge, du volume du réservoir et de l'état de karstification pour les aquifères karstiques, ou de la perméabilité pour les aquifères poreux. Dans la nature, les coefficients sont compris entre 0.1 j^{-1} et 0.001 j^{-1} .

Plus le coefficient est grand, plus la décroissance des débits est rapide. Inversement, plus le coefficient est petit, plus la décroissance des débits est lente (cf. graphique 3-45). Par exemple : si le tarissement apparaît pour un débit d' $1 \text{ m}^3/\text{s}$, il sera de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ au bout de :

- quelques heures pour $\alpha = 1 \text{ j}^{-1}$;
- 5 jours pour $\alpha = 0.1 \text{ j}^{-1}$;
- 36 jours pour $\alpha = 0.01 \text{ j}^{-1}$;
- 365 jours pour $\alpha = 0.001 \text{ j}^{-1}$.

Sur le bassin, la durée du tarissement est en moyenne de deux à trois mois. Elle peut atteindre quatre, voire cinq mois (cycle 1985 et 1986). Les précipitations du cycle suivant provoquent la fin du tarissement.



Graphique 3 - 45. Exemples de coefficients de tarissement

3.3.1.2. Tarissement des principaux affluents de la Garonne.

Le système karstique du Baget est choisi comme référence pour déterminer les périodes de tarissement sur l'ensemble du bassin. Cela pour plusieurs raisons :

- l'hydrogramme du Baget et son tarissement sont étudiés depuis une vingtaine d'année par le Laboratoire Souterrain du CNRS;
- le régime hydrologique du Baget s'apparente à celui d'une rivière de surface;
- les débits ne sont pas perturbés par des aménagements;
- le bassin ne possède pas de réserve neigeuse;
- et le système karstique du Baget est en parallèle avec les autres réservoirs du bassin.

L'analyse du tarissement est basée sur une longue période de décroissance, ce qui nécessite des débits non influencés par des précipitations. Une recherche sur la chronique du Baget, période 1973-1987, a permis de sélectionner trois tarissements correspondant au mieux à ce critère : 1985, 1986 et 1977.

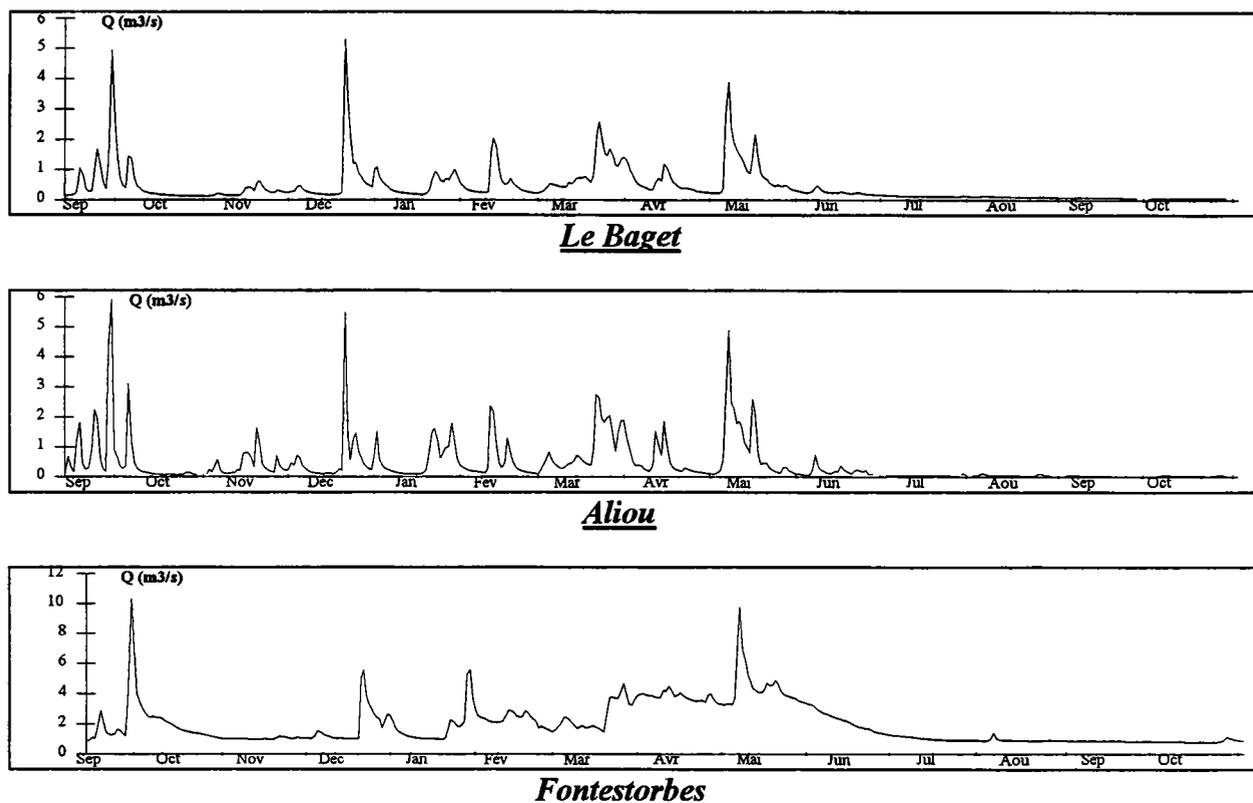
On étudiera, dans un premier temps, le tarissement des aquifères karstiques présents sur le bassin pour le cycle 1985, puis, dans un deuxième temps, celui des principaux affluents de la Garonne. Cette seconde partie est elle-même partagée suivant le degré de complexité de l'analyse du tarissement. Elle concerne les affluents :

- peu perturbés par les aménagements : le Ger, le Volp, l'Arize, la Lèze, l'Hers mort et le Girou;
- influencés par la neige : le Salat;
- influencés par les aménagements : les affluents de la rive gauche;
- influencés par la neige et les aménagements : l'Ariège.

La dernière partie est une comparaison des volumes de tarissement des différents aquifères et des différents affluents, pour les cycles 1985, 1986 et 1977.

3.3.1.2.1. Tarissement des aquifères karstiques du bassin : le Baget, Aliou et Fontestorbes

Les comportements dynamiques d'Aliou, du Baget et de Fontestorbes sont différents. Ceci est mis en évidence sur les hydrogrammes du cycle 1985 (cf. graphique 3-46). Les petites crues sont filtrées et la décrue est très lente à Fontestorbes. C'est l'inverse pour Aliou et le Baget où les crues sont très marquées et la décrue rapide.

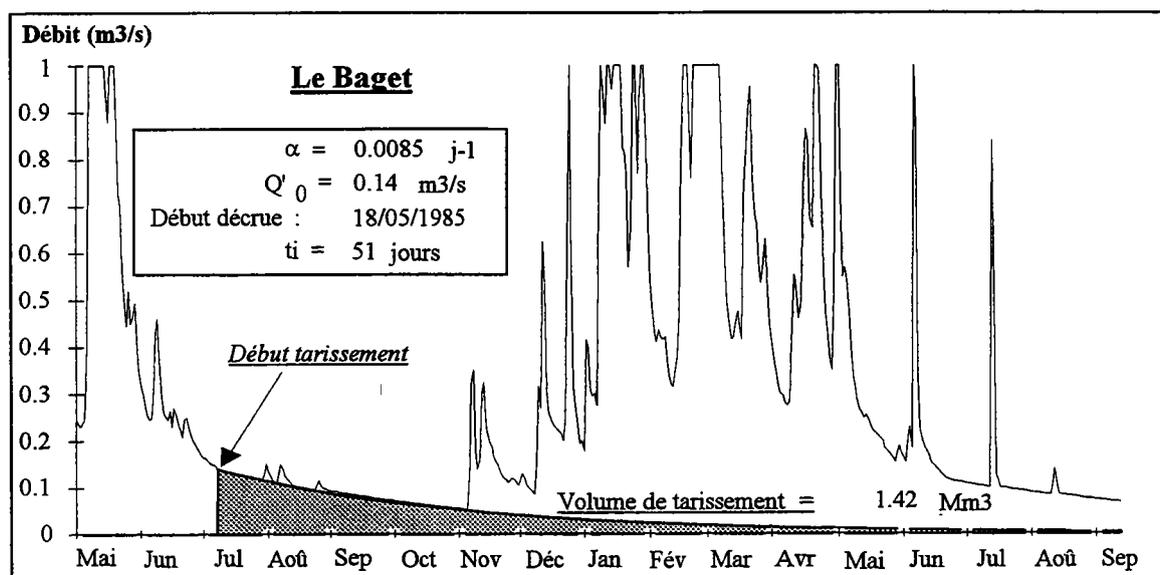


Graphique 3 - 46. Hydrogrammes des aquifères karstiques du Baget, d'Aliou et de Fontestorbes, cycle 1985

Le cycle 1985 débute le 14 septembre 1984, et se termine le 3 novembre 1985, soit une durée de 416 jours. Le tarissement sur le Baget commence 51 jours après la décrue amorcée le 18 mai 85. **Le volume dynamique** calculé à partir de MAILLET est de **1.4 millions de m³**. Il ne correspond pas au volume effectivement écoulé, mais au volume qui aurait dû s'écouler en l'absence de précipitations (cf. graphique 3-47).

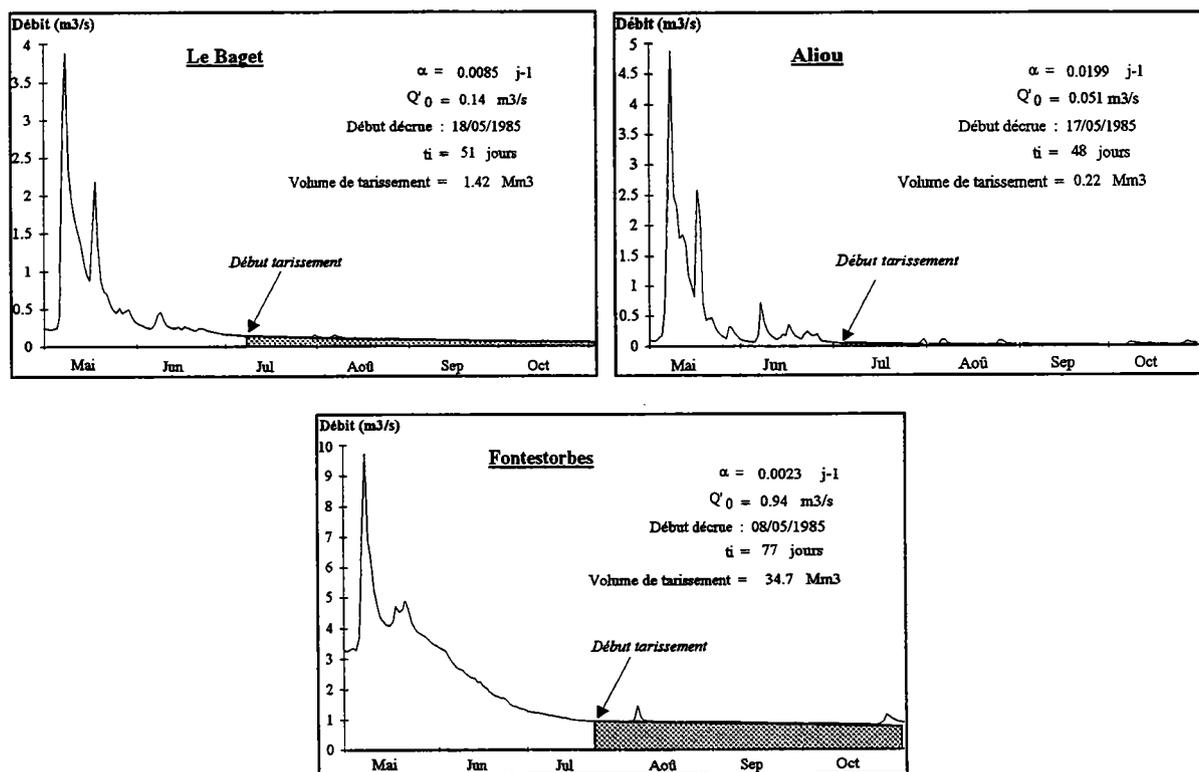
Le tarissement à Aliou et au Baget débute à-peu-près à la même date. Celui de Fontestorbes est plus tardif (cf. graphique 3-48). Les coefficients de tarissement sont variables et sont respectivement pour Aliou, le Baget et Fontestorbes de : 0.0199 j^{-1} , 0.0085 j^{-1} et 0.0023 j^{-1} . Ceux-ci sont donc variables selon l'aquifère karstique.

Aliou est un système avec très peu de réserves et une karstification bien développée. α moyen est égal à 0.033 j^{-1} . Cependant, Fontestorbes est un système avec d'énormes réserves. α moyen est égal à 0.0035 j^{-1} . Ce coefficient de tarissement est comparable à celui de la nappe alluviale à Finhan ($\alpha = 0.003 \text{ j}^{-1}$) (cf. graphique 3-49).

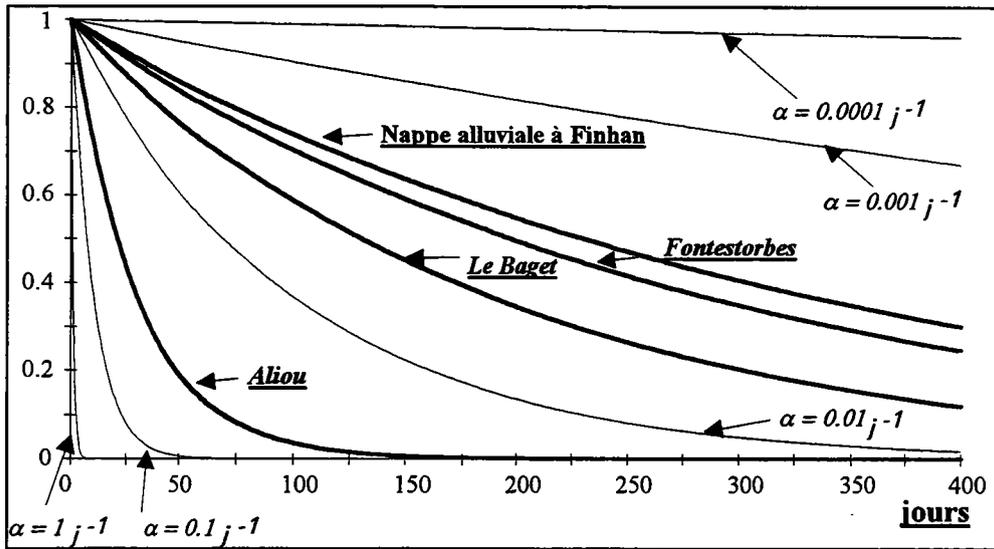


Graphique 3 - 47. Représentation du volume de tarissement pour le système karstique du Baget, cycle 1985

Le volume dynamique du cycle 85 montre que les réserves souterraines sont énormes à Fontestorbes (34.7 hm³) par rapport au Baget (1.42 hm³) et à Aliou (0.22 hm³). Les réserves de Fontestorbes représentent la moitié de la capacité de stockage du barrage de Montbel, barrage destiné au soutien d'étiage et à l'irrigation.



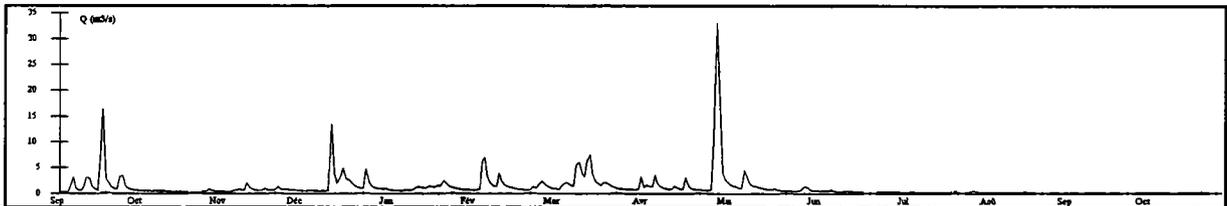
Graphique 3 - 48. Tarissement des aquifères karstiques du Baget, d'Aliou et de Fontestorbes, cycle 1985



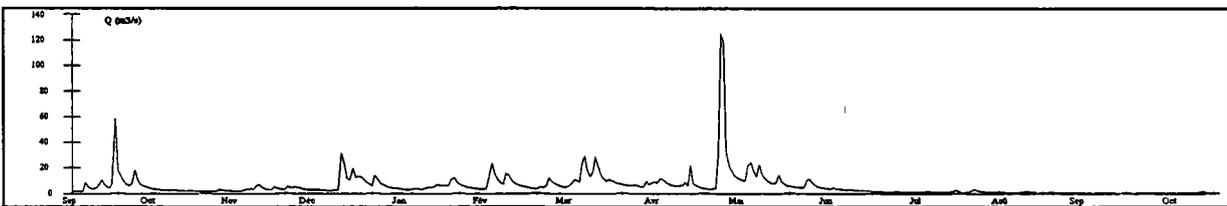
Graphique 3 - 49. Coefficients de tarissement moyens des aquifères

3.3.1.2.2. Tarissements peu perturbés par les aménagements : le Volp, l'Arize, la Lèze, l'Hers mort, le Girou et le Ger

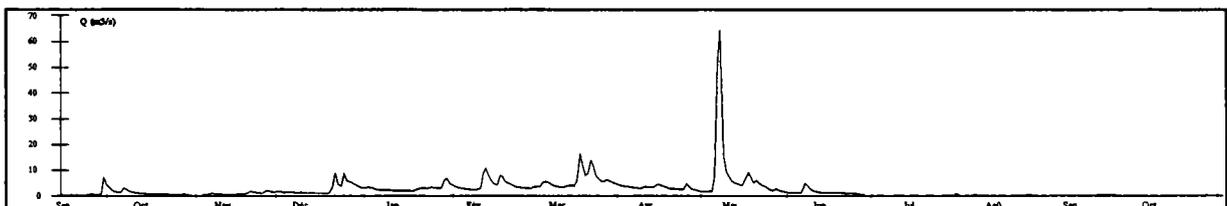
Ces affluents ont un comportement hydrodynamique similaire (cf. graphique 3-50). Les différences entre les hydrogrammes proviennent des conditions météorologiques, qui ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin. Le Ger se différencie des autres rivières par des crues atténuées et une décrue lente.



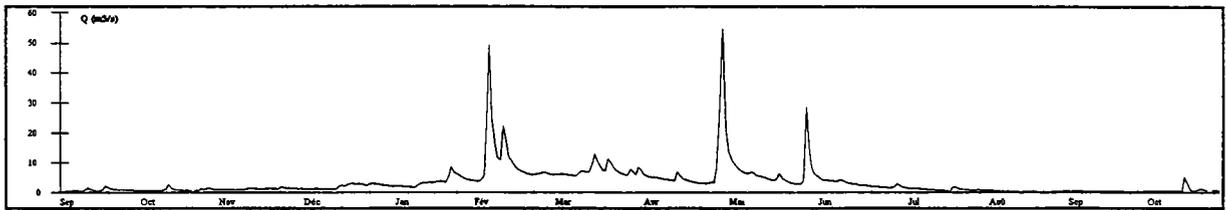
Le Volp



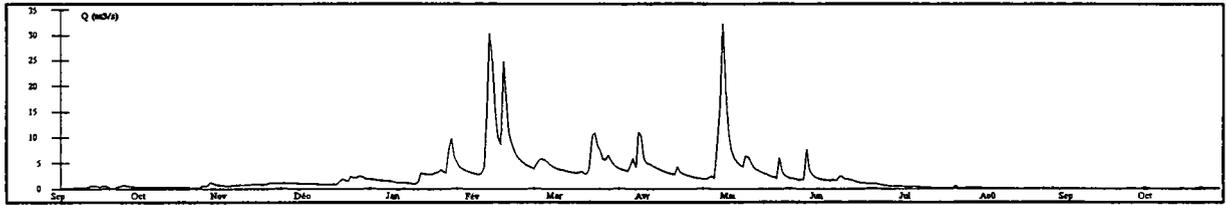
L'Arize



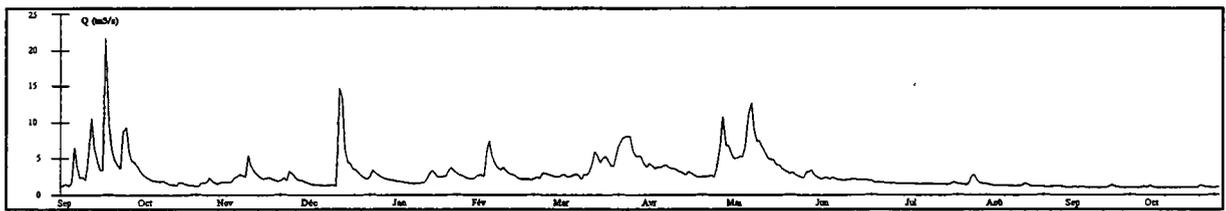
La Lèze



L'Hers mort



Le Girou



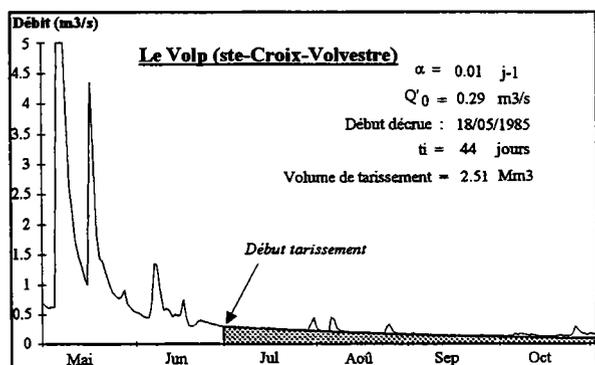
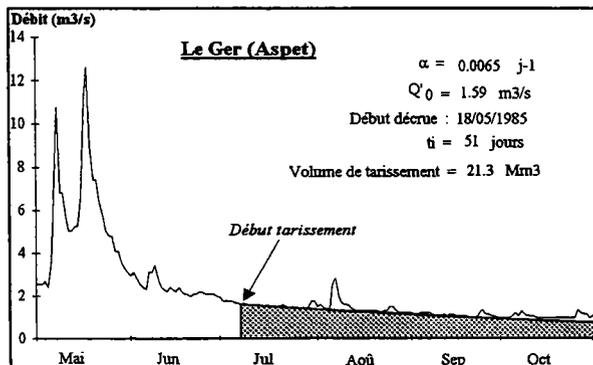
Le Ger

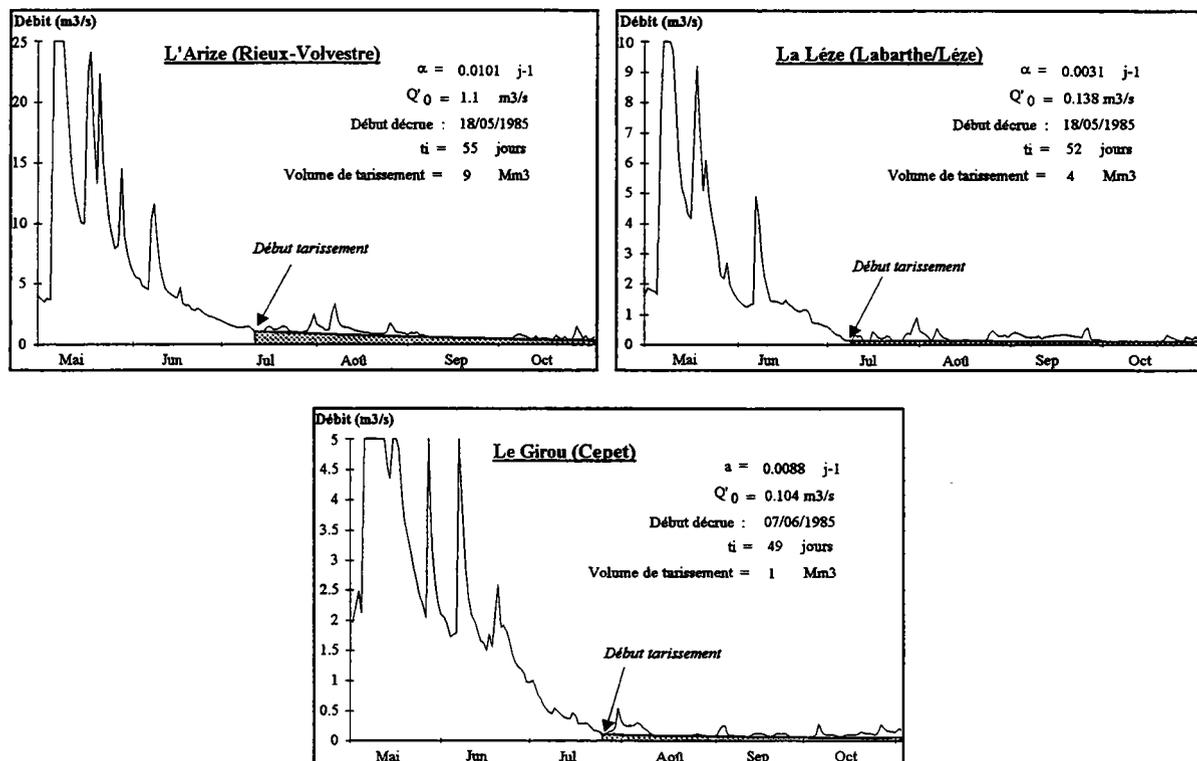
Graphique 3 - 50. Hydrogrammes des affluents de la rive droite de la Garonne ordonnés dans le sens amont-aval, cycle 1985

L'analyse du tarissement s'avère plus délicate que pour les aquifères karstiques. En effet, la décroissance est saccadée en raison de crues provenant d'orages ou de faibles perturbations anthropiques (barrage de Mondely sur la Lèze, par exemple).

Les dates du tarissement sont à peu près identiques à celles du Baget. Les coefficients de tarissement des rivières sont compris entre 0.0031 et 0.01 j⁻¹ (cf. graphique 3-51).

Le Ger présente les réserves les plus importantes : 21.3 hm³. C'est pourtant, un bassin de faible superficie (95 km²). Puis, viennent l'Arize, la Lèze, le Volp et le Girou possédant des réserves respectives de 9 hm³, 4 hm³, 2.5 hm³ et 1 hm³. Ces derniers n'ont pas de ressources importantes (le tarissement de l'Hers mort n'est pas étudié, car les débits d'étiage ne sont pas bien connus).

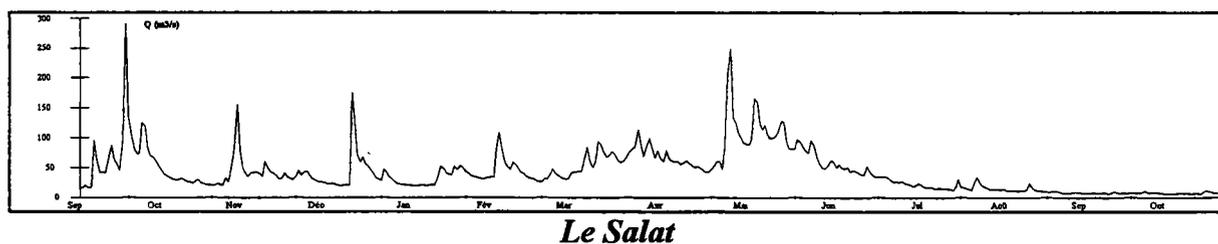




Graphique 3 - 51. Tarissement des affluents de la rive droite, cycle 1985

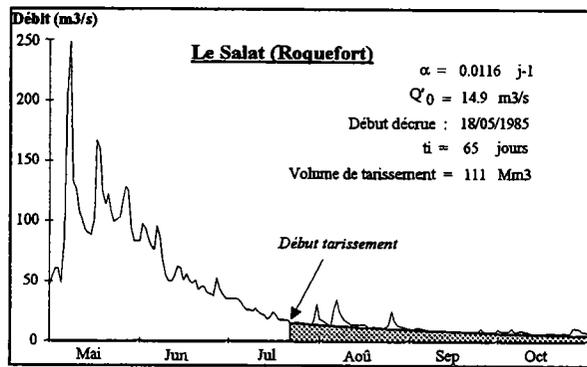
3.3.1.2.3. Tarissement influencé par la neige : le Salat

La fonte des neiges commence début avril et se termine début juillet (cf. graphique 3-52) (cf. partie 3.3.2.2.).



Graphique 3 - 52. Hydrogramme du Salat, cycle 1985

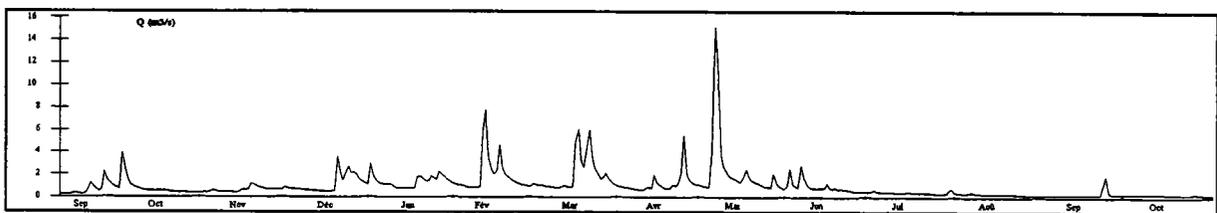
Le tarissement n'intervient qu'après l'influence neigeuse (cf. graphique 3-53). Le coefficient de tarissement est égal à 0.0116 j^{-1} . Les réserves, quant à elles, sont estimées à 111 hm^3 , ce qui est considérable.



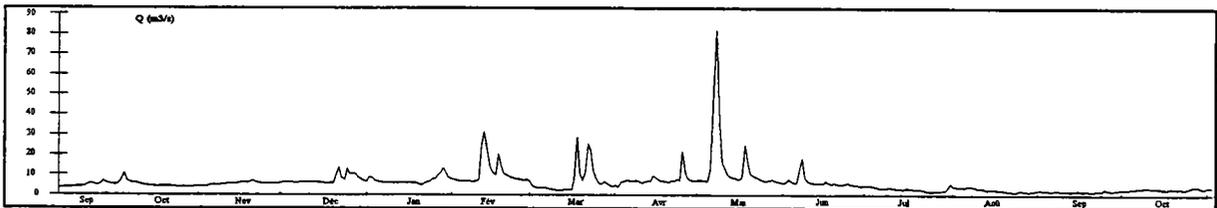
Graphique 3 - 53. Tarissement du Salat, cycle 1985

3.3.1.2.4. Tarissements influencés par les aménagements : affluents de la rive gauche

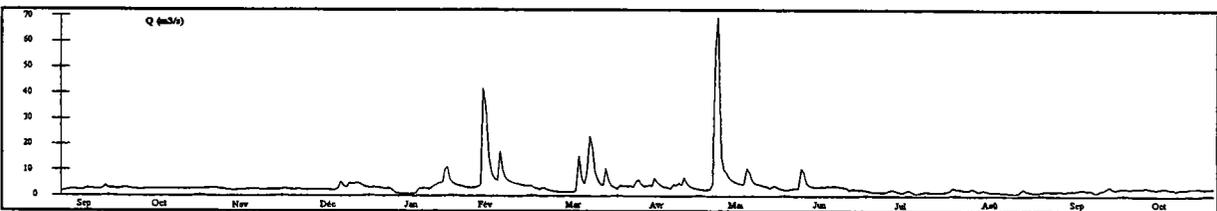
Ces rivières sont réalimentées par l'intermédiaire du canal de la Neste et du canal de Saint-Martory (cf. partie 2.1). Leurs comportements hydrodynamiques sont identiques : le ruissellement prédomine et les réponses aux crues sont rapides (cf. graphique 3-54).



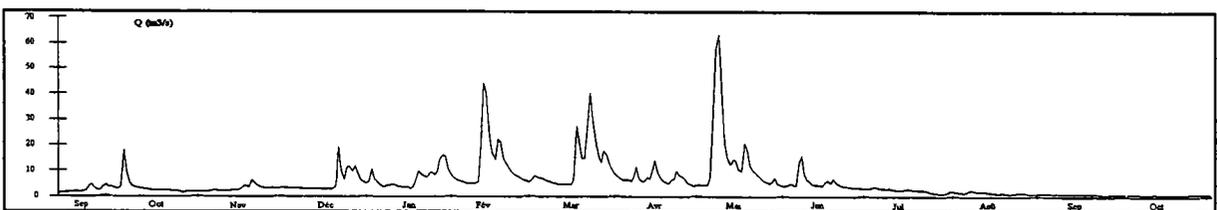
La Noue



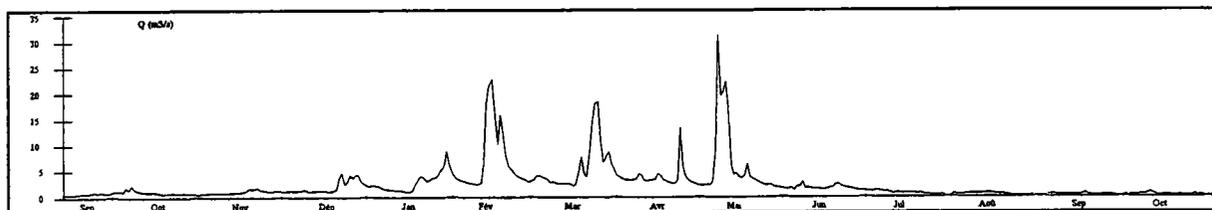
La Louge



Le Touch



La Save



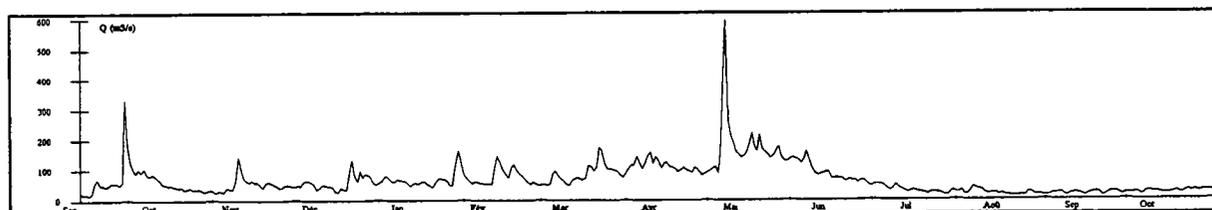
La Gimone

Graphique 3 - 54. Hydrogrammes des affluents de la rive gauche de la Garonne, cycle 1985

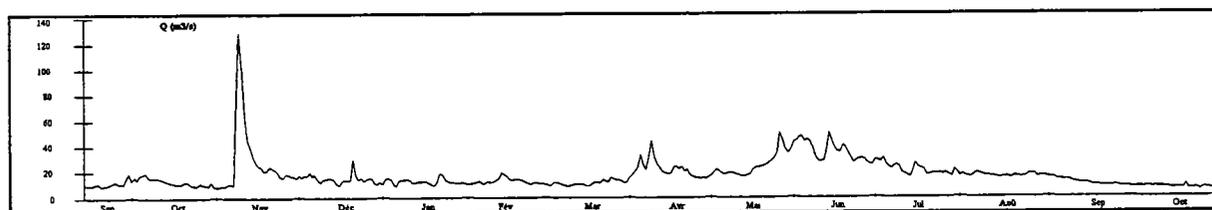
Pendant la période de basses eaux, les débits sont très variables. On note même des remontés, liées à la réalimentation. Dans ces conditions, il est difficile d'ajuster une droite sur les débits. Cependant, on peut affirmer que les coefficients de tarissement sont élevés, puisque certaines rivières, comme la Gimone et la Save notamment, seraient à sec durant l'été, sans les apports artificiels. Ceci confirme la faiblesse des réserves sur ces bassins.

3.3.1.2.5. Tarissements influencés par la neige et les aménagements : l'Ariège et la Neste

Ces rivières ont un régime de type pluvio-nival. La fonte des neiges a lieu, comme pour le Salat, de début avril à début juillet (cf. graphique 3-55). De plus, les débits sont perturbés par de nombreux aménagements hydroélectriques, implantés en amont des bassins. Les débits d'étiage sont, d'ailleurs, supérieurs aux débits naturels.



L'Ariège



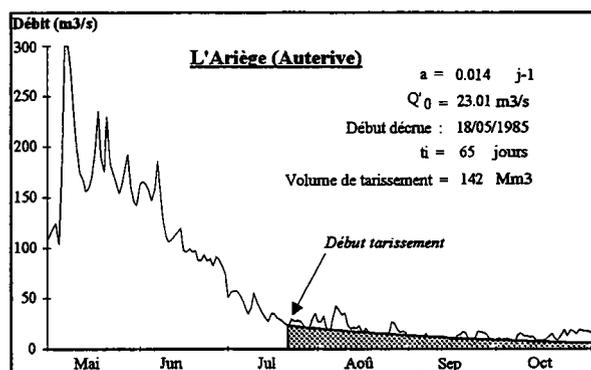
La Neste

Graphique 3 - 55. Hydrogrammes de l'Ariège et de la Neste, cycle 1985

Avant d'étudier le tarissement, nous avons enlevé l'influence des barrages. Cette dernière n'est connue qu'au pas mensuel. Les corrections sur les débits moyens journaliers ont donc été effectuées, faute de mieux, à ce pas. Cette méthode n'est pas rigoureuse, mais elle a le mérite d'exister et de permettre une estimation plus réaliste du volume de tarissement.

Celui-ci est d'environ 142 hm^3 pour le bassin de l'Ariège (cf. graphique 3-56). C'est une valeur considérable et un apport important pour la Garonne. Sans les corrections apportées, le volume de tarissement est totalement différent : il est de 550 hm^3 (soit 4 fois supérieures au vrai volume).

La Neste est une rivière très perturbée, car elle est influencée par des barrages importants et par la dérivation vers le canal de la Neste. Pour ces raisons et d'autres encore, l'analyse du tarissement n'a pu être effectuée.



Graphique 3 - 56. Tarissement de l'Ariège, cycle 1985

3.3.1.2.6. Comparaison des volumes de tarissement et conclusions.

En plus du cycle 85, nous avons étudié le tarissement du cycle 86 et 87 pour effectuer des comparaisons et connaître l'évolution des réserves (cf. tableau 3-6).

		1985		1986		1977	
		α (j-1)	V_t (hm^3)	α (j-1)	V_t (hm^3)	α (j-1)	V_t (hm^3)
Systèmes karstiques	Aliou	0.0199	0.2	0.0169	0.3	0.0451	0.1
	le Baget	0.0085	1.4	0.0072	1.4	0.0100	0.8
	Fontestorbes	0.0023	34.7	0.0031	28.0	0.0017	47.4
Affluents	le Ger	0.0065	21.3	0.0050	17.0	0.0123	12.0
	le Salat	0.0116	111.0	0.0107	132.0	0.0104	153.0
	le Volp	0.0100	2.5	0.0104	1.7	0.0124	3.1
	l'Arize	0.0101	9.0	0.0065	10.0	0.0080	13.2
	la Lèze	0.0031	4.0	0.0051	0.7	0.0060	4.7
	l'Ariège	*0.0140	*142.0	-	-	*0.0110	*182.0
	le Girou	0.0088	1.0	-	-	-	-

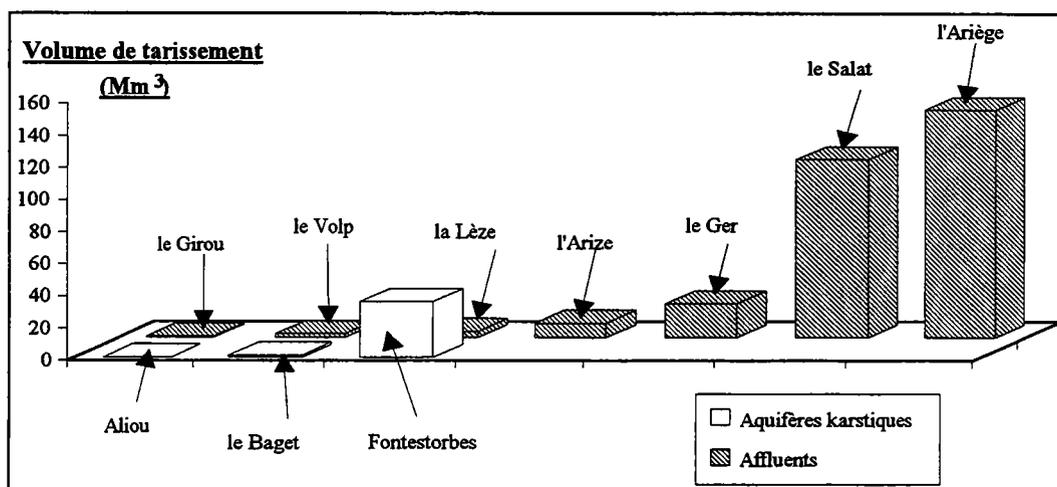
* : valeur corrigée.

Tableau 3 - 6. Volume et coefficient de tarissement des systèmes karstiques et de quelques affluents, cycle 1985, 1986 et 1977

Les volumes et les coefficients de tarissement des aquifères karstiques et des affluents sont variables selon les cycles. Ils restent, cependant, dans un même intervalle de valeurs. Afin

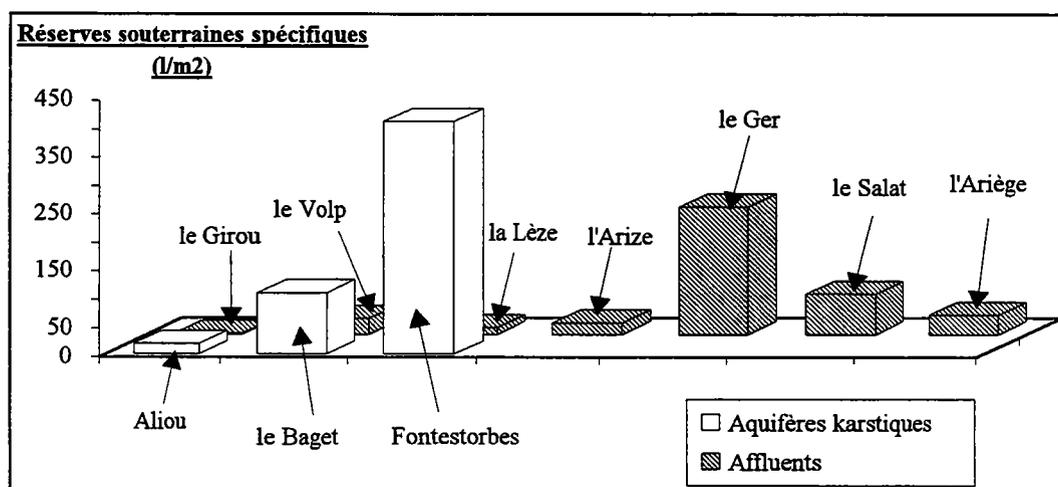
de comparer les volumes de tarissement, nous avons représenté des réservoirs fictifs (cf. graphique 3-57).

Fontestorbes est l'aquifère le plus important. Ses réserves sont supérieures à celles de nombreux affluents (34.7 hm³ en 1985). Il n'y a que l'Ariège et le Salat qui possèdent des réserves plus importantes avec respectivement 142 hm³ et 111 hm³ en 1985. Mais ce sont des bassins de grande superficie (1570 km² pour le Salat et 4120 km² pour l'Ariège). Après l'Ariège et le Salat, on trouve le Ger, qui se distingue encore une fois. Ses réserves, équivalant à 21 hm³, proviennent de nombreux aquifères, essentiellement karstiques.



Graphique 3 - 57. Volume de tarissement des aquifères karstiques et de quelques affluents, cycle 1985

La représentation des réserves souterraines spécifiques — réserves souterraines rapportées à une surface unitaire — est intéressante (cf. graphique 3-58). On s'aperçoit que Fontestorbes présente les réserves spécifiques les plus importantes (400 l/m²). Les autres aquifères karstiques, le Baget et Aliou suivent avec respectivement 107 l/m² et 18 l/m².



Graphique 3 - 58. Réserves souterraines spécifiques en l/m² des aquifères karstiques et de quelques affluents, cycle 1985

La hiérarchie est modifiée pour les affluents de la Garonne, puisque c'est le **Ger qui détient les plus grandes réserves spécifiques : 224 l/m²**. Ensuite, arrive le Salat avec 71 l/m². Le Ger apparaît, à nouveau, comme un bassin caractéristique du point de vue hydrogéologique.

3.3.1.3. Tarissement de la Garonne

3.3.1.3.1. Evolution des débits de la Garonne (exemple du cycle 1985)

L'hydrogramme des quatre stations installées sur la Garonne (Arlos, Valentine, Portet et Verdun) présente la même évolution saisonnière, et une augmentation sensible des débits au printemps (cf. graphique 3-59). Le début du cycle est marqué par de nombreuses crues. Les débits à la station d'Arlos sont tourmentés et saccadés en raison des aménagements et des retenues en amont (on note même une augmentation des débits au mois de septembre).

La croissance des débits est importante entre Valentine et Portet, compte tenu des apports du Salat et de l'Ariège. Elle est plus faible entre Arlos et Valentine (les apports proviennent de la Pique et de la Neste). Elle est négligeable entre Portet et Verdun car les apports sont faibles et une partie des débits est prélevée pour le canal latéral.

3.3.1.3.2. Tarissement de la Garonne à Portet sur plusieurs cycles hydrologiques

Les cycles sélectionnés sont les mêmes que pour l'étude du tarissement des différents affluents, c'est-à-dire 1985, 1986 et 1977. D'autres cycles où le tarissement est visible ont été ajoutés : 1973, 1978 et 1981.

L'influence des aménagements sur la Garonne est élevée (cf. partie 2.1). C'est pour cette raison que l'analyse du tarissement est effectuée sur des débits corrigés des perturbations.

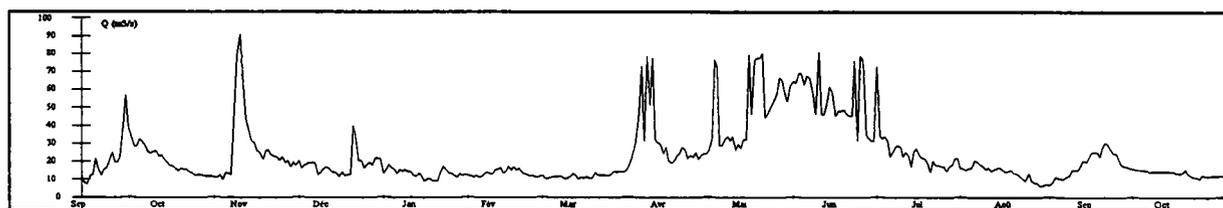
L'ajustement d'une droite sur le tarissement est souvent délicat, du fait de la complexité hydrologique, de l'étendue du bassin, de la présence de crues estivales et des effets perturbateurs des aménagements hydroélectriques. Le début du tarissement à Portet a lieu après la fonte des neiges, à peu près, au même moment que le tarissement sur les plus gros affluents (Ariège et Salat).

Les cycles 85, 73 et 78 possèdent des tarissements peu perturbés (cf. graphique 3-60). Ce n'est pas le cas des autres cycles qui présentent des crues, et des remontées de débits causées par les influences des aménagements.

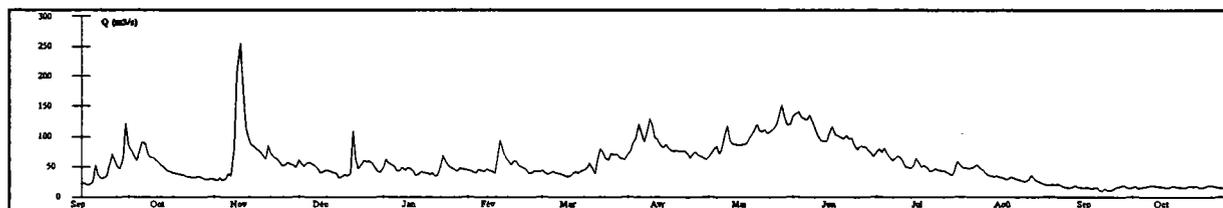
Le coefficient de tarissement est assez constant, compris entre 0.0080 j⁻¹ et 0.0116 j⁻¹. Le coefficient moyen est de 0.0096 j⁻¹. Cependant, il est possible de trouver, en fin de récession, un coefficient plus faible, autour de 0.0050 j⁻¹, qui n'a pas de réalité physique et qui serait induit par les aménagements le long de la Garonne. En effet, le déstockage de certains barrages permet de garder un débit assez constant sur la Garonne.

A partir du début du tarissement, on calcule le volume de tarissement qui est une estimation du réservoir souterrain. Ce dernier est compris entre **677 et 1062 millions de m³** (cf. tableau 3-7), la valeur moyenne étant de 823 millions de m³. La Garonne possède donc des réserves considérables. Ce résultat est inférieur à une estimation préliminaire de 2 milliards de

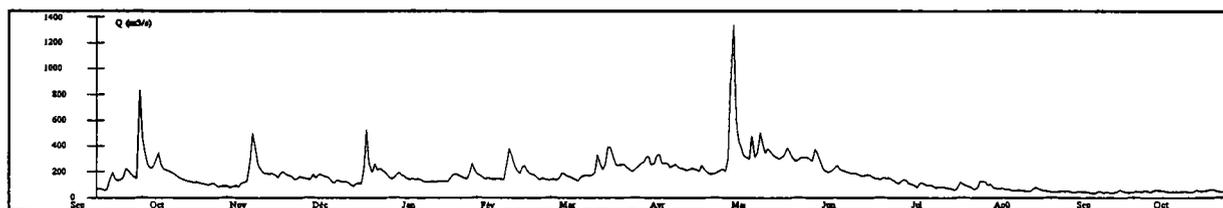
m³, calculée à partir d'un coefficient de tarissement sur une récession influencée par les aménagements (cf. rapport d'avancement de février 1993).



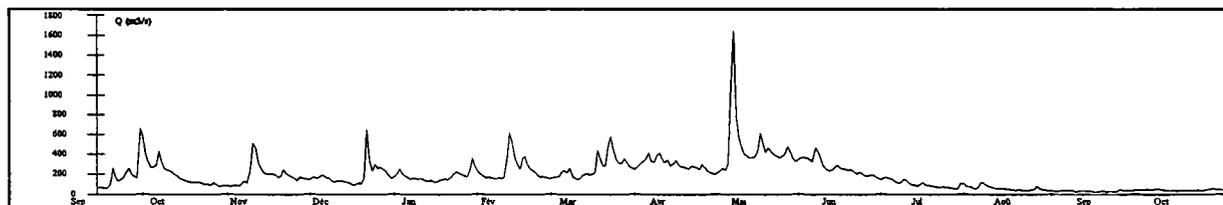
Arlos



Valentine



Portet

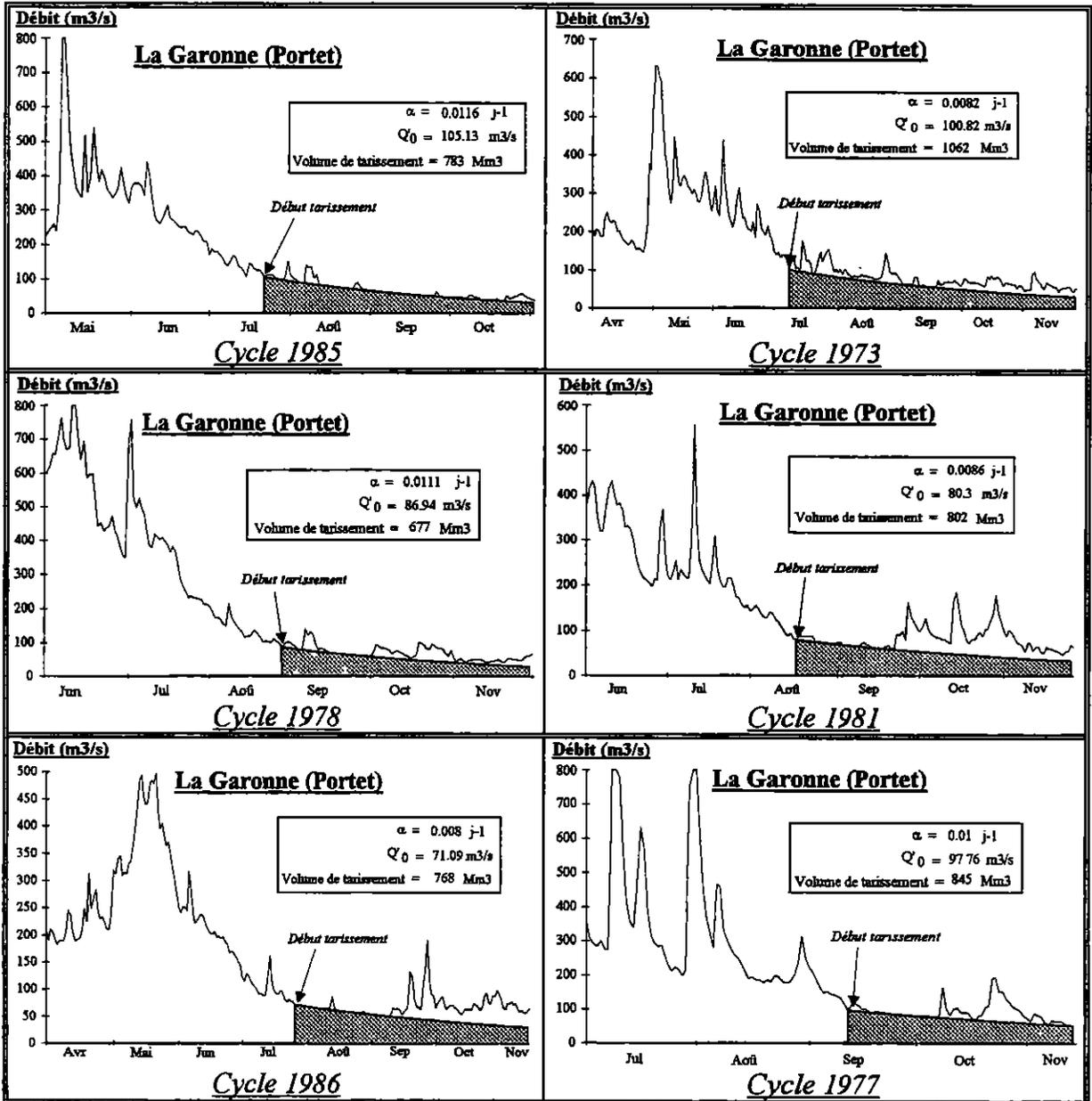


Verdun

Graphique 3 - 59. Hydrogrammes de la Garonne à Arlos, Valentine, Portet et Verdun, cycle 1985

Cycles	Date de fin de l'influence de la neige	α (j⁻¹)	Q'_0 (m³/s)	Volume de tarissement total (hm³)
1985	Début juillet	0.0116	105	783
1973	Début juin	0.0082	101	1062
1978	Début août	0.0111	87	677
1981	Fin juillet, début août	0.0086	80	802
1986	Début juillet	0.0080	71	768
1977	Fin juin	0.0100	98	845
Moyenne :		0.0096	90	823

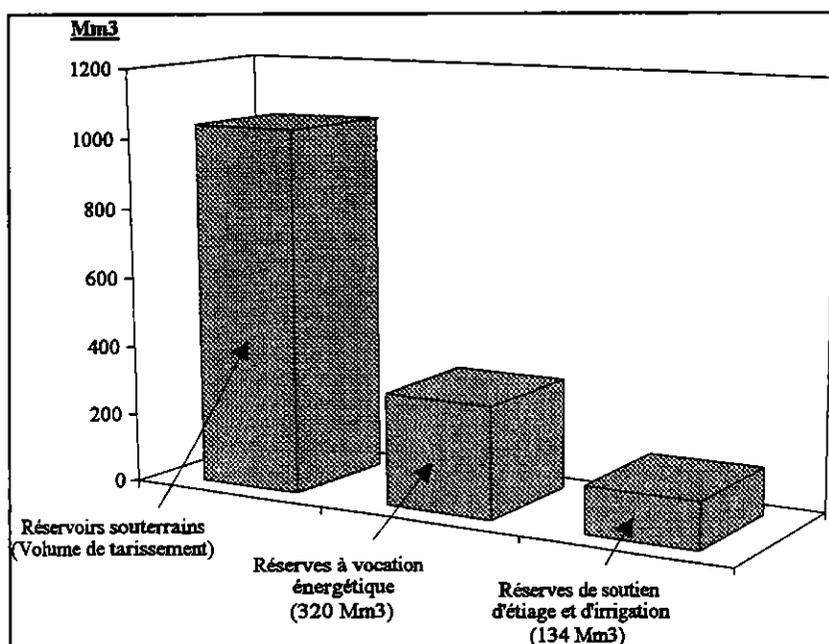
Tableau 3 - 7. Coefficients et volumes de tarissement pour la Garonne à Portet, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977



Graphique 3 - 60. Tarissement de la Garonne, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977

Il est intéressant de comparer le volume du réservoir souterrain à Portet aux autres formes de stockage du bassin (cf. graphique 3-61). Nous prendrons la valeur maximale de 1062 millions de m³ pour représenter le réservoir souterrain. Celui-ci est en réalité encore plus important, car l'écoulement souterrain existe aussi pendant la phase de décrue.

La principale réserve d'eau se trouve dans les aquifères. Elle est trois fois supérieure aux réserves à vocation énergétique (barrages E.D.F.), et huit fois supérieure aux réserves destinées au soutien d'étiage et à l'irrigation. La réserve souterraine est donc loin d'être négligeable. Son utilisation à des fins de soutien d'étiage et d'irrigation est possible, si le gestionnaire la déstocke de façon sensée et raisonnable.



Graphique 3 - 61. Importance des différents réservoirs d'eau pour le bassin en amont de Toulouse

<u>Cycles</u>	<u>Durée du cycle</u> (jours)	<u>Durée du tarissement dans le cycle</u> (jours)	<u>Durée du tarissement dans le cycle</u> (%)	<u>Volume de tarissement écoulé / Volume de tarissement total</u> (%)
1985	416	105	25	70
1973	308	144	47	69
1978	382	97	25	66
1981	416	103	25	59
1986	377	113	30	60
1977	400	65	16	48
<u>Moyenne :</u>			<u>28</u>	<u>62</u>

Tableau 3 - 8. Volumes de tarissement écoulés à Portet, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977

Le volume de tarissement écoulé est toujours inférieur au volume de tarissement total. En effet, le cycle hydrologique suivant interrompt la vidange progressive des réservoirs souterrains. **La part du volume de tarissement écoulé par rapport au volume de tarissement total est en moyenne de 62 %** (cf. tableau 3-8), ce qui représente 3/5 des réserves. Il reste donc un stock important (2/5 des réserves) qui ne s'est pas écoulé et qui aurait pu être mobilisé par des moyens artificiels. La durée moyenne du tarissement par rapport au cycle est, quant à elle, de 28 %.

Conclusions

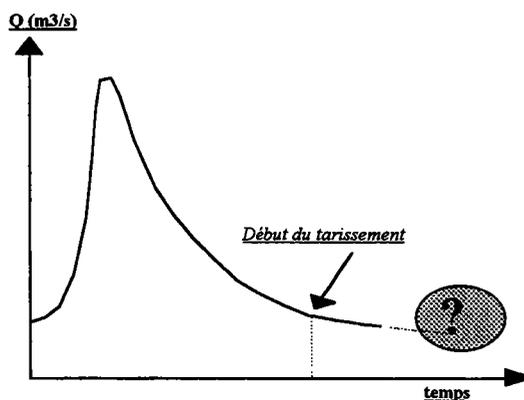
Les principales réserves souterraines du bassin sont situées dans le bassin du Salat, de l'Ariège et du Ger. Leurs volumes respectifs sont, pour le cycle 1985, de 111 hm³, 142 hm³ et 21 hm³. Le Ger détient, par contre, les réserves spécifiques les plus importantes : 224 l/m². C'est un bassin qui contient de nombreux aquifères karstiques, dont la Source Bleue. Mais, beaucoup de sources ne sont pas connues. Une étude hydrogéologique détaillée doit donc être engagée, afin de mieux connaître les zones d'apports et les aquifères présents sur ce bassin, et pour une éventuelle gestion active de leurs réserves.

Les réserves souterraines du bassin de la Garonne proviennent de nombreux aquifères carbonatés, fissurés ou karstiques; de nappes alluviales et colluviales; et d'autres petits aquifères. **C'est Fontestorbes qui possède les plus grandes réserves pour les aquifères karstiques.** Ces dernières s'élèvent à 34.7 hm³ en 1985.

A Portet, le réservoir souterrain s'élève à environ 800 millions de m³. C'est un chiffre considérable puisqu'il représente plus de 400 mille piscines olympiques ou si l'on préfère un lac de 10×10 km et 8 m de profondeur. Ces réserves sont bien supérieures aux réserves à vocation énergétique et aux réserves destinées au soutien d'étiage et à l'irrigation.

A partir de l'équation de vidange de MAILLET, on peut simuler l'évolution des débits d'étiage de la Garonne. La connaissance de ces débits s'avère très important pour les gestionnaires, les utilisateurs et, bien sûr, l'écologie des rivières.

L'équation comprend un coefficient de tarissement. Ce dernier peut correspondre à un coefficient moyen de la Garonne ou peut être déterminé sur le tarissement concerné. De plus, l'estimation des débits n'est envisageable que sur des débits naturels. Il faut par conséquent connaître les effets perturbateurs des aménagements.



L'équation utilisée pour la prédiction est la suivante :

$$Q_t = Q'_0 \times e^{(-\alpha \times t)}$$

avec :

- α : coefficient de tarissement;
- Q'_0 : débit au début du tarissement;
- t : temps;
- Q_t : débit au temps t .

Le débit d'étiage dans 1 mois, 2 mois ou 3 mois, sera donné respectivement par :

$$Q_{30} = Q'_0 \times e^{(-\alpha \times 30)}$$

$$Q_{60} = Q'_0 \times e^{(-\alpha \times 60)}$$

$$Q_{90} = Q'_0 \times e^{(-\alpha \times 90)}$$

avec :

- Q'_0 : débit au début du tarissement;
- α : coefficient de tarissement;
- Q_{30}, Q_{60}, Q_{90} : débit au bout de 30, 60 et 90 jours de tarissement.

L'étude du tarissement a permis de connaître les réserves souterraines du bassin. Mais quelle est la contribution de l'écoulement souterrain pendant l'année ? Est-elle supérieure au ruissellement ? Le chapitre suivant a pour objet d'estimer cet écoulement, à partir de la décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme.

3.3.2. Décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme

Introduction

Après avoir recensé et décrit les méthodes de décomposition existantes, nous proposerons une nouvelle méthode. Cette dernière tient compte des influences des aménagements et de la fonte des neiges. Appliquée, pour le cycle 1993, au Salat à Roquefort, bassin peu perturbé, et sur la Garonne à Portet, elle permet une estimation de l'écoulement souterrain.

3.3.2.1. Méthodes existantes

Ces méthodes supposent l'absence totale de perturbation provenant d'aménagements : barrages, retenues, dérivations, prélèvements. Elles ne prennent pas non plus en compte la contribution de la neige.

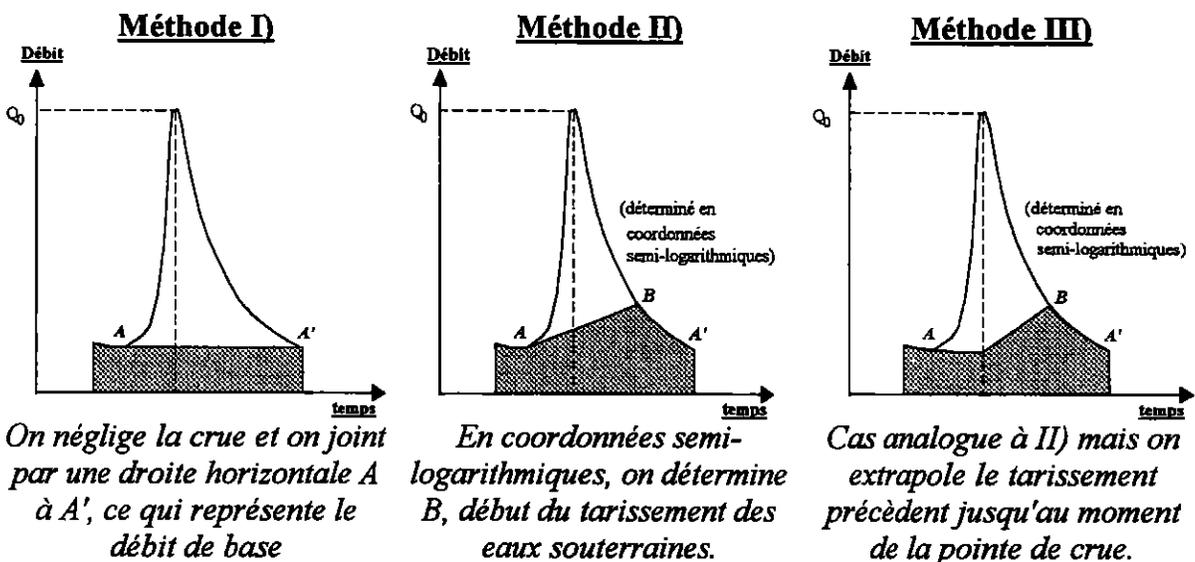
3.3.2.1.1. Décomposition d'une crue simple

Il existe actuellement deux grands groupes de méthodes :

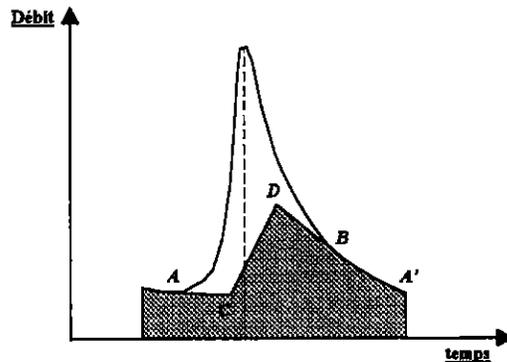
- les méthodes classiques, rapides et approchées, basées sur des concepts simples et réels, mais qui sous estiment en général l'apport souterrain;
- les méthodes empiriques fondées sur des propriétés mathématiques : méthode semi-logarithmique et méthode de LANGBEIN.

3.3.2.1.1.1. Méthodes classiques

Nous citerons les méthodes proposées par CASTANY, REMENERIAS, SCHOELLER, qui permettent d'avoir une estimation rapide de l'écoulement souterrain (cf. méthodes I, II et III).



De longues chroniques de débit de sources ou de niveau piézométrique, comprenant le tarissement de l'écoulement souterrain, permettent de déterminer de façon plus précise le point C et le point D correspondant respectivement, au début de la crue et à la pointe de la crue de l'écoulement souterrain (cf. figure).



3.3.2.1.1.2. Méthode semi-logarithmique

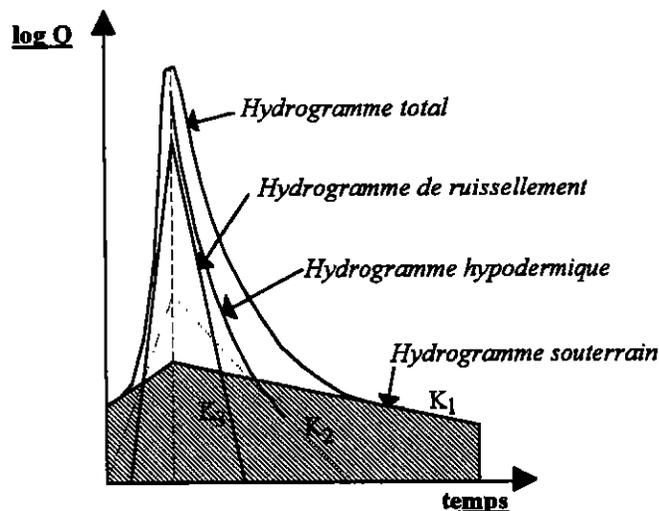
On considère que l'écoulement total est formé de plusieurs composantes obéissant, chacune, à une loi de décroissance exponentielle du type :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-kt}$$

avec :

- k : coefficient de décrue;
- Q_0 : débit correspondant au début de la décrue; déterminé avec la courbe $\log(Q) = f(t)$.

La méthode consiste à séparer les différentes composantes (souterraine, hypodermique et de ruissellement) sur un graphique en coordonnées semi-logarithmiques, la décroissance exponentielle étant représentée par une droite. Dès que la droite correspondant à l'écoulement souterrain est ajustée sur la partie terminale de l'hydrogramme, on l'extrapole jusqu'à la pointe de crue. On retranche ensuite cette composante à l'hydrogramme total. On recommence l'opération pour l'hydrogramme résultant. Ce qui permet ainsi, de connaître la contribution de chaque composante à l'écoulement total.



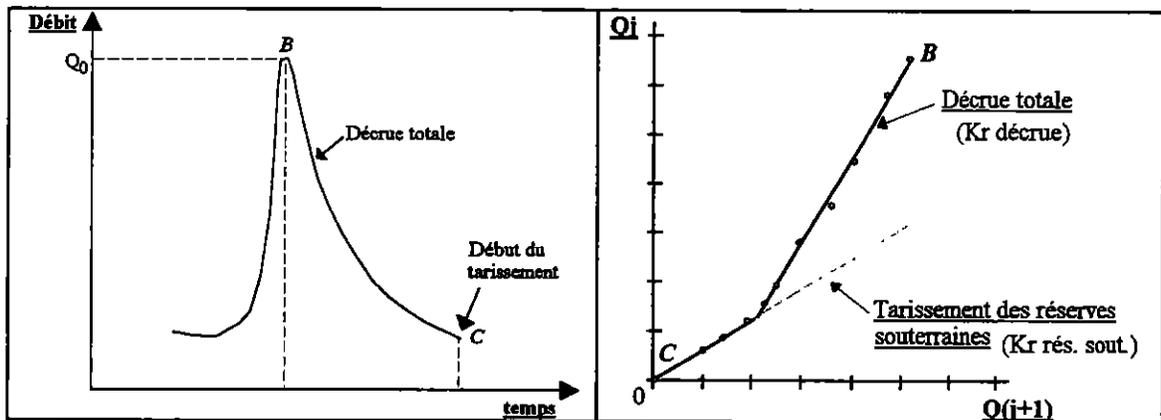
3.3.2.1.1.3. Méthode de LANGBEIN

Elle utilise la partie de la décrue comprise entre la pointe de crue (B) et le moment où commence l'écoulement strictement souterrain (C). On reporte sur un graphique le débit du jour j en fonction du jour $j + 1$. W.B. LANGBEIN, 1940, montre que l'écoulement souterrain, et l'écoulement total, s'alignent tous deux respectivement sur une droite. Les pentes de ces droites donnent une constante K_r , constante qui permet d'établir l'équation de la décrue totale et celle du tarissement des réserves souterraines :

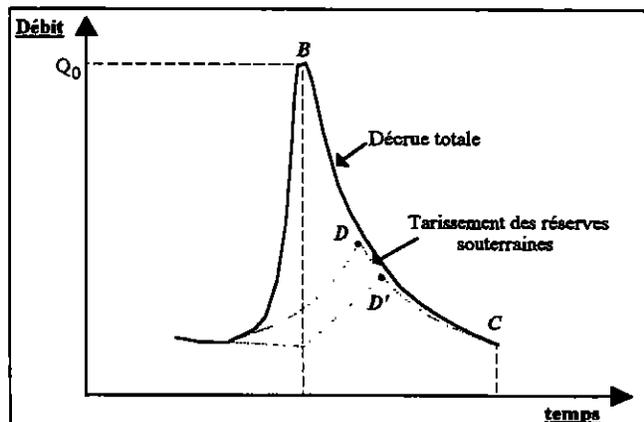
- pour la décrue : $Q_t = Q_0 \cdot (K_r^{\text{décrue}})^t$;
- pour le tarissement : $Q_t = Q_0 \cdot (K_r^{\text{tarissement}})^t$.

avec :

t : temps séparant Q_0 (début de la pointe de crue) de Q_t (débit durant la décrue).



- L'hydrogramme de l'écoulement souterrain durant la crue est déterminé de deux façons :
- à partir de l'équation du tarissement des réserves souterraines : la partie montante est symétrique à la partie descendante. Ce procédé établit le point D, pointe de crue de l'écoulement souterrain;
 - de façon arbitraire, avec comme pointe de crue, D'.



3.3.2.1.2. Décomposition de l'hydrogramme annuel

L'opération s'avère plus délicate, car on a généralement plusieurs crues et le tarissement n'apparaît pas systématiquement. B. RAMBERT, après avoir passé en revue quelques méthodes (méthodes russes, méthodes de KUDELIN et de REZAI-VALYCE), propose en 1971, plusieurs méthodes basées sur l'extrapolation du tarissement et la détermination des minimums et maximums de l'écoulement souterrain. Suivant les cas, l'auteur envisage la décomposition en employant :

- *un seul tarissement* : avec une crue principale ou plusieurs crues de l'écoulement souterrain (cf. figure 3-2);
- *deux tarissements* : le tarissement précédent et un autre correspondant à un écoulement souterrain plus rapide avec une crue ou plusieurs crues;
- *trois tarissements* : les deux tarissements précédents et un nouveau, plus rapide.

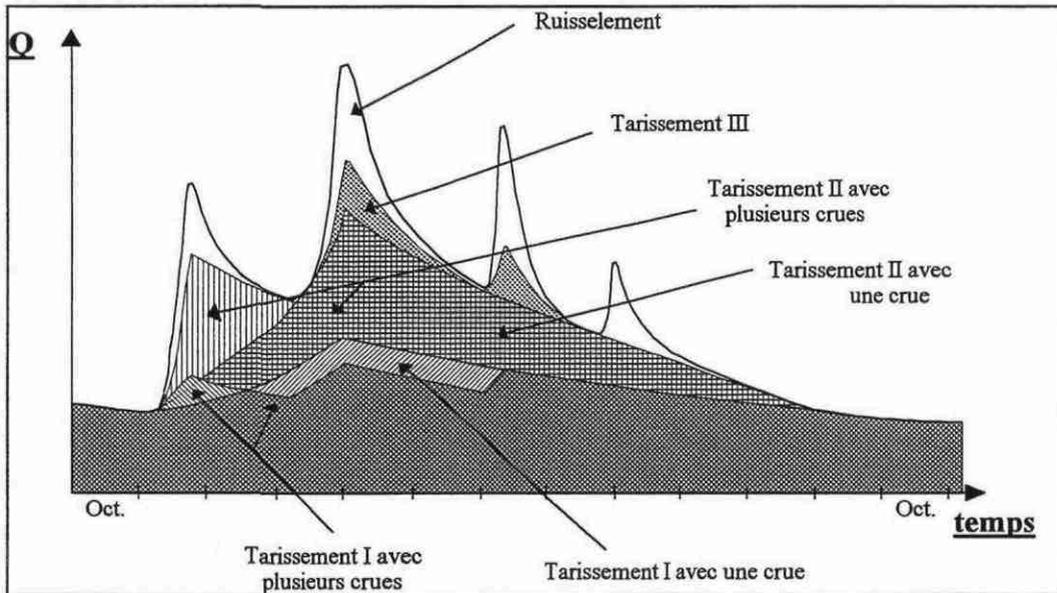


Figure 3 - 2. Décomposition de l'hydrogramme en plusieurs composantes

3.3.2.1.3. Conclusions

Les méthodes exposées n'ont pas de réalité physique (notamment celle de LANGBEIN). Elles sont utilisées par les hydrologues gestionnaires pour conceptualiser et définir, de façon grossière, les composantes de l'écoulement.

Les méthodes classiques sont souvent un peu simplistes et ne sont pas représentatives de l'écoulement souterrain. La méthode semi-logarithmique et la décomposition annuelle envisageant plusieurs tarissements sont à rejeter, car les réservoirs correspondant aux différentes composantes de l'écoulement ne sont pas indépendants entre eux (cf. 3.3.1.1.2.).

En outre, les décompositions supposent un échange uniquement dans le sens nappe-rivière, par le biais d'un drainage. La seule source d'alimentation de la nappe provient des précipitations. Cette hypothèse, souvent employée, n'est cependant pas toujours vérifiée.

3.3.2.2. Nouvelle méthode proposée pour déterminer l'écoulement souterrain

Elle implique une connaissance approfondie des principaux réservoirs d'eau susceptibles d'alimenter le cours d'eau, en amont de la station étudiée. Ces réservoirs peuvent être de plusieurs types : souterrains, neigeux, à vocation énergétique ou de soutien d'étiage.

La plupart des études négligent les impacts des aménagements, ce qui est un tort, car l'influence sur les débits provoque des erreurs sur l'estimation de l'écoulement souterrain. Il est donc nécessaire, dans la mesure du possible, de reconstituer l'hydrogramme naturel avant de commencer la décomposition.

Sur le bassin de la Garonne, les aménagements sont nombreux (canaux, barrages hydroélectriques, retenues pour le soutien d'étiage). Au pas mensuel, l'influence peut atteindre 30 % à la station de Portet, en amont de Toulouse.

Pour les bassins comportant une partie montagneuse et un enneigement saisonnier, l'écoulement neigeux doit être aussi pris en compte. C'est pourquoi, une méthode est proposée. Elle est basée sur la comparaison d'hydrogrammes de bassin comportant un réservoir neigeux, et de bassin sans réservoir neigeux. Elle permet d'évaluer la participation des écoulements provenant de la fonte des neiges.

Une fois que les perturbations dues aux aménagements et à l'écoulement neigeux sont déterminées, on les enlève de l'hydrogramme. Il reste alors un hydrogramme résiduel comprenant deux parties essentielles : une composante souterraine et une composante de ruissellement. Ces dernières sont ensuite estimées à partir de la décomposition de l'hydrogramme fondée sur l'extrapolation de la courbe de tarissement et la détermination de la crue de l'écoulement souterrain. Dans l'étude qui suivra, nous considérerons que ce dernier provient exclusivement d'aquifères poreux.

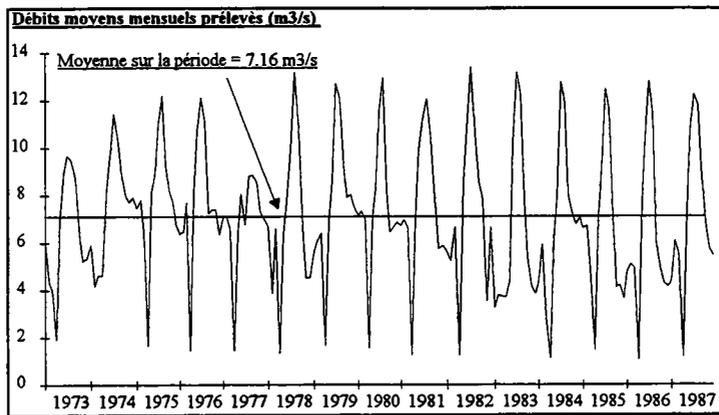
3.3.2.2.1. Impacts des aménagements et des prélèvements sur les débits

Les perturbations sont deux types. Il s'agit :

- soit d'un détournement d'un volume d'eau en amont de la station étudiée avec une restitution négligeable (cas des canaux, des prélèvements pour l'AEP et l'irrigation);
- soit d'une modification du régime de la rivière avec stockage et déstockage différés (barrages hydroélectriques et de soutien d'étiage).

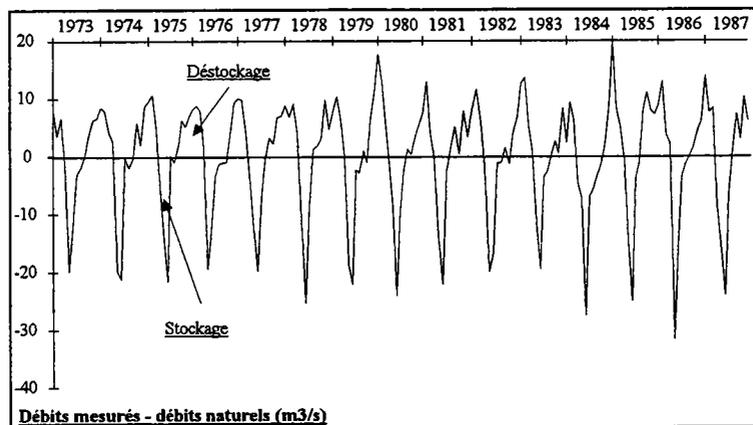
Pour illustrer ces propos, on a pris deux exemples régionaux : le canal de la Neste (détournement d'un volume d'eau), et les barrages à vocation énergétique du bassin de l'Ariège (effet des stockages et des déstockages) :

- Le canal de la Neste : il permet la réalimentation des rivières gasconnes à partir de prélèvements sur la Neste. Les débits moyens prélevés sont de l'ordre de 7.16 m³/s pour la période 1973-1987 (cf. graphique 3-62).



Graphique 3 - 62. Débits moyens mensuels prélevés sur la Neste pour le canal de Sarrancolin, période 1973-1987

- Le bassin de l'Ariège : il possède de nombreux barrages hydroélectriques, ce qui fait que les débits perturbés sont de plusieurs m^3/s (cf. graphique 3-63). En règle générale, la période de stockage a lieu au printemps et au début de l'été, la période de déstockage, en automne et en hiver.



Graphique 3 - 63. Mise en évidence des stockages et déstockages des barrages à vocation énergétique à Auterive (Ariège), période 1973-1987

Au niveau pluriannuel, et parfois sur un cycle hydrologique, l'influence des barrages est pratiquement nulle, car le volume stocké est équivalent au volume déstocké.

Une démarche préliminaire auprès des services compétents et des gestionnaires (EDF, services des eaux, syndicats d'eau potable) est indispensable afin d'estimer l'influence de ces aménagements. Dans le premier cas, la reconstitution de l'hydrogramme s'effectue en rajoutant les débits prélevés. Dans le deuxième cas, on ajoute ou on retranche les débits suivant qu'ils sont stockés ou déstockés.

La décomposition de l'hydrogramme s'effectue au pas journalier, mais souvent les perturbations ne sont connues qu'au pas mensuel. Il s'agit alors de corriger les débits journaliers de l'hydrogramme, en utilisant la valeur mensuelle moyenne. Cette méthode est simple, mais peu rigoureuse. Elle est critiquable, mais elle a le mérite de prendre en compte les volumes modifiés.

Parmi les débits détournés, certains sont faciles à connaître: ce sont les prélèvements pour l'AEP, recensés et répertoriés dans les Agences de Bassin; les autres sont approximatifs: ce sont les prélèvements occasionnels, souvent importants lors des périodes estivales.

3.3.2.2.2. Ecoulement lié à la fonte des neiges

Les bassins montagneux ont une partie de leurs écoulements annuels qui proviennent de la fonte des neiges. Une évaluation de cet écoulement est donnée par les météorologues. Ceux-ci utilisent un coefficient de nivosité, mais la démarche est approximative. La méthode proposée ici est plus rigoureuse, car elle s'appuie sur une démarche hydrologique. Elle permet de connaître le début et la fin de l'influence neigeuse, et d'avoir une estimation des volumes neigeux.

3.3.2.2.2.1. Exposé de la méthode permettant d'estimer la contribution neigeuse

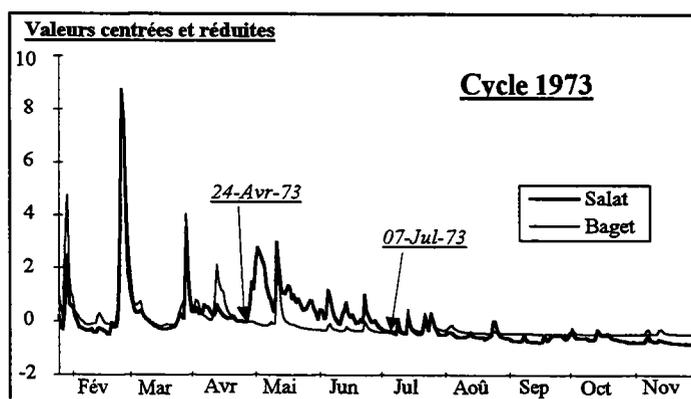
La méthode consiste à comparer, sur un cycle hydrologique, les hydrogrammes provenant de l'exutoire de deux bassins appartenant à la même province géographique et climatique, dont l'un est, a priori, affecté par la neige, et l'autre pas du tout. On suppose que ces bassins réagissent de la même façon aux effets des précipitations et qu'il existe une linéarité spatiale, c'est-à-dire que le débit à l'exutoire est proportionnel à la superficie du bassin.

La comparaison des débits des deux hydrogrammes ne se fait pas en coordonnées ordinaires, mais en les centrant et en les réduisant. Le calcul est simple : on retranche, pour un débit donné, la moyenne de la chronique, et on divise l'ensemble par la variance totale. La nouvelle valeur, sans unité, est donnée par :

$$\text{Valeur centrée et réduite} = \frac{Q_{(m^3/s)} - \text{Moyenne}}{\sqrt{\text{Variance totale}}}$$

Du point de vue statistique, l'échantillonnage est représentatif.

La **différence** entre les deux nouvelles chroniques centrées et réduites met en évidence la fonte des neiges, et permet de connaître, avec précision, **les dates de début et de fin de l'influence neigeuse** (cf. graphique 3-64). En effet, pour la période correspondant à la fonte des neiges, la chronique centrée et réduite du bassin qui possède un écoulement neigeux se trouve bien au dessus de celle du bassin qui ne possède pas d'écoulement neigeux.



Graphique 3 - 64. Exemple de mise en évidence de l'influence neigeuse sur le bassin du Salat en Ariège. La comparaison est faite avec le bassin du Baget non neigeux

Le volume neigeux est ensuite calculé en pondérant par les surfaces des bassins la partie de la chronique influencée. On peut ainsi obtenir un hydrogramme ne comportant plus l'écoulement lié à la neige.

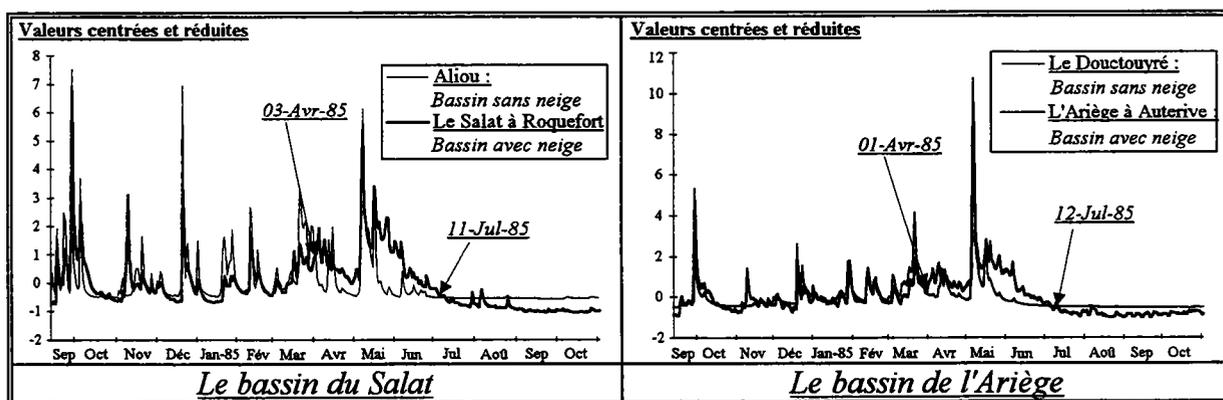
De façon condensée, les principales étapes de la méthode sont donc les suivantes :

- 1) choix d'un bassin non neigeux, proche géographiquement et hydrogéologiquement du bassin neigeux;
- 2) comparaison des chroniques sur un cycle hydrologique;
- 3) centrage et réduction des débits;
- 4) détermination des dates de l'influence neigeuse;
- 5) calcul du volume neigeux par pondération de la surface.

3.3.2.2.2. Validité de la méthode : exemple de deux bassins montagneux, le Salat et l'Ariège

Les chroniques de débits de ces deux bassins, et de deux autres bassins sans réserve neigeuse sont étudiées sur un même cycle, afin de déterminer les dates respectives de l'influence neigeuse. Les bassins non neigeux choisis sont : Aliou, près de Saint-Girons, pour le bassin du Salat, et le Douctouyre, affluent de l'Hers vif, pour le bassin de l'Ariège (cf. graphique 3-65).

Les dates de début et de fin de l'influence neigeuse sur les deux bassins se correspondent, à un ou deux jours près. L'influence, en 1985, commence à partir du mois d'avril et se termine mi-juillet. Sa durée est d'environ une centaine de jours, soit un peu plus de trois mois. Le petit décalage entre les dates provient des conditions locales, mais, globalement, l'influence neigeuse se déroule sur les deux bassins d'une façon synchrone. La méthode apparaît donc précise et rigoureuse.



Graphique 3 - 65. Comparaison des dates d'influence neigeuse sur deux bassins : le Salat et l'Ariège, pour le cycle 1985

3.3.2.2.2.3. Estimation des volumes neigeux sur le bassin du Salat pour quelques cycles

Cette estimation est faite en comparant les chroniques de débits, centrés et réduits, du bassin du Salat, et celles du bassin du Baget. Ce dernier est un bassin karstique ne possédant pas de réserve neigeuse. Son comportement est assimilable à un réseau de surface.

Sur la période 1973-1987, six cycles ont été étudiés :

- le cycle le plus sec : le cycle 1986 (cf. tableau 3-9);
- le cycle le plus humide : le cycle 1977;
- un cycle moyen : le cycle 1981;
- des cycles intermédiaires entre le cycle le plus sec et le cycle le plus humide : les cycles 1987, 1973, 1978.

<u>Cycle</u>	<u>Durée (jours)</u>	<u>Précipitations totales (mm)</u>	<u>Précipitations moyennes journalières (mm)</u>
1973	308	888.4	2.9
1977	400	1388.3	3.5
1978	382	1218.1	3.2
1981	416	1208.1	2.9
1986	377	895.9	2.4
1987	410	1023.6	2.5

Tableau 3 - 9. Précipitations totales et moyennes pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87; station d'Antichan (St-Girons)

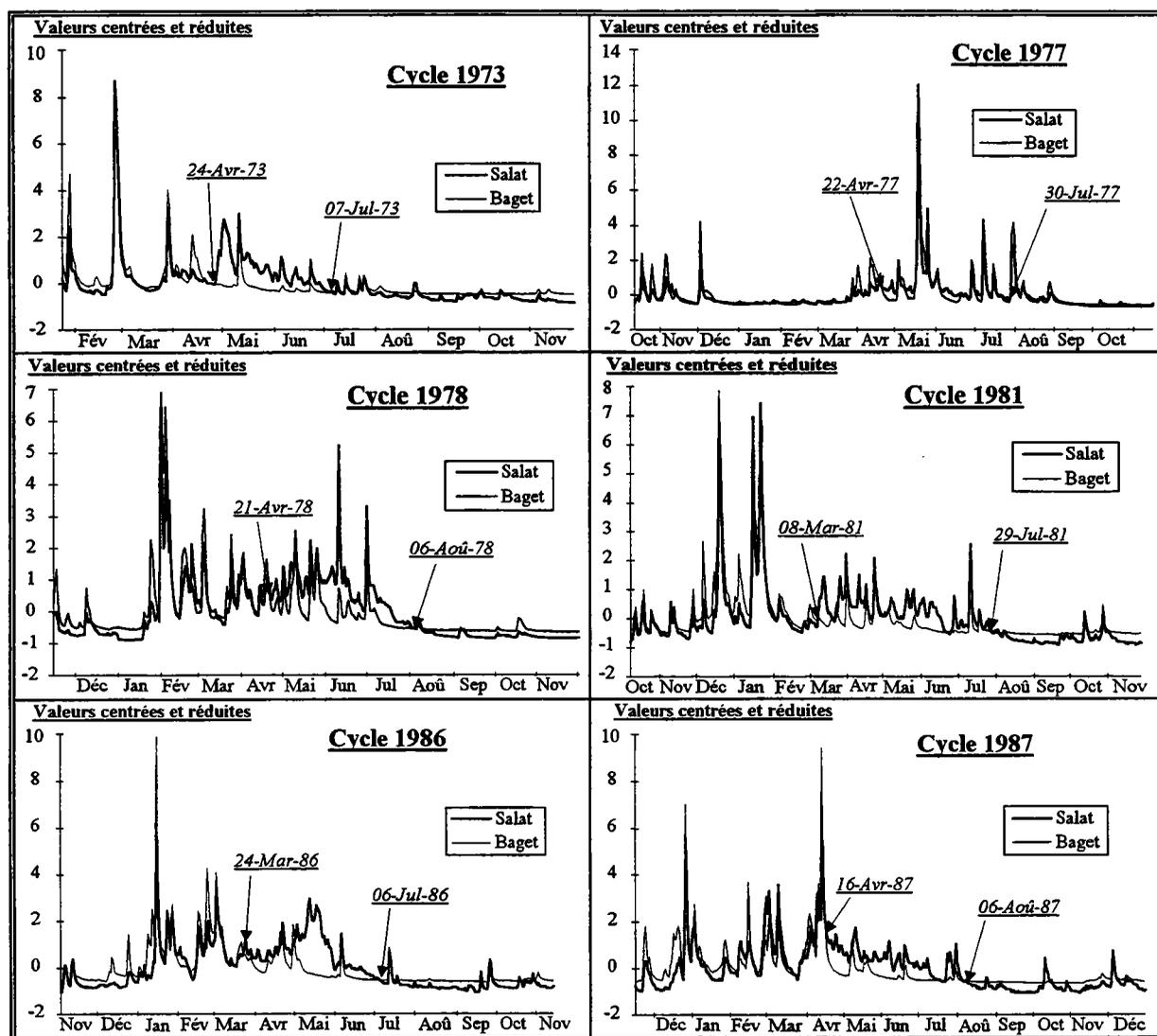
3.3.2.2.2.3.1. Périodes d'influence neigeuse

Elles débutent à partir de mars, avril ou mai. Elles se terminent, généralement, en juillet ou août (cf. graphique 3-66 et tableau 3-10). La durée de l'influence neigeuse dépend des conditions d'enneigement et d'ensoleillement. Si les précipitations neigeuses sont faibles, la durée d'influence sera plus courte, pour un ensoleillement annuel équivalent. Pour les cycles étudiés, la durée de l'influence est comprise entre deux mois et demi (1973), et cinq mois (1981).

3.3.2.2.2.3.2. Volumes d'écoulement neigeux

Ils se chiffrent en centaines de millions de m³ (cf. graphique 3-67 et tableau 3-11). Ils représentent donc des réserves importantes. Le cycle 81 détient le volume le plus important : 279 millions de m³. Le cycle 77 est peu neigeux : le volume est estimé à 121 millions de m³.

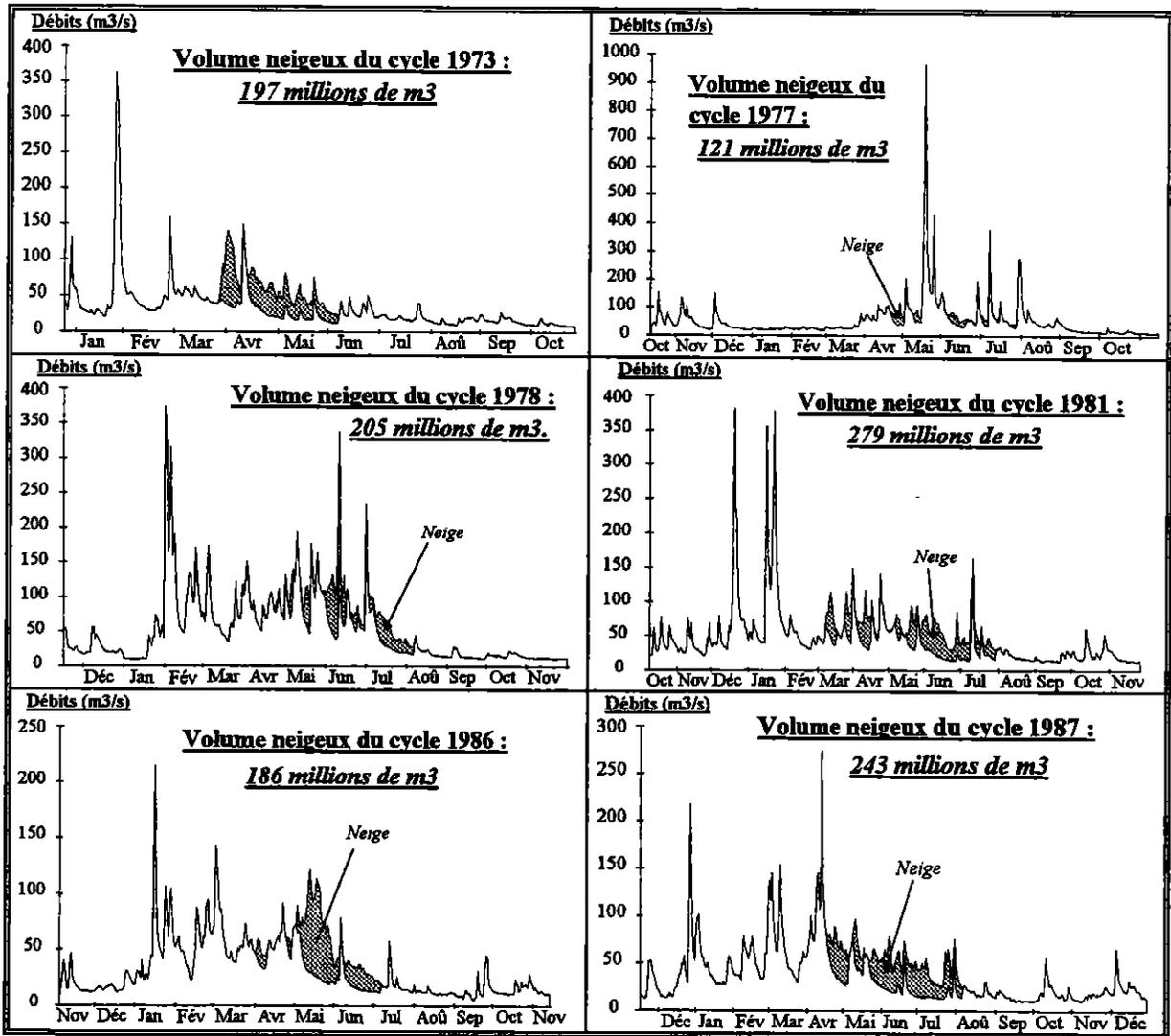
La hauteur d'eau associée à ces volumes neigeux correspond à quelques cm répartis sur la totalité du bassin : 8 à 18 environ. Ramenées à une surface enneigée équivalant au dixième du bassin (valeur qui se rapproche de la surface réellement enneigée de façon permanente), les hauteurs d'eau varient entre 0.77 m (1977) et 1.78 m (1981). L'épaisseur de neige correspondante est encore plus élevée, car l'eau occupe un volume plus important à l'état solide, sous forme de cristaux. Il serait intéressant de comparer ces chiffres aux relevés nivologiques effectués sur le bassin.



Graphique 3 - 66. Détermination des dates d'influence de la neige sur le bassin du Salat pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87

<u>Cycles</u>	<u>Date de début de l'influence neigeuse</u>	<u>Date de fin de l'influence neigeuse</u>	<u>Durée de l'influence (jours)</u>
1973	24 avril	7 juillet	74
1977	22 avril	30 juillet	99
1978	21 avril	6 août	107
1981	8 mars	29 juillet	143
1986	24 mars	6 juillet	104
1987	16 avril	6 août	112

Tableau 3 - 10. Périodes d'influence neigeuse pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87

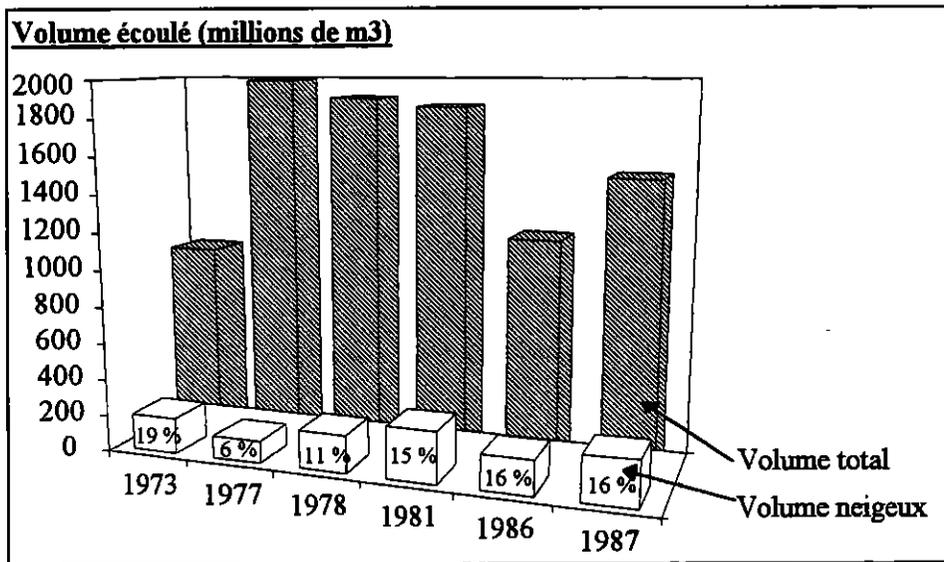


Graphique 3 - 67. Volumes d'écoulement neigeux et hydrogrammes du Salat à Roquefort, sans l'influence neigeuse, pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87

Cycles	Volume écoulé (millions de m ³)			Hauteur d'eau associée (m)	
	total	neige	Pourcentage du volume neigeux dans le cycle	bassin entier	1/10 du bassin
1973	1045	197	19	0.13	1.25
1977	1991	121	6	0.08	0.77
1978	1901	205	11	0.13	1.31
1981	1860	279	15	0.18	1.78
1986	1190	186	16	0.12	1.18
1987	1517	243	16	0.15	1.55

Tableau 3 - 11. Volume neigeux et hauteur de neige associée sur le bassin du Salat, cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87

Le volume total écoulé sur le bassin du Salat varie entre 1 milliard et deux milliards de m³ suivant les cycles. La part de l'écoulement neigeux est comprise entre 6 %, pour les cycles peu neigeux (1977), et 19 %, pour les cycles plus neigeux (1973) (cf. graphique 3-68). C'est une contribution qui n'est pas négligeable.



Graphique 3 - 68. Part de l'écoulement neigeux dans l'écoulement total pour le Salat à Roquefort, cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87

3.3.2.2.3. Décomposition de l'hydrogramme en une composante souterraine et une composante de ruissellement

Une fois que l'influence des aménagements et la contribution neigeuse sont connues, si elles existent, on les retranche de l'hydrogramme. On obtient alors un hydrogramme résiduel sur lequel on peut entreprendre une décomposition en deux parties : une composante de ruissellement et une composante souterraine.

Cette décomposition est basée sur l'extrapolation de la courbe de tarissement. La plupart du temps, les cycles hydrologiques sont constitués par plusieurs périodes de hautes eaux et d'un ou plusieurs tarissements. Généralement, un tarissement apparaît dans la partie terminale de l'hydrogramme — on parle alors de tarissement final —, et un deuxième tarissement peut apparaître en hiver — il s'agit du tarissement hivernal —. Dans le premier cas, la décomposition s'effectue à partir du tarissement final. Dans le deuxième cas, elle repose sur l'extrapolation des deux tarissements.

Mais où arrêter l'extrapolation de la courbe du tarissement ? La détermination de la crue de l'écoulement souterrain est parfois possible lorsqu'on dispose d'enregistrement de débit de sources. Ce n'est pas souvent le cas. De plus, sur un grand bassin, le comportement dynamique des aquifères est différent. C'est pourquoi, nous envisagerons deux cas :

- 1^{er} cas) une extrapolation du tarissement jusqu'à la pointe de crue de l'écoulement total. La crue souterraine arrive alors en même temps que la crue de l'écoulement total. Ce cas se rapproche du comportement des aquifères à réaction rapide;

- 2^{ième} cas) une extrapolation du tarissement s'arrêtant un mois après la crue de l'écoulement total (déphasage d'un mois). Cette hypothèse s'apparente au **comportement des aquifères poreux**.

Les aquifères carbonatés, fissurés et karstiques, les nappes libres et les nappes alluviales alimentent la rivière de surface. Parfois, les nappes alluviales sont elles-mêmes réalimentées par la rivière (cf. figure 3-3), par le biais des berges, si elles ne sont pas colmatées, ou directement par infiltration, lors des périodes d'inondations. Certains secteurs peuvent favoriser cette réalimentation, comme les méandres, les goulets et les surélévations du lit de la rivière. Les périodes de réalimentation dépendent des conditions climatiques et de l'état piézométriques de la nappe. Dans les deux cas précités, **nous négligerons la réalimentation des aquifères par la rivière**.

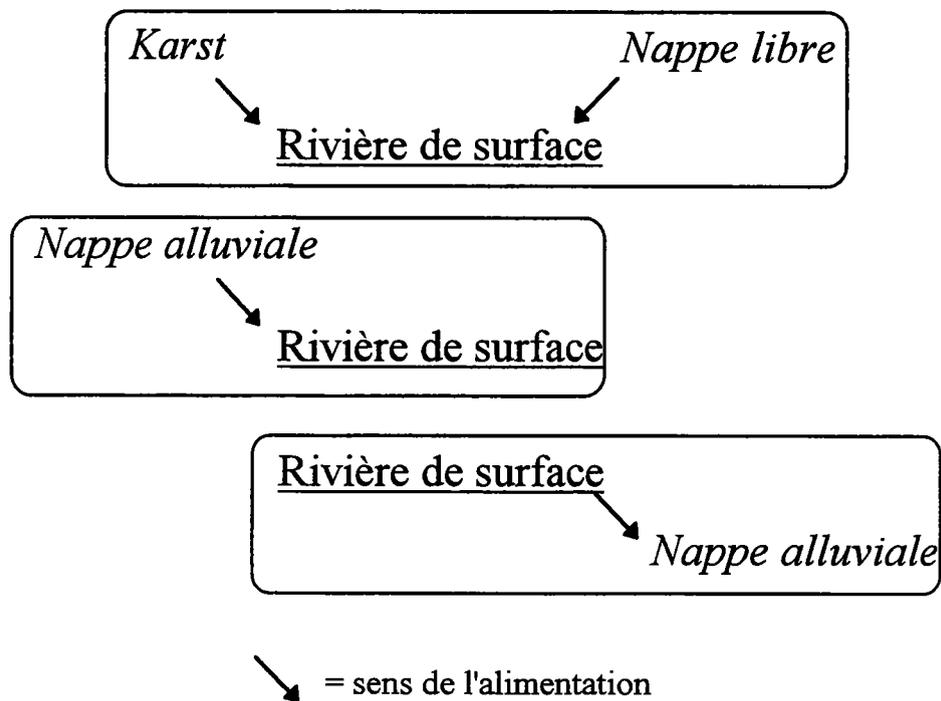
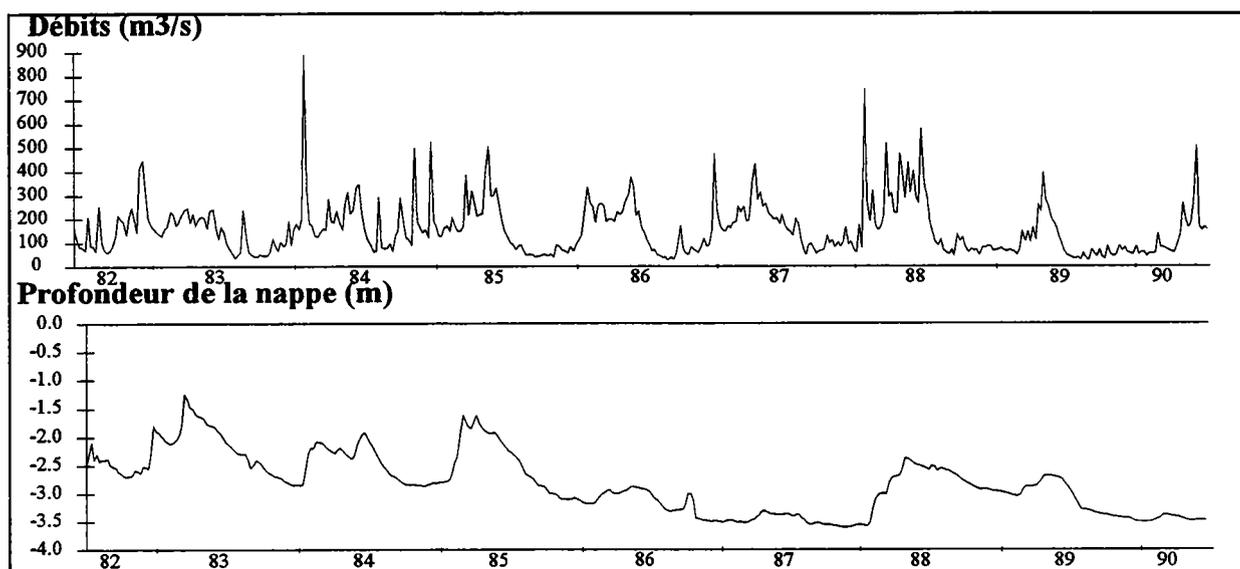


Figure 3 - 3. Types d'échanges aquifère-rivière

3.3.2.2.3.1. Comportement des aquifères poreux

Dans les milieux poreux, l'apport souterrain est différé de plusieurs jours, voire quelques mois. Ce délai est fonction de l'épaisseur, de l'état et de la porosité de la zone non saturée, mais aussi de la porosité de la zone saturée.

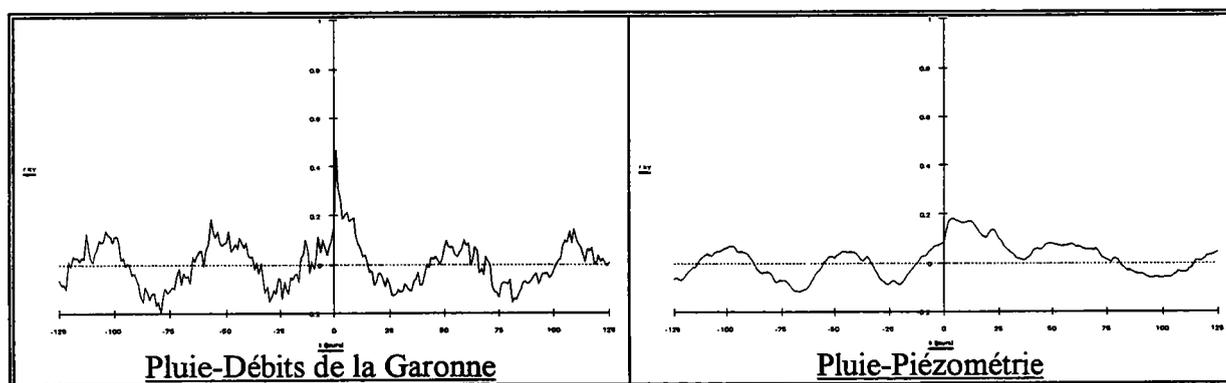
Le comportement des aquifères poreux peut être étudié à partir de la piézométrie de la nappe alluviale de Saint-Porquier (période 1982-1990). La comparaison de ce comportement avec celui d'un cours d'eau de surface est intéressante (cf. graphique 3-69).



Graphique 3 - 69. Débit de la Garonne (en haut) et piézométrie à Saint-Porquier (en bas) pour la période 1982-1990

Les nombreuses crues présentent sur la chronique des débits (hydrogramme à Portet) sont toutes atténuées sur la piézométrie. Les fortes précipitations engendrent une montée régulière de la piézométrie qui se stabilise sur une longue période. La nappe alluviale apparaît donc régulatrice et très inertielle.

L'analyse croisée entre les pluies et les débits, d'une part, et les pluies et la piézométrie, d'autre part, fournit la réponse du cours d'eau, et la réponse de la piézométrie aux précipitations. Le déphasage par rapport aux pluies peut être aussi apprécié (cf. graphique 3-70).

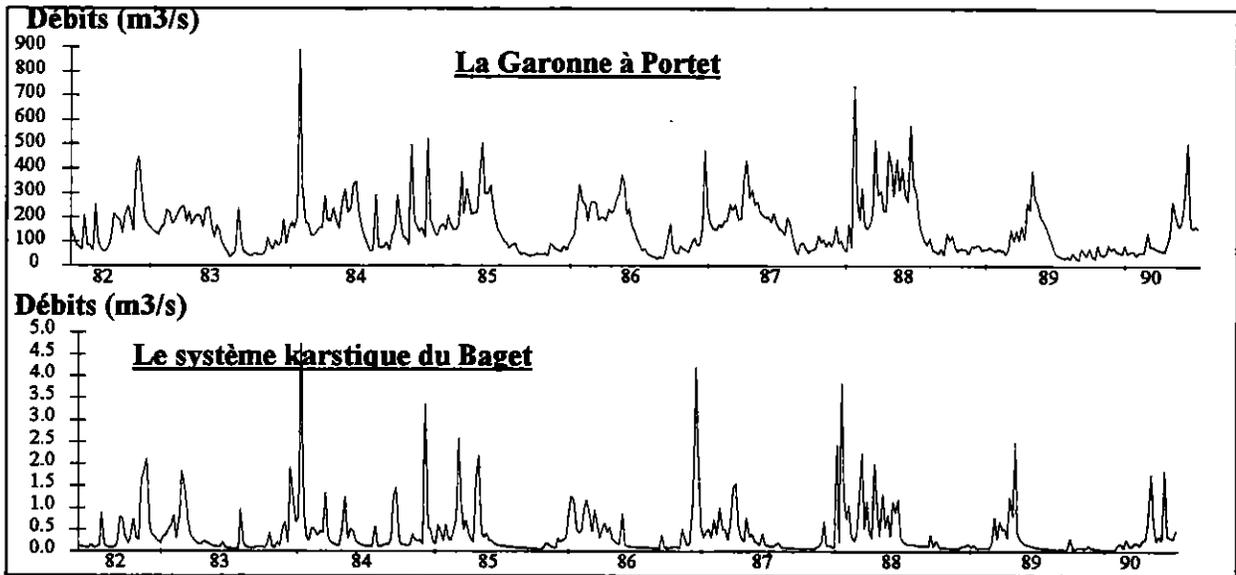


Graphique 3 - 70. Hydrogramme unitaire de la Garonne à Portet et limnigramme unitaire de la piézométrie à Saint-Porquier, période 1982-1990, pas hebdomadaire

Les réponses des deux systèmes sont tout à fait différentes. L'hydrogramme unitaire de la Garonne situé, à peu près, entre $k = 0$ et $k = 15$ est très étroit et pointu. Le temps de réponse aux pluies est de quelques jours seulement. Par contre, le piézogramme unitaire est plus évasé et moins prononcé. Le temps de réponse moyen est d'environ 70 jours.

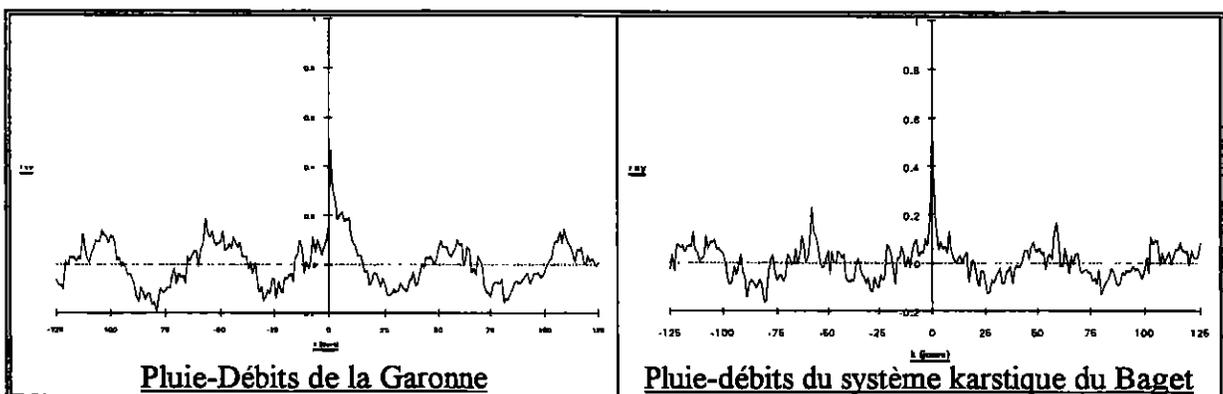
3.3.2.2.3.2. Comportement des aquifères karstiques

Le comportement hydrodynamique des aquifères karstiques est tout à fait différent de celui des aquifères poreux. Il s'apparente plutôt à celui d'un cours d'eau de surface. Les débits de la Garonne à Portet et ceux du système karstique du Baget illustrent parfaitement ces considérations (cf. graphique 3-71).



Graphique 3 - 71. Débit de la Garonne et du système karstique du Baget pour la période 1982-1990

La réponse aux pluies est identique (cf. graphique 3-72). Le comportement des aquifères karstiques est comparable à celui du cours d'eau de surface. Le déphasage est de quelques heures pour le Baget, et d'un ou deux jours pour la Garonne (le bassin est plus grand).



Graphique 3 - 72. Hydrogramme unitaire de la Garonne à Portet et du système karstique du Baget, période 1982-1990, pas hebdomadaire

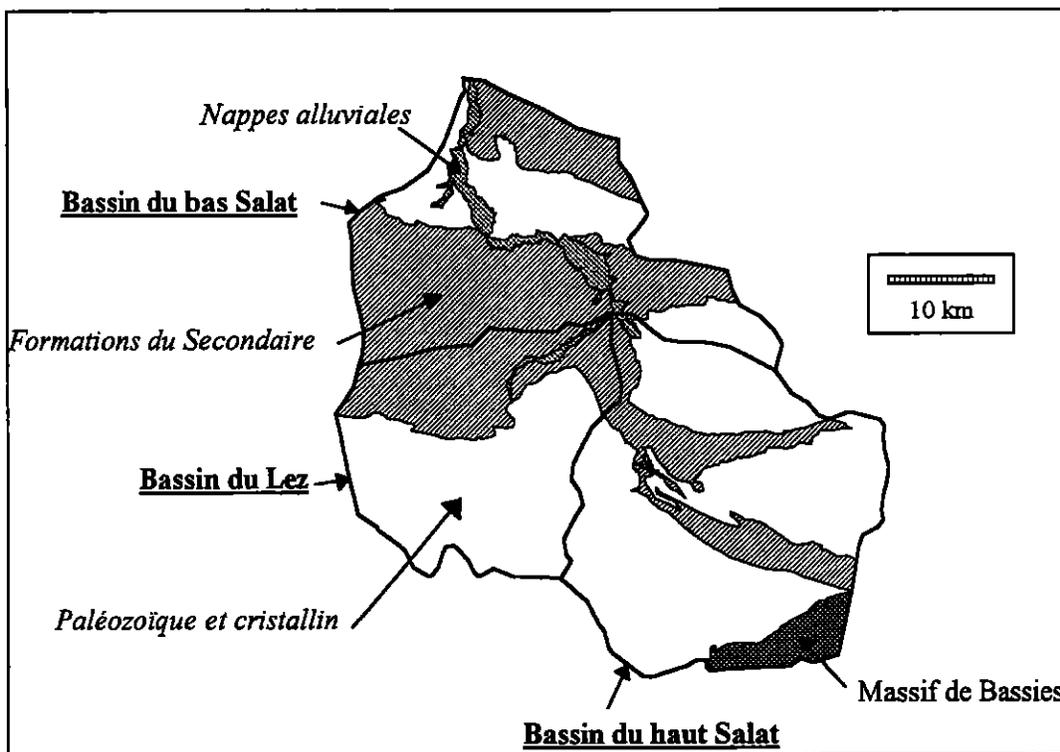
3.3.2.3. Décomposition de l'hydrogramme du Salat à Roquefort, cycle 1993

Le Salat est l'un des plus importants affluents de la Garonne en amont de Toulouse, au même titre que l'Ariège. Les débits sont peu influencés par les aménagements et la contribution neigeuse intervient dans les écoulements.

Le bassin est composé de formations cristallines, et de terrains :

- du Secondaire, comprenant des formations marneuses et calcaires (cf. carte 3-6);
- du Paléozoïque.

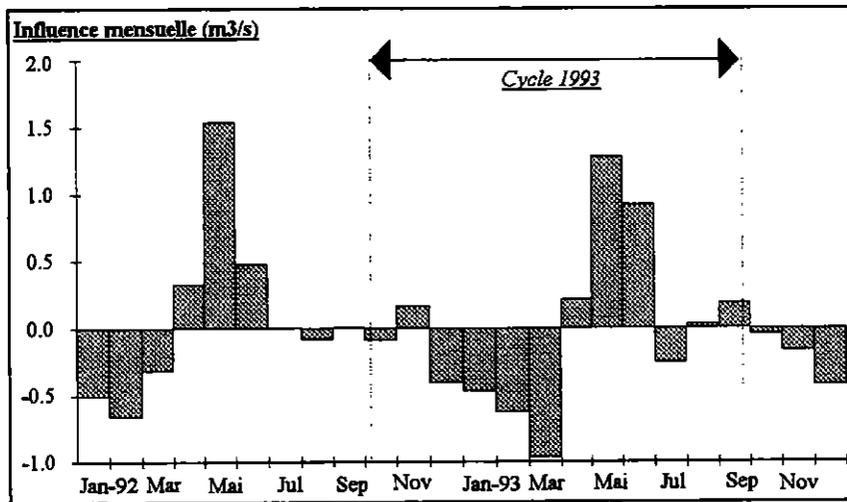
Du point de vue hydrogéologique, les terrains aquifères sont représentés par les karsts (niveaux calcaires et dolomitiques des séries mésozoïques), les formations colluviales et alluviales (alluvions holocènes et wurmiennes), et les massifs granitiques.



Carte 3 - 6. Géologie du bassin du Salat

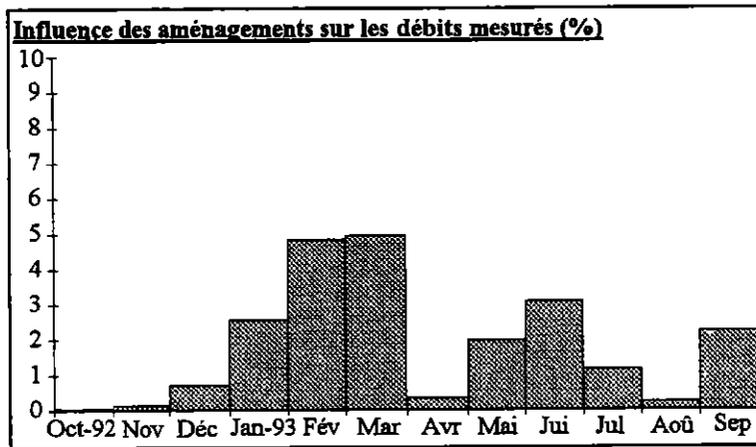
3.3.2.3.1. Influence des aménagements et hydrogramme naturel

Les débits mesurés à Roquefort ne sont pas des débits naturels. Une partie du bassin (haut bassin du Lez) comprend des aménagements hydroélectriques et quelques retenues dont celle d'Araing. De décembre à mars 1993, une partie des écoulements du cycle précédent est déstockée. Au mois de mars l'influence moyenne est d'1 m³/s (cf. graphique 3-73). D'avril à juin, un nouveau stock est constitué pour palier à la demande en électricité de fin d'année.



Graphique 3 - 73. Influence mensuelle des aménagements hydroélectriques (m^3/s) sur le Salat à Roquefort, cycle 1993

L'impact des aménagements sur les débits ne dépasse pas 5 % (cf. graphique 3-74). L'influence moyenne est à peine de 2 % sur le cycle 1993. L'hydrogramme des débits mesurés est proche de l'hydrogramme des débits naturels.

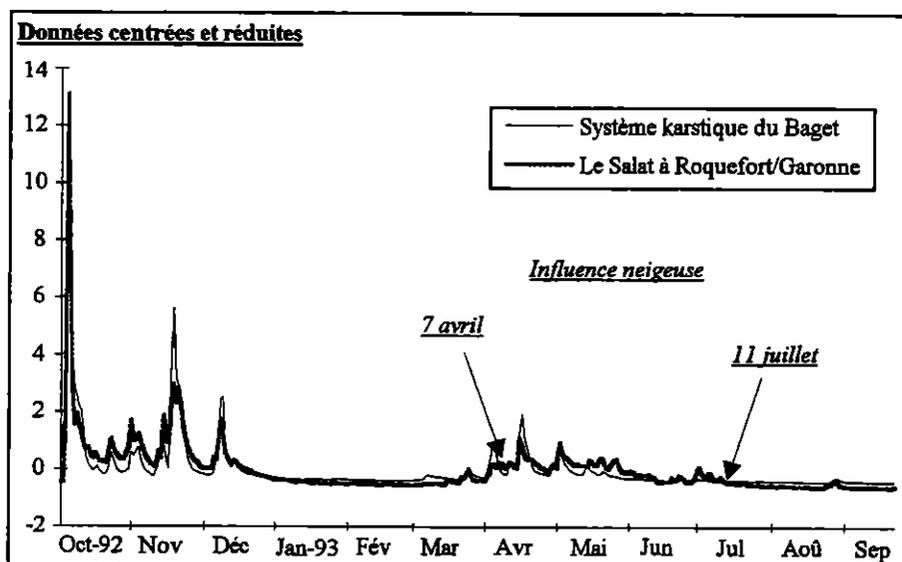


Graphique 3 - 74. Influence des aménagements sur les débits mesurés sur le Salat à Roquefort, cycle 1993

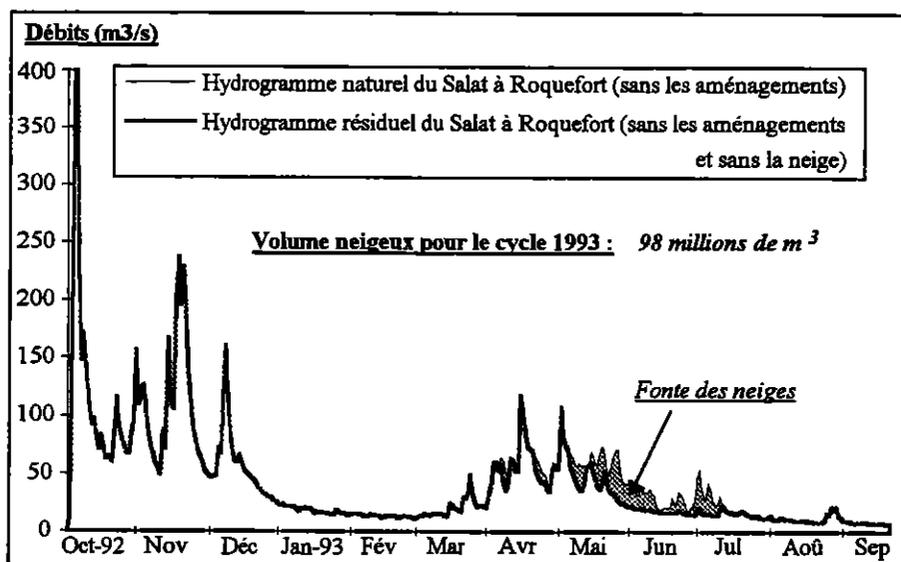
3.3.2.3.2. Influence de l'écoulement neigeux et hydrogramme résiduel

Afin de déterminer les dates de l'influence de la fonte des neiges, les débits du Salat sont comparés à ceux du système karstique du Baget. L'écoulement lié à la neige débute le 7 avril et se termine le 11 juillet, soit une durée d'un peu plus de trois mois (cf. graphique 3-75).

Le volume neigeux écoulé est de 98 millions de m^3 (cf. graphique 3-76). Il correspond à 7 % du volume naturel écoulé (1,435 milliard de m^3). Si on se réfère au résultat trouvé précédemment, le cycle 1993 est un cycle très peu neigeux.



Graphique 3 - 75. Détermination de la période d'influence neigieuse sur le Salat, cycle 1993



Graphique 3 - 76. Hydrogramme résiduel du Salat (sans les aménagements et sans la neige), cycle 1993

3.3.2.3.3. Hydrogramme souterrain

La connaissance hydrogéologique du bassin permet de supposer qu'il n'existe pas de réalimentation des aquifères par la rivière. Après avoir retiré l'influence des barrages et celle de l'écoulement neigeux, il reste un hydrogramme résiduel, comportant une partie liée au ruissellement et une partie souterraine. C'est à partir de cet hydrogramme que la décomposition est menée.

L'étude de la récession donne deux périodes de tarissement : une première de janvier à mars, étiage hivernal, et une seconde de juin à septembre, étiage final. Les dates de début et de fin des tarissements coïncident avec celles du système karstique du Baget présent dans le bassin. L'analyse des tarissements permet d'obtenir l'équation de vidange des réservoirs souterrains, et les volumes de tarissement correspondants (cf. tableau 3-12).

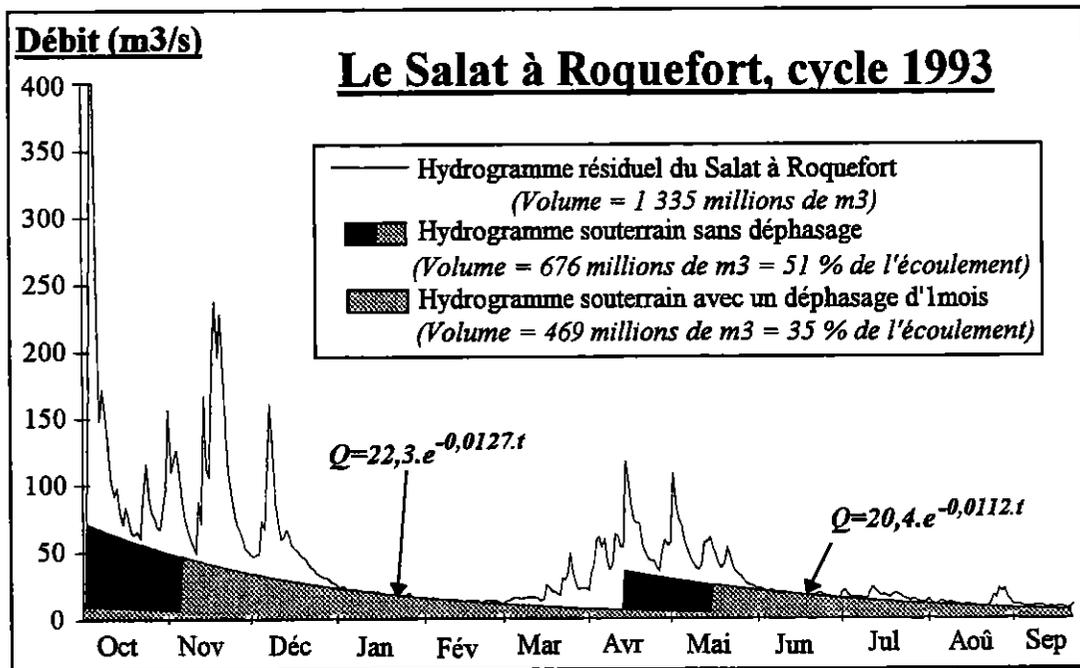
	Etiage hivernal	Etiage final
Coefficient de tarissement (i-1)	0.0127	0.0112
Q_0 (m ³ /s)	22.3	20.4
Equation de vidange	$Q=22,3.e^{-0,0127.t}$	$Q=20,4.e^{-0,0112.t}$
Volume de tarissement (millions de m ³)	151	157

Tableau 3 - 12. Résultats de l'étude du tarissement, cycle 1993

Les paramètres hydrogéologiques, coefficients et volumes de tarissement, sont à peu près identiques pour les deux périodes d'étiage. Le volume des réservoirs souterrains est d'environ 150 millions de m³. Le Baget ne possède qu'un réservoir de 2 millions de m³.

La décomposition de l'hydrogramme du Salat à Roquefort est entreprise sans, puis avec un déphasage de l'écoulement souterrain (cf. graphique 3-77).

Le volume du réservoir souterrain calculé est variable selon le cas. Il est de 676 millions de m³ sans déphasage, et de 469 millions de m³ avec déphasage. Ce qui correspond respectivement à 51 % et 35 % de l'écoulement résiduel (sans la neige et sans les aménagements). Le bassin du Salat ne comprend pas de vastes aquifères poreux à temps de réponse long, mais des aquifères à temps de réponse rapide, aquifères karstiques notamment. La décomposition sans déphasage correspond donc davantage à la réalité. Le volume ainsi calculé constitue un maximum de l'écoulement souterrain.



Graphique 3 - 77. Hydrogramme souterrain du Salat à Roquefort avec et sans déphasage, cycle 1993

Le volume des réserves souterraines permet d'estimer le nombre de recharges⁴ des aquifères dans le cycle, par rapport à l'écoulement souterrain calculé sans déphasage (cf. tableau 3-13).

⁴ Le nombre de recharges correspond au volume souterrain écoulé durant le cycle divisé par le volume des réserves souterraines.

La méthode sans extrapolation sous-estime les réserves souterraines, car le nombre de recharges est très élevé et incompatible avec l'hydrogéologie du bassin. L'extrapolation de l'équation de vidange permet cependant de quantifier plus précisément ces réserves. Les volumes calculés avec cette dernière méthode, donnent un nombre de recharges compris entre 2.4 et 1.4, résultats plus cohérents. Le volume des réserves souterraines doit donc être compris entre 482 et 275 millions de m³.

<u>Méthode de calcul</u>		<u>Volume des réservoirs souterrains (millions de m³)</u>	<u>Part dans l'écoulement souterrain total (%)</u>	<u>Nombre de recharges</u>
Sans extrapolation		150	22	4.5
Avec extrapolation	Tarissement final	275	41	2.4
	Tarissement hivernal	482	71	1.4

Tableau 3 - 13. Volume des réservoirs souterrains du bassin du Salat calculé avec et sans extrapolation de tarissement, cycle 1993

3.3.2.3.4. Conclusions

La décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme du Salat à Roquefort permet d'estimer la part de chaque composante dans l'écoulement naturel dont le volume est de 1435 millions de m³ (cf. tableau 3-14).

	<u>Volume écoulé cycle 1993 (millions de m³)</u>	<u>Contribution (%)</u>
<i>Composante neigeuse</i>	98	7
<i>Composante souterraine (sans déphasage)</i>	676	47
<i>Composante de ruissellement</i>	661	46
<u>Total</u>	<u>1 435</u>	<u>100</u>

Tableau 3 - 14. Contribution des composantes dans l'écoulement naturel du bassin du Salat, cycle 1993

L'écoulement neigeux participe à 7 % de l'écoulement naturel. La composante de ruissellement et la composante souterraine affichent pratiquement les mêmes valeurs : respectivement 47 % et 46 % de l'écoulement. Le volume des réservoirs souterrains représentent de 41 à 71 % de la composante souterraine, selon le tarissement.

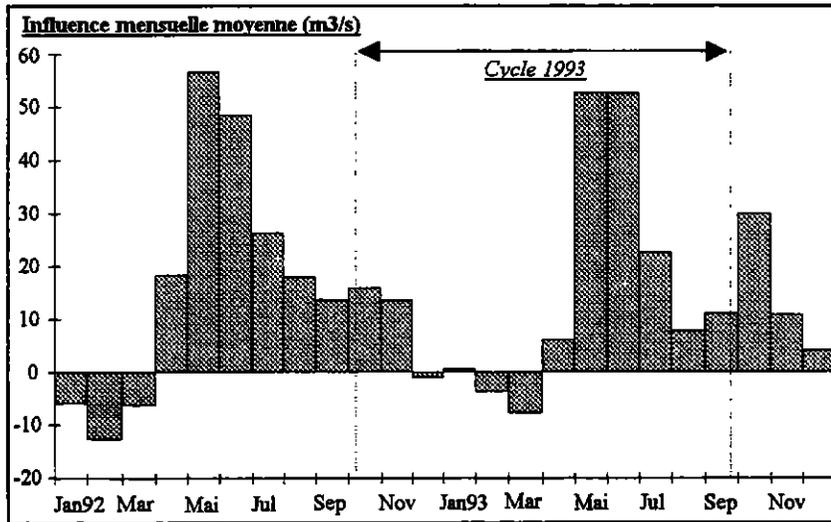
3.3.2.4. Décomposition de l'hydrogramme de la Garonne à Portet, cycle 1993

L'importance des aménagements sur le bassin de la Garonne, en amont de Portet, rend la décomposition plus délicate.

3.3.2.4.1. Influence des aménagements et hydrogramme naturel

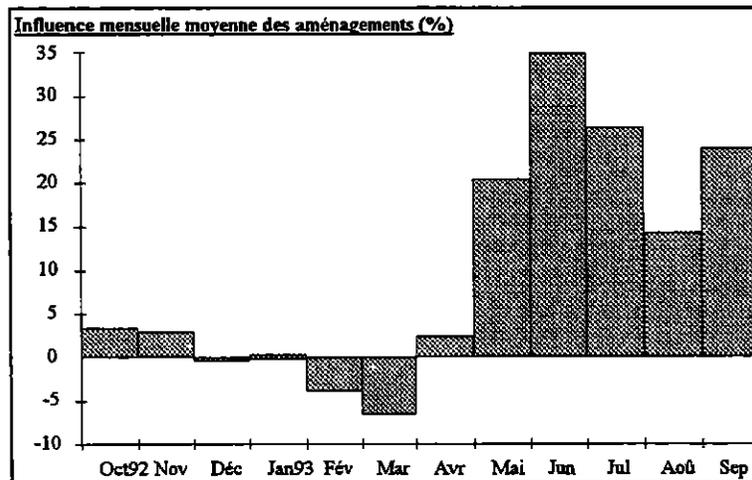
Les débits de la Garonne à Portet sont généralement en deçà de la normale (cf. graphique 3-78). Le déficit moyen mensuel peut atteindre jusqu'à 57 m³/s. Cette particularité est due aux aménagements : barrages et dérivations (canal de la Neste et canal de Saint-Martory).

Au moment des déstockages des réservoirs hydroélectriques, les débits moyens mesurés sont supérieurs aux débits naturels. Ceci se produit de janvier à mars 92, en décembre 92, et de février à mars 93.



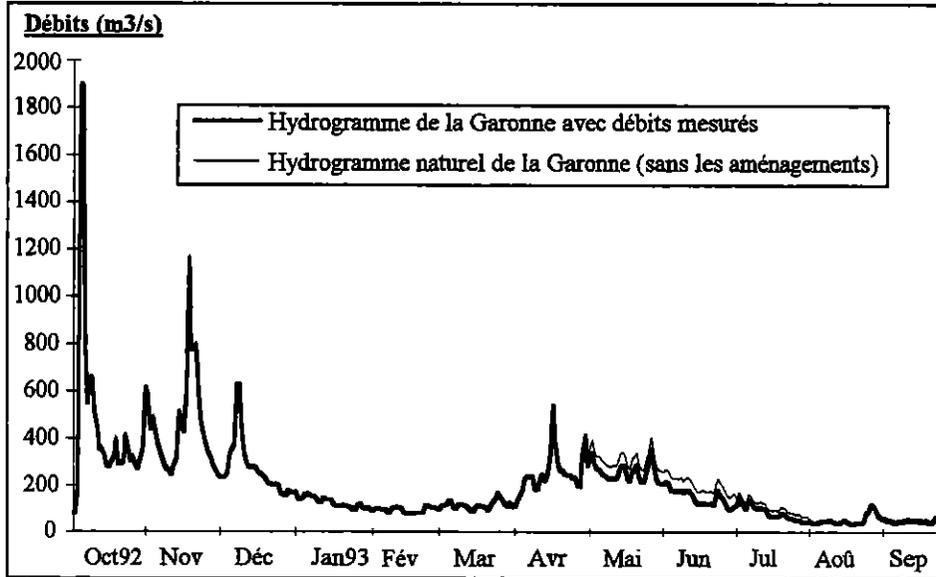
Graphique 3 - 78. Influence mensuelle des aménagements (m³/s) sur la Garonne à Portet, cycle 1993

L'influence mensuelle moyenne est élevée vers la fin du cycle 1993 (cf. graphique 3-79). L'effet des prélèvements effectués pour les canaux se conjugue, au printemps, au stockage des écoulements neigeux, et, entre juillet et septembre, à la diminution des débits liée au tarissement de la Garonne. L'influence moyenne sur le cycle est d'environ 11.7 %.



Graphique 3 - 79. Influence des aménagements sur les débits mesurés à la station de Portet, sur la Garonne, cycle 1993

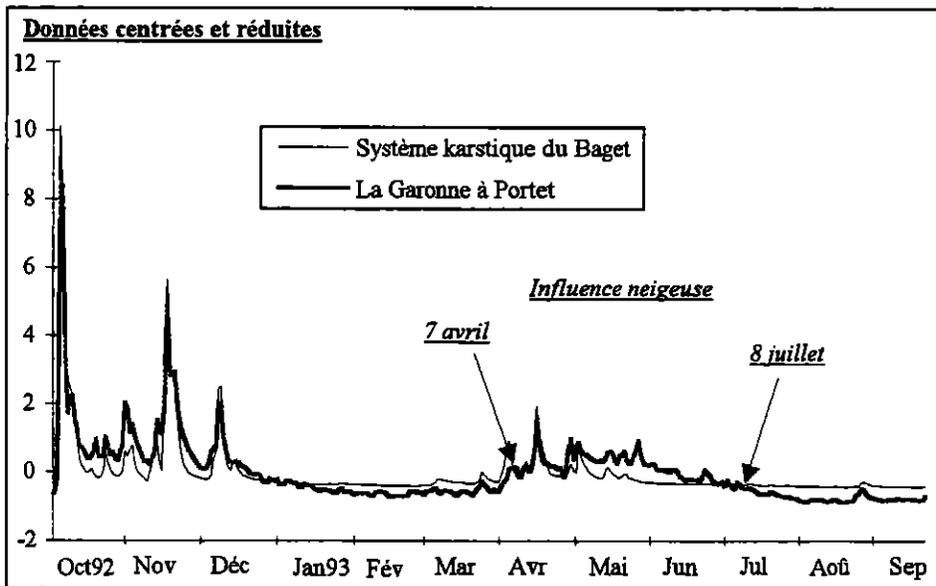
La prise en compte des influences au niveau journalier permet d'obtenir l'hydrogramme naturel de la Garonne (cf. graphique 3-80).



Graphique 3 - 80. Hydrogrammes de la Garonne avec et sans les aménagements, cycle 1993

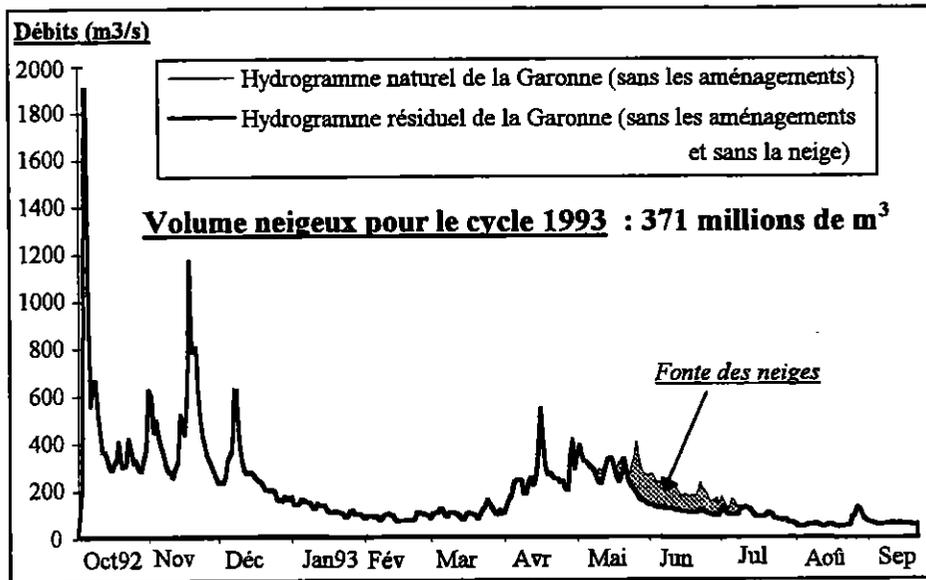
3.3.2.4.2. Influence de l'écoulement neigeux et hydrogramme résiduel

L'hydrogramme naturel de la Garonne à Portet est comparé à l'hydrogramme du Baget dont la composante neigeuse est inexistante. L'influence neigeuse se fait sentir à partir du mois d'avril et se termine en juillet (cf. graphique 3-81). Les dates coïncident avec celles trouvées sur le bassin du Salat.



Graphique 3 - 81. Détermination de la période d'influence neigeuse sur la Garonne à Portet, cycle 1993

Le volume neigeux écoulé, pour le cycle hydrologique 1993, est de 371 millions de m³. Il correspond à 5.6 % de l'écoulement naturel, corrigé des influences anthropiques (cf. graphique 3-82). La contribution neigeuse du Salat, affluent de la Garonne, est de 26 % (98 millions de m³).



Graphique 3 - 82. Hydrogramme résiduel de la Garonne (sans les aménagements et sans la neige), cycle 1993

3.3.2.4.3. Hydrogramme souterrain

Le bassin de la Garonne comprend plusieurs types d'aquifères : des nappes libres, des nappes alluviales et colluviales, des aquifères karstiques et fissurés, et de petits aquifères issus des formations cristallines et du Paléozoïque. Quelques aquifères sont bien connus. C'est le cas des karsts étudiés par le Laboratoire Souterrain du CNRS. Mais les autres aquifères ne sont étudiés, quand ils le sont, que ponctuellement. Ce manque d'informations ne permet pas de déterminer la position des maximums de l'écoulement souterrain.

Comme pour le Salat, l'hydrogramme de la Garonne présente deux tarissements : un pendant l'étiage hivernal, et l'autre pendant l'étiage final (cf. graphique 3-83). Les paramètres de l'équation de vidange sont proches, et les volumes de tarissement calculés sont d'environ 1 milliard de m³ (cf. tableau 3-15). Ces chiffres sont en accord avec ceux trouvés pour d'autres cycles (cf. paragraphe 3.3.1.4).

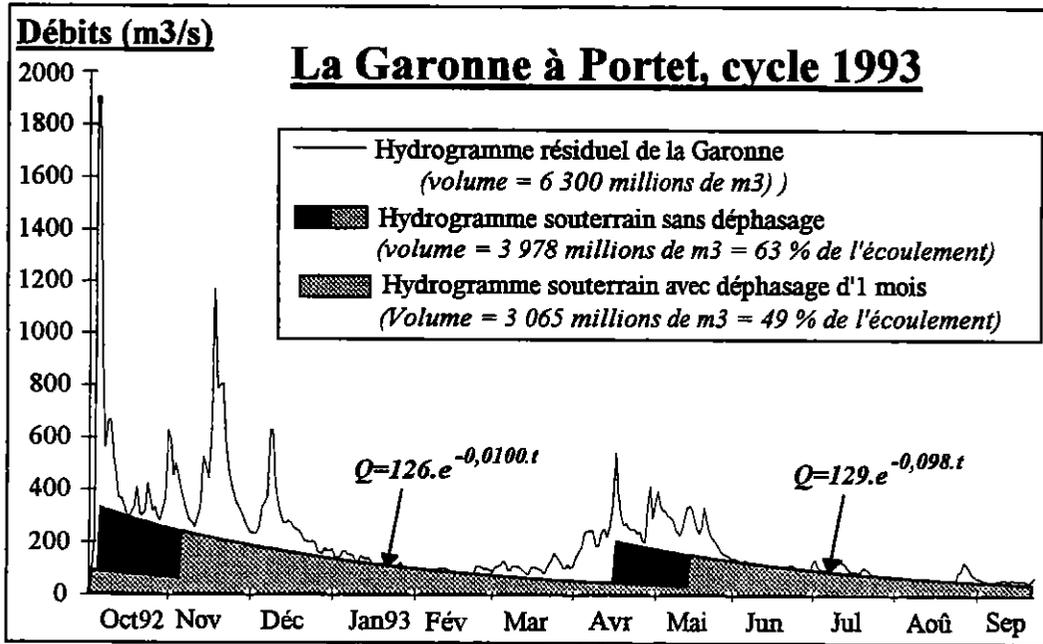
	Etiage hivernal	Etiage final
Coefficient de tarissement (j^{-1})	0.0101	0.0098
Q_0 (m ³ /s)	126	129
Equation de vidange	$Q=126e^{-0,0101.t}$	$Q=129.e^{-0,0098.t}$
Volume de tarissement (millions de m ³)	1 086	1 142

Tableau 3 - 15. Résultats de l'étude du tarissement, cycle 1993

Les volumes souterrains déterminés avec ou sans déphasage sont respectivement de 3978 millions de m³, soit 63 % de l'écoulement résiduel, et 3065 millions de m³, soit 49 % de

l'écoulement résiduel. La véritable valeur de l'écoulement souterrain de la Garonne doit se trouver entre ces deux chiffres puisqu'ils représentent des cas extrêmes. Ces derniers sont un peu supérieurs en pourcentage à ceux du bassin du Salat (51 % et 35 %).

La différence entre les deux hydrogrammes souterrains (sans et avec déphasage) est de 912 millions de m³, soit 14 % de l'écoulement résiduel. Ce volume peut correspondre, dans le cas où la rivière et les nappes alluviales sont connectées, à une réalimentation des nappes par la rivière.



Graphique 3 - 83. Hydrogramme souterrain de la Garonne à Portet avec et sans déphasage, cycle 1993

<u>Méthode de calcul</u>			<u>Volume des réservoirs souterrains (millions de m³)</u>	<u>Part dans l'écoulement souterrain total (%)</u>	<u>Nombre de recharges</u>
Sans extrapolation			1 100	29 sans déph. 37 avec déph.	3.5 sans déph. 2.7 avec déph.
Avec extrapolation	Sans déphasage	Tarissement hivernal	2 859	72	1.4
		Tarissement final	1 846	46	2.2
	Avec déphasage	Tarissement hivernal	2 097	68	1.5
		Tarissement final	1 389	45	2.2

Tableau 3 - 16. Volume des réservoirs souterrains du bassin de la Garonne à Portet avec ou sans déphasage, cycle 1993

Les volumes de tarissement déterminés par la méthode du tarissement (sans extrapolation) correspondent à des valeurs sous-estimées. L'extrapolation de l'équation de vidange permet d'identifier plus précisément les réserves souterraines (cf. tableau 3-16).

Les réserves déterminées à partir de l'extrapolation du tarissement final paraissent faibles, car le nombre de recharges équivaudrait à 2.2, ce qui est élevé. Par contre, les réserves calculées pour le premier étiage (hivernal) équivalent à 1.4 et 1.5 nombre de recharges. Elles sont plus compatibles avec la réalité hydrogéologique. **Les réserves souterraines, en amont de Portet, seraient donc comprises entre 2.1 et 2.8 milliards de m³.**

3.3.2.4.4. Conclusions

La contribution de chaque composante, mise à part la neige, varie suivant le mode de décomposition (cf. tableau 3-17). La décomposition sans déphasage implique une contribution, de 60 % pour l'écoulement souterrain, de 34 % pour le ruissellement et de 6 % pour la neige, à l'écoulement naturel. La décomposition avec déphasage donne plus de poids au ruissellement : 48 %, l'écoulement souterrain étant de 46 %.

Les deux méthodes fournissent des valeurs très différentes, mais qui permettent de mieux quantifier l'écoulement souterrain, qui doit être compris dans la fourchette déterminée.

	Volume écoulé cycle 1993 (millions de m3)	Contribution (%)
<i>Composante neigeuse</i>	371	6
<i>Composante souterraine</i>	3 978 3 065	60 46
<i>Composante de ruissellement</i>	2 322 3 235	34 48
Total :	6 671	100

en gras : décomposition souterraine sans déphasage,
en normal : décomposition souterraine avec déphasage.

Tableau 3 - 17. Contribution des composantes dans l'écoulement naturel du bassin de la Garonne à la station de Portet, cycle 1993

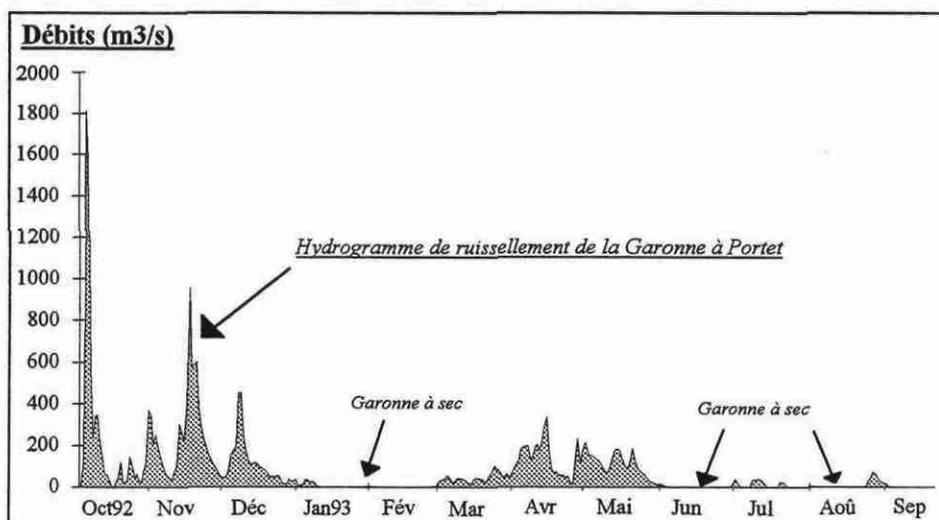
Conclusions

La nouvelle méthode de décomposition proposée dans cette étude apporte, pour la première fois, une estimation de la contribution neigeuse. Cette dernière évolue suivant les cycles hydrologiques. Sur le Salat, elle constitue de 6 % (cycle peu neigeux) à 19 % (cycle neigeux) de l'écoulement naturel. En 1993, la contribution neigeuse est de 7 % sur le Salat, et de 5.6 % sur la Garonne à Portet, soit respectivement 98 millions de m³ et 371 millions de m³.

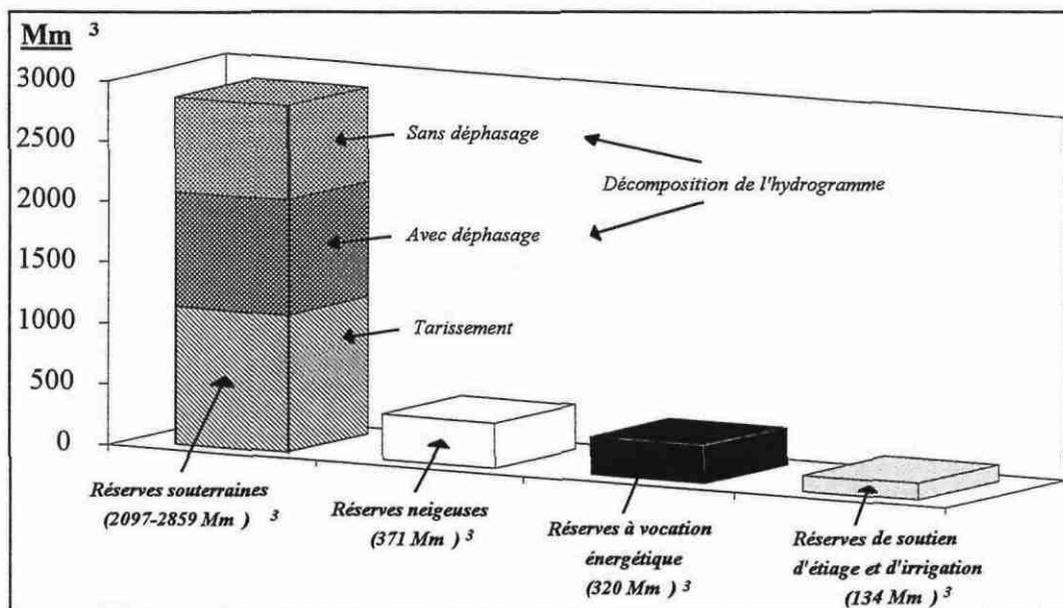
La composante souterraine de l'écoulement naturel, évaluée par extrapolation du tarissement, représente 47 % sur le Salat et de 46 à 60 % sur la Garonne. Le volume naturel écoulé est respectivement sur le Salat et la Garonne de 1435 et de 6671 millions de m³.

Pour mieux saisir l'importance de l'écoulement souterrain à Portet, nous avons reconstitué l'hydrogramme de ruissellement pour 1993 (cf. graphique 3-84). Il apparaît deux grandes périodes sans écoulement : de janvier à février et de juin à septembre. La Garonne réagirait comme un "Oued". Dans ces conditions, il serait possible de traverser la Garonne à Toulouse sans utiliser les ponts. La vie aquatique serait éphémère et les rejets de la cité changeraient le lit de la Garonne en un grand égout.

Ces hypothèses sont bien sûr irréalistes, car la nature a bien fait les choses. Elle a créé des formations capables de stocker et de réguler les eaux : les aquifères souterrains.



Graphique 3 - 84. Esquisse de l'hydrogramme de ruissellement de la Garonne à Portet, cycle 1993



Graphique 3 - 85. Comparaison du réservoir souterrain à Portet avec les autres formes de stockage, cycle 1993

Les réserves souterraines à Portet, calculées à partir du tarissement, sont d'environ 1 milliard de m³ (cf. chapitre 3.3.1). Suivant la méthode de décomposition, le volume des réservoirs souterrains à Portet peut être estimé (si on considère un nombre de recharges inférieur à 2) entre 2.1 et 2.9 milliards de m³. Les réserves sont donc deux à trois fois plus importantes que l'estimation faite par les volumes de tarissement.

Si on compare ces réserves souterraines aux autres réserves, elles apparaissent comme **le réservoir principal du bassin** (cf. graphique 3-85). La deuxième forme de stockage correspond aux réserves neigeuses (371 hm³), puis viennent les autres réserves d'origine anthropique.

CONCLUSIONS DU CHAPITRE 3

Conclusions

Les ACS (analyses corrélatoires et spectrales) mettent en évidence la contribution des eaux souterraines aux débits des eaux de surface. Elles permettent de classer les sous-bassins de la Garonne en cinq groupes principaux suivant l'origine et l'importance de leurs réserves qui peuvent être :

- à dominante neigeuse : la Neste;
- souterraines et neigeuses : l'Ariège et le Salat;
- souterraines et importantes : le Ger;
- souterraines, mais plus faibles : l'Arize et la Lèze;
- négligeables : le Volp et les affluents de la rive gauche avec la Gimone, la Noue, le Touch, la Save, la Louge.

Ces résultats sont confirmés par l'étude du tarissement qui apporte une estimation quantitative des réserves souterraines.

L'Ariège et le Salat possèdent les principales réserves souterraines du bassin qui sont évaluées respectivement à **142 et 111 millions de m³**, pour le cycle 1985 (cycle considéré comme moyen). **La Garonne**, quant à elle, présente aussi d'importantes réserves, son effet mémoire moyen étant de 53 jours. L'analyse du tarissement permet d'estimer ces réserves à 800 millions de m³. L'extrapolation du tarissement permet de mieux apprécier ces réserves, qui doivent en réalité être comprises entre **2.1 et 2.9 milliards de m³**. Celles-ci apparaissent comme le réservoir principal du bassin, bien avant les réserves neigeuses et les réserves d'origine anthropique (barrages).

Au niveau du cycle hydrologique 1993, **la contribution souterraine représente 46 à 60 % de l'écoulement de la Garonne (et 47 % sur le Salat). La contribution neigeuse est de 5.6 %, soit 371 millions de m³ (et 7 % sur le Salat).** Ce sont bien sûr les premières évaluations sur le bassin qu'il faudra vérifier sur d'autres cycles.

L'origine des eaux souterraines est multiple. Elle n'est pas exclusivement karstique et alluviale. D'autres aquifères sont **mis en évidence sur le bassin du Lez en Ariège** (cf. chapitre 3.1.2). Ce sont **les formations colluviales**, que l'on retrouve un peu partout dans les Pyrénées. Il est important, aujourd'hui, de tenir compte de ces formations dans les plans d'aménagements territoriaux. A titre d'exemple, on citera les déforestations et l'implantation de stations de ski qui provoquent la destruction de ces formations.

Le principal réservoir karstique identifié est celui de Fontestorbes, dont les réserves moyennes sont de 24 millions de m³.

Les apports des aquifères karstiques et alluviaux au réseau de surface varient suivant la saison. L'étude de la **nappe alluviale entre Foix et Saverdun**, en Ariège, révèle que la participation de la nappe a lieu **en période de crue**. Pour les aquifères karstiques, les apports dépendent de la nature du karst, de sa dynamique et de son altitude. Ainsi, **l'apport est-il maximal, en hiver et au printemps, pour le Baget; et en hiver et en étiage, pour Fontestorbes**. Au niveau pluriannuel, les ACS mettent en évidence **le caractère régulateur de ces aquifères**. Celui-ci est nettement plus élevé pour les aquifères poreux (cf. nappe alluviale de Saint-Porquier). Pourtant, la nappe alluviale entre Foix et Saverdun ne présente pas de rôle régulateur marqué !

Enfin, les résultats mettent en évidence la particularité d'un bassin : **le Ger**. C'est un petit affluent de la Garonne, en aval de Saint-Gaudens. Pour une superficie de 95 km², ce bassin possède des **réserves importantes : 21.3 millions de m³** en 85, et les plus fortes réserves spécifiques : 224 l/m². Le débit spécifique en étiage est de 10.6 l/s/km². C'est le **bassin le moins sensible aux conditions climatiques**, car l'évolution de la tendance sur les débits est la plus stable (cf. Chapitre 3.2.2). Il contient de nombreuses sources karstiques, mais son hydrogéologie, mal connue, mériterait d'être étudiée plus en détail.

La partie suivante est relative à l'hydrochimie du bassin. Plusieurs campagnes d'échantillonnage, le long de la Garonne et sur ses affluents, ont été effectuées, afin de caractériser chimiquement les eaux souterraines, et connaître leur participation à l'écoulement total. L'évolution pluriannuelle des eaux est aussi étudiée. In fine, une décomposition chimique de l'hydrogramme est effectuée sur quelques bassins, à partir des teneurs en bicarbonates.

4. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES A LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE

Introduction

Cette troisième partie est scindée en quatre chapitres. Le premier, théorique, est consacré à des rappels et des généralités sur la chimie des eaux, et plus particulièrement des eaux carbonatées.

Dans le deuxième chapitre, nous caractériserons et nous étudierons l'évolution chimique des eaux souterraines du bassin sur le cycle 1993. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnages (douze au total) sur une quarantaine de sites répartis le long de la Garonne et sur ses principaux affluents. Le travail porte, dans un premier temps, sur l'évolution du chimisme des eaux sur les affluents, et, dans un deuxième temps, sur l'évolution du chimisme des eaux le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à Saint-Aignan, exutoire du bassin.

L'évolution pluriannuelle des eaux est étudiée dans le troisième chapitre, à partir des stations de prélèvements de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Elle permet de voir notamment si l'évolution du chimisme des eaux au niveau du cycle se répète dans le temps et si la tendance de certains éléments est stable.

Pour finir, une décomposition chimique est effectuée sur les eaux de quelques affluents et sur celles de la Garonne à Portet, afin d'estimer la part de la composante souterraine dans l'écoulement.

4.1. GENERALITES SUR LA CHIMIE DES EAUX

L'eau de pluie est, en général, faiblement minéralisée. Elle contient certains sels d'origine marine (sodium, potassium et chlorures), des sulfates, des nitrates et des carbonates. Ces derniers, sous forme acide (H_2SO_4 , HNO_3 , H_2CO_3), proviennent de l'oxydation puis de l'hydratation des sulfures, de l'azote et du carbone et provoquent, de temps en temps, des pluies acides, parfois dévastatrices. Les rejets des usines sont souvent l'origine principale de ces éléments. En ce qui concerne les sels (sodium, potassium et chlorures), il existe un gradient de concentration sur le continent, lié à la distance par rapport à la mer et à l'altitude.

Dans les eaux de surface, les sels sont présents, mais en faible quantité. La minéralisation des eaux a, en effet, d'autres origines qui sont géologiques, biologiques et anthropiques. Les éléments que l'on trouve en forte teneur dans les eaux de surface sont les bicarbonates. Ils sont issus du CO_2 , de la dissolution des roches carbonatées et, de façon moindre, de la dissolution des minéraux silicatés. D'autres éléments sont présents dans les eaux. Il s'agit :

- du calcium et du magnésium provenant de la dissolution des calcaires et des dolomies;
- du sodium, du potassium, des chlorures et des sulfates ayant comme origine la dissolution de formations évaporitiques et de minéraux silicatés;
- de la silice issue des argiles et des minéraux silicatés.

Nous avons simplement décrit l'origine naturelle de ces éléments. Cependant, depuis l'industrialisation massive, les éléments ont aussi une origine anthropique, qui peut être essentielle dans certains cas (cf. tableau 4-1).

L'hydrochimie est donc essentiellement fonction de la nature de l'encaissant (les roches traversées) et des rejets et pollutions anthropiques. Mais, elle dépend aussi du régime du cours d'eau (l'hydrologie) : du ruissellement et de l'écoulement de fusion nivale pour les bassins montagneux.

Les eaux étant pour la plupart carbonatées, nous nous sommes intéressés, dans ce qui suit, à la chimie et à la dissolution des carbonates.

4.1.1. La chimie des carbonates

Nous l'avons dit, les carbonates sont les éléments principaux des eaux de surface. Ils proviennent de deux grands types de roches carbonatées : les roches fissurées et les roches karstifiées (notamment sur le bassin de la Garonne). Un processus chimique et mécanique aboutit à la dissolution et à la désagrégation de ces roches.

4.1.1.1. Les roches carbonatées

Elles sont nombreuses et variées. Chimiquement, elles sont constituées, soit de calcite ($CaCO_3$), soit de dolomite $CaMg(CO_3)_2$, soit d'un mélange des deux avec, parfois, des éléments non carbonatés. Un diagramme triangulaire permet de définir l'ensemble des roches carbonatées par rapport à leur constitution (cf. figure 4-1).

<u>Origine</u>				
<u>Eléments</u>	<u>Météoritique</u>	<u>Géologique</u>	<u>Biologique</u>	<u>Anthropique</u>
HCO ₃ ⁻	-	Dissolution des calcaires, dolomies et silicates	-	-
Ca ²⁺	-	Dissolution des calcaires, dolomies et minéraux (gypse)	-	neutralisation d'effluents acides par la chaux
Mg ²⁺	-	Dissolution des roches magnésiennes	-	industries de la potasse
Na ⁺	origine marine	Dissolution de formations évaporitiques (Trias) et de minéraux silicatés	-	sels pour la route, engrais
Cl ⁻	origine marine	Dissolution de formations évaporitiques (Trias) et de minéraux silicatés	-	rejets humains (urine) et animaux, industries, sels pour la route
K ⁺	origine marine	Dissolution de formations évaporitiques (Trias) et de minéraux silicatés	-	industries (sel, potasse et verre), engrais, sels pour la route
SO ₄ ²⁻	oxydation et hydratation du soufre présent dans l'atmosphère*	Dissolution des roches évaporitiques (Trias) et minéraux (Pyrite, gypse)	lié à la matière organique végétale et animale	tanneries, papeteries, textiles, engrais
NO ₃ ⁻	oxydation et hydratation de l'azote présent dans l'atmosphère*	-	cycle de l'azote	eaux usées, industries d'engrais azotés, engrais
SiO ₂	-	minéraux silicatés (quartz, feldspaths, argiles)	-	-

* : provenant de pollutions atmosphériques (fuel, automobiles)

Tableau 4 - 1. Origine des éléments dans les eaux de surface

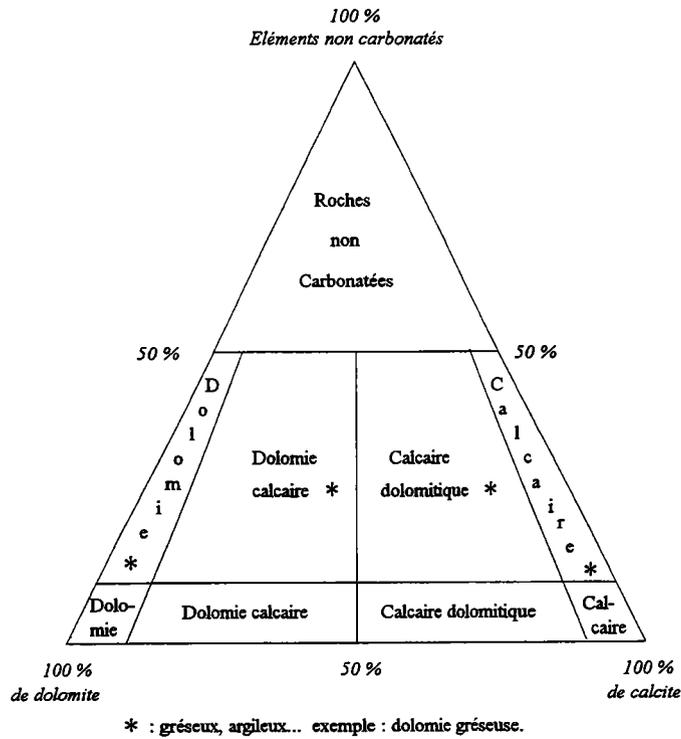


Figure 4 - 1. Diagramme triangulaire définissant la nomenclature des roches carbonatées en fonction de leur composition (d'après M.W. LEIGHTON & C. PENDEXTER, tiré de A. MANGIN, 1975)

La structure des roches carbonatées est aussi une cause de leur diversité. La dimension et l'arrangement des cristaux, l'homogénéité de la matrice, la présence ou non de stratifications délimitant des bancs plus ou moins épais, peuvent varier d'une roche à l'autre.

Les roches carbonatées présentent, contrairement aux argiles, une tendance à la fracturation, à des températures et pressions faibles (cf. figure 4-2). Cette fracturation est à l'origine de fissures, éléments d'amorce pour la karstification.

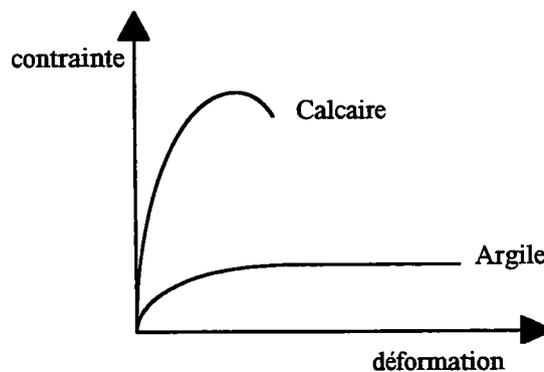
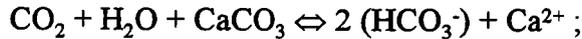


Figure 4 - 2. Déformations du calcaire et de l'argile

4.1.1.2. La dissolution des carbonates

Le moteur de la dissolution est l'eau météorique qui, au contact du sol, se charge en CO_2 , et permet ainsi la dissociation du carbonate :



Cette réaction comporte trois phases : *une phase gazeuse* : le dioxyde de carbone, *une phase liquide* : l'eau, *une phase solide* : le carbonate. Elle est en fait, la simplification de plusieurs réactions et équilibres chimiques (cf. tableau 4-2) :

- entre phase liquide et phase gazeuse;
- dans la phase liquide;
- entre phase liquide et phase solide.

A chaque réaction correspond une constante d'équilibre. Cette dernière peut être calculée de façon empirique, grâce à la température.

Un modèle a été proposé (H. ROQUES, 1964) pour expliquer la cinétique de la mise en équilibre du système calco-carbonique (cf. figure 4-3). Il distingue trois chaînes :

- *une chaîne physique* correspondant à la dissolution du CO_2 et à un équilibre atteint en quelques minutes à quelques heures;
- *une chaîne chimique*, liée aux réactions à l'intérieur de la solution, et qui atteint l'équilibre presque instantanément;
- *une chaîne cristallographique* relative à la dissolution du solide avec un temps de mise à l'équilibre de 1 à 3 semaines pour des calcaires purs, en fonction de la pression partielle en CO_2 , de la taille des cristaux et de la surface de contact solution-roche.

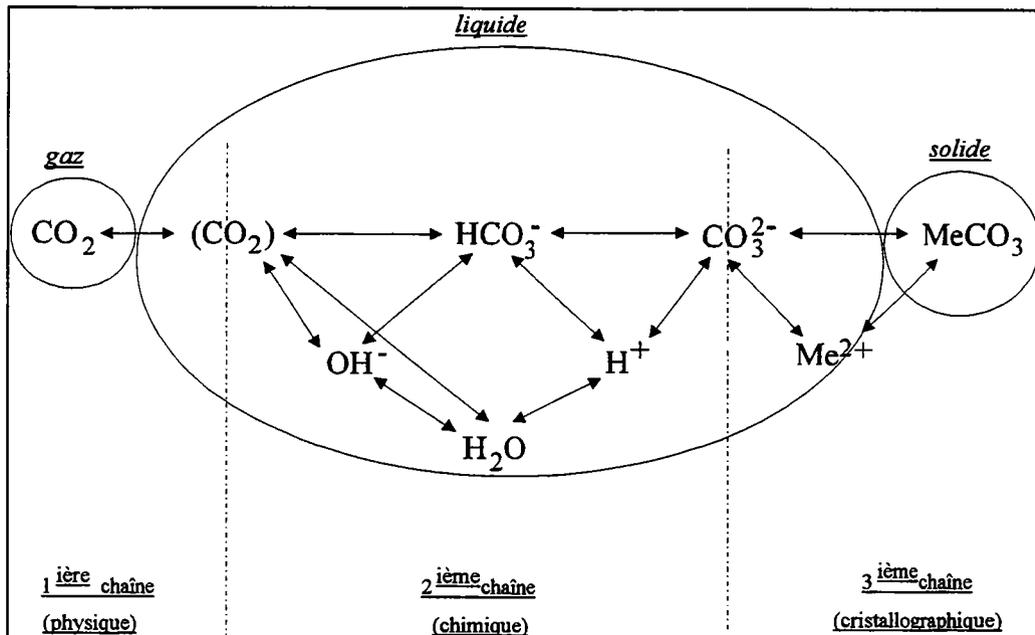


Figure 4 - 3. Modèle de H. ROQUES, 1964

<u>EQUILIBRE</u>	<u>CONSTANTES D'EQUILIBRE</u>
<u>Entre phase liquide et phase gazeuse :</u>	
Dissolution ou évaporation du CO ₂	
(1) $(\text{CO}_2)_{\text{gaz}} \leftrightarrow (\text{CO}_2)_{\text{liq}}$	$K_0 = \frac{(\text{CO}_2)_{\text{liq}}}{p\text{CO}_2}$
<u>Dans la phase liquide :</u>	
Hydratation du CO ₂ :	
$\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow (\text{CO}_2, n\text{H}_2\text{O})$	
Ionisations :	
(2) $(\text{CO}_2, n\text{H}_2\text{O}) + p\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}_3\text{O}^+ + (n-p-2)\text{H}_2\text{O}$	$K_1 = \frac{(\text{HCO}_3^-)(\text{H}_3\text{O}^+)}{(\text{CO}_2)}$
(3) $\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$	$K_2 = \frac{(\text{CO}_3^{2-})(\text{H}_3\text{O}^+)}{(\text{HCO}_3^-)}$
Formation des paires d'ions :	
(4) $\text{HCO}_3^- + \text{Me}^{2+} \leftrightarrow \text{MeHCO}_3^+$	$K_3 = \frac{(\text{MeHCO}_3^+)}{(\text{HCO}_3^-)(\text{Me}^{2+})}$
(5) $\text{CO}_3^{2-} + \text{Me}^{2+} \leftrightarrow \text{MeCO}_3^0$	$K_4 = \frac{(\text{MeCO}_3^0)}{(\text{CO}_3^{2-})(\text{Me}^{2+})}$
Dissociation de l'eau :	
(6) $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$	$K_e = (\text{H}_3\text{O}^+)(\text{OH}^-) = 10^{-14}$
Formation de paires d'ions avec SO ₄ ²⁻	
(7) $\text{Me}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{MeSO}_4^0$	$K_5 = \frac{(\text{MeSO}_4^0)}{(\text{SO}_4^{2-})(\text{Me}^{2+})}$
<u>Entre phase liquide et phase solide :</u>	
dissociation ou précipitation du carbonate :	
(8) $\text{MeCO}_3 \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{Me}^{2+}$	$K_s = \frac{(\text{Me}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{MeCO}_3)}$
<u>Electroneutralité de la solution</u>	
(9)	
$2m\text{CO}_3^{2-} + m\text{HCO}_3^- + 2m\text{SO}_4^{2-} = 2m\text{Me}^{2+} + m\text{H}_3\text{O}^+ + m\text{MeHCO}_3^+$	
avec :	
$m\text{Me}_{\text{tot}} = m\text{Me}^{2+} + m\text{MeHCO}_3^+ + m\text{MeCO}_3^0 + m\text{MeSO}_4^0$	
$m\text{HCO}_3^{\text{tot}} = m\text{HCO}_3^- + m\text{MeHCO}_3^+$	
$m\text{CO}_3^{\text{tot}} = m\text{CO}_3^{2-} + m\text{MeCO}_3^0$	
$m\text{SO}_4^{\text{tot}} = m\text{SO}_4^{2-} + m\text{MeSO}_4^0$	

Tableau 4 - 2. Equilibres calco-carboniques et constantes d'équilibre (M. Bakalowicz, 1992)

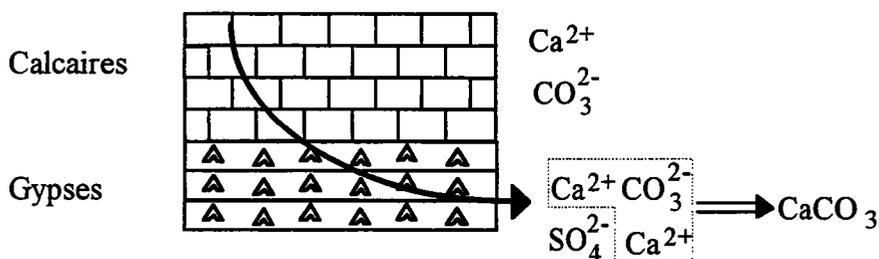
L'état d'équilibre de la solution résulte des relations entre la cinétique chimique des réactions et la vitesse d'écoulement des eaux. Le temps de mise à l'équilibre de l'ensemble du système est gouvernée par celui de la chaîne la plus lente, c'est-à-dire la chaîne cristallographique, qui joue donc le rôle de facteur limitant. Deux autres paramètres interviennent aussi dans la cinétique des réactions et la quantité de roche dissoute :

- **la $p\text{CO}_2$ équilibrante** : elle correspond à la valeur de la $p\text{CO}_2$ d'une phase gazeuse fictive, associée à la solution dont l'équilibre est supposé atteint. Si elle est forte, le temps de mise à l'équilibre du système est nettement plus court, de l'ordre d'une dizaine de jours;
- **la vitesse d'écoulement** : en effet, il existe une couche limite entre le solide (la roche carbonatée) et le solvant (l'eau) qui régule la cinétique des réactions de dissolution du solide. Si l'écoulement est lent, la couche limite est plus importante et la réaction de dissolution est lente. Au contraire, si l'écoulement est rapide, la couche limite est moins importante et la réaction de dissolution est plus rapide.

4.1.1.3. Sursaturation et reprécipitation

Une fois que l'eau s'est chargée en carbonates, elle peut à nouveau évoluer chimiquement. En effet, si l'eau est sous-saturée, elle peut devenir sursaturée et reprécipiter suite à :

- **un dégazage en CO_2 de la solution** : lié à un rééquilibrage des pressions lorsque la $p\text{CO}_2$ des sols est moins forte;
- **une évaporation de la solution** : on a alors précipitation de carbonate de calcium;
- **une augmentation de la température de la solution** provoquant un départ de CO_2 ;
- **une dissolution d'une espèce carbonatée ayant une solubilité différente de celle de la calcite et introduisant des ions Ca^{2+} (gypse, dolomite)** : si une eau carbonatée traverse des formations gypseuses, on a reprécipitation de calcite, car le produit de solubilité du gypse est plus élevé que celui des carbonates.



4.1.2. Paramètres caractéristiques des eaux souterraines

Une fois que l'eau a transité par l'aquifère, elle possède des caractéristiques particulières qui permettent de la différencier de l'eau de ruissellement. **La minéralisation** est le premier paramètre caractérisant les eaux souterraines. En effet, l'eau de pluie après son passage dans l'aquifère acquiert une minéralisation plus élevée qu'à son entrée. Les éléments mis en solution dans l'eau dépendent du type d'aquifère traversé, du temps de séjour et de la $p\text{CO}_2$ équilibrante.

Les eaux issues d'*aquifères carbonatés* (formations sédimentaires) sont riches en *bicarbonates, calcium et magnésium*. Les *nitrate*s caractérisent souvent les apports souterrains provenant *des nappes alluviales*. Les eaux provenant d'*aquifères non carbonatés* (formations métamorphiques, plutoniques, et évaporitiques) contiennent du *sodium, du potassium, des chlorures, des sulfates et de la silice*.

Les eaux souterraines sont aussi caractérisées par des *valeurs élevées en CO₂ dissous et de pCO₂ équilibrante*. Une eau de surface possède des valeurs de pCO₂ proches de la valeur de la pCO₂ atmosphérique, c'est-à-dire 0.03 %. Au contraire, les eaux souterraines ont des valeurs de pCO₂ plus fortes qui peuvent atteindre, même dépasser, 1 %. L'expression de la pCO₂ (cf. tableau des équilibres) est la suivante :

$$\log (pCO_2) = \log (HCO_3^-) - \log (K_0) - \log (K_1) - pHe .$$

L'indice de saturation Is et le dpH (différence entre le pH mesuré sur le terrain et le pH calculé, par le biais des équilibres calco-carboniques des solutions) caractérisent l'état de la solution par rapport à l'équilibre et révèlent, par leurs valeurs élevées, l'existence d'eaux souterraines. Ils permettent, en outre, de mieux connaître le fonctionnement de l'aquifère.

- *l'Is ou indice de BACK & HANSHAW (1970)* :

$$Is = \log (CO_3^{2-}) + \log (Me^{2+}) - \log (Ks) \quad ;$$

avec :

() = activité de l'ion considéré;

Me²⁺ : cation divalent;

Ks : constante thermodynamique.

Pour les aquifères carbonatés, on utilise l'indice de saturation de la calcite :

$$Is_{\text{calcite}} = \log (CO_3^{2-}) + \log (Ca^{2+}) - \log (Ks) .$$

La valeur de l'indice de saturation indique l'état de la solution par rapport à l'équilibre.
Si :

-Is > 0 ⇒ la solution est sursaturée;

-Is = 0 ⇒ la solution est saturée;

-Is < 0 ⇒ la solution est sous-saturée;

- *le dpH, différence de pH, défini par ROQUES (1964)* :

$$dpH = pHr - pHe$$

avec :

- pHr : pH réel, mesuré sur le terrain;

- pHe : pH d'équilibre, calculé par le biais des équilibres calco-carboniques.

Il a été montré (M. BAKALOWICZ, 1979) que le dpH est l'équivalent de l'indice de saturation de la calcite. Lorsque :

- $\text{dpH} > 0.05 \Rightarrow$ la solution est sursaturée;
- $-0.05 > \text{dpH} > 0.05 \Rightarrow$ la solution est à l'équilibre;
- $\text{dpH} < -0.05 \Rightarrow$ la solution est sous-saturée.

Lorsque les eaux souterraines se mélangent aux eaux de surface, il s'établit un équilibre avec la pCO_2 atmosphérique, ce qui engendre un dégazage de la solution et une augmentation du dpH. Le mélange produit une diminution des teneurs en CO_2 des eaux souterraines. Le dégazage est dû à l'écoulement à l'air libre, avec réchauffement et agitation. A ce moment-là, le dpH augmente jusqu'à ce qu'apparaisse une précipitation (si $\text{dpH} > 0.5$), alors le dpH et la pCO_2 diminuent à nouveau. Mais l'eau peut rester longtemps à $\text{dpH} \gg 0$ sans qu'il y ait vraiment précipitation.

Les indices et les éléments caractéristiques des eaux souterraines seront utilisés par la suite pour étudier la contribution de ces eaux au réseau de surface et comprendre l'évolution de l'hydrochimie sur la Garonne et ses principaux affluents.

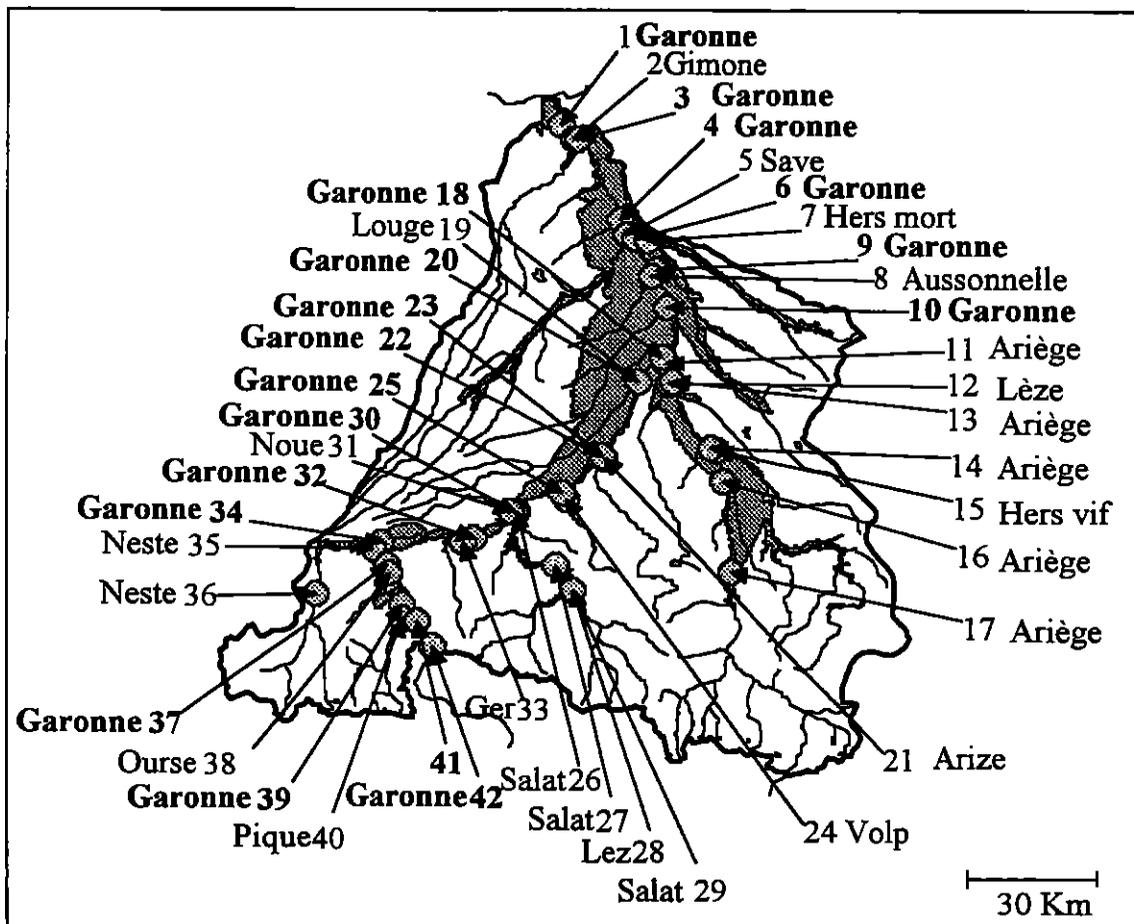
4.2. CARACTERISATION ET EVOLUTION DU CHIMISME
DES EAUX DU BASSIN DE LA GARONNE DURANT LE
CYCLE 1993 (STATION DU CNRS)

Introduction

Des campagnes mensuelles de prélèvements (12 au total) ont été effectuées, durant le cycle 1993, sur une quarantaine de sites. Le choix de ces sites est fondé sur la connaissance des apports alluviaux et de l'hydrochimie des principaux affluents de la Garonne. Certains prélèvements ont été effectués en amont et en aval des principales nappes alluviales situées sur l'axe de la Garonne et sur les bassins de l'Ariège, du Salat et de la Neste. Les autres sites correspondent aux principaux affluents de la Garonne (cf. carte 4-1). Il s'agit, de l'amont vers l'aval du bassin :

- *en rive gauche* : la Pique, l'Ourse, la Noue, la Louge, l'Aussonnelle, la Save et la Gimone;
- *en rive droite* : le Ger, le Volp, l'Arize, l'Hers mort.

Les prélèvements sur ces affluents ont été réalisés au niveau de l'exutoire dans le souci d'intégrer l'ensemble de l'hydrochimie des bassins.



Carte 4 - 1. Numéro des sites de prélèvements et rivière étudiée

Les campagnes de prélèvements se sont déroulées entre le Pont-du-Roi (frontière espagnole) et Saint-Aignan (exutoire du bassin). Mais, pendant la période d'étiage 1993, une autre campagne a été effectuée dans le val d'Aran en Espagne, afin d'étudier l'hydrochimie des sources de la Garonne. **Au total, 10 000 km ont été parcourus pour effectuer l'ensemble de ces campagnes.**

Les variables physico-chimiques étudiées sont : la température, le pH et la conductivité, qui sont mesurés sur le terrain; et les éléments majeurs (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, calcium, magnésium, sodium et potassium), qui, après échantillonnage, sont analysés en laboratoire (cf. annexe 2). **L'ensemble des analyses effectuées pour cette étude représentent trois mois de travail.**

Après un bref exposé sur le cycle hydrologique 1993 et une critique des données, le chapitre est organisé en quatre parties concernant :

- 1) la caractérisation physico-chimique des eaux sur les affluents;
- 2) l'évolution de l'hydrochimie sur les affluents;
- 3) l'évolution de l'hydrochimie sur la Garonne;
- 4) l'évolution du chimisme des eaux sur les bassins de l'Ariège, du Salat et de la Neste.

4.2.1. Le cycle hydrologique 1993 : pluviométrie et hydrologie

Il débute le 2 octobre 1992 et se termine le 22 septembre 1993, soit une durée de 356 jours. Ce cycle est délimité par deux grandes crues. La première, d'octobre 1992, est caractérisée par un débit moyen de 1890 m³/s à Toulouse. La deuxième, fin septembre 1993, possède un débit moyen d'environ 1580 m³/s. Le cycle est aussi marqué par deux périodes de basses eaux assez longues où le tarissement est atteint : une de janvier à mars, et l'autre de juin à septembre. Cette distribution hydrologique est assez courante dans les Pyrénées. Les basses eaux d'hiver sont plus dues à l'absence de précipitations qu'à l'accumulation de neige.

4.2.1.1. La pluviométrie (Station de Blagnac)

Avec 854 mm de précipitations, le cycle 1993 est le plus humide des vingt dernières années. Les faibles précipitations de janvier, février et mars ont été compensées par d'importantes quantités d'eau tombées en début de cycle et au printemps (cf. graphique 4-1). Les 160 mm du mois d'octobre 1992 constituent le maximum mensuel.

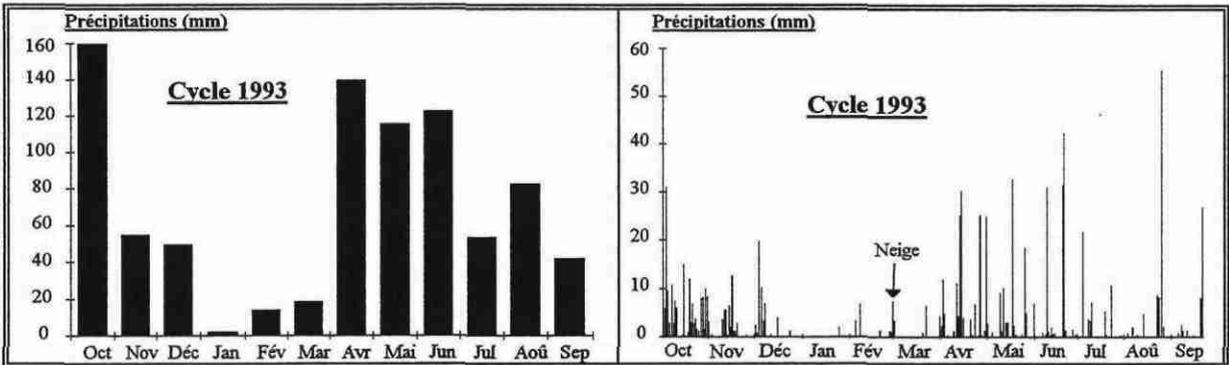
On note quelques précipitations neigeuses fin février et début mars (cf. graphique 4-2). Les fortes précipitations de la fin août, localisées sur la partie aval du bassin, ont engendré de fortes crues. Le 26 août, il est tombé 55 mm de pluie à Blagnac.

4.2.1.2. L'hydrologie

Le cycle 1993 peut être découpé en quatre phases (cf. graphique 4-3) :

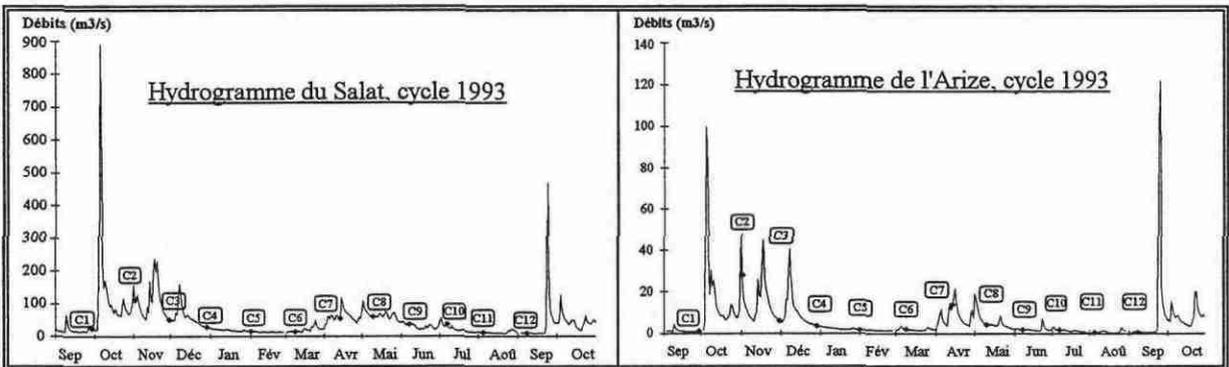
- une période de hautes eaux, en début de cycle, caractérisée par une crue importante début octobre;
- une période de basses eaux comprenant un tarissement hivernal;
- une autre période de hautes eaux, liées aux précipitations de printemps (Arize, Salat) et à la fonte des neiges (Salat);

- une période finale de basses eaux, correspondant à l'étiage terminal.



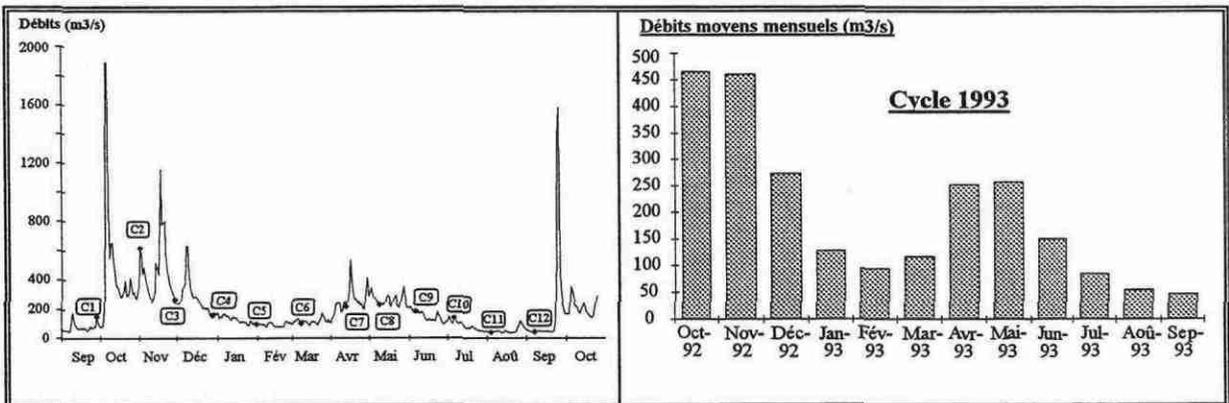
Graphique 4 - 1. Précipitations mensuelles à Blagnac pour le cycle 1993

Graphique 4 - 2. Précipitations journalières à Blagnac pour le cycle 1993



Graphique 4 - 3. Hydrogrammes du Salat à Roquefort et de l'Arize à Rieux-Volvestre, cycle 1993 (les étiquettes numérotées de C1 à C14 correspondent aux campagnes de prélèvements)

A Portet, le débit moyen de la Garonne pour le cycle 1993 est de 204 m³/s. Les débits, maximal et minimal, sont respectivement de 1890 et de 36 m³/s (cf. graphique 4-4). Les débits moyens mensuels les plus élevés, localisés en octobre et novembre 92, sont supérieurs à 450 m³/s. L'étiage final présente les débits moyens les plus faibles (autour de 50 m³/s).



Graphique 4 - 4. Hydrogramme et débits moyens mensuels de la Garonne à Portet, cycle 1993

4.2.2. Critique des données

C'est une étape nécessaire. Car des erreurs de manipulation, de lecture ou de report peuvent s'être glissées dans les analyses, et par là même, fausser l'interprétation des résultats.

4.2.2.1. Les moyens de détection

Ils sont nombreux. Nous citerons les deux principaux :

- 1) *étude des maximums et des minimums* des variables afin d'éliminer les erreurs grossières;
- 2) *calcul de la balance ionique (B.I.)* : c'est un indice de validité des analyses chimiques. Elle est basée sur le principe de l'électroneutralité de la solution.

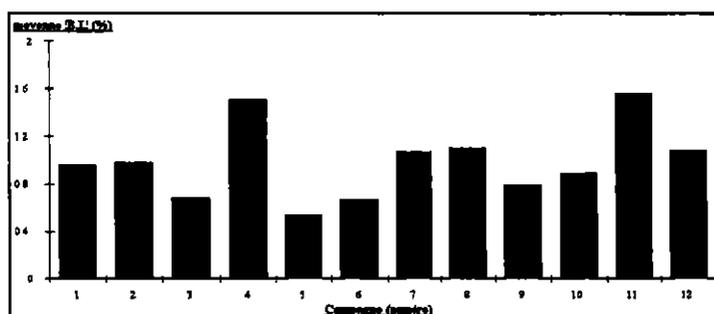
La formule de la B.I., qui s'exprime en %, est la suivante :

$$B.I.(%) = \frac{\sum(\text{cations}) - \sum(\text{anions})}{\sum(\text{cations}) + \sum(\text{anions})} \times 100 ;$$

En principe, une solution doit posséder une balance ionique égale à 0 %. Cependant, ce cas de figure est rare. Généralement, la balance ionique est comprise entre -5 % et +5 %. Cette marge d'erreur est due à l'imprécision des méthodes d'analyse, mais aussi au fait que l'analyse, qui ne retient que les éléments majeurs, soit incomplète. Par contre, une balance ionique élevée, soit $|B.I.| > 10\%$, indique à coup sûr une erreur d'analyse. Les méthodes d'analyse utilisées au Laboratoire Souterrain du CNRS et le chimisme des eaux étudiées sont tels que la B.I. devrait être de l'ordre de 1 %.

4.2.2.2. Les campagnes 1992-1993

Quelques erreurs ont été détectées, suite au calcul de la balance ionique. L'ensemble des 495 échantillons, correspondant à 12 campagnes, possède une balance ionique moyenne de 0.29 % (en valeur absolue la moyenne est de 0.99 %) (cf. tableau 4-3). Les analyses chimiques sont donc bonnes. Deux campagnes présentent cependant une moyenne négative : la huitième (mai 93) et la douzième (septembre 93). Elles apparaissent donc excédentaires en anions ou déficitaires en cations.



Graphique 4 - 5. Evolution de la moyenne de la B.I. / des campagnes

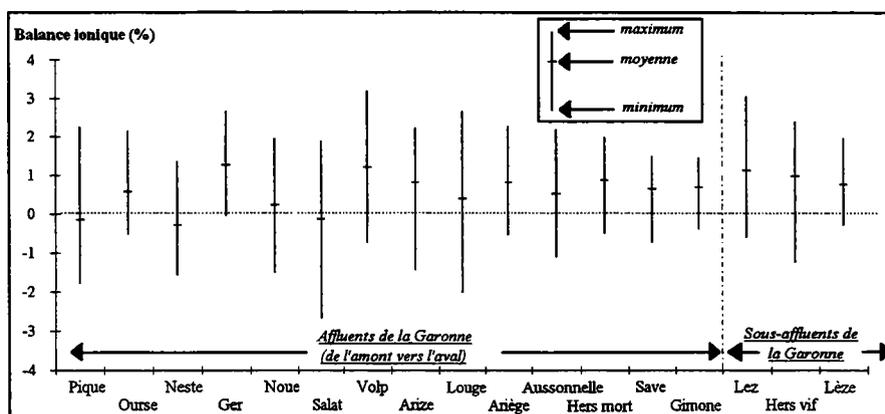
Les minimums et maximums de la balance ionique n'excèdent pas 5 % en valeur absolue. Excepté pour la campagne 11 qui possède un échantillon dont la balance ionique est égale à -5.5 %. En plus, elle possède la balance ionique moyenne la plus forte en valeur absolue : 1.56 %. Ces résultats sont sans doute liés à de mauvaises analyses.

L'évolution de la |B.I.| moyenne des campagnes, durant le cycle 1993, est complexe (cf. graphique 4-5).

<u>Campagne</u>		<u>Nb. échantillons</u>	<u>B.I. moyenne</u>	<u> B.I. moyenne</u>	<u>Variance de la B.I.</u>	<u>B.I. min.</u>	<u>B.I. max.</u>
<u>n°</u>	<u>Date</u>						
1	28-29/09/92	40	0.61	0.96	1.13	-1.47	2.95
2	1-2/11/92	41	0.59	0.98	1.00	-1.99	2.36
3	29-30/11/92	42	0.39	0.68	0.52	-1.56	2.09
4	28-29/12/92	42	1.46	1.51	0.56	-0.72	2.65
5	31-1/02/93	42	0.14	0.54	0.49	-1.35	2.01
6	8-9/03/93	41	0.06	0.67	0.82	-2.48	1.43
7	13-14/04/93	42	0.83	1.07	0.91	-1.49	3.18
8	9-10/05/93	41	-0.29	1.10	1.93	-3.19	3.19
9	6-7/06/93	41	0.14	0.79	0.95	-1.98	2.17
10	6-7/07/93	41	0.23	0.89	1.11	-1.83	2.01
11	4-5/08/93	41	0.00	1.56	3.93	-5.52	3.05
12	7-8/09/93	41	-0.66	1.08	1.49	-2.97	1.20
		total :	moyenne :	moyenne :			
		495	0.29	0.99			

Tableau 4 - 3. Statistiques sur la balance ionique, campagnes 1992-93

Il n'existe pas de relation entre l'évolution de la balance ionique et les affluents (cf. graphique 4-6). N'étant pas non plus en rapport avec l'évolution d'un paramètre climatique, hydrologique ou chimique, on peut en déduire que les erreurs fournies par la balance ionique sont aléatoires.



Graphique 4 - 6. Balances ioniques des échantillons des affluents et sous-affluents de la Garonne, cycle 1993

4.2.3. Caractérisation physico-chimique des eaux des différents affluents

Les affluents et sous-affluents sélectionnés pour l'étude sont :

- *en rive gauche de la Garonne* : la Pique, l'Ourse, la Neste, la Noue, la Louge, l'Aussonnelle, la Save et la Gimone;
- *en rive droite de la Garonne* : le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize, l'Ariège; l'Hers mort; la Lèze et l'Hers vif (affluents de l'Ariège); et le Lez (affluent du Salat).

4.2.3.1. Concentrations des éléments et valeurs physico-chimiques

4.2.3.1.1. Les bicarbonates

(cf. graphique 4-7)

Les affluents en aval de Toulouse possèdent les teneurs les plus fortes en bicarbonates, malgré une importance minimale des aquifères carbonatés. Ceci s'explique par des $p\text{CO}_2$ élevées qui favorisent la production de bicarbonates par dissolution de carbonates. Les moyennes, sur le cycle étudié, sont de 283 mg/l pour l'Hers mort, 280 mg/l pour la Gimone et 257 mg/l pour la Save. La teneur maximale est détenue par l'Hers mort avec 360 mg/l (valeur de début du cycle).

Les affluents d'origine montagnaise présentent des teneurs moyennes peu élevées : 78 mg/l pour la Pique, 94 mg/l pour la Neste, 109 mg/l pour le Salat, 122 mg/l pour l'Ariège et 100 mg/l pour le Lez (affluent du Salat).

Les affluents les plus carbonatés de la rive droite en amont de Toulouse sont : le Ger, le Volp, l'Arize, l'Hers vif et la Lèze (sous-affluents de la Garonne).

L'amplitude de variation des concentrations, durant le cycle, est plus importante pour les affluents en aval de Toulouse : Hers mort, Aussonnelle et Gimone. Cette variabilité est due au ruissellement et à la faiblesse des réserves souterraines.

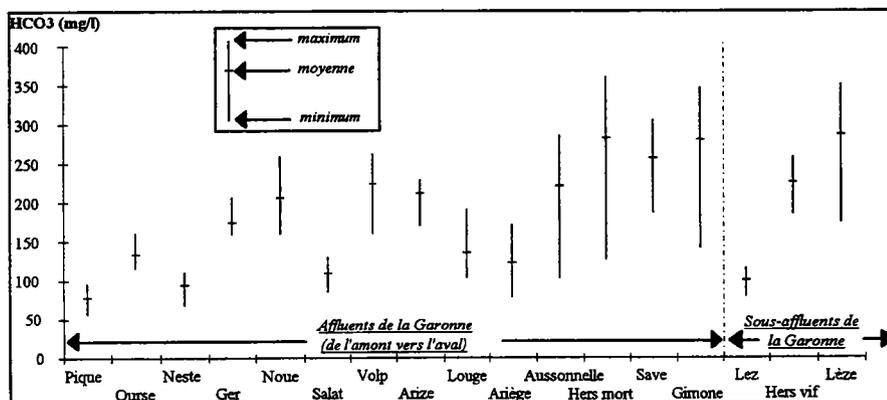
4.2.3.1.2. Le calcium

(cf. graphique 4-8)

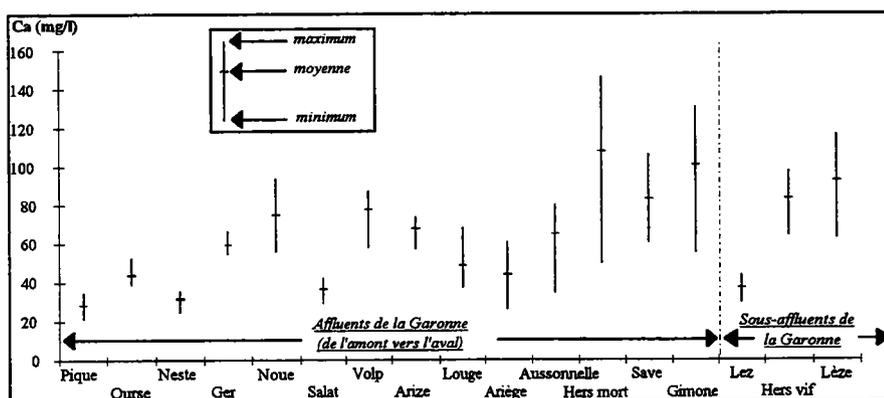
Les teneurs en calcium sont très bien corrélées avec celles en bicarbonates (le coefficient de corrélation est proche de 1). Elles sont en moyenne trois fois moins importantes que les teneurs en bicarbonates. L'affluent le plus concentré, en moyenne, est l'Hers mort (108 mg/l), et le moins concentré est la Pique (28 mg/l).

4.2.3.1.3. Le magnésium

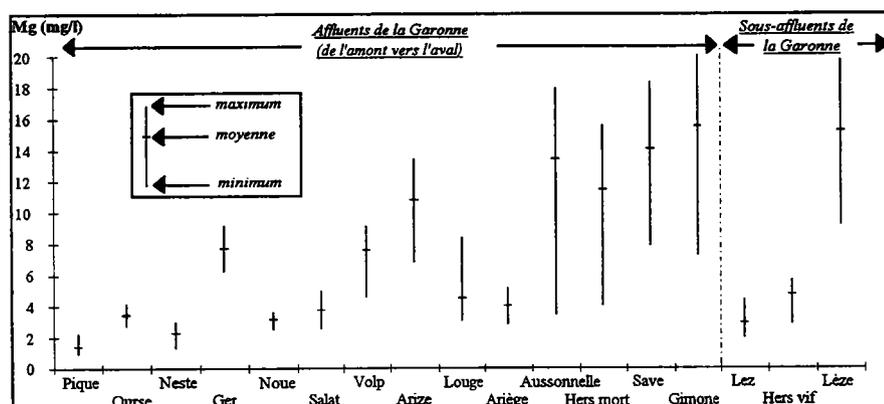
(cf. graphique 4-9)



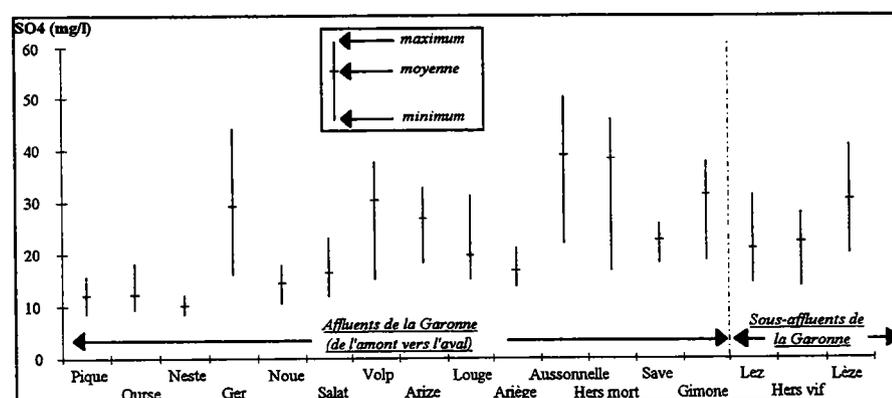
Graphique 4 - 7.
Teneurs en bicarbonates pour les différents affluents et sous-affluents de la Garonne



Graphique 4 - 8.
Teneurs en calcium pour les différents affluents et sous-affluents de la Garonne



Graphique 4 - 9.
Teneurs en magnésium pour les différents affluents et sous-affluents de la Garonne



Graphique 4 - 10.
Teneurs en sulfates pour les différents affluents et sous-affluents de la Garonne

La corrélation avec les bicarbonates, moins bonne, est égale à 0.8. Ce sont encore les affluents de la rive droite qui possèdent les teneurs les plus élevées. C'est la Pique qui détient la moyenne la plus basse : 1.4 mg/l, et la Gimone la plus haute : 15.5 mg/l.

4.2.3.1.4. Les sulfates

(cf. graphique 4-10)

Les concentrations des différents affluents ne dépassent pas 50 mg/l. L'Aussonnelle et l'Hers mort sont les rivières les plus chargées. Les concentrations moyennes sont respectivement de 39 mg/l et de 38 mg/l. En amont de Toulouse, quelques affluents se distinguent. C'est le cas du Ger, du Volp et de l'Arize où les teneurs élevées proviennent de la dissolution de roches évaporitiques.

4.2.3.1.5. Le sodium

(cf. graphique 4-11)

Les affluents en amont de Toulouse ont des teneurs naturelles en sodium. La Pique, l'Ourse et la Neste ont des teneurs faibles. Les autres affluents ont des concentrations plus élevées qui sont liées à la présence de roches évaporitiques, mais une pollution par les eaux usées n'est pas à exclure. Sur le Salat, la forte concentration en sodium est due aux rejets salés des thermes de Salies-du-Salat.

En aval de Toulouse, les teneurs, très fortes, sont d'origine anthropique (rejets domestiques et industriels, engrais). Elles sont, en moyenne, 30 fois supérieures aux teneurs naturelles rencontrées dans les Pyrénées. L'Aussonnelle détient le record de concentration. Elle possède, en moyenne, 51 mg/l de sodium. Sa concentration maximale est de 65 mg/l (le 31/01/93).

4.2.3.1.6. Le potassium

(cf. graphique 4-12)

Les teneurs naturelles des eaux de surface sont inférieures à celles des eaux météoriques, car le potassium contenu dans ces dernières est absorbé par les plantes lors de l'infiltration. Les variations dans les eaux de surface sont liées au cycle végétatif : en automne, on note une augmentation de la concentration suite au lessivage de la litière restituant le potassium.

Les concentrations en potassium sont bien corrélées à celles du sodium, mais elles sont plus faibles.

Lorsque la concentration est inférieure à 1 mg/l, le potassium est d'origine naturelle. C'est le cas pour la Pique, l'Ourse, la Neste, le Ger, le Salat et le Lez. Lorsqu'elle est supérieure, il existe, assurément, une pollution par les engrais. C'est le cas pour les autres affluents. L'Aussonnelle présente encore une fois les teneurs les plus fortes, la moyenne étant de 4.7 mg/l.

4.2.3.1.7. Les chlorures

(cf. graphique 4-13)

Suivant les teneurs moyennes et la variabilité des teneurs, on peut distinguer trois groupes d'affluents :

- 1) un groupe avec des teneurs (inférieure à 5 mg/l) et une variabilité faibles : Pique, Ourse, Neste, Ger, Ariège et Lez. Les chlorures ont une origine météorique;
- 2) un groupe avec des teneurs et une variabilité un peu plus forte : Noue, Salat, Volp, Arize, Louge, Hers vif. Les chlorures proviennent, soit de la dissolution de formations évaporitiques (Volp, Arize, Hers vif), soit des rejets de stations thermales (Salat), soit de l'utilisation d'engrais (Noue, Louge);
- 3) un groupe avec des teneurs élevées et une variabilité plus importante : Aussonnelle, Hers mort, Save, Gimone, Lèze. L'origine des chlorures est anthropique (industries, engrais et rejets des stations d'épuration). L'Aussonnelle se fait encore remarquer : elle possède une moyenne de 58 mg/l et un maximum de 80 mg/l (le 4 août 1993).

4.2.3.1.8. Les nitrates

(cf. graphique 4-14)

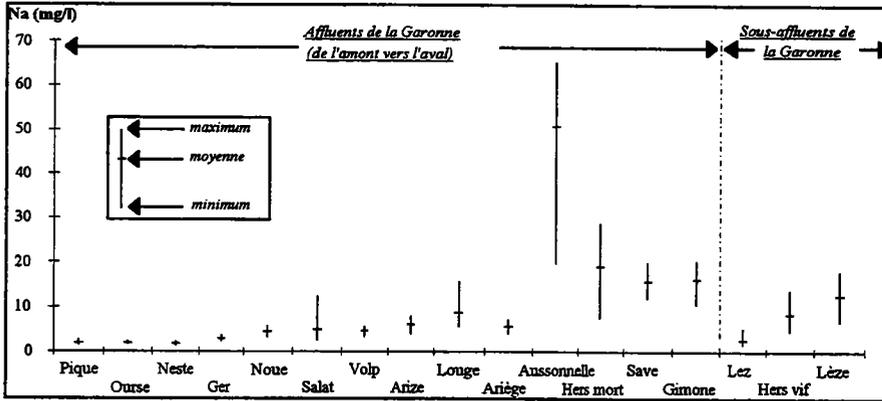
Lorsque leur teneur est inférieure à 5 mg/l, ils ont essentiellement une origine naturelle (liée au cycle de l'azote) sur certaines rivières : la Pique, l'Ourse, la Neste, le Ger, le Salat, le Volp et le Lez. Ils ont une origine naturelle et anthropique sur la Noue, l'Arize, la Louge, l'Ariège, l'Hers vif et la Lèze. Les nitrates sur les affluents en aval de Toulouse sont issus essentiellement de sources artificielles. Ils proviennent du lessivage des engrais utilisés pour l'agriculture, et des pollutions domestiques. La norme de 50 mg/l (au delà de laquelle la consommation des eaux de surface est fortement déconseillée pour les femmes enceintes et les nourrissons âgés de moins de six mois) est dépassée ponctuellement sur l'Aussonnelle, l'Hers mort et la Gimone. La teneur la plus élevée est de 54 mg/l (le 28 décembre 1992 sur l'Hers mort).

4.2.3.1.9. La conductivité

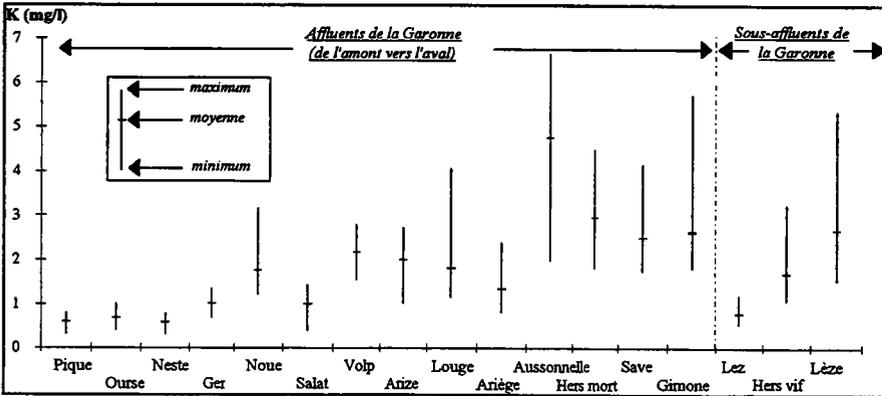
(cf. graphique 4-15)

Elle est fonction de la minéralisation des eaux. Plus elle est forte, plus les eaux sont minéralisées.

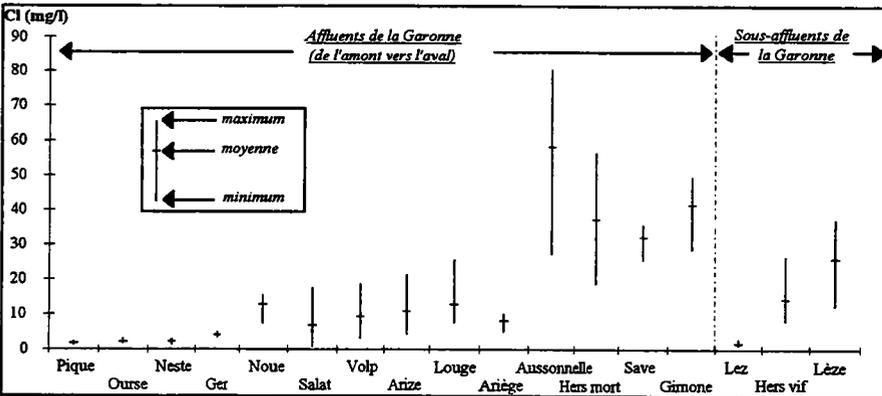
Les conductivités moyennes les plus basses se rencontrent sur les affluents d'origine montagnaise : la Pique, l'Ourse, la Neste, le Salat, le Lez et l'Ariège. Ceci s'explique par la faible minéralisation des eaux de ces affluents qui proviennent de terrains primaires, conjuguée à l'influence de l'écoulement neigeux qui crée des dilutions. Les autres affluents, en amont de Toulouse, possèdent des conductivités plus élevées, comprises entre 250 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



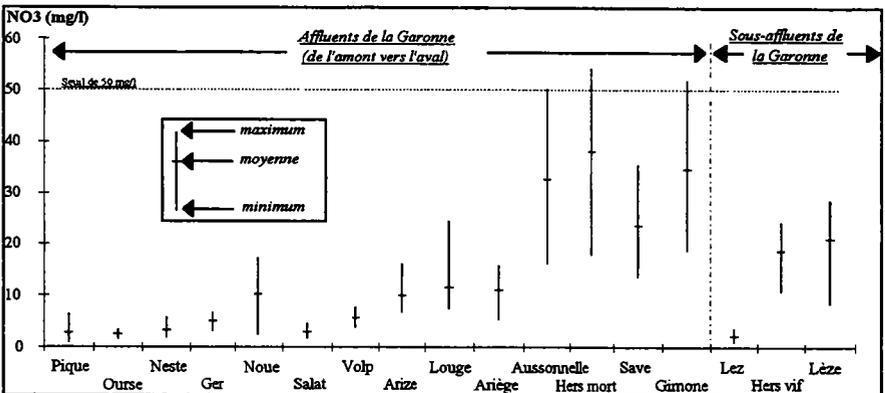
Graphique 4 - 11.
Teneurs en sodium
pour les différents
affluents et sous
affluents de la
Garonne



Graphique 4 - 12.
Teneurs en
potassium pour les
différents affluents et
sous affluents de la
Garonne



Graphique 4 - 13.
Teneurs en chlorures
pour les différents
affluents et sous
affluents de la
Garonne



Graphique 4 - 14.
Teneurs en nitrates
pour les différents
affluents et sous
affluents de la
Garonne

Les affluents, en aval de Toulouse, ont les conductivités moyennes les plus importantes : 632 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'Aussonnelle, 645 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'Hers mort, 548 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la Save, et 639 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la Gimone. Ceci s'explique par une minéralisation bicarbonatée calcique importante et la présence d'éléments d'origine anthropique.

La conductivité moyenne la plus basse est de 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pique), la plus élevée est de 645 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Hers mort). Le minimum mesuré est de 124 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pique), et le maximum mesuré est de 813 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aussonnelle).

4.2.3.1.10. La température

(cf. graphique 4-16)

La température de l'eau des affluents est fonction de :

- la saison;
- la vitesse d'écoulement;
- la température des précipitations.

L'augmentation de la température moyenne sur les affluents entre la Pique et la Noue est liée à une diminution de la vitesse des écoulements. En effet, plus l'écoulement est lent, plus les eaux sont réchauffées. En aval, les affluents ont une température moyenne, à peu près constante, de 13°C, car les vitesses d'écoulement permettent une homogénéisation des températures.

Les températures mesurées les plus faibles sont légèrement inférieures à 5°C. Les plus élevées dépassent 20°C.

4.2.3.1.11. Le dpH

(cf. graphique 4-17)

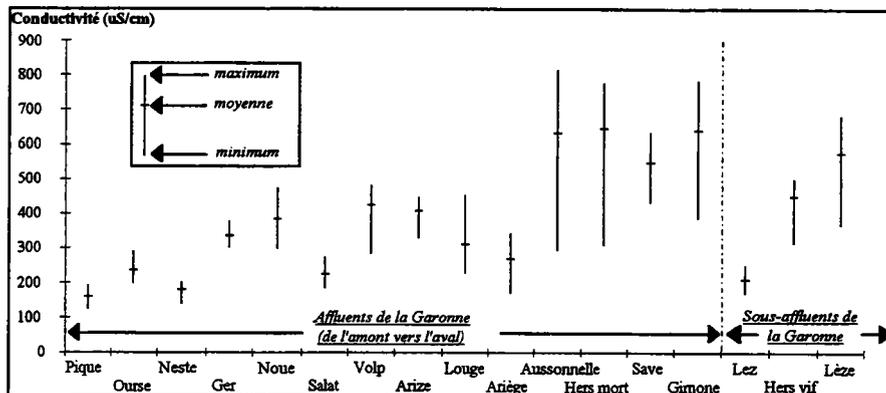
Certains affluents ont des eaux presque toujours sous-saturées. C'est le cas de la Pique, de la Neste, du Salat et du Lez. Ceci s'explique par un transfert rapide des eaux qui ne permet pas une mise en solution complète des éléments, et par des formations carbonatées peu nombreuses sur ces bassins.

Quelques affluents ont par contre des eaux sursaturées. C'est ainsi pour le Ger, la Noue, le Volp, l'Arize, l'Hers mort, la Save, la Gimone, l'Hers vif et la Lèze. Dans la majorité des cas, la sursaturation provient d'un dégazage de la solution.

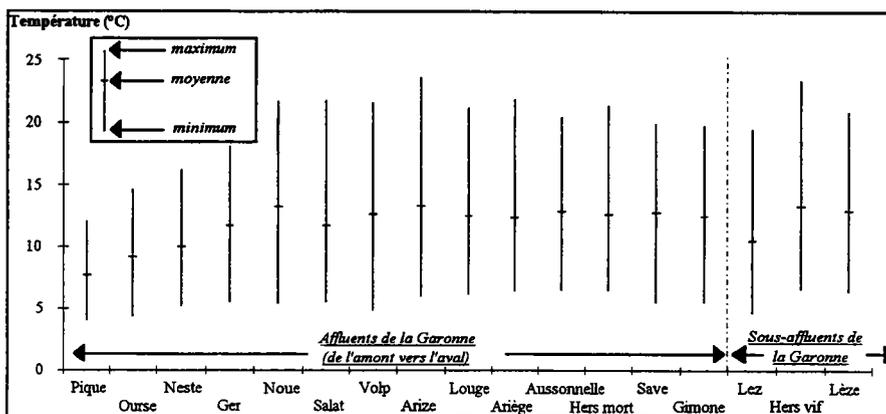
Les autres affluents (l'Ourse, la Louge, l'Ariège et l'Aussonnelle) ont des eaux qui oscillent entre la sous-saturation et la sursaturation.

4.2.3.1.12. La pCO₂

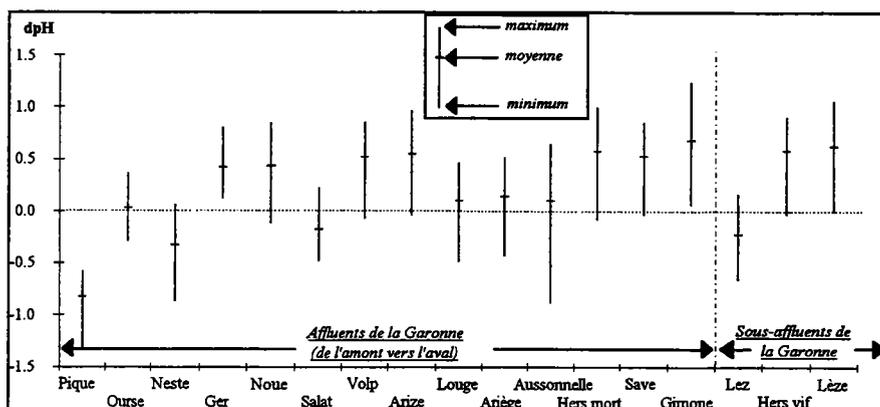
(cf. graphique 4-18)



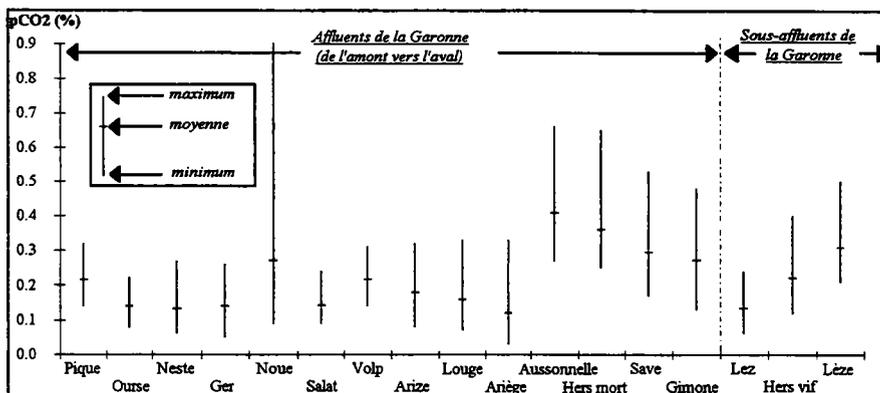
Graphique 4 - 15.
Valeurs de la conductivité pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne



Graphique 4 - 16.
Valeurs de la température pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne



Graphique 4 - 17.
Valeurs du dpH pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne



Graphique 4 - 18.
Valeurs de la pCO₂ pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne

Toujours nettement supérieure à 0.03 % (valeur de la pCO_2 d'une eau de surface en équilibre avec le CO_2 atmosphérique), elle révèle une participation continue des eaux souterraines aux écoulements durant le cycle.

L'Hers vif, la Lèze et les affluents en aval de Toulouse possèdent les valeurs de pCO_2 les plus fortes. Ces dernières peuvent atteindre 0.66 % (Aussonnelle). Ceci s'explique par l'accumulation du CO_2 dans la zone non saturée quand les gradients altitudinaux sont faibles.

Les autres affluents ont des pCO_2 comprises entre 0.05 et 0.3 %. La Noue présente, ponctuellement, une pCO_2 très élevée, égale à 0.9 % (novembre 92) qui correspond à une participation souterraine importante.

Conclusions

Les valeurs de la pCO_2 permettent d'affirmer que la participation des eaux souterraines dans les écoulements est permanente.

La majorité des affluents n'ont pas une hydrochimie naturelle. C'est surtout le cas pour les affluents en aval du bassin qui sont les plus minéralisés. En effet, ils présentent souvent les caractéristiques physico-chimiques les plus élevées (cf. tableau 4-4). Leurs eaux sont bicarbonatées calciques et possèdent de fortes teneurs en éléments d'origine anthropique (potassium, sodium, chlorures, nitrates et sulfates). Elles sont donc de qualité très médiocres.

<u>Variables</u>	<u>Premier affluent</u>	<u>Deuxième affluent</u>	<u>Troisième affluent</u>
<i>Conductivité</i>	Hers mort	Gimone	Aussonnelle
<i>Bicarbonates</i>	Lèze	Hers mort	Gimone
<i>Calcium</i>	Hers mort	Gimone	Lèze
<i>Magnésium</i>	Gimone	Lèze	Save
<i>Sulfates</i>	Aussonnelle	Hers mort	Gimone
<i>Nitrates</i>	Hers mort	Gimone	Aussonnelle
<i>chlorures</i>	Aussonnelle	Gimone	Hers mort
<i>sodium</i>	Aussonnelle	Hers mort	Gimone
<i>potassium</i>	Aussonnelle	Hers mort	Lèze
<i>dpH</i>	Gimone	Lèze	Hers vif
<i>pCO_2</i>	Aussonnelle	Hers mort	Lèze
<i>Température</i>	Arize	Hers vif	Noue

Tableau 4 - 4. Classement des affluents par concentrations ou valeurs physico-chimiques décroissantes (ne sont notés ici que les trois premiers affluents)

Parmi les affluents les plus pollués, l'Aussonnelle détient la première place. Elle présente des teneurs extrêmes : 6 mg/l en potassium, 65 mg/l en sodium, 50 mg/l en nitrates et sulfates, 80 mg/l en chlorures. Cette pollution est due aux rejets domestiques et industriels insuffisamment traités.

L'hydrochimie générale des affluents étant connue, nous allons maintenant examiner les corrélations entre les variables physico-chimiques sur chacun des affluents grâce à l'ACP (cf. annexe 4). Cette étude nous permettra de connaître la structure des données et de mieux définir le contexte hydrogéologique des bassins des affluents.

4.2.3.2. Corrélations entre les variables physico-chimiques de chaque affluent

L'ACP de chaque affluent traite les 12 échantillons du cycle 1993 et les 12 variables physico-chimiques suivantes : la température (t), la conductivité (C), les bicarbonates (HCO₃), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le sodium (Na), le potassium (K), les chlorures (Cl), les nitrates (NO₃), les sulfates (SO₄), le dpH et la pCO₂.

4.2.3.2.1. Les pourcentages de variance exprimée

Ils permettent de juger la structure des données. Ils sont en moyenne de 77 % pour le plan I-II, 55.5 % pour le facteur I et 21.5 % pour le facteur II (cf. tableau 4-5). Ces chiffres révèlent une bonne structure des données sur l'ensemble des affluents.

L'Hers mort, l'Aussonnelle et la Gimone possèdent, pour le plan I-II, des pourcentages de variance exprimée élevés. Ces derniers sont respectivement de 86.5 %, 85.4 % et 85.3 %, avec, pour le premier facteur, 66.6 %, 70.7 % et 69.7 %. La structure des données sur ces bassins est donc très forte. Elle révèle une hydrochimie peu complexe qui évolue de façon très voisine pour l'ensemble des variables.

<u>Cours d'eau</u>		<u>Facteur I</u>	<u>Facteur II</u>	<u>Plan I-II</u>
<u>Affluents de la Garonne</u>	<u>La Pique</u>	61.7	18.4	80.1
	<u>L'Ourse</u>	63.4	13.6	77.0
	<u>La Neste</u>	53.3	20.9	74.2
	<u>Le Ger</u>	50.2	20.6	70.8
	<u>La Noue</u>	45.6	18.5	64.1
	<u>Le Salat</u>	45.5	28.2	73.7
	<u>Le Volp</u>	56.1	21.6	77.7
	<u>L'Arize</u>	44.7	27.7	72.4
	<u>La Louge</u>	54.7	23.6	78.3
	<u>L'Ariège</u>	48.7	24.5	73.2
	<u>L'Aussonnelle</u>	70.7	14.7	85.4
	<u>L'Hers mort</u>	66.0	20.5	86.5
	<u>La Save</u>	53.5	17.8	71.3
	<u>La Gimone</u>	69.7	15.6	85.3
<u>Sous-affluents de la Garonne</u>	<u>Le Lez</u>	55.7	24.4	80.1
	<u>L'Hers vif</u>	54.5	26.8	81.3
	<u>La Lèze</u>	48.9	24.8	73.7
Moyenne :		55.5	21.5	77.0

Tableau 4 - 5. Pourcentage de variance exprimée par les deux premiers facteurs de l'ACP pour les différents affluents

4.2.3.2.2. Les cercles des corrélations

Ils mettent en évidence les variables indépendantes et les corrélations existant entre les variables physico-chimiques (corrélations proportionnelles ou inversement proportionnelles).

La comparaison entre les cercles des différents affluents de la Garonne permet de voir les changements d'un affluent à l'autre (cf. graphique 4-19) (cf. tableau 4-6) :

- les corrélations entre les variables;
- la position spatiale des variables;
- les variables mal représentées.

Ces trois caractères traduisent la nature des eaux et l'origine des éléments chimiques.

Les bicarbonates et le calcium sont toujours corrélés proportionnellement. Ils se trouvent généralement sur le facteur I. Ils proviennent de la dissolution de roches carbonatées.

Le magnésium est corrélé aux bicarbonates et au calcium. Mais il est parfois corrélé :

- aux sulfates, au sodium, au potassium et aux chlorures (sur le Ger);
- aux sulfates, au sodium et aux chlorures (sur l'Arize);
- aux sulfates, et de façon moindre, au sodium et aux chlorures (sur l'Hers vif).

Le magnésium est dans ce cas sur le facteur I, mais les bicarbonates et le calcium sont sur le facteur II. **Le facteur I révèle alors des eaux provenant de dépôts évaporitiques du Trias** (dépôts de sels d'origine marine). **Le facteur II caractérise des eaux bicarbonatées.** **L'origine des apports souterrains sur le Ger, l'Arize et l'Hers vif est donc double. Mais la contribution des eaux salées n'est pas importante, car les concentrations en sels sont faibles** (cf. paragraphe 4.2.3.1). En outre, les eaux salées sont plus chaudes, sursaturées, et pauvres en CO₂.

La température est souvent une variable indépendante des autres variables. Elle se trouve sur le facteur II. Dans certains cas, elle est corrélée :

- à la minéralisation totale sur le facteur I (sur l'Ourse). Ce dernier oppose des eaux souterraines chaudes à des eaux peu minéralisées froides qui proviennent de la fonte des neiges et des formations primaires;
- aux sels d'origine évaporitiques (eaux salées du Ger et de l'Arize);
- au sodium et aux chlorures (eaux thermales de Salies-du-Salat sur le Salat, et eaux salées de l'Hers vif et de la Lèze).

La conductivité est située toujours sur le facteur I.

Le sodium est lui aussi sur le facteur I. Il participe ainsi à la minéralisation. Excepté pour :

- le Salat et la Lèze (facteur II) où il est corrélé aux chlorures;
- la Save (facteur II) où il est corrélé à la pCO₂.

Le potassium est souvent mal représenté dans le plan I-II. Il peut être sur le facteur III, voire IV, car il est lié à des mécanismes naturels complexes qui diminuent sa concentration.

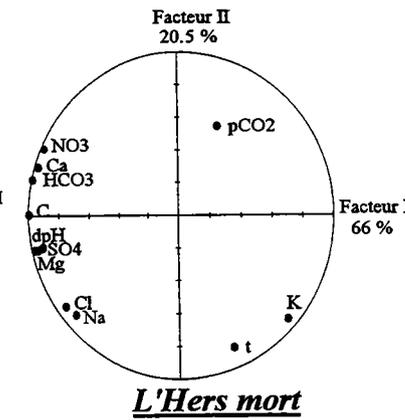
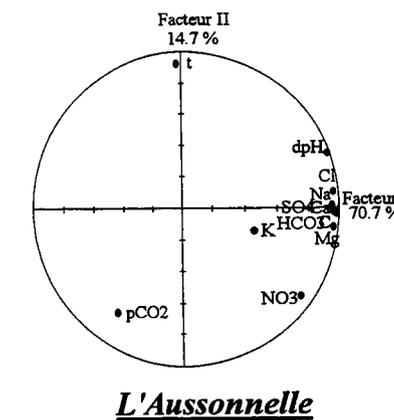
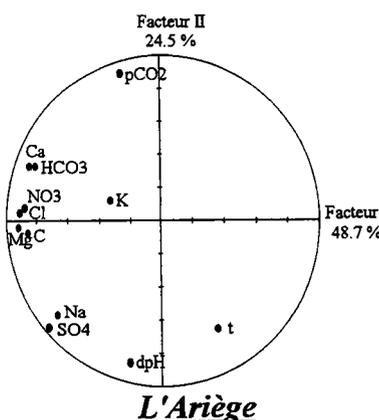
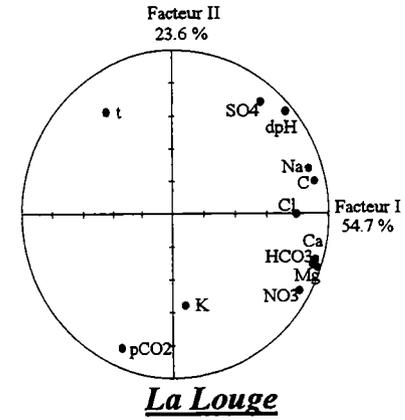
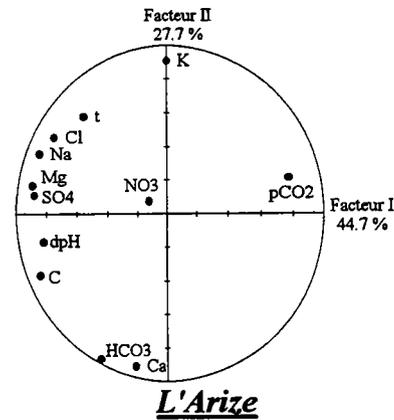
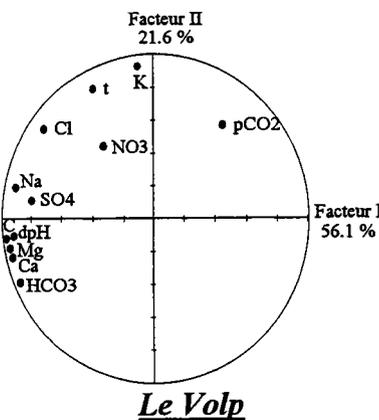
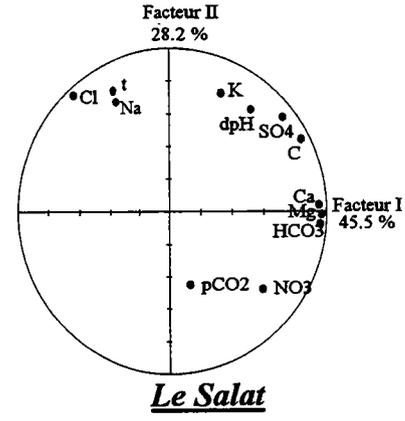
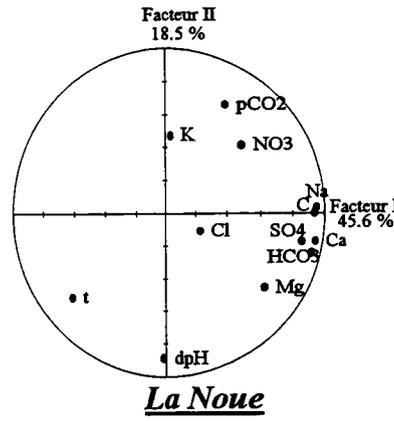
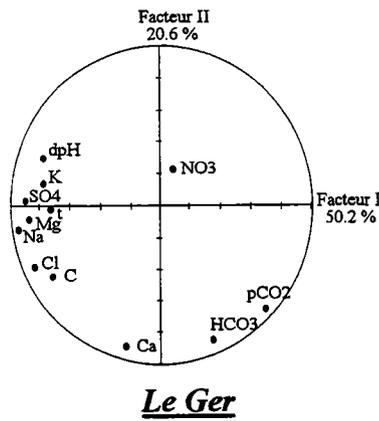
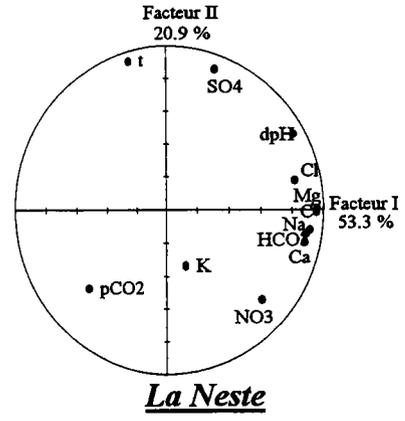
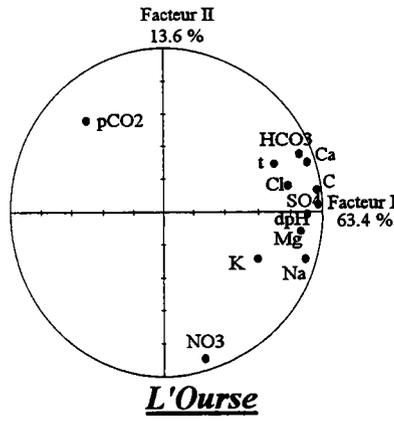
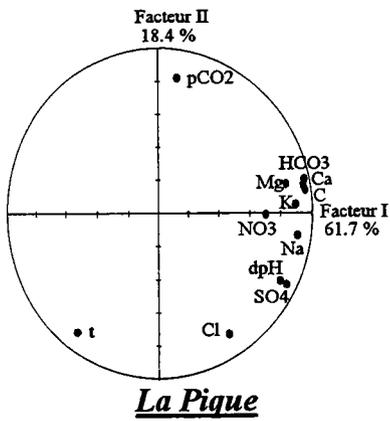
Nous l'avons vu précédemment, les nitrates ont, suivant les affluents, une origine naturelle ou anthropique. Les corrélations semblent confirmer ceci. En effet, lorsque les nitrates :

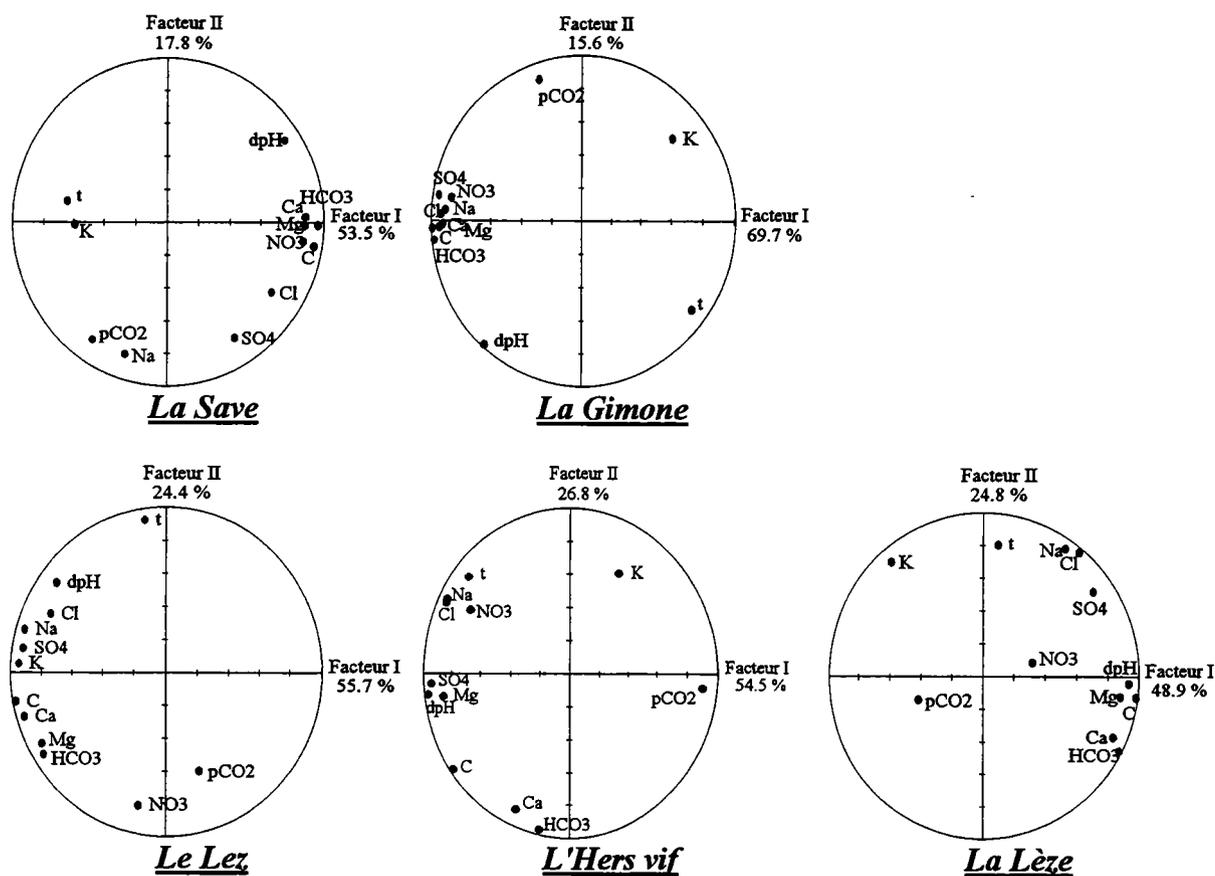
- 1) sont corrélés, sur le facteur I, à la minéralisation, au calcium, aux bicarbonates et au magnésium, ils ont une origine anthropique. C'est le cas de la Louge, de l'Ariège, de l'Hers mort, de la Save et de la Gimone. De plus, cette corrélation montre que les nitrates proviennent de la vidange des aquifères souterrains carbonatés. En effet, ceux-ci possèdent des teneurs en nitrates importantes, liées à l'utilisation intensive d'engrais azotés. Sur l'Aussonnelle, les nitrates sont moins corrélés à la minéralisation, au calcium et aux bicarbonates, mais ils ont pourtant une origine anthropique. Ils sont issus d'engrais utilisés pour l'agriculture, et des effluents des centrales d'épuration.
- 2) sont mal représentés, ils ont une origine naturelle. C'est le cas de l'Ourse, la Neste, le Ger, la Noue, le Salat, le Volp, l'Arize, le Lez et la Lèze. Ce sont des affluents qui possèdent un couvert forestier important. Les nitrates proviennent de la minéralisation d'azote organique en azote minéral qui est ensuite entraîné par les pluies vers les cours d'eau.
- 3) sont corrélés au sodium, aux chlorures et à la température (sur l'Hers vif), ils ont sans doute pour origine une pollution domestique.

Les Chlorures sont en règle générale liés aux sels. Ils sont sur le facteur I ou II, voire III (Noue).

Les sulfates sont bien représentés dans le plan I-II. Ils sont, soit corrélés à la minéralisation totale, soit corrélés aux sels et ont alors une origine évaporitique.

Le dpH : lorsqu'il est sur le facteur I, il est corrélé à la minéralisation totale. Mais, il est situé parfois aussi sur le facteur II (Noue, Salat, Ariège, Gimone). En règle générale, le dpH est inversement proportionnel à la $p\text{CO}_2$. Les eaux sursaturées sont donc pauvres en $p\text{CO}_2$. Ceci est souvent lié au dégazage de la solution.





Graphique 4 - 19. Cercles des corrélations pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne, cycle hydrologique 1993.

	t	C	HCO ₃	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	dpH	pCO ₂
<i>Affluent de la Garonne</i>												
<i>La Pique</i>	-F2	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	-F2	+F1 +F4	+F1	+F1	+F2
<i>L'Ourse</i>	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1 +F3	+F1	-F2	+F1	+F1	+F3 +F2
<i>La Neste</i>	+F2	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	-F3 -F4	+F1	+F1 -F2	+F2	+F1	-F1 +F3
<i>Le Ger</i>	-F1	-F1	-F2	-F2	-F1	-F1	-F1	-F1	+F4	-F1	-F1	+F1 -F2
<i>La Noue</i>	-F1 +F4	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	-F3	-F3	-F3	+F1	-F2	+F2
<i>Le Salat</i>	+F2	+F1	+F1	+F1	+F1	+F2 +F3	+F2	+F2 -F1	+F1 -F4	+F1	+F2 -F3	+F3
<i>Le Volp</i>	+F2	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	+F2	-F1	+F4	-F1	-F1	+F2 -F3
<i>L'Arize</i>	+F2 -F1	-F1	-F2	-F2	-F1	-F1	+F2	-F1	-F3	-F1	-F1	+F1
<i>La Louge</i>	+F2 +F3	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	+F3	+F1	+F1	+F2 +F1	+F1	-F2
<i>L'Ariège</i>	-F2	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	-F3	-F1	-F1	-F1 -F2	-F2	+F2
<i>L'Aussonnelle</i>	+F2	+F1	+F1	+F1	+F1	+F1	-F3	+F1	+F1	+F1	+F1	-F2
<i>L'Hers mort</i>	-F2	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	+F1 -F2	-F1	-F1	-F1	-F1	-F3
<i>La Save</i>	-F1	+F1	+F1	+F1	+F1	-F2	-F4	+F1	+F1	-F2	+F1	-F2
<i>La Gimone</i>	+F1	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	+F1 -F4	-F1	-F1	-F1	-F2 -F1	+F2
<i>Sous-affluents de la Garonne</i>												
<i>Le Lez</i>	+F2	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	-F1	-F2	-F1	-F1	+F3 -F2
<i>L'Hers vif</i>	-F1	-F1	-F2	-F2	-F1	-F1	+F2	-F1	-F1	-F1	-F1	+F1
<i>La Lèze</i>	+F2	+F1	+F1	+F1	+F1	+F2	+F2 -F1	+F2 -F1	+F4	+F1	+F1	+F3

Tableau 4 - 6. Position des variables dans le cercle des corrélations

4.2.4. Evolution du chimisme des eaux sur les affluents

Ce chapitre est divisé en trois sous-chapitres. Le premier sera consacré à l'étude de l'évolution et à la comparaison globale de l'hydrochimie sur les affluents. Dans un deuxième temps, nous verrons l'évolution temporelle de quelques variables. Enfin, nous étudierons l'évolution de l'hydrochimie sur quatre bassins dont l'hydrodynamique est différente.

4.2.4.1. A.C.P. d'ensemble

Elle regroupe :

- douze campagnes effectuées durant le cycle 1993 sur 17 affluents et sous-affluents, soit 204 échantillons.
- douze variables physico-chimiques : la conductivité (C), la température (t), les bicarbonates (HCO_3^-), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), les sulfates (SO_4^{2-}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les chlorures (Cl), les nitrates (NO_3^-), le dpH et la pression de CO_2 équilibrante associée à l'eau (pCO_2).

La matrice des corrélations montrent que certaines variables sont bien corrélées (cf. tableau 4-7). C'est le cas :

- de la conductivité avec les bicarbonates, le calcium, le magnésium, les chlorures, les nitrates et les sulfates;
- du sodium avec le potassium et les chlorures.

Par contre, la température et la pCO_2 ne sont pas corrélées à d'autres variables. Elles sont indépendantes.

	t	C	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl	NO_3^-	SO_4^{2-}	dpH	pCO_2
t	1.0											
C	0.1	1.0										
HCO_3^-	0.1	0.9	1.0									
Ca^{2+}	0.1	0.9	1.0	1.0								
Mg^{2+}	0.1	0.9	0.8	0.8	1.0							
Na^+	0.1	0.7	0.5	0.4	0.6	1.0						
K^+	0.3	0.6	0.5	0.4	0.6	0.8	1.0					
Cl	0.2	0.9	0.7	0.6	0.8	0.9	0.8	1.0				
NO_3^-	0.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.9	1.0			
SO_4^{2-}	0.2	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	1.0		
dpH	0.4	0.7	0.8	0.8	0.7	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	1.0	
pCO_2	-0.1	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.0	1.0

Tableau 4 - 7. Corrélations entre variables

Les 5 premiers axes de l'ACP expriment, au total, 94.5 % de la variance (avec 63.7 % pour le premier axe et 12.9 % pour le deuxième axe). Les données apparaissent donc bien structurées.

Dans l'espace des variables (cf. graphique 4-20) : le facteur I représente la minéralisation. Il oppose des eaux peu minéralisées à des eaux plus minéralisées. Ces dernières se répartissent en deux pôles de part et d'autre de l'axe I : un pôle naturel et un pôle anthropique. Le facteur II oppose le dpH et la pCO₂. Il différencie des eaux sursaturées possédant des pCO₂ faibles et des eaux sous-saturées avec des pCO₂ fortes. Le facteur III est simplement représenté par la température.

Dans l'espace des individus, le facteur I différencie les échantillons des affluents par rapport à leur minéralisation. Les douze échantillons de chaque affluent ont été reliés et regroupés. Ils forment ainsi des polygones de surfaces plus ou moins importantes, permettant de mieux visualiser la position et les variations hydrochimiques des affluents.

Les rivières les moins minéralisées du bassin sont celles de la rive droite de la Garonne, en amont de Montréjeau : *la Pique, la Neste et l'Ourse*. Les affluents de la rive droite, en amont de Toulouse, ont une minéralisation plus forte : *le Salat, l'Ariège, le Ger, le Volp et l'Arize*. Les affluents les plus minéralisés sont ceux de la rive gauche, en aval de Montréjeau, et ceux de la rive droite, en aval de Toulouse : *la Louge, la Noue, la Save, l'Hers mort, la Gimone et l'Aussonnelle*. Cette répartition géographique est liée :

- à la neige présente en amont du bassin. Elle provoque une dilution;
- à l'hydrogéologie. Les bassins carbonatés fournissent des eaux plus minéralisées que les bassins de cristallins;
- aux pollutions qui sont surtout présentes en aval du bassin;
- aux gradients altitudinaux. Les faibles altitudes de la rive gauche favorisent l'emprisonnement du CO₂, ce qui provoque de fortes dissolutions et une minéralisation élevée.

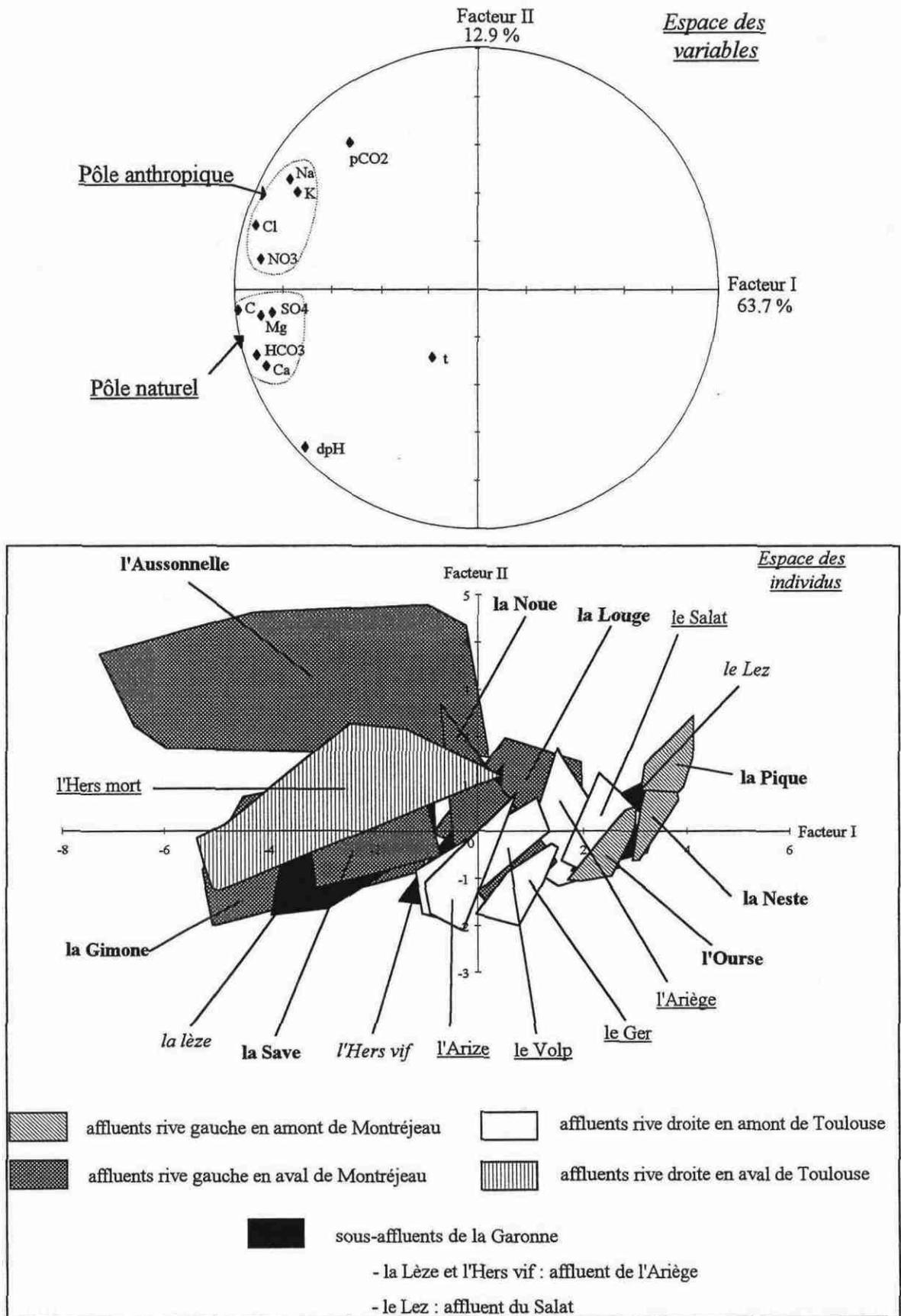
En ce qui concerne les trois sous-affluents de la Garonne, *le Lez* (affluent du Salat) est la rivière la moins minéralisée. Ensuite viennent *l'Hers vif* et *la Lèze*, qui sont même plus minéralisés que l'Ariège dans laquelle ils se jettent.

La surface des polygones est un indice de variabilité du comportement hydrochimique des affluents. Plus l'hétérogénéité de l'hydrochimie est grande, plus les surfaces sont importantes. L'origine de cette variabilité est multiple : régime hydrologique, pollutions importantes, présence de neige et d'aquifères régulateurs.

Les aires les plus importantes sont celles des affluents de la rive gauche, en aval de Montréjeau, et celles de la rive droite, en aval de Toulouse. Ces affluents ont une variabilité hydrochimique importante. Cette dernière est due aux rejets polluants des villes et des industries, au régime hydrologique dont la composante principale est le ruissellement, et à des réserves souterraines faibles. L'Aussonnelle est le meilleur représentant de ce groupe.

Par contre, certains affluents ont des surfaces moins étendues. C'est le cas des affluents en amont du bassin (*Pique, Neste, Ourse*) qui n'ont pas beaucoup de réserves souterraines carbonatées, mais des réserves neigeuses importantes (*Neste et Pique*).

Le Ger possède aussi une surface réduite. Son hydrochimie est donc assez constante. Cette faible variabilité est due à la présence de nombreux aquifères, essentiellement karstique, qui ont un rôle régulateur. Ceci confirme les résultats de l'hydrodynamique.



Graphique 4 - 20. ACP sur l'ensemble de l'hydrochimie des affluents de la Garonne, cycle 1993, 204 échantillons

4.2.4.2. Evolution temporelle de quelques variables physico-chimiques

L'ACP met en évidence des évolutions similaires entre plusieurs variables, par le biais du cercle des corrélations. Six variables représentatives ont donc été retenues :

- les bicarbonates (cf. graphique 4-21), le dpH (cf. graphique 4-22) et la pCO_2 (cf. graphique 4-23) : dans le but de caractériser les apports carbonatés;
- le sodium (cf. graphique 4-24) : dans le but de caractériser les apports anthropiques;
- et la température (cf. graphique 4-25).

4.2.4.2.1. Les bicarbonates

La majorité des affluents possède des variations importantes de concentrations. Mais trois d'entre eux suivent une évolution à faibles variations : c'est le Ger, le Lez et le Salat. Cette particularité est liée au rôle régulateur des aquifères et confirme les résultats de la partie hydrodynamique.

Les eaux d'étiage ne sont pas les plus concentrées en bicarbonates, comme on pouvait le présager. En effet, les teneurs maximales interviennent à des moments très différents selon les affluents.

1) En début de cycle :

Pour la plupart des affluents, on note une augmentation de concentration entre l'échantillon de la campagne C1 et celui de la campagne C2, c'est-à-dire entre la fin du cycle 1992 et le début du cycle 1993. Cette hausse est causée par la vidange d'eaux souterraines plus concentrées à temps de séjour long dans les aquifères, et par le lessivage des sols.

En revanche, on note une diminution des teneurs pour le Volp, l'Aussonnelle, la Lèze et l'Hers vif. Deux hypothèses peuvent expliquer cette baisse :

- 1^{ère} possibilité : le volume issu de la vidange des réserves souterraines est faible par rapport aux eaux de ruissellement car les formations carbonatées sont peu nombreuses. On a alors dilution;
- 2^{ème} possibilité : **la vidange des réserves souterraines est retardée**, car :
 - a) les aquifères carbonatés ont des faibles perméabilités;
 - b) les réserves d'eaux carbonatées, de faible importance, sont épuisées. Il faut alors attendre la reconstitution des réserves avant la vidange vers le réseau de surface.

La deuxième hypothèse apparaît réaliste, car on note systématiquement une augmentation des teneurs pour l'échantillon de la campagne C3. La solution 2b sera préférée pour le Volp et la Lèze, car les concentrations diminuent après C3.

2) L'étiage hivernal :

Durant cette période, les concentrations :

- augmentent légèrement : pour l'Ourse, la Neste et le Salat. Ceci révèle la présence d'aquifères carbonatés où le temps de séjour des eaux est long (ce qui permet une meilleure mise en solution), ou une contribution plus

importante des eaux souterraines dans les écoulements, en raison d'une diminution des débits;

- restent constantes : pour le Ger et le Lez. Cette stagnation marque des réserves très régulatrices;

- diminuent progressivement : pour le Volp, l'Arize, l'Hers mort, la Gimone, la Save et la Lèze. Ceci s'explique par des réserves carbonatées faibles (Volp), mais aussi par un dégazage des eaux (Arize);

- évoluent indistinctement : pour la Pique, la Noue, la Louge, l'Ariège, l'Aussonnelle et l'Hers vif. Il est alors difficile de se prononcer sur l'importance des réserves carbonatées.

3) Le milieu de cycle :

Les crues de printemps et la fonte des neiges provoquent des dilutions très nettes sur la plupart des affluents.

4) L'étiage final :

Certaines eaux retrouvent à nouveau des teneurs élevées en bicarbonates, car la contribution souterraine est plus marquée ou le temps de séjour des eaux dans l'aquifère est plus long. C'est le cas pour l'Ourse, la Neste, le Salat, la Louge et l'Ariège. Le Lez et le Ger ont toujours des teneurs assez constantes.

On note, au contraire, une diminution progressive des concentrations pour le Volp, la Noue, l'Arize, la Save et l'Hers vif. Cette baisse est liée à la faiblesse des réserves carbonatées et à une réprécipitation des eaux suite à un dégazage.

La crue survenue au moment de la campagne C10 empêche de connaître l'évolution des eaux d'étiage pour quelques rivières (Hers mort, Aussonnelle, Gimone et Lèze). Il semble, tout de même, que les teneurs diminuent, ce qui révélerait la faiblesse des réserves souterraines carbonatées.

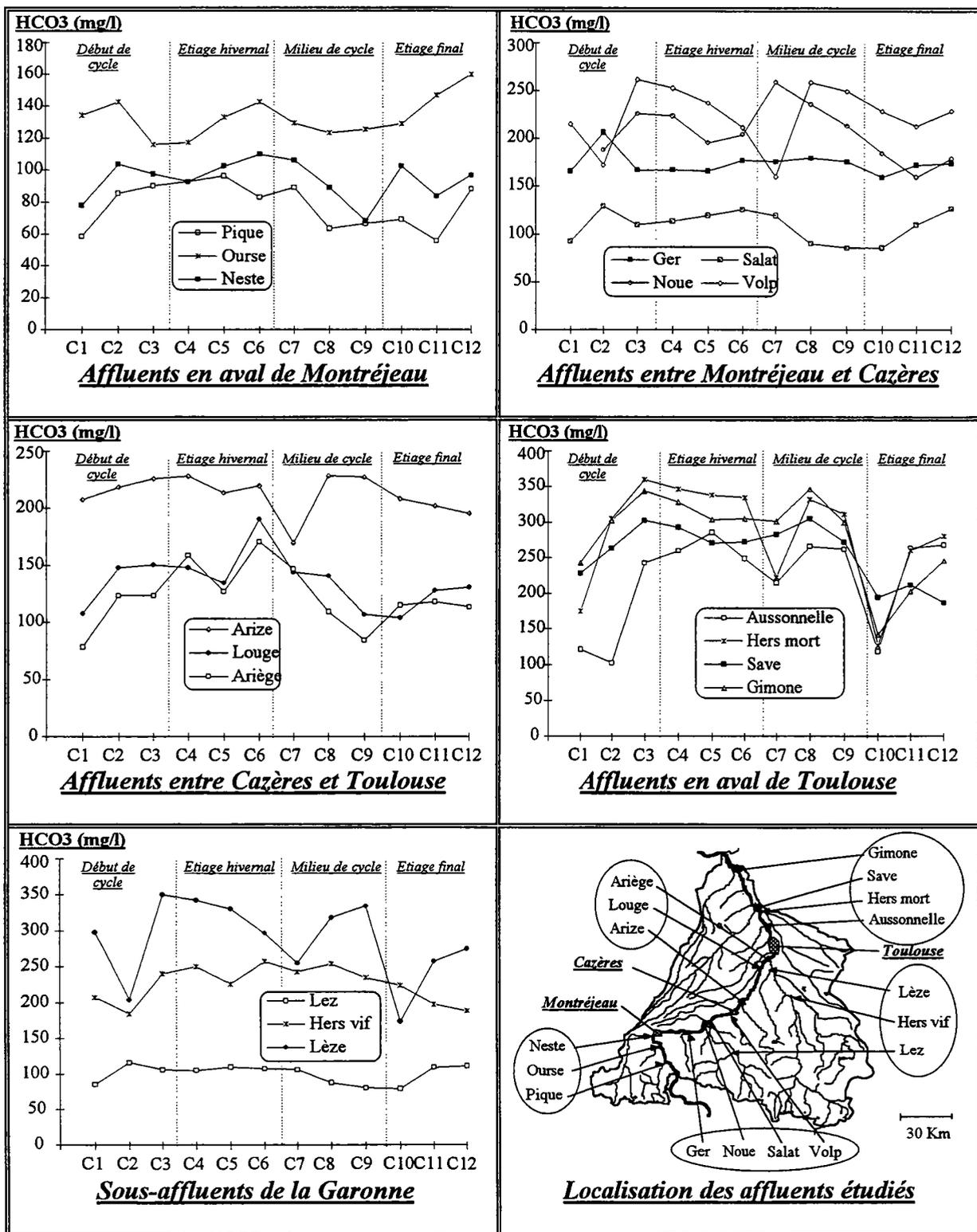
4.2.4.2.2. Le dpH et la pCO₂

Certains affluents voient leur dpH augmenter pendant les périodes de basses eaux, car le temps de séjour des eaux dans l'aquifère est important, favorisant ainsi, la mise en solution des carbonates. C'est le cas des affluents en aval de Montréjeau (Pique, Ourse, Neste), du Salat, de l'Ariège, de la Louge et du Lez.

Pour d'autres affluents, le dpH et la pCO₂ diminuent parallèlement. C'est le signe d'un dégazage des eaux. On le constate pour l'Arize et la Lèze durant les périodes de basses eaux, et pour l'Hers vif, la Lèze et les affluents en aval de Toulouse sur l'ensemble du cycle.

Quelques pics de pCO₂ pédogénique sont à noter :

- *au printemps* sur les affluents en aval de Toulouse;
- *en début de cycle* sur l'Ariège et sur la Noue.



Graphique 4 - 21. Evolution temporelle des teneurs en bicarbonates sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93

4.2.4.2.3. Le sodium

Son évolution est liée aux conditions hydrologiques. Les dilutions en début de cycle et au printemps provoquent une diminution des concentrations, alors que les deux périodes d'étiage présentent les concentrations les plus élevées.

L'amplitude des variations est maximale sur les rivières anthropisées : l'Hers vif, la Lèze la Louge, et les affluents en aval de Toulouse (et plus particulièrement sur l'Aussonnelle).

4.2.4.2.4. La température

Son évolution est indépendante des autres variables. **Elle est liée aux conditions climatiques. La totalité des affluents possède la même courbe d'évolution de la température.** Celle-ci diminue jusqu'en février, puis remonte progressivement.

Sur le Ger, les eaux de l'étiage final ont des températures atypiques. En effet, ces dernières apparaissent plus basses que pour les autres affluents. C'est un indice d'apports souterrains.

Pour la plupart des affluents, la température chute lors de la dernière campagne (C12). Ceci est dû à des précipitations estivales froides dans l'aval du bassin.

4.2.4.3. Quatre affluents caractéristiques

Les affluents sélectionnés n'ont pas le même régime hydrologique et possèdent des réserves différentes. Ces affluents sont :

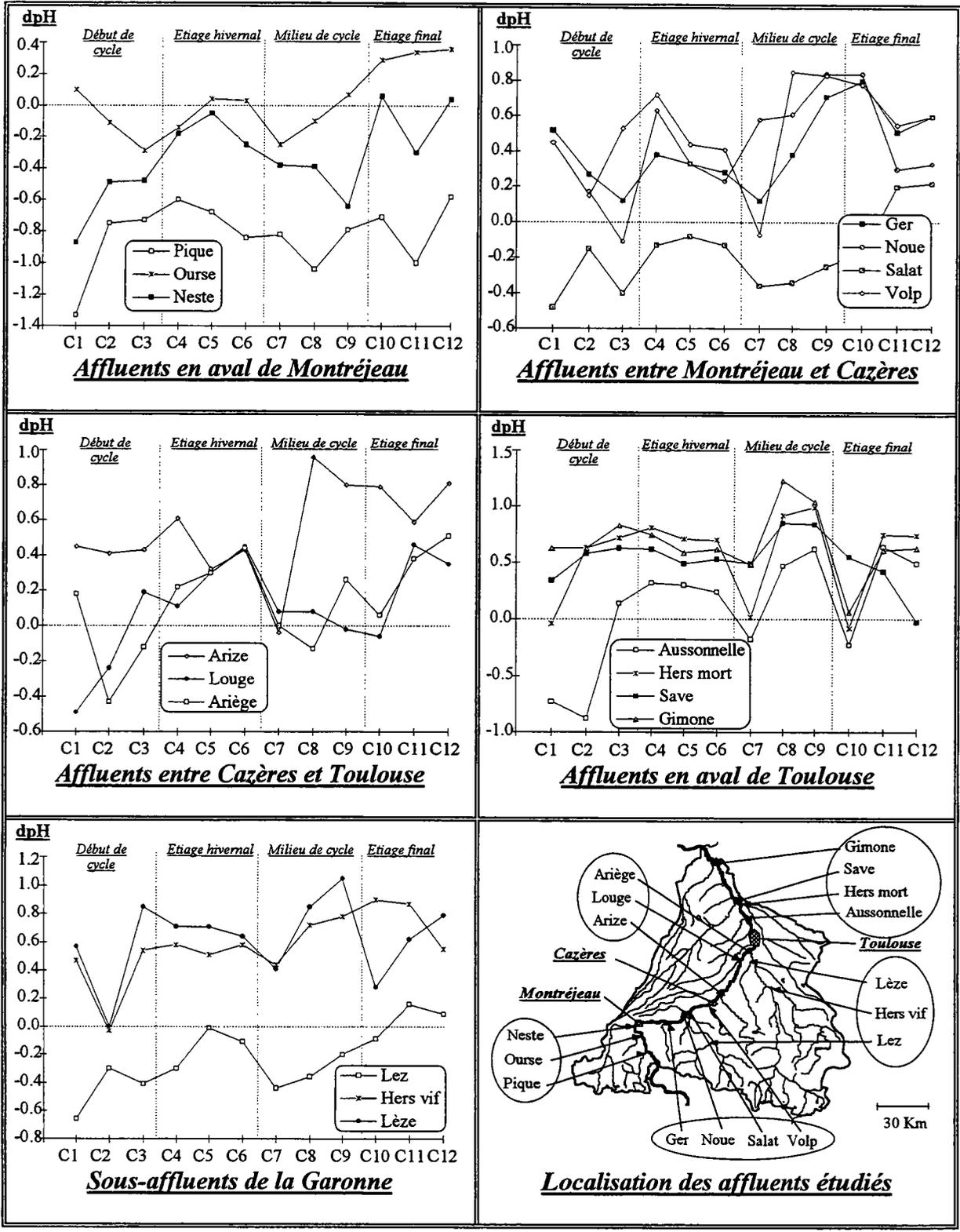
- *le Volp* (en rive droite) et *l'Aussonnelle* (en rive gauche) qui sont pratiquement dépourvus de réserves souterraines. Les écoulements proviennent essentiellement du ruissellement;
- *le Ger* dont l'écoulement souterrain est important;
- *le Salat* qui possèdent à la fois des réserves souterraines et neigeuses.

Une ACP est réalisée sur les échantillons de chaque affluent et sur les douze variables décrites précédemment. Les résultats de l'ACP (espace des variables et espace des individus) sont regroupés dans un tableau où ont été ajoutés l'hydrogramme du cycle 1993 et la localisation de l'affluent dans le bassin de la Garonne.

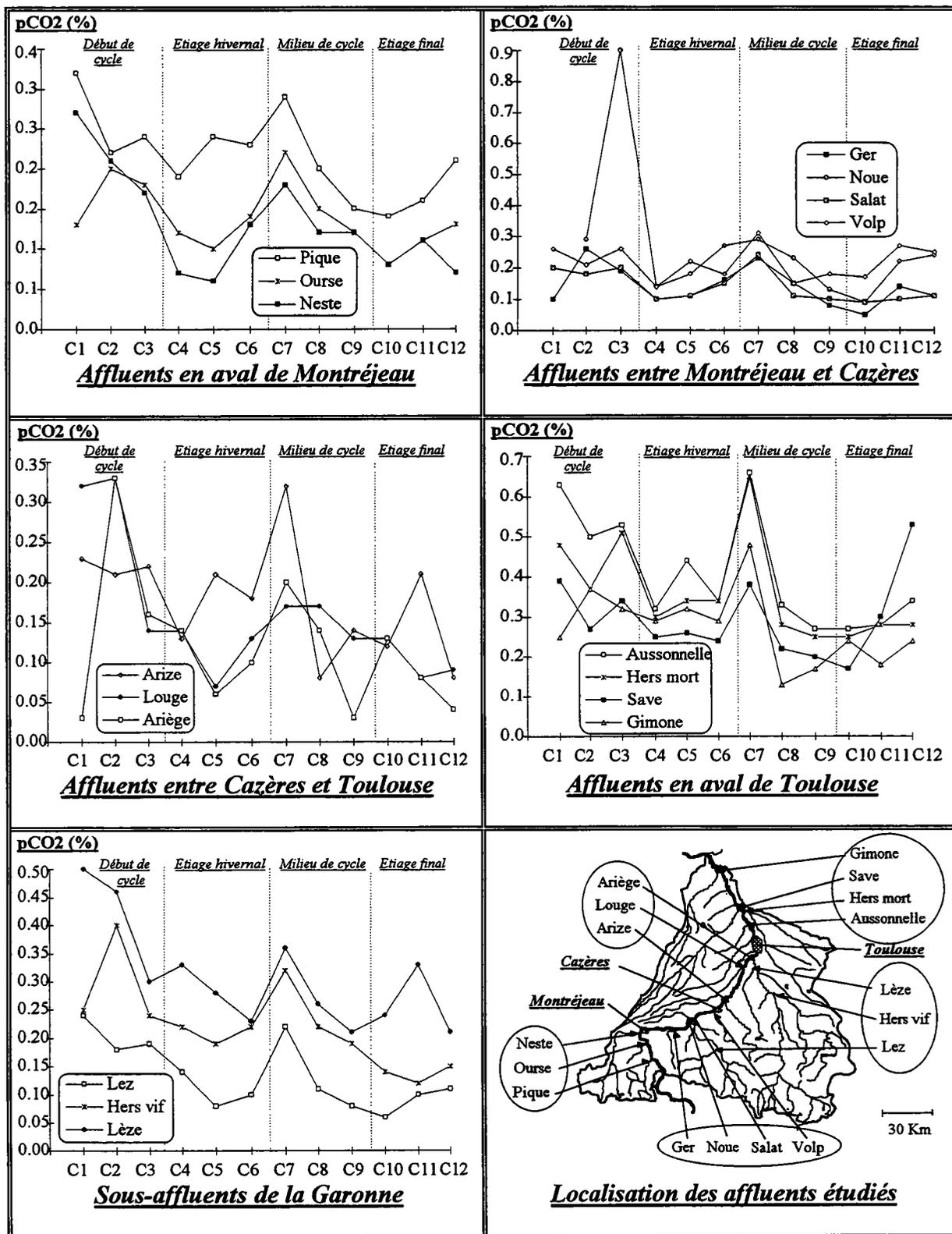
4.2.4.3.1. Le Salat

L'espace des individus met en évidence une minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne pour les eaux de début cycle, de l'étiage hivernal et de l'étiage final (cf. graphique 4-26). La contribution majeure des eaux carbonatées n'est donc pas exclusive à l'étiage final. Les trois groupes d'eaux carbonatées se différencient par rapport au facteur II, qui représente un pôle salé (influence des thermes de Salies-du-Salat). Ce dernier est lié à l'échantillon C1 qui est particulièrement salé.

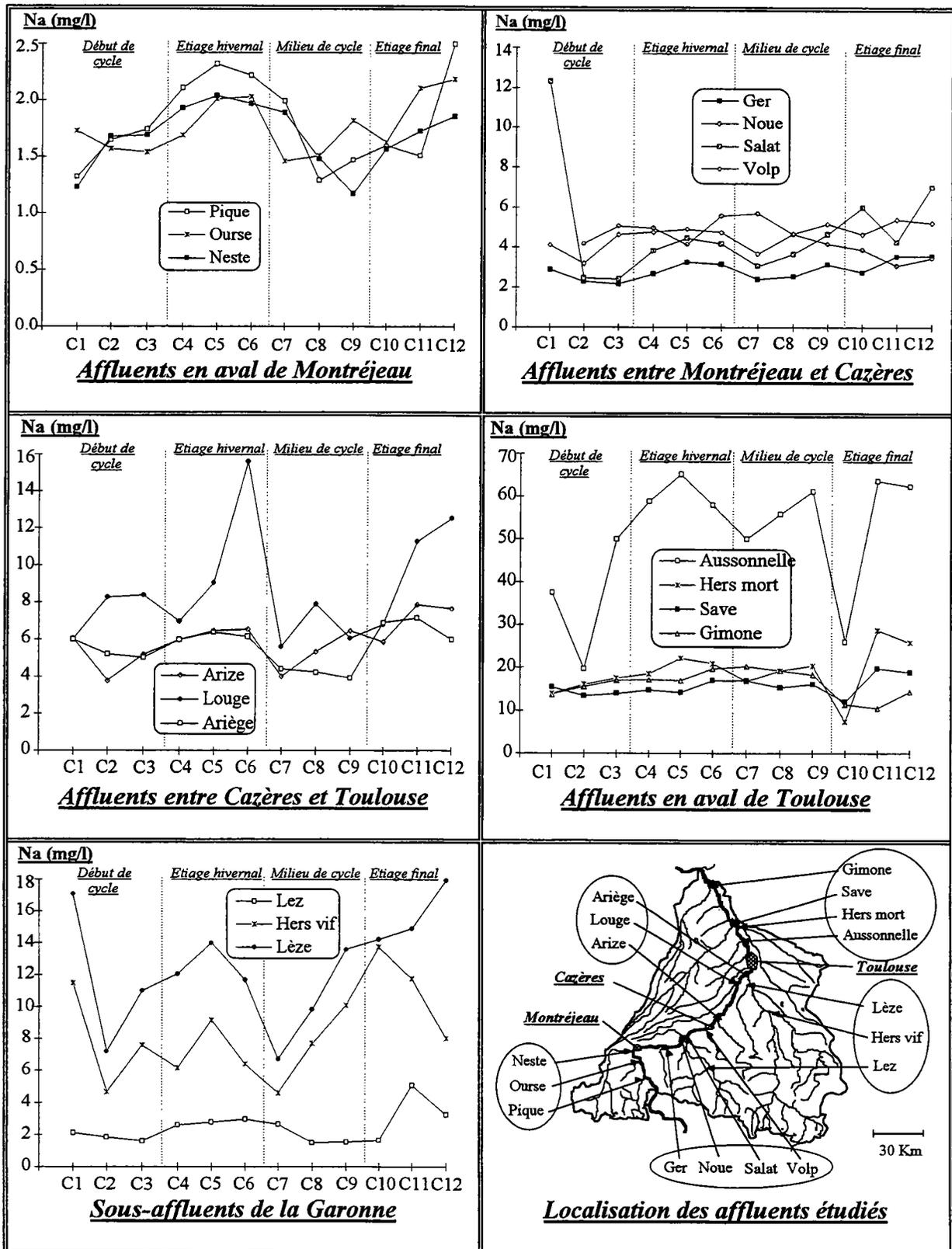
Les eaux du milieu de cycle (C8, C9, C10) sont moins minéralisées, car on a une dilution par les eaux de fonte des neiges. L'échantillon C7 n'est pas influencé par cette dilution.



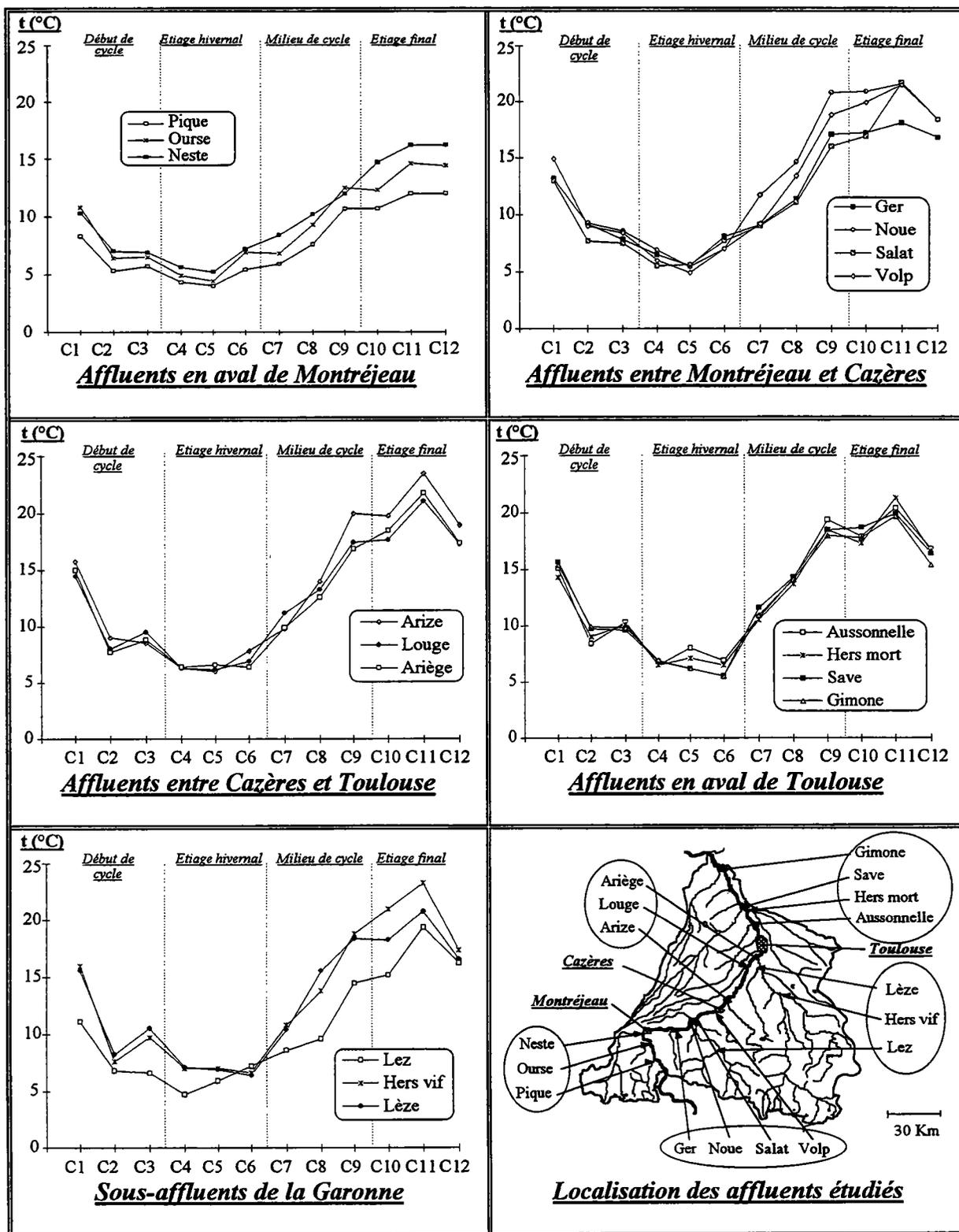
Graphique 4 - 22. Evolution temporelle du dpH sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93



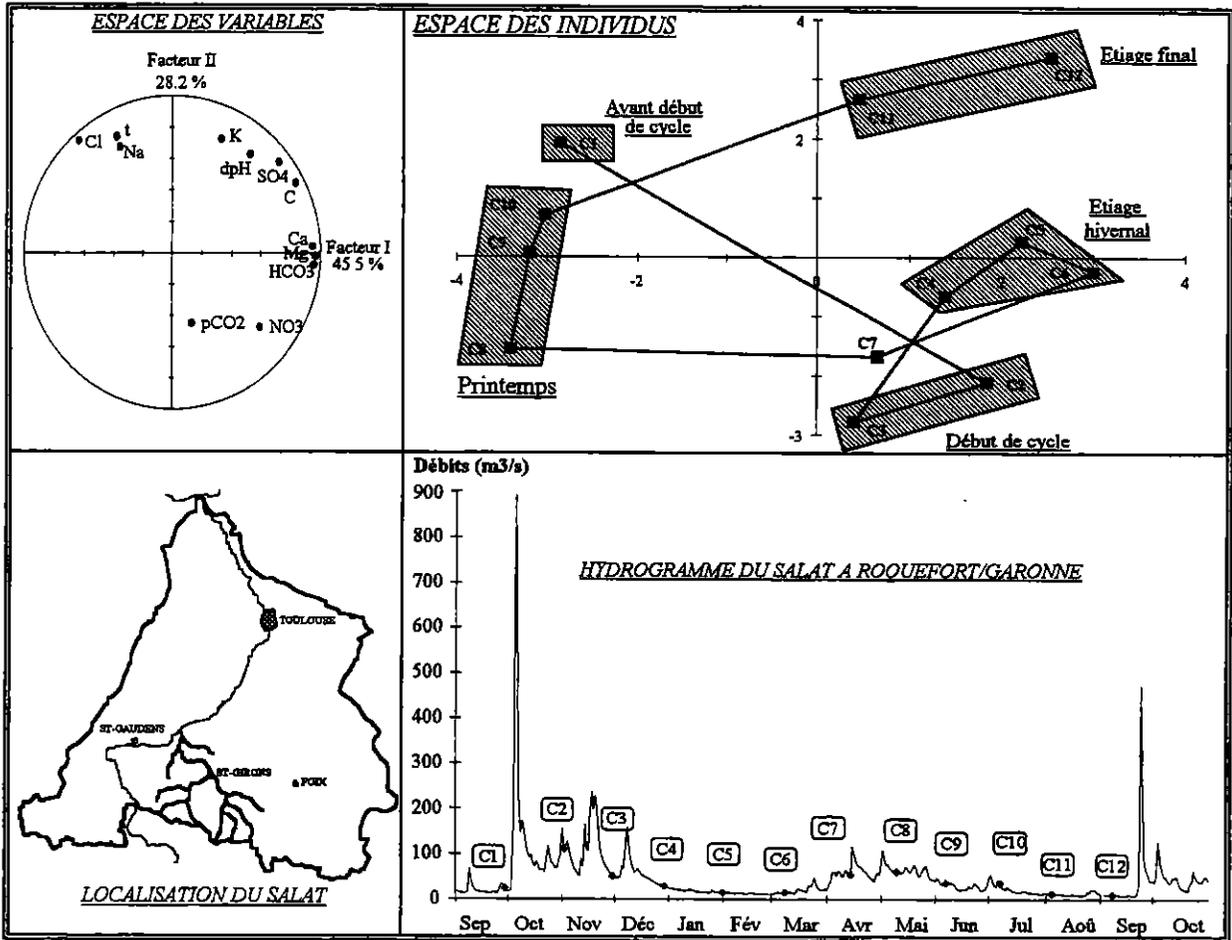
Graphique 4 - 23. Evolution temporelle de la pCO₂ sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93



Graphique 4 - 24. Evolution temporelle des teneurs en sodium sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93



Graphique 4 - 25. Evolution temporelle des températures sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93



Graphique 4 - 26. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Salat

4.2.4.3.2. Le Ger

Les quatre périodes du cycle sont aussi bien individualisées dans l'espace des individus (cf. graphique 4-27) :

- les eaux du début de cycle sont les moins minéralisées. Les pCO_2 y sont élevées;
- puis, à l'étiage hivernal, les eaux sont plus chargées en éléments dissous. Le chimisme des eaux de cette période est identique à celui des eaux de l'étiage final du cycle antérieure (échantillon C5 proche de C1);
- les crues de printemps, liées aux précipitations, provoquent une dilution;
- enfin la période de récession permet aux eaux d'acquérir une bonne minéralisation, plus forte que celle du tarissement précédent.

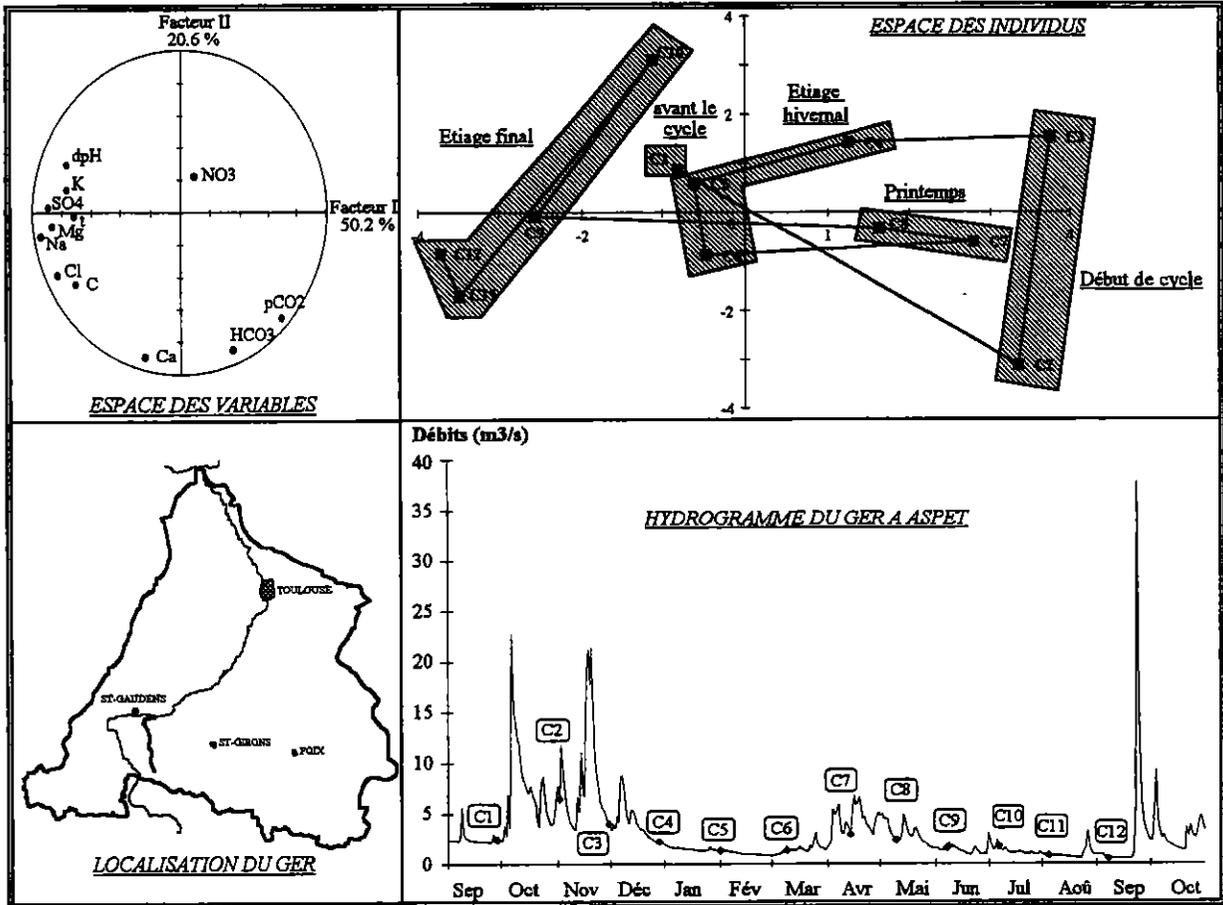
L'ACP rend compte de la dynamique du système et ne fait pas intervenir une évolution temporelle. C'est pourquoi, nous avons réalisé une AFD en entrant la variable temps. Cette analyse montre que l'évolution temporelle n'est pas liée à la dynamique du système, mais à la température (96 % de l'inertie), c'est-à-dire au climat.

Nous l'avons déjà vu, le cercle des corrélations met en évidence deux sortes d'eaux :

- des eaux bicarbonatées calciques, issues des formations secondaires (facteur II);

- des eaux salées en faible proportion, provenant des formations évaporitiques du Trias (facteur I).

Le passage du début de cycle à l'étiage hivernal, et du printemps à l'étiage final se manifeste, en premier lieu, par une augmentation des teneurs en sels dans les eaux. Dans un second temps, les eaux acquièrent une minéralisation bicarbonatée calcique.



Graphique 4 - 27. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Ger

L'hydrogéologie du bassin du Ger n'est pas bien connue. Mais il existe quelques sources thermominérales qui ont été étudiées, dont la source de Salomon à Encasse. Cette dernière est située dans le bassin du Job, sous-bassin du Ger (P. CORRIGNAN & H. VERRIERE, 1985). La source présente des teneurs élevées en sels, et sa température à l'exutoire est d'environ 30 °C. Sa composition hydrochimique est la suivante :

<u>Eléments</u>	<u>Source de Salomon (mg/l)</u>	<u>Le Ger (composition moyenne) (mg/l)</u>
Bicarbonates	200	173.8
Calcium	745	59.2
Magnésium	140	7.7
Sulfates	1740	29.2
Potassium	5	1.0
Sodium	105	2.9
Chlorures	48	4.0

Si on admet que toutes les sources salées possèdent la même composition chimique, on peut estimer leur contribution dans l'écoulement du Ger à partir de l'équation de conservation des masses. Au moment de l'étiage final, période où l'écoulement est strictement souterrain, on a :

$$Q_{\text{Ger}} \cdot C_{\text{ger}} = Q_{\text{sources salées}} \cdot C_{\text{sources salées}} + Q_{\text{sources carbonatées}} \cdot C_{\text{sources carbonatées}}$$

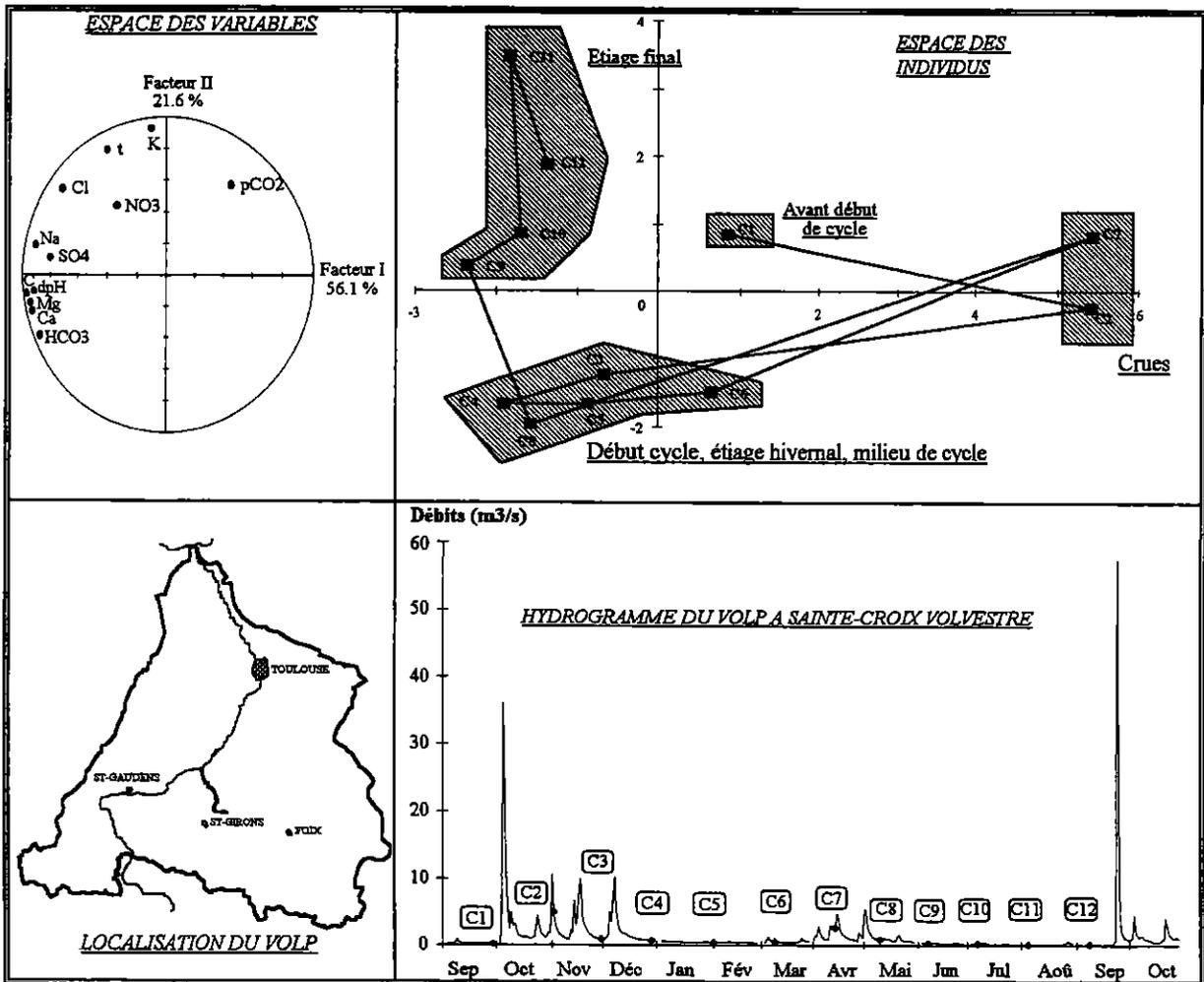
Le calcul effectué à partir des sulfates et du sodium estime la participation des sources salées dans l'écoulement à quelques dizaines de litres. **La contribution des sources salées durant l'étiage final est donc d'environ 2 à 3 %, ce qui est négligeable.**

4.2.4.3.3. Le Volp

A la différence du Ger, on distingue trois groupes (cf. graphique 4-28) :

- un groupe I correspondant à des eaux de crues;
- un groupe II regroupant les eaux de début de cycle, de l'étiage hivernal et du milieu de cycle;
- un groupe III comprenant les eaux de l'étiage final.

Les eaux du groupe II sont bicarbonatées calciques et magnésiennes. Durant les épisodes de pluies, les eaux sont fortement diluées (C2 et C7).



Graphique 4 - 28. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Volp

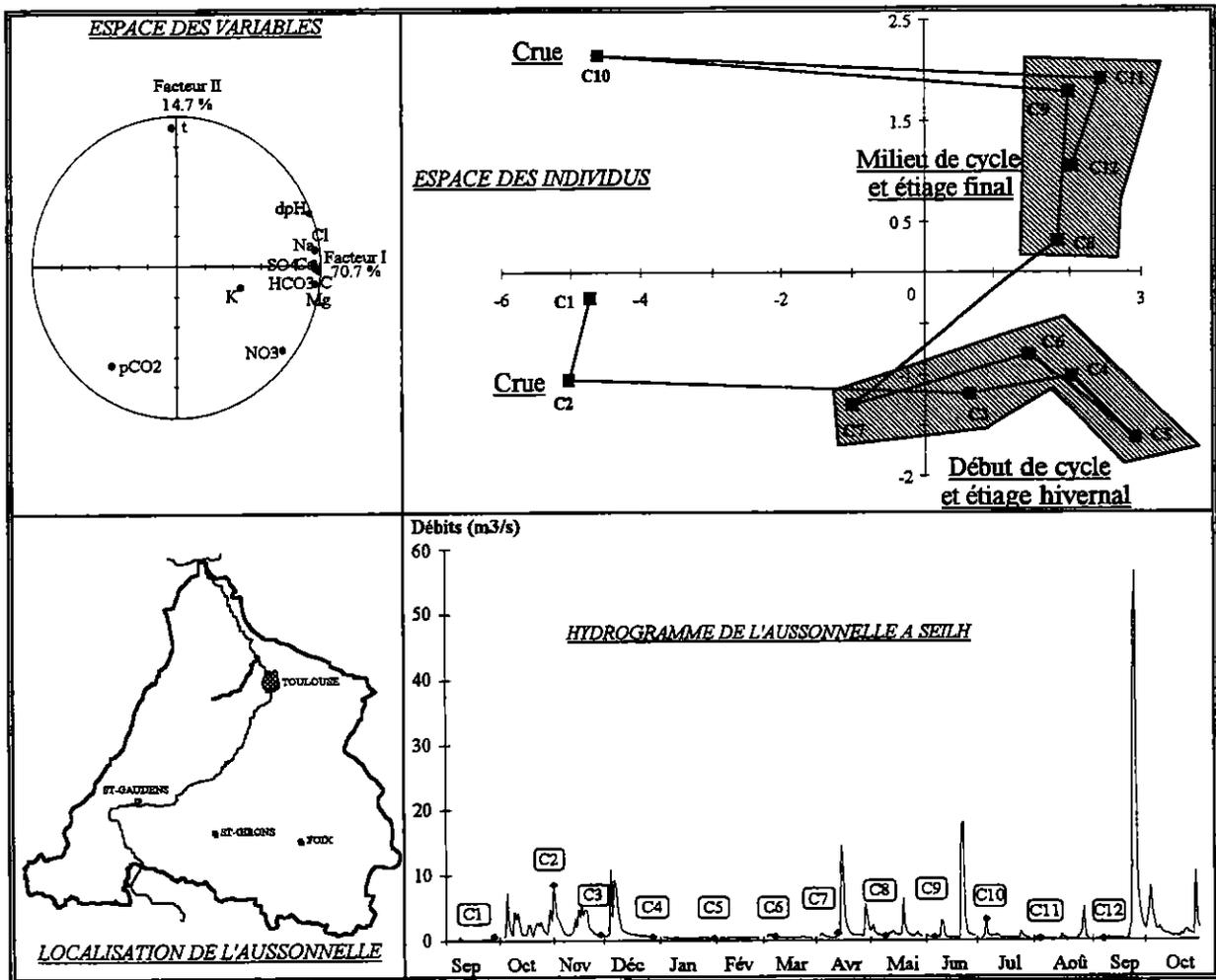
A la fin du cycle, les eaux bicarbonatées deviennent de plus en plus salées. La contribution d'eaux évaporitiques est probable, comme pour le Ger.

4.2.4.3.4. L'Aussonnelle

On peut aussi distinguer trois groupes dans l'espace des individus (cf. graphique 4-29). Le premier groupe est formé par deux échantillons qui se caractérisent par une faible minéralisation et s'opposent entre eux par rapport à l'axe II, déterminé par la température et la pCO_2 . Ce sont les eaux de crues (C2 en automne, eaux froides, et C10 en été, eaux plus chaudes). Les autres échantillons se répartissent en deux pôles :

- les eaux de début de cycle et d'étiage hivernal;
- les eaux de milieu de cycle et d'étiage final.

Ces deux groupes ont une minéralisation identique, mais ils se différencient par la température et la pCO_2 . Les eaux de la première moitié du cycle sont plus froides et possèdent des pCO_2 élevées.



Graphique 4 - 29. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur l'Aussonnelle

L'hydrochimie des différents affluents étant connue, il devient plus facile d'appréhender l'évolution du chimisme des eaux de la Garonne.

4.2.5. Evolution des eaux de la Garonne, du Pont-du-Roi à Saint-Aignan, et dans le Val d'Aran

Introduction

L'évolution des eaux de la Garonne entre le Pont-du-Roi et Saint-Aignan, soit une distance d'environ 210 km, est étudiée à partir d'un peu plus de 200 échantillons. Ces derniers proviennent de douze campagnes effectuées durant le cycle 1993 sur dix-huit stations (cf. carte 4-2) (cf. tableau 4-8).

<u>Stations (numéro de campagne)</u>	<u>Position</u>	<u>Stations (code)</u>
1	Saint-Aignan, aval confluence Gimone	G1
3	amont confluence Gimone	G2
4	aval confluence Save	G3
6	Grenade	G4
9	Lespinasse	G5
10	Pont de Blagnac, aval Toulouse	G6
18	Pinsaguel	G7
20	Muret, amont confluence Louge	G8
22	Carbonne, amont confluence Arize (1 ^{er} jour de campagne)	G9
23	Carbonne, amont confluence Arize (2 ^{ième} jour de campagne)	G10
25	Cazères	G11
30	amont confluence Salat	G12
32	aval confluence Ger	G13
34	Montréjeau	G14
37	Labroquère	G15
39	Chaum	G16
41	St-Béat	G17
42	Pont du Roi	G18

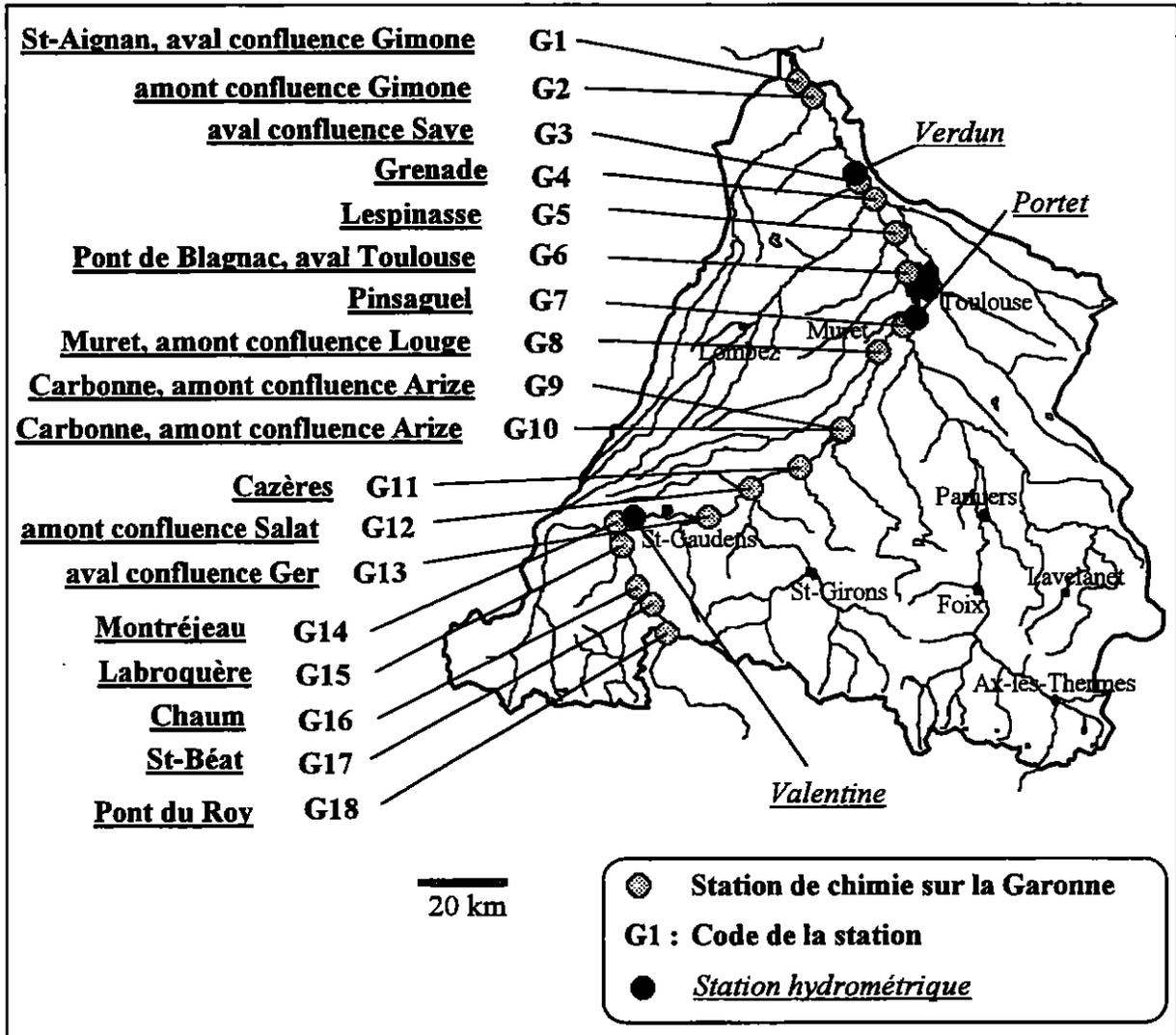
Tableau 4 - 8. Position et code des stations sur la Garonne

Les stations de prélèvements ont été choisies par rapport :

- aux ponts disponibles sur la Garonne (les prélèvements se faisant dans l'eau courante);
- à la connaissance des apports intermédiaires (apports des affluents et des nappes alluviales).

Dans la mesure du possible, une distance similaire a été respectée entre chaque station.

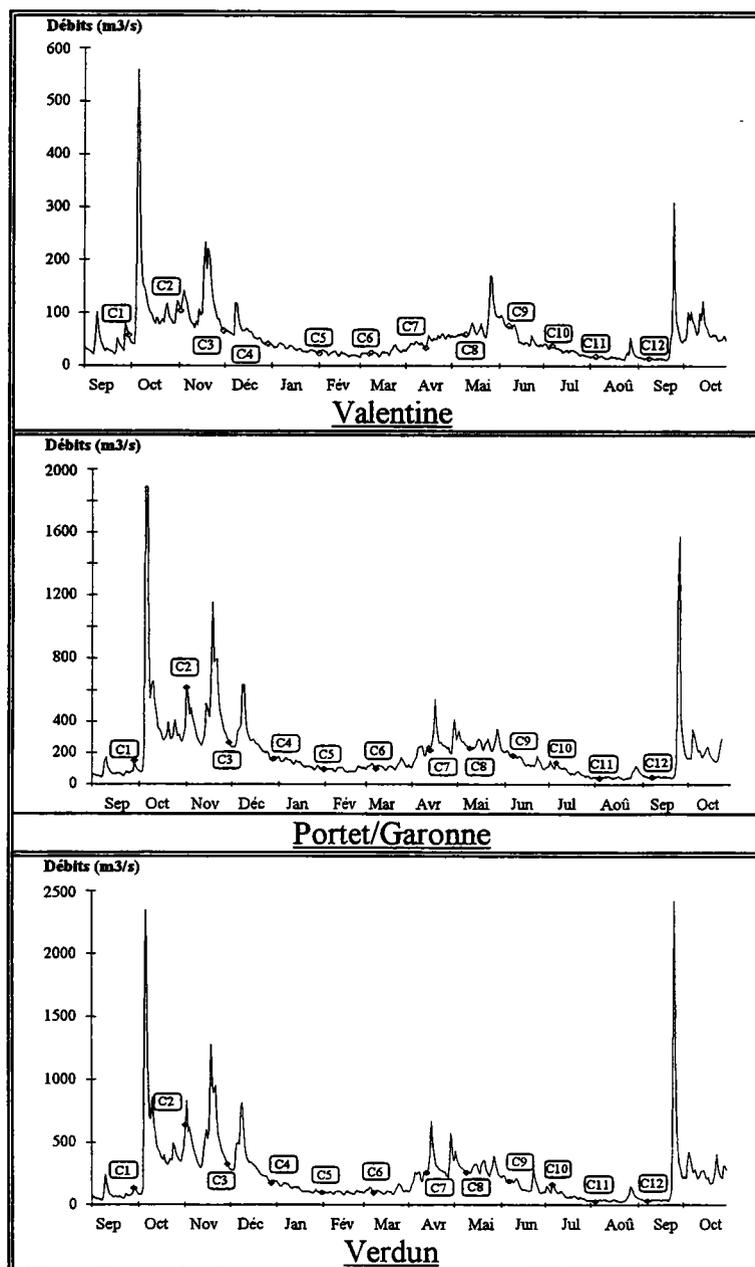
Les campagnes de prélèvements se sont déroulées sur deux jours. Le premier jour, l'échantillonnage est effectué sur la partie de l'aval du bassin, de Saint-Aignan à Carbonne. Le deuxième jour les prélèvements ont lieu en amont du bassin, du Pont-du-Roi (frontière franco-espagnole) à Carbonne. En période de précipitations, un double échantillonnage est réalisé à Carbonne, afin d'évaluer les changements hydrochimiques entre les deux jours.



Carte 4 - 2. Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques le long de la Garonne

Pour comparer l'ensemble des campagnes et connaître l'évolution des eaux, nous avons d'abord réalisé une ACP. Nous étudierons par la suite, l'évolution spatiale de quelques variables physico-chimiques choisies à partir de l'ACP, puis, pour terminer, l'hydrochimie des sources de la Garonne dans le Val d'Aran.

Les campagnes du cycle hydrologique 1993 sont représentées sur l'hydrogramme de Valentine, Portet/Garonne et Verdun (cf. graphique 4-30). Ces trois graphiques permettent de relier l'hydrochimie à l'hydrologie.



Graphique 4 - 30. Hydrogrammes de la Garonne à Valentine, Portet/Garonne et Verdun, cycle 1993

4.2.5.1. ACP des eaux de la Garonne

L'espace des variables met en évidence un regroupement des variables autour de l'axe I (cf. graphique 4-31). Ce dernier détient un fort pourcentage de variance exprimée : 66 %, contre seulement 12.4 % pour le facteur II. Le facteur I exprime la minéralisation. Comme pour les affluents, les eaux se répartissent entre un pôle anthropique et un pôle naturel. Le facteur II rend compte des variations saisonnières de température, car il est représenté uniquement par cette variable.

La position des variables dans le cercle des corrélations est pratiquement identique à celle des affluents précédemment étudiés (cf. chapitre 4.2.4). Ce n'est pas trop étonnant, car les eaux de la Garonne sont alimentées par ces différents affluents.

Les bicarbonates, le calcium et le magnésium sont bien corrélés entre eux, de même que les sels, et notamment le sodium avec les chlorures. Le dpH est lié aux eaux bicarbonatées calciques. Par contre, la température et la pCO₂ évoluent indépendamment des autres variables.

Dans l'espace des individus, les douze campagnes sont représentées chronologiquement trois par trois. Ceci pour des raisons de clarté, et pour une meilleure interprétation des résultats. Quatre groupes sont ainsi formés :

- 1) C1, C2, C3 (début de cycle);
- 2) C4, C5, C6 (étiage hivernal);
- 3) C7, C8, C9 (milieu de cycle);
- 4) C10, C11, C12 (étiage final).

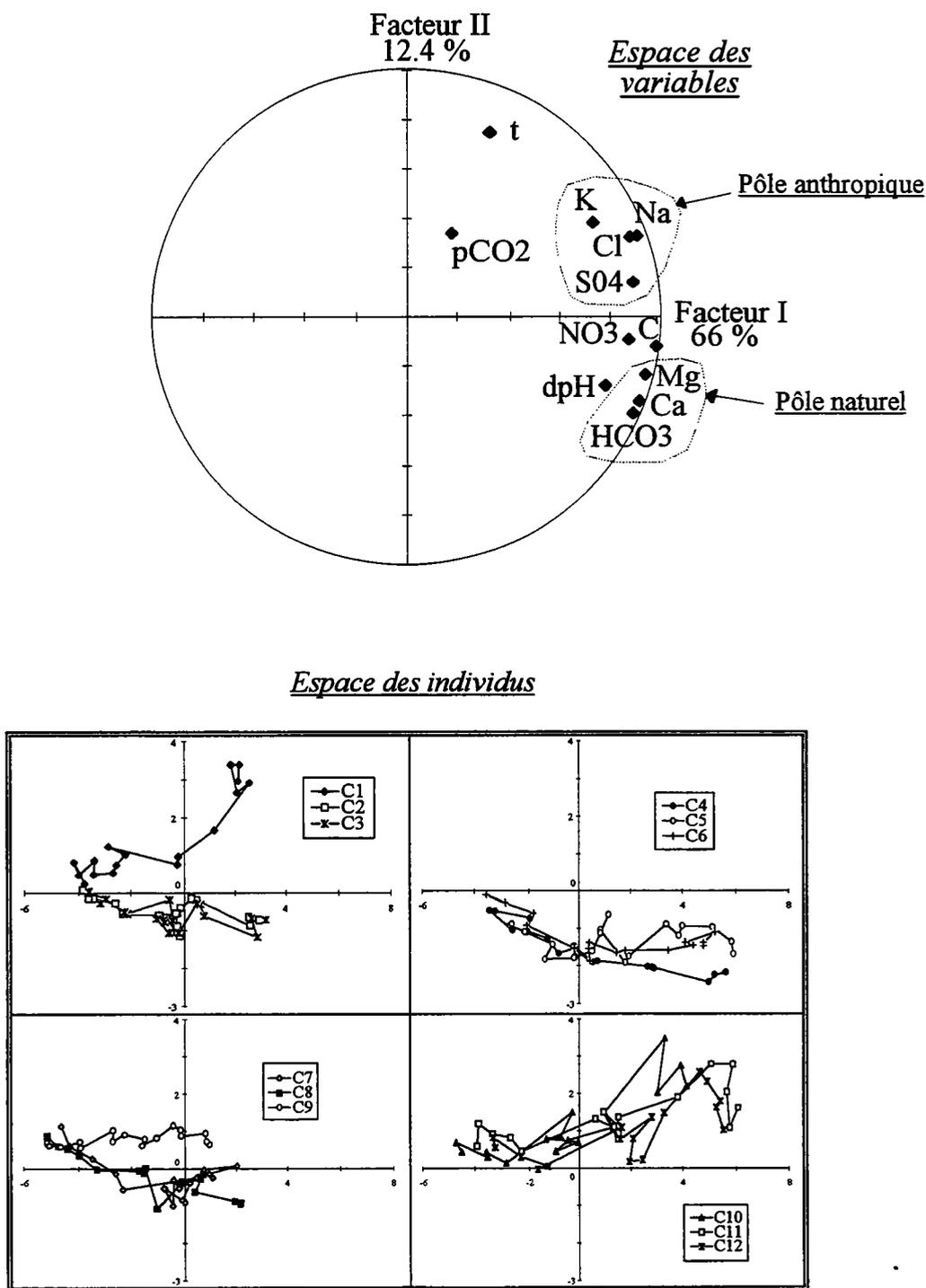
Un premier graphique représente la position générale des campagnes (cf. graphique 4-32). Un deuxième graphique permet d'étudier l'évolution des échantillons de chaque campagne (cf. graphique 4-33).

Le premier graphique montre que :

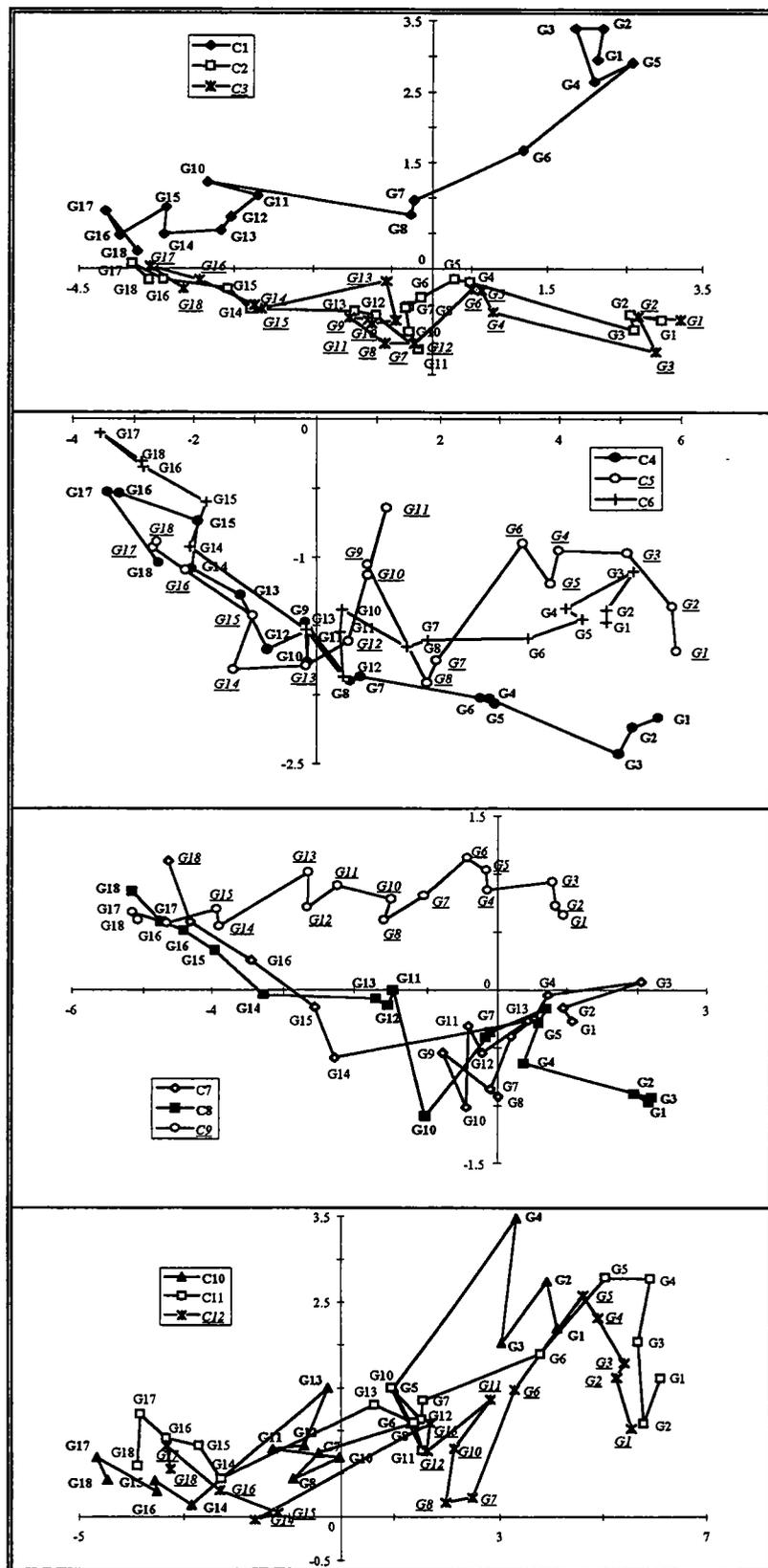
- **les eaux à l'exutoire du bassin sont beaucoup plus minéralisées durant l'étiage hivernal et l'étiage final;**
- **la différence de minéralisation, entre les stations les plus extrêmes, est plus élevée pour les eaux de l'étiage hivernal (campagnes 4, 5, 6) et de l'étiage final (campagnes 10, 11, 12). Ceci s'explique par une diminution du ruissellement, peu minéralisé, et des apports souterrains, plus minéralisés et plus importants, durant ces périodes;**
- les campagnes C1, C9, C10, C11 et C12 possèdent des eaux plus chaudes. Elles sont situées dans la partie positive de l'axe des ordonnées. Cette constatation a déjà été faite pour les affluents.

Le deuxième graphique indique :

- **une augmentation de la minéralisation des eaux de l'amont vers l'aval du bassin;**
- une évolution saccadée de l'hydrochimie au sein d'une même campagne. Une telle évolution est liée à l'hétérogénéité des apports intermédiaires et à un mauvais mélange des eaux.



Graphique 4 - 31. ACP sur les eaux de la Garonne, cycle 1993



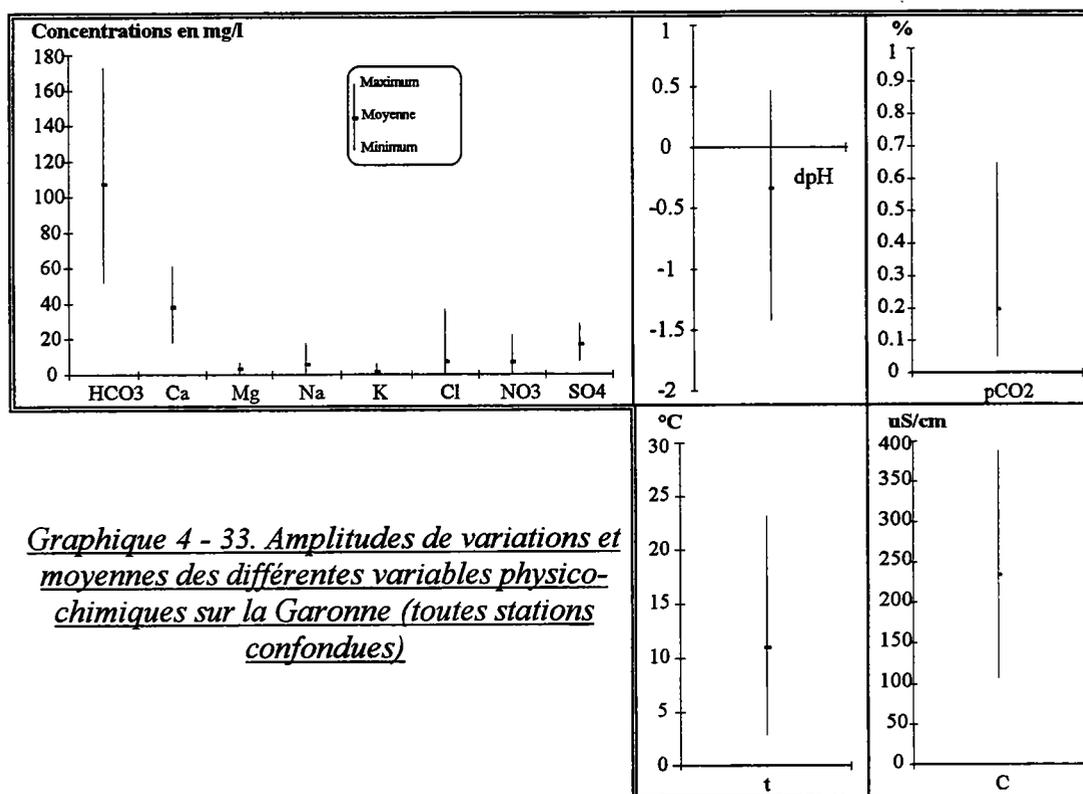
Graphique 4 - 32. Evolution des échantillons des différentes campagnes dans l'espace des individus

4.2.5.2. Amplitude de variation des variables

Les concentrations en bicarbonates, calcium et chlorures présentent les amplitudes les plus importantes. Elles varient respectivement entre : 52 et 173 mg/l, 18 et 62 mg/l, 0.8 et 37.2 mg/l. Les moyennes respectives sont de 107 mg/l, 38 mg/l, et 7 mg/l.

Les eaux de la Garonne ont des dpH variables, compris entre -1.42 et 0.47. La pCO₂, supérieure à 0.03 %, est comprise entre 0.05 et 0.65 %. Elle indique une participation des eaux souterraines dans les écoulements.

La température atteint son minimum en hiver : 3 °C, et son maximum à la fin de l'été : 23.3 °C. La conductivité, quant à elle, varie entre 107 et 389 uS/cm.



Graphique 4 - 33. Amplitudes de variations et moyennes des différentes variables physico-chimiques sur la Garonne (toutes stations confondues)

4.2.5.3. Evolution spatiale de quelques variables physiques et chimiques

Les variables retenues sont les mêmes que dans l'étude des affluents : bicarbonates, pCO₂, dpH, sodium et température. La silice (élément conservatif) est aussi étudiée pour la première campagne, afin de chiffrer l'augmentation du débit de la Garonne après l'apport de chaque affluent.

4.2.5.3.1. Les bicarbonates

Quelle que soit la campagne, les teneurs en bicarbonates augmentent de l'amont vers l'aval du bassin. Cette évolution s'effectue d'une façon pratiquement parallèle sur toutes les campagnes (cf. graphique 4-34). L'augmentation moyenne entre la station du Pont-du-Roi et la station de St-Aignan est d'environ 60 mg/l.

Parfois, la minéralisation bicarbonatée est très différente (campagne C1) entre les deux jours de prélèvement. C'est le cas de la campagne 1. Ceci est dû à une crue survenue entre ces deux jours.

Les concentrations les plus fortes sont relevées sur les campagnes hivernales. Les eaux de l'étiage final ne sont donc pas les plus concentrées comme on pourrait le croire.

La campagne C9 est la moins concentrée. Elle correspond à la période de fonte des neiges et des crues de printemps où les dilutions sont importantes.

L'évolution moyenne des bicarbonates le long de la Garonne permet de distinguer **trois hausses systématiques** dans les concentrations (cf. graphique 4-35) :

- la première entre G16 (Chaum) et G15 (Labroquère). Elle est liée aux apports de l'Ourse;
- la seconde entre G14 (Montréjeau) et G13 (aval confluence Ger). Elle est liée aux apports du Ger;
- la troisième entre G4 (Grenade) et G3 (aval confluence Save). Due à un mauvais mélange des eaux de la Save au niveau de G3, elle n'est pas effective. Cependant, en aval de Toulouse, il existe une légère augmentation des concentrations liée aux apports très bicarbonatés des affluents.

Une baisse des concentrations est remarquable entre G18 (Pont-du-Roi) et G17 (St-Béat). Ceci est dû à un mauvais mélange à la station G18 entre les eaux de la Garonne et celles, faiblement concentrées, issues d'une centrale hydroélectrique espagnole située juste en amont.

Certains affluents ont une composition moyenne très proche des eaux de la Garonne. Il s'agit de la Pique, de la Neste, du Salat et de l'Ariège. Comme la Garonne, ils possèdent une composante neigeuse importante, ce qui pourrait expliquer cette ressemblance.

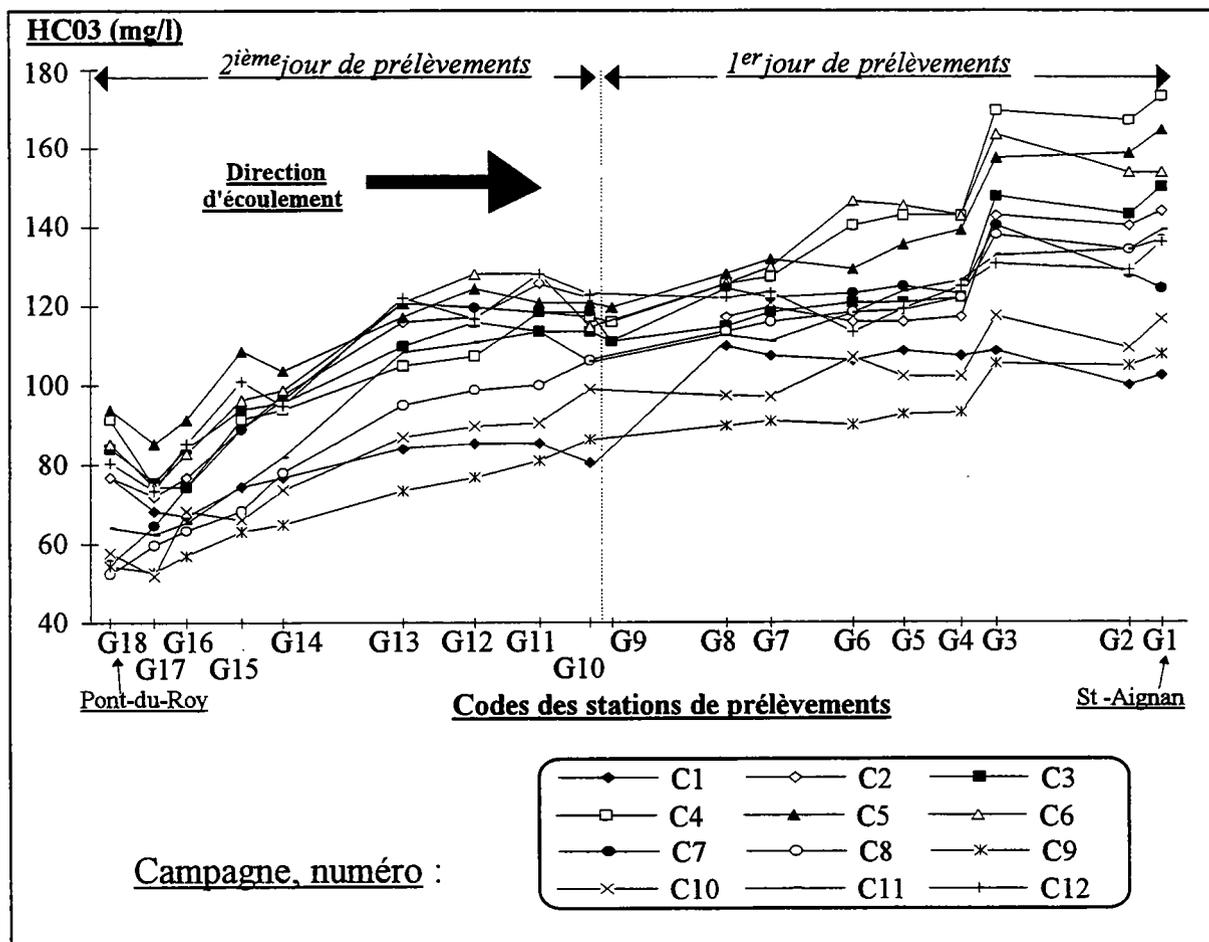
4.2.5.3.2. La pCO₂ et le dpH

La composante souterraine participe toujours aux écoulements, car les valeurs de la pCO₂ sont nettement supérieures à 0.03 % (valeur de la pCO₂ atmosphérique) (cf. graphique 4-36).

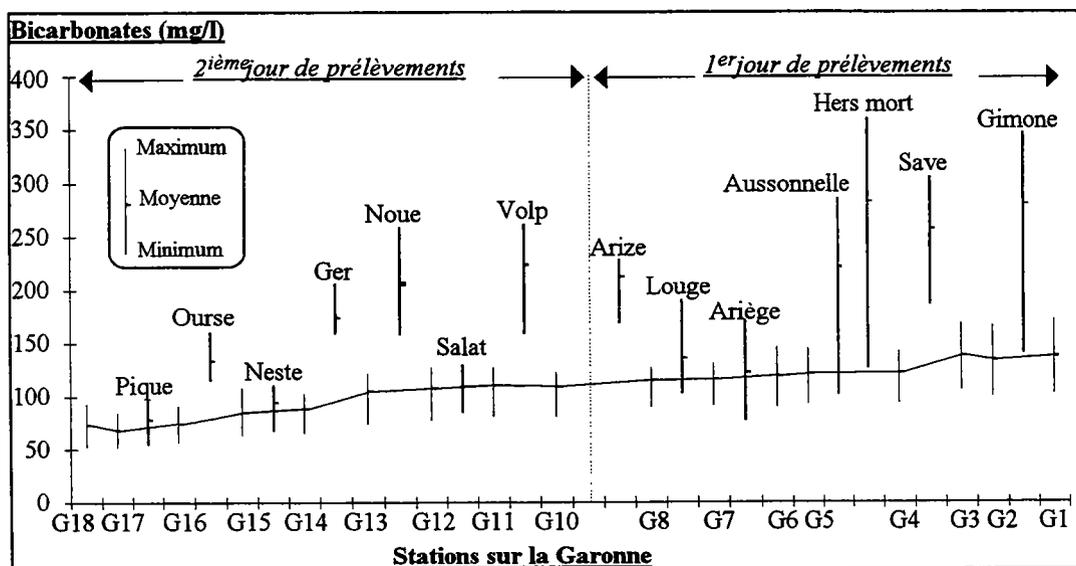
L'évolution moyenne de la pCO₂ n'est pas constante (cf. graphique 4-37). **Les montées de pCO₂ sont liées aux arrivées des eaux souterraines** de l'Ourse, du Ger, du Salat, de l'Ariège, et des affluents en aval de Toulouse. Cette constatation n'est pas déterminée à partir des pCO₂ moyennes de ces rivières, mais sur les valeurs instantanées.

Les eaux d'étiage, à circulation lente, ont une évolution saccadée, car le CO₂ dégaze moins facilement. Par contre, les eaux de printemps, à circulation plus rapide, ont une évolution de la pCO₂ moins saccadée.

En général, **les eaux de la Garonne sont sous-saturées** du fait de l'importance, surtout, des formations non carbonatées (cf. graphique 4-38). Quelques stations en aval de Toulouse présentent, tout de même, des eaux sursaturées. Ce sont les eaux de l'étiage hivernal et de l'étiage final.



Graphique 4 - 34. Evolution des bicarbonates le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993



Graphique 4 - 35. Représentation des variations de concentrations en bicarbonates sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne des bicarbonates sur la Garonne)

L'évolution moyenne du dpH (cf. graphique 4-39) est croissante jusqu'à Carbonne (G10), puis elle est quasiment-stable jusqu'à l'exutoire du bassin. L'acquisition de la saturation s'effectue donc en amont du bassin.

4.2.5.3.3. Le sodium

Les concentrations en sodium augmentent régulièrement jusqu'à Montréjeau (G14). Par la suite, les teneurs évoluent de façon hétérogène, car les eaux sont influencées par les effluents de stations d'épuration et d'industries diverses (cf. graphique 4-40).

La première perturbation, le premier grand saut de concentration se produit après Montréjeau (G14). Les teneurs sont multipliées par 2, 3 voire 4. La responsable est la papeterie de St-Gaudens qui utilise du sulfate de sodium et de la soude pour la cuisson de la pâte et le blanchiment.

Une deuxième perturbation apparait sur quelques campagnes (C1, C4, C5, C6, C12) entre G12 (amont confluence Salat) et G11 (Cazères). Elle est causée par les rejets des industries de Boussens et, surtout, par les eaux salées du Salat.

Le dernier effet anthropique à lieu entre G7 (Pinsaguel) et G5 (Lespinasse). Il est très visible sur les campagnes 12, 11, 5, 1 et 6. Il est d'autant plus marqué que les débits de la Garonne sont faibles. Ce sont les industries de Toulouse, notamment la SNPE et la Grande Paroisse, et la grande station d'épuration de Toulouse qui sont responsables. L'Aussonnelle, l'Hers mort, la Save et la Gimone contribuent aussi, en aval de Toulouse, à l'augmentation des teneurs.

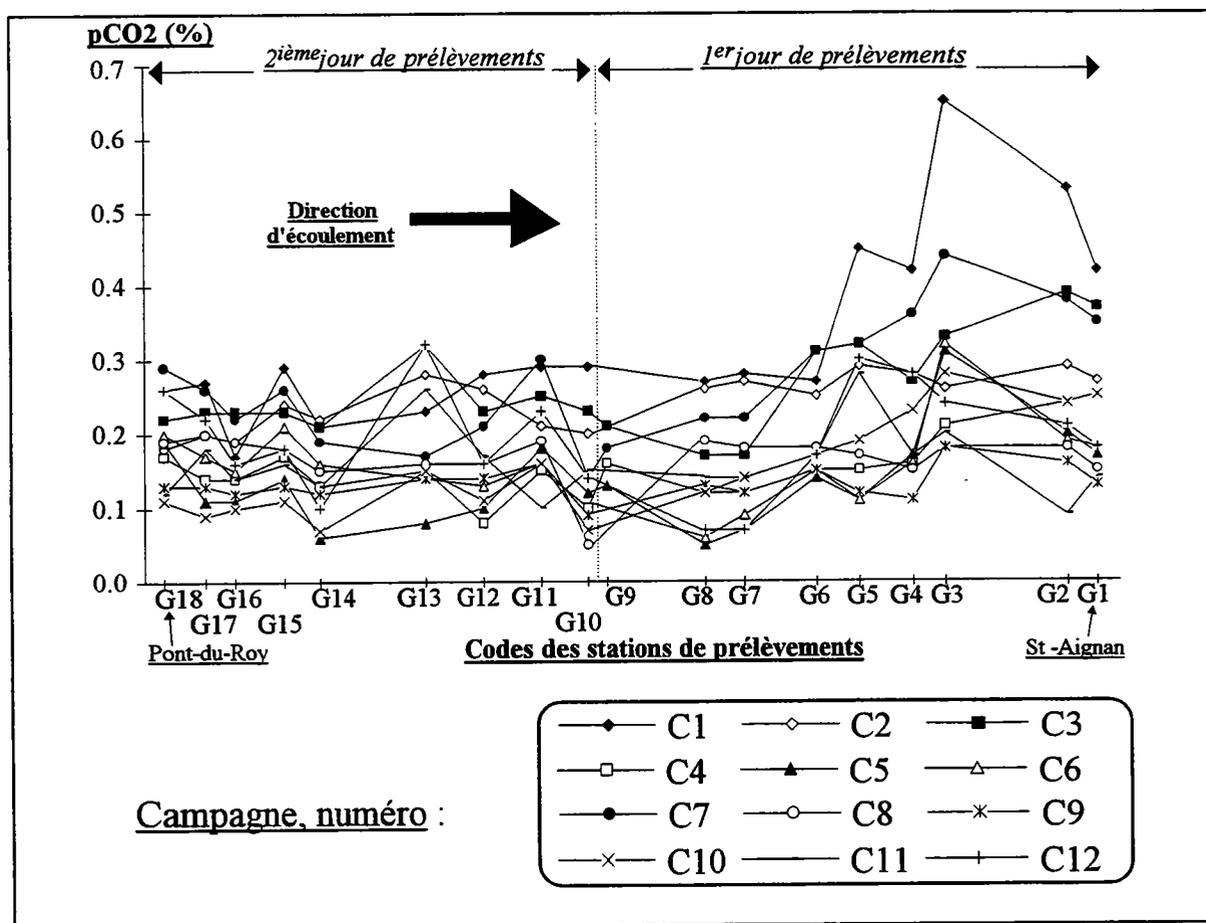
Le débit des effluents des industries n'est pas constant. C'est pourquoi, on note sur certaines portions de la Garonne, des pollutions ponctuelles.

En amont de Montréjeau, l'origine du sodium est donc naturelle puis en aval de Montréjeau, l'origine devient essentiellement anthropique. La concentration naturelle à l'exutoire de la Garonne n'est donc pas connue. Son approche pourrait être tout de même entreprise par le biais du calcul d'un gradient altitudinal comme dans les précipitations.

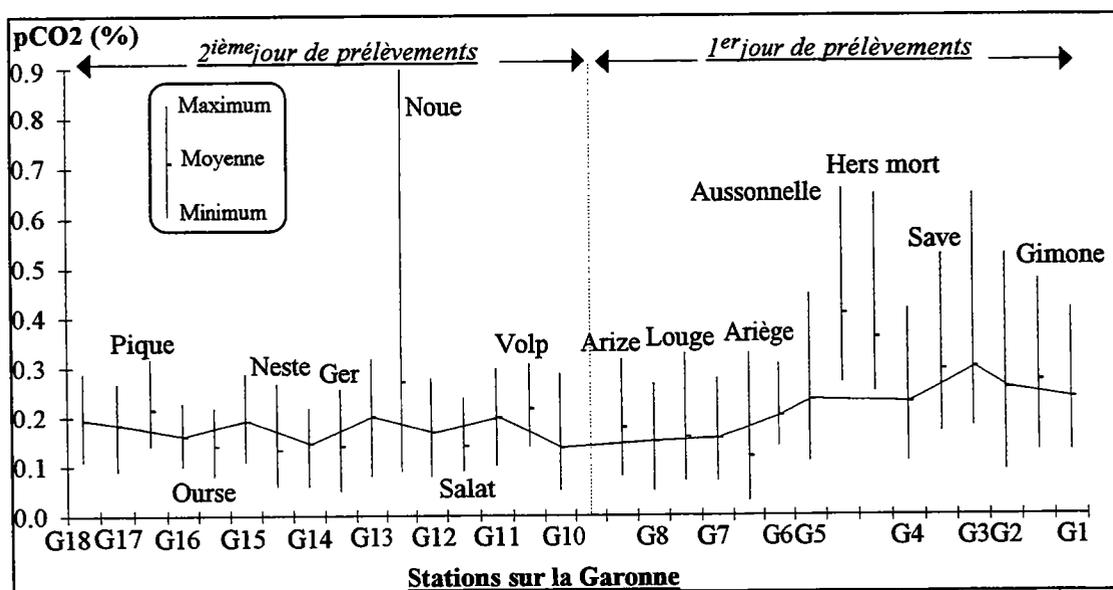
4.2.5.3.4. La température

La température augmente d'une façon assez régulière de l'amont vers l'aval du bassin (cf. graphique 4-41). Les écarts de températures constatés sont plus importants l'été que l'hiver (10 °C l'été, 2 °C l'hiver).

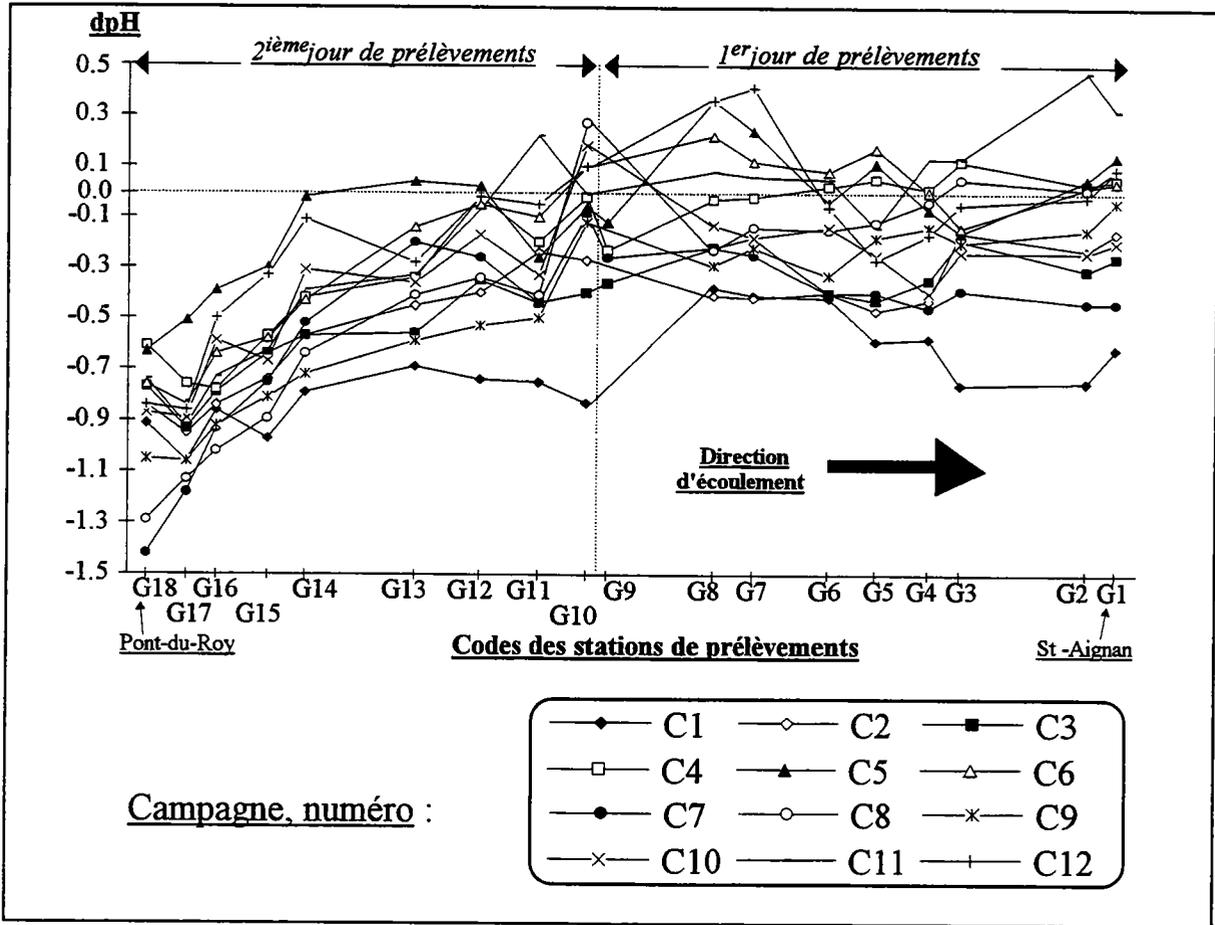
On note une augmentation de la température entre G11 et G9, car les prélèvements sont effectués sur une petite partie des débits (la majorité des débits étant déviés pour la centrale hydroélectrique de Carbonne). L'eau est donc plus facilement réchauffée. L'augmentation de la température est très nette à la fin de l'étiage final, car les conditions d'ensoleillement sont meilleures et l'écoulement plus lent.



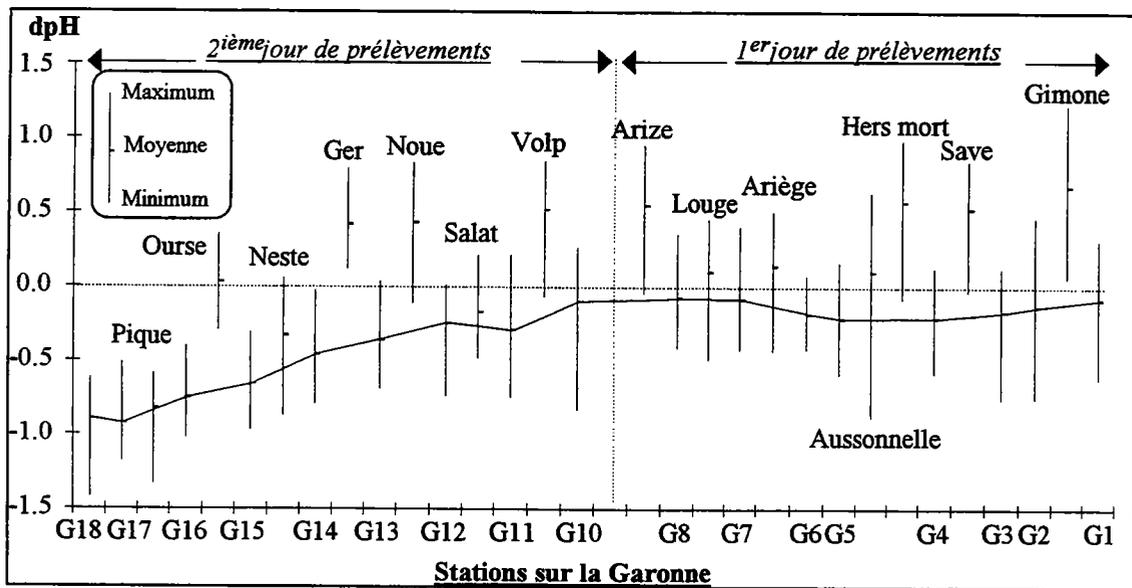
Graphique 4 - 36. Evolution de la pCO₂ le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993



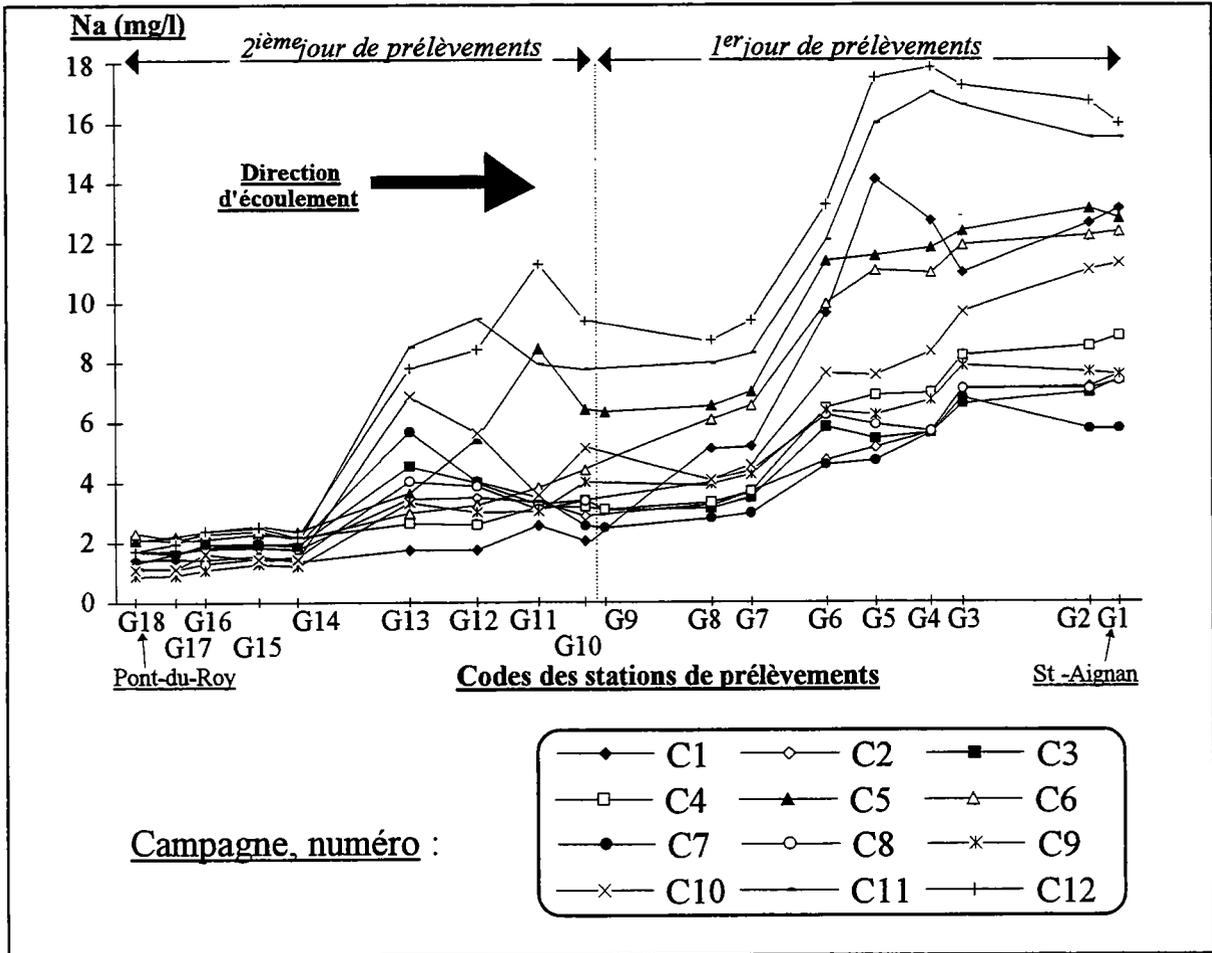
Graphique 4 - 37. Représentation des variations de la pCO₂ sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne de la pCO₂ sur la Garonne)



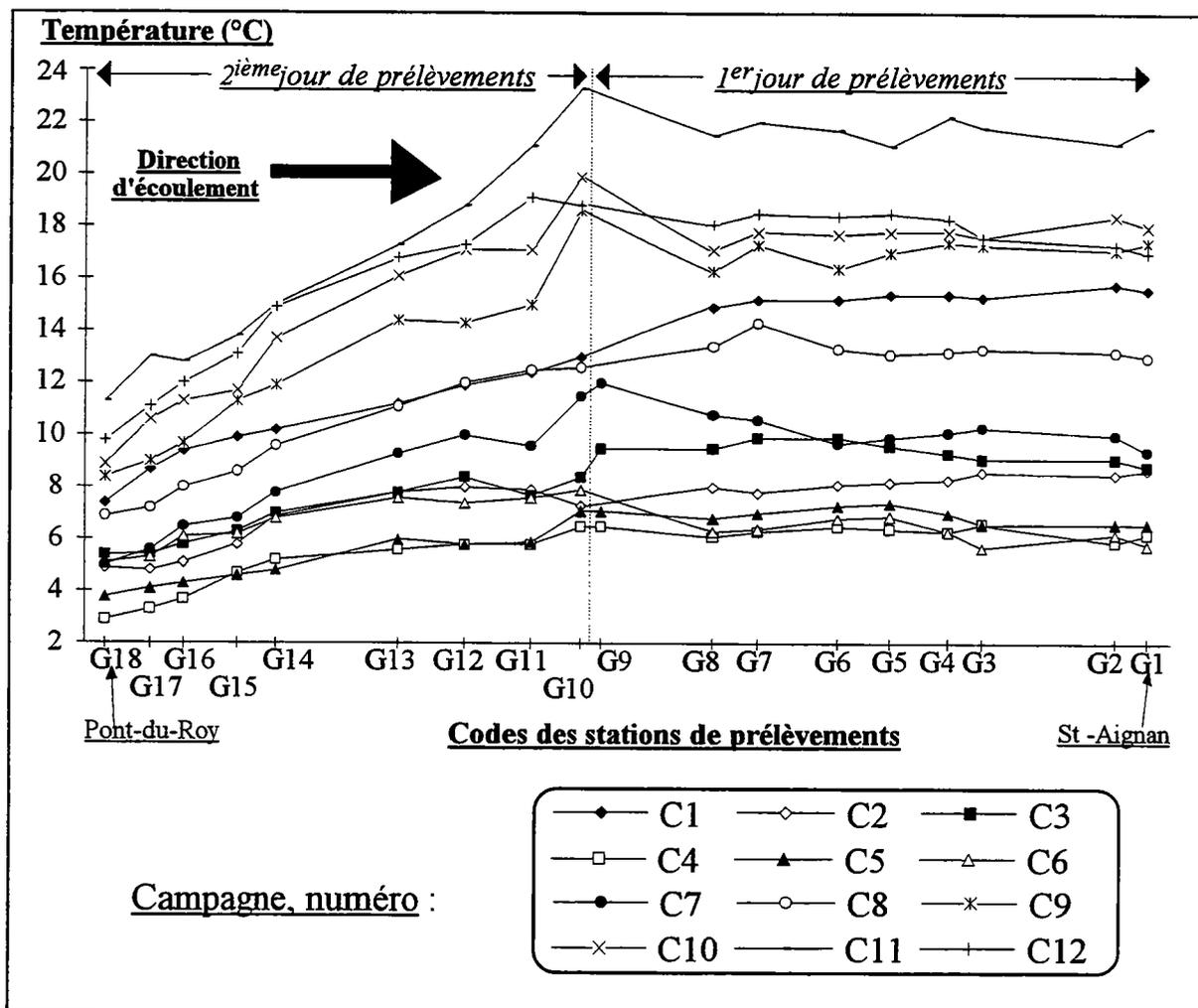
Graphique 4 - 38. Evolution du dpH le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993



Graphique 4 - 39. Représentation des variations du dpH sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne du dpH sur la Garonne)



Graphique 4 - 40. Evolution du sodium le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993



Graphique 4 - 41. Evolution de la température le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993

4.2.5.3.5. La silice

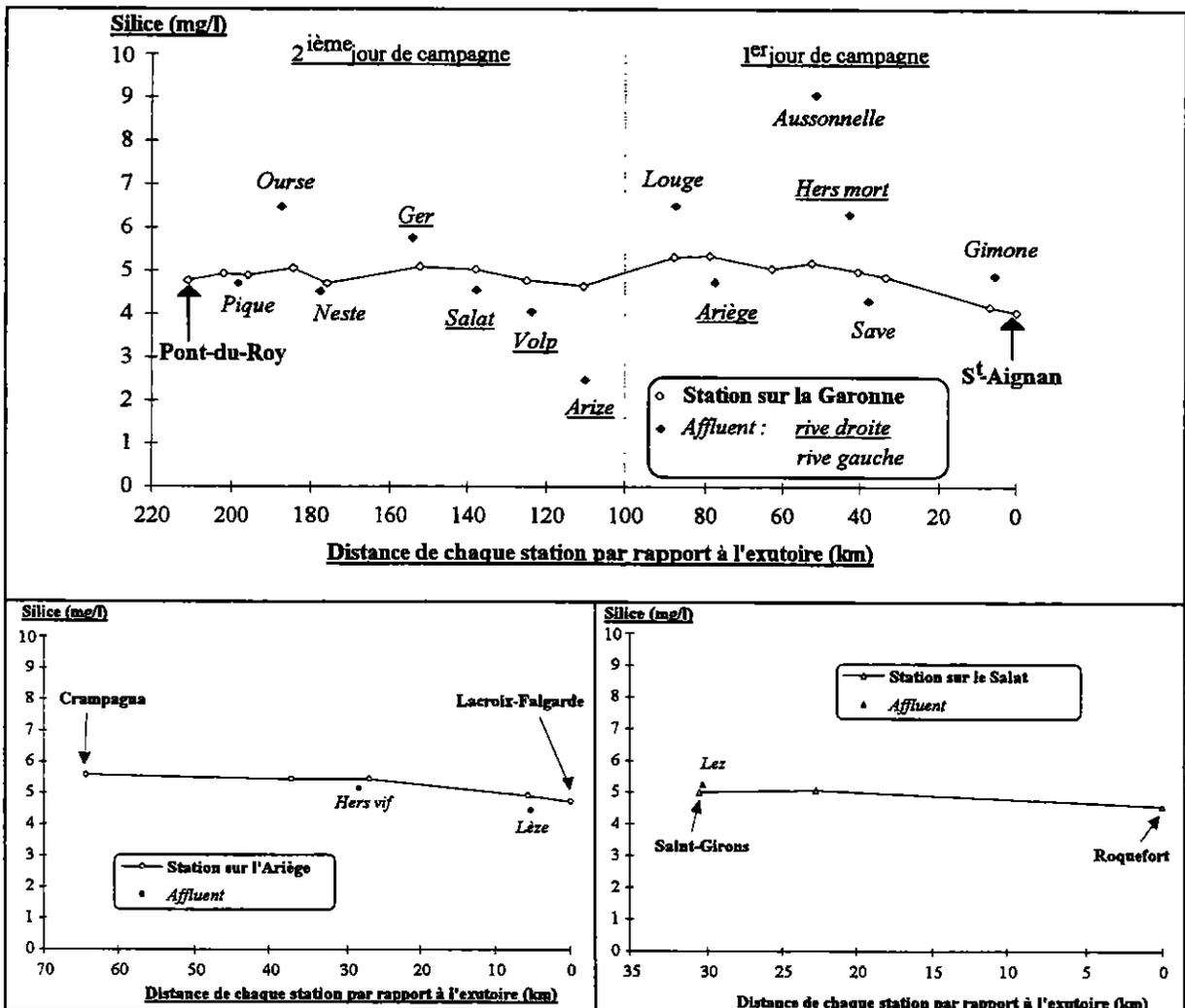
Les prélèvements ont été effectués en septembre 1992, durant la période d'étiage final.

La silice possède une évolution propre. Elle n'est pas corrélée aux autres variables physico-chimiques (elle caractérise, à elle seule, un facteur de l'ACP).

C'est un élément constitutif des minéraux silicatés, des roches métamorphiques, magmatiques, sédimentaires et détritiques (comme les grès et les argiles).

Les teneurs le long de la Garonne sont comprises entre 4 et 6 mg/l. Elles ont tendance à diminuer vers l'aval du bassin, comme, d'ailleurs, sur l'Ariège et le Salat (cf. graphique 4-42). La hausse sensible des concentrations entre les deux jours de campagne est liée au changement des conditions hydrologiques (des crues sont survenues le deuxième jour, abaissant ainsi les teneurs par effet de dilution).

L'Aussonnelle détient la concentration la plus élevée : 9 mg/l. L'Arize, quant à elle, est l'affluent de la Garonne le moins chargé en silice. Ses aquifères sont donc peu siliceux.



Graphique 4 - 42. Evolution des teneurs en Silice sur le bassin de la Garonne, étiage 1992

Aux teneurs et dans les conditions climatiques observées, la silice est un élément conservatif dans les eaux. C'est pour cette raison que nous l'avons utilisée pour évaluer les apports de quelques affluents de la Garonne, à partir de l'équation de conservation des masses (en négligeant les apports alluviaux) :

$$Q_{\text{Garonne aval}} \cdot S_{\text{Garonne aval}} = (Q_{\text{Garonne amont}} \cdot S_{\text{Garonne amont}}) + (Q_{\text{affluent}} \cdot S_{\text{affluent}})$$

$$\text{et } Q_{\text{Garonne aval}} = Q_{\text{Garonne amont}} + Q_{\text{affluent}}$$

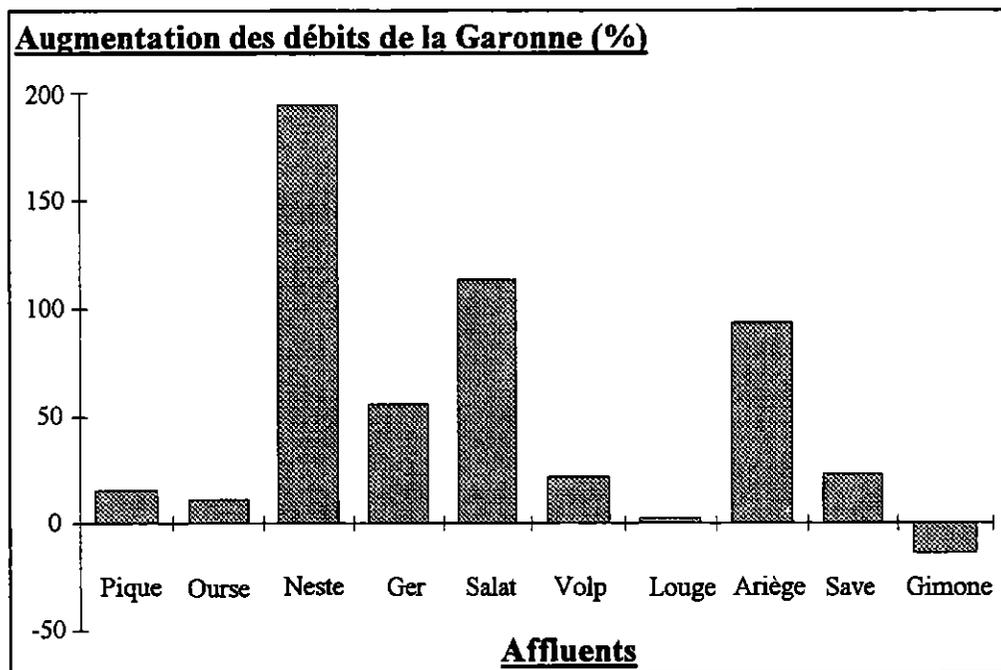
avec :

- Q : débit;
- S : concentration en silice;

Le débit de la Garonne au niveau de la station aval est alors donné par :

$$Q_{\text{Garonne aval}} = (Q_{\text{Garonne amont}}) \cdot ((S_{\text{Garonne amont}} - S_{\text{affluent}})/(S_{\text{Garonne aval}} - S_{\text{affluent}}))$$

On prendra le débit de la station amont égal à 1, afin de chiffrer l'augmentation du débit de la Garonne après l'apport de chaque affluent (cf. graphique 4-43).



Graphique 4 - 43. Augmentation des débits de la Garonne en fonction des affluents

Les augmentations principales des débits de la Garonne ont lieu aux confluences de la Neste, du Ger, du Salat et de l'Ariège. Elles sont respectivement de 200 %, de 50 %, de 110 % et de 90 %. L'Ariège et le Salat restent cependant les affluents les plus importants de la Garonne.

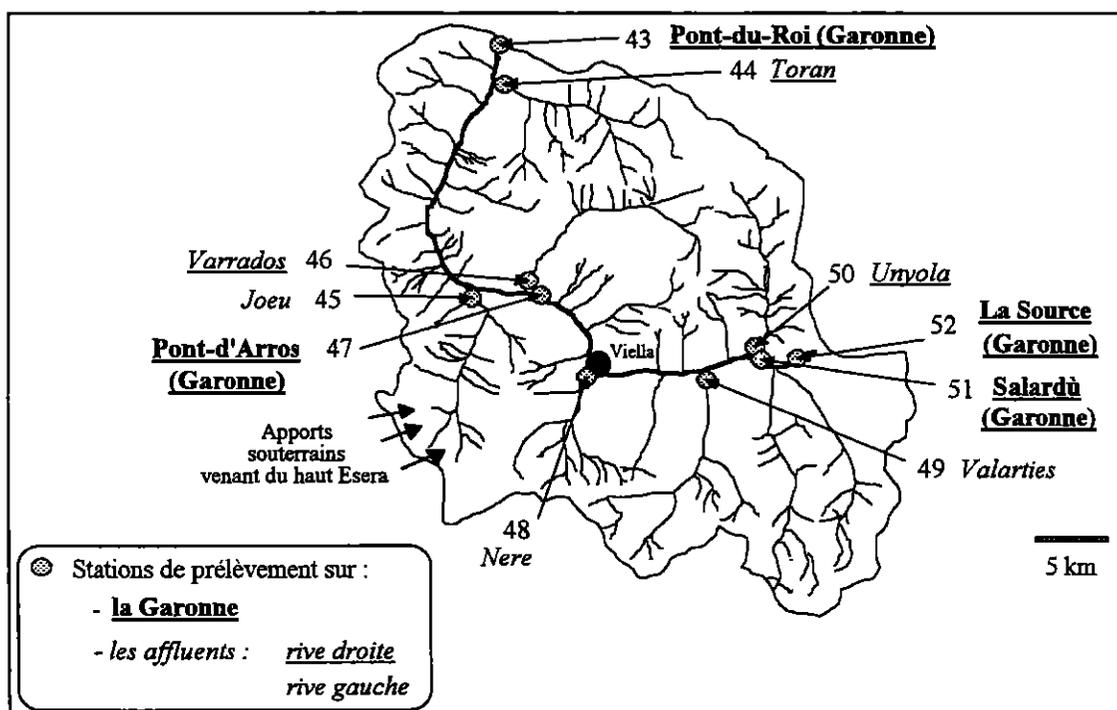
La valeur négative pour la Gimone montre que le mélange des eaux ne s'est pas effectué en ce point du bassin où les débits de la Garonne sont très importants.

4.2.5.4. Les sources de la Garonne : le Val d'Aran

Lors des prélèvements mensuels, nous nous sommes arrêtés à la station du Pont-du-Roi qui marque le passage de la Garonne sur le territoire français. Mais, le fleuve prend sa source en amont de cette station, dans la région du Val d'Aran, en Espagne. Afin de connaître l'hydrochimie de ses sources, en septembre 1993, une nouvelle campagne de prélèvements a été effectuée dans le Val d'Aran. Dix échantillons ont été prélevés : quatre sur la Garonne et six sur ses affluents les plus importants (cf. tableau 4-9) (cf. carte 4-3).

<u>Station</u> <u>(numéro)</u>	<u>Rivière étudiée</u> <u>(nom)</u>	<u>Station</u> <u>(position)</u>
43	Garonne	Pont-du-Roi
44	Toran	exutoire
45	Joëu	Es Bordes
46	Barrados	exutoire
47	Garonne	Pont-d'Arros
48	Nere	Viella
49	Valarties	exutoire
50	Unyola	Salardu
51	Garonne	Salardu
52	Garonne	Source

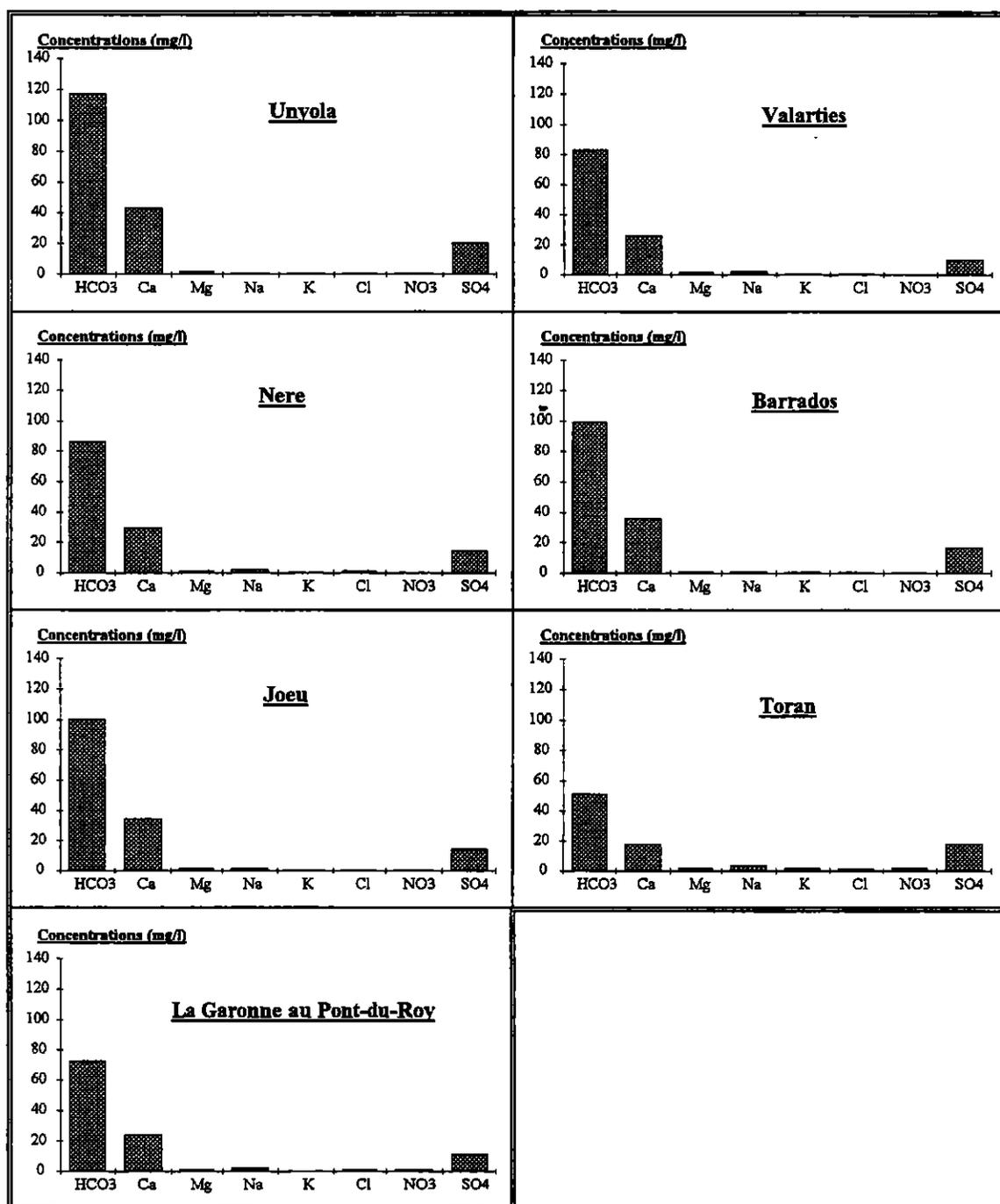
Tableau 4 - 9. Stations de prélèvement dans le val d'Aran



Carte 4 - 3. Position des stations de prélèvement dans le Val d'Aran (Espagne)

La région du Val d'Aran est située dans la zone axiale pyrénéenne. Elle est constituée de formations géologiques datées du Paléozoïque. On y trouve des granites, des pegmatites, des granodiorites, des terrains métamorphiques, des terrains carbonatés karstifiés et des dépôts fluvio-glaciaires quaternaires.

La source de la Garonne est située historiquement en amont de Salardù. Cependant, certains auteurs disent que la véritable source est issue de la résurgence karstique du Goueil de Jouéou dans la vallée d'Artiga. Dans cette étude, nous avons retenu la source historique.



Graphique 4 - 44. Concentrations des principaux éléments chimiques des eaux du Val d'Aran

Plusieurs affluents contribuent à l'alimentation de la Garonne : Ruda, Unyola, Valarties, Nere, Varrados, Joeu, Toran. Ils sont alimentés par de nombreux étangs et lacs qui sont les plus importants de la chaîne pyrénéenne. A titre d'exemple, le lac Mar possède une superficie d'environ 36 hectares et une profondeur maximale de 110 m.

Le réseau hydrographique naturel de la Garonne est perturbé par des barrages (dont l'exploitation est saisonnière), des centrales hydroélectriques, et des nombreuses dérivations et chutes. Les centrales les plus importantes sont : Arties (débit maximal turbiné = 10 m³/s) avec une hauteur de chute de 804 m, Aiguamotx (14 m³/s), Viella (14 m³/s), Benos (16 m³/s), Bossost (23 m³/s), et le Pont-du-Roi (48 m³/s). Une campagne plus précise permettrait d'estimer l'impact de ces influences artificielles, et de connaître l'évolution naturelle des eaux.

Les eaux souterraines proviennent des aquifères carbonatés du Cambro-Ordovicien, du Dévonien, et des formations fluvio-glaciaires. Une résurgence karstique importante, le "Güells del Joeu", est présente dans la vallée d'Artiga. Les eaux de cette source proviennent du bassin de l'Ebre depuis deux pertes principales : "El Forau de Alguallut" et "El Forau de la Llana".

L'analyse de l'hydrochimie de la Garonne et de ses affluents montre que **les eaux ont une minéralisation bicarbonatée calcique et sulfatée** (cf. graphique 4-44). Les affluents de la rive droite et les affluents de la rive gauche ont une hydrochimie identique. Les sulfates sont liés à la transformation des sulfures présents dans les siltites, les schistes, les marnes et les quartzites des formations siluriennes et ordoviciennes.

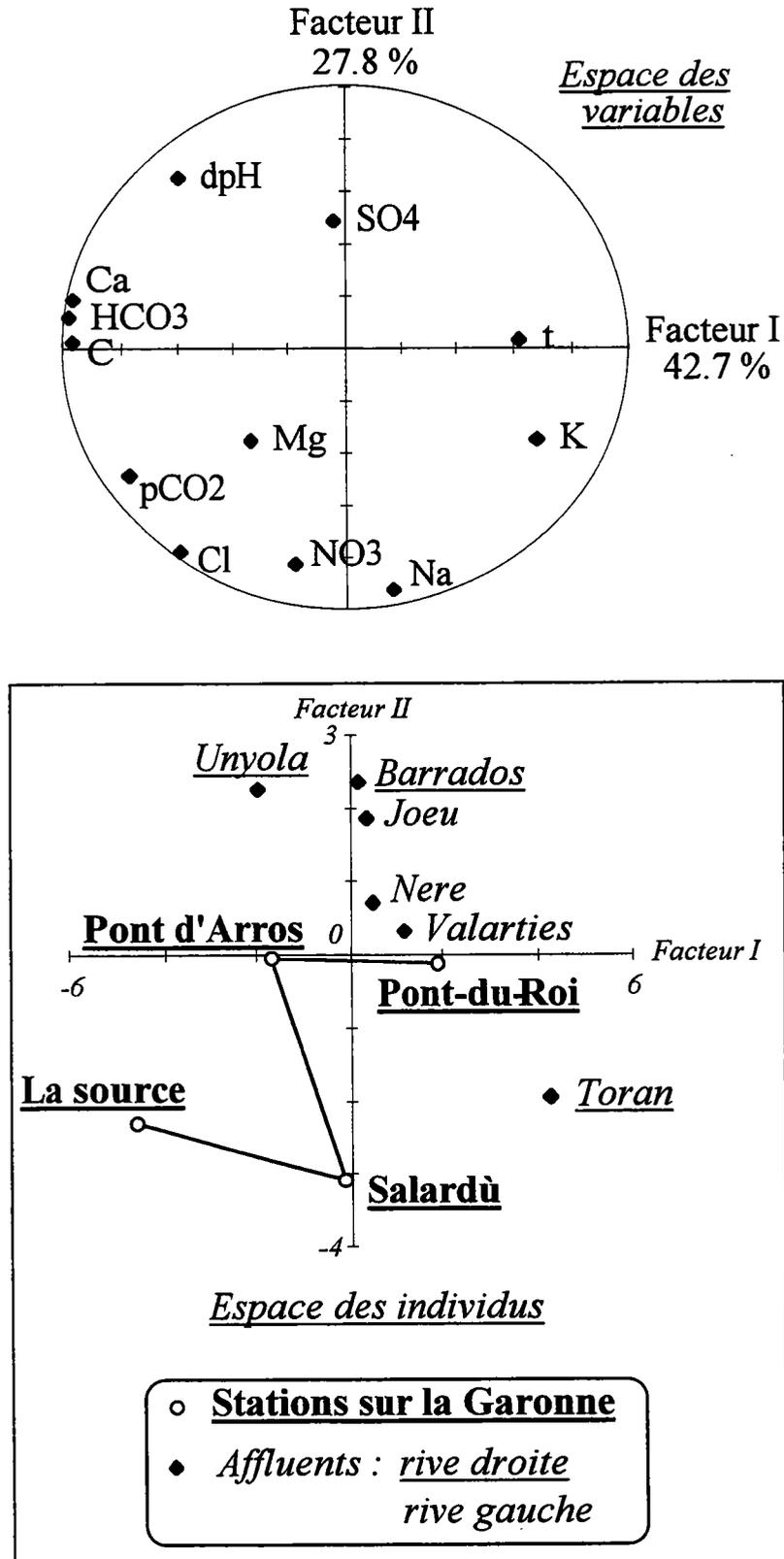
4.2.5.4.1. ACP sur les eaux du Val d'Aran

Les facteurs I et II représentent 70.5 % de la variance. Les données sont donc bien structurées (cf. graphique 4-45). L'espace des variables met en évidence :

- un pôle bicarbonaté calcique, présent sur le facteur I, mais non magnésien, ce qui indique l'existence de roches carbonatées plutôt calciques et non dolomitiques;
- un pôle salé sur le facteur II, représenté par le sodium, les chlorures et les nitrates. Il caractérise des eaux polluées par le salage des routes et les rejets domestiques;
- une opposition sur le facteur I entre la température, le potassium, et le pôle bicarbonaté calcique. Les eaux carbonatées apparaissent donc plus froides. C'est un indice d'apports souterrains;
- des variables indépendantes : le magnésium et les sulfates;
- la non corrélation entre la pCO₂ et le dpH.

Les principaux affluents (cf. espace des individus) apparaissent moins anthropisés que la Garonne. Cependant, le Toran présente une forte teneur en potassium d'origine anthropique (autour de 1.8 mg/l).

L'évolution des eaux de la Garonne n'est pas homogène. La source de la Garonne est minéralisée et possède une pCO₂ élevée (le débit est de quelques litres). Les concentrations en sels sont importantes. Elles sont liées aux activités hivernales (salage des routes). A Salardù, la minéralisation chute, car les apports des affluents provoquent des dilutions. Cependant, les eaux se chargent en éléments anthropiques (sodium, chlorures et nitrates). Cette pollution s'atténue jusqu'au Pont-du-Roi où les eaux apparaissent moins minéralisées du fait des apports des différents affluents.



Graphique 4 - 45. Analyse en composantes principales de la Garonne et de ses affluents dans le Val d'Aran

4.2.5.4.2. Evolution spatiale de quelques variables physico-chimiques

Les variables sont choisies par rapport à l'ACP.

4.2.5.4.2.1. Les bicarbonates, les sulfates et le magnésium

Le long de la Garonne, l'évolution des concentrations est quasi-identique pour les trois éléments. Après la source, les concentrations chutent, puis elles augmentent entre Salardù et le Pont-d'Arros, et enfin, elles baissent de nouveau jusqu'au Pont-du-Roi (cf. graphique 4-46).

Au Pont-d'Arros, les teneurs sont maximales pour les sulfates et le magnésium. La plus forte concentration en bicarbonates se trouve, quant à elle, au niveau de la source. L'Unyola est l'affluent qui détient les plus fortes concentrations.

La plupart des affluents ont des concentrations en bicarbonates inférieures à celles des eaux de la Garonne. Cependant, pour les sulfates, c'est l'inverse.

4.2.5.4.2.2. Les chlorures et le potassium

Sur la Garonne, les concentrations diminuent de la source jusqu'au Pont-du-Roi pour les chlorures, et seulement à partir de Salardù pour le potassium. Ces baisses sont liées aux dilutions que créent les différents affluents.

L'origine des chlorures, comme nous l'avons dit, est anthropique. Ils proviennent des sels utilisés pour les routes durant l'hiver. **Les fortes teneurs de la source indiquent un temps de séjour des eaux assez long dans l'aquifère**, car six mois se sont écoulés entre l'hiver et la période d'échantillonnage.

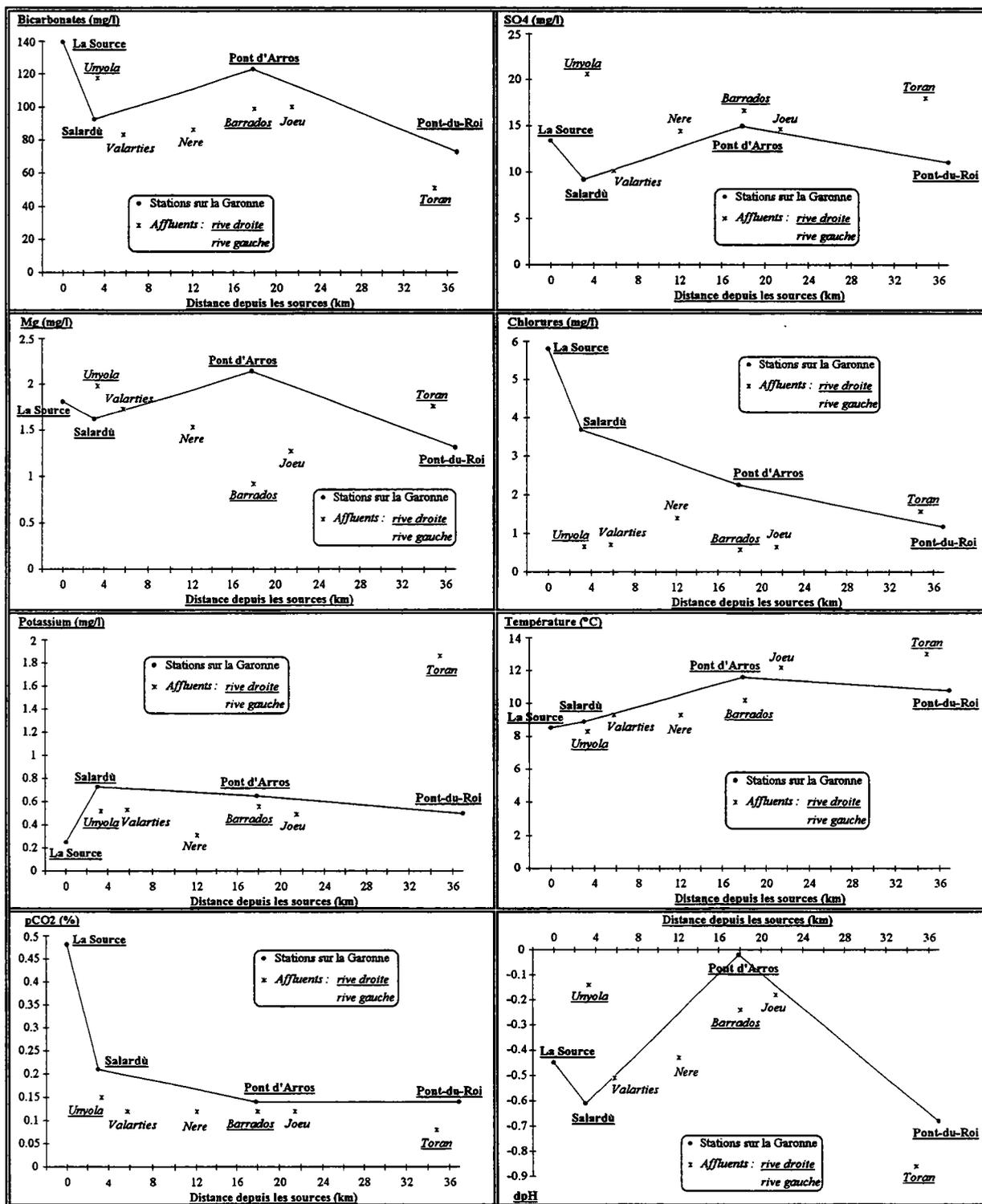
4.2.5.4.2.3. La température

On note, grosso modo, un réchauffement des eaux de l'amont vers l'aval du bassin qui est fonction de la diminution d'altitude.

4.2.5.4.2.4. La pCO₂ et le dpH

On note une diminution de la pCO₂ de l'amont vers l'aval du bassin. La contribution souterraine s'atténue donc vers l'aval du bassin du fait des apports des affluents qui possèdent des pCO₂ plus faibles (autour de 0.1 %).

Les eaux sont toutes sous-saturées. On peut en déduire que les formations carbonatées ne sont pas importantes ou que les temps de séjour sont très courts. Entre Salardù et le Pont-d'Arros, on note une montée régulière du dpH due aux apports des affluents. Le faible dpH au Pont-du-Roi est lié, en partie, aux apports du Toran qui possède un dpH inférieur à -0.8.



Graphique 4 - 46. Evolution de quelques variables physico-chimiques sur les eaux du Val d'Aran

4.2.6. Caractérisation et évolution du chimisme des eaux dans le bassin de l'Ariège, du Salat et de la Neste

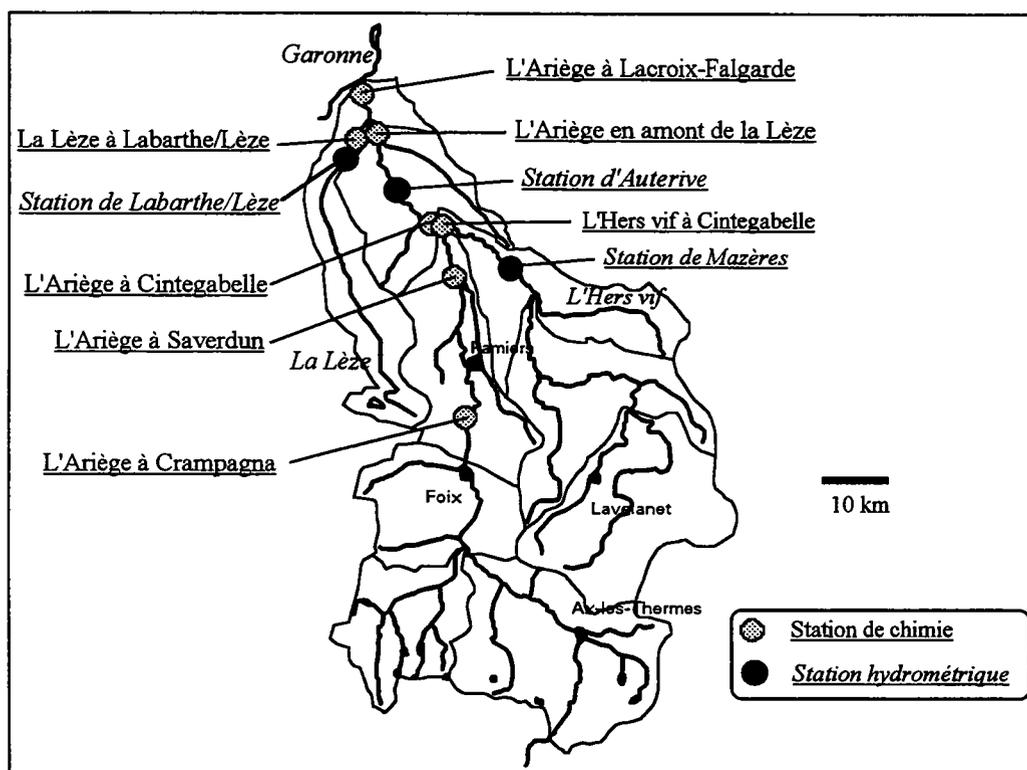
En plus des prélèvements sur la Garonne et sur ses affluents, des campagnes d'échantillonnages ont été effectuées parallèlement sur les trois principaux sous-bassins (l'Ariège, le Salat et la Neste), afin de mieux connaître l'origine de leur hydrochimie et les apports de leurs nappes alluviales (celle de l'Ariège notamment).

4.2.6.1. Evolution des eaux dans le bassin de l'Ariège

Cinq stations ont été choisies afin d'estimer les apports de la nappe alluviale de l'Ariège (cf. carte 4-4) :

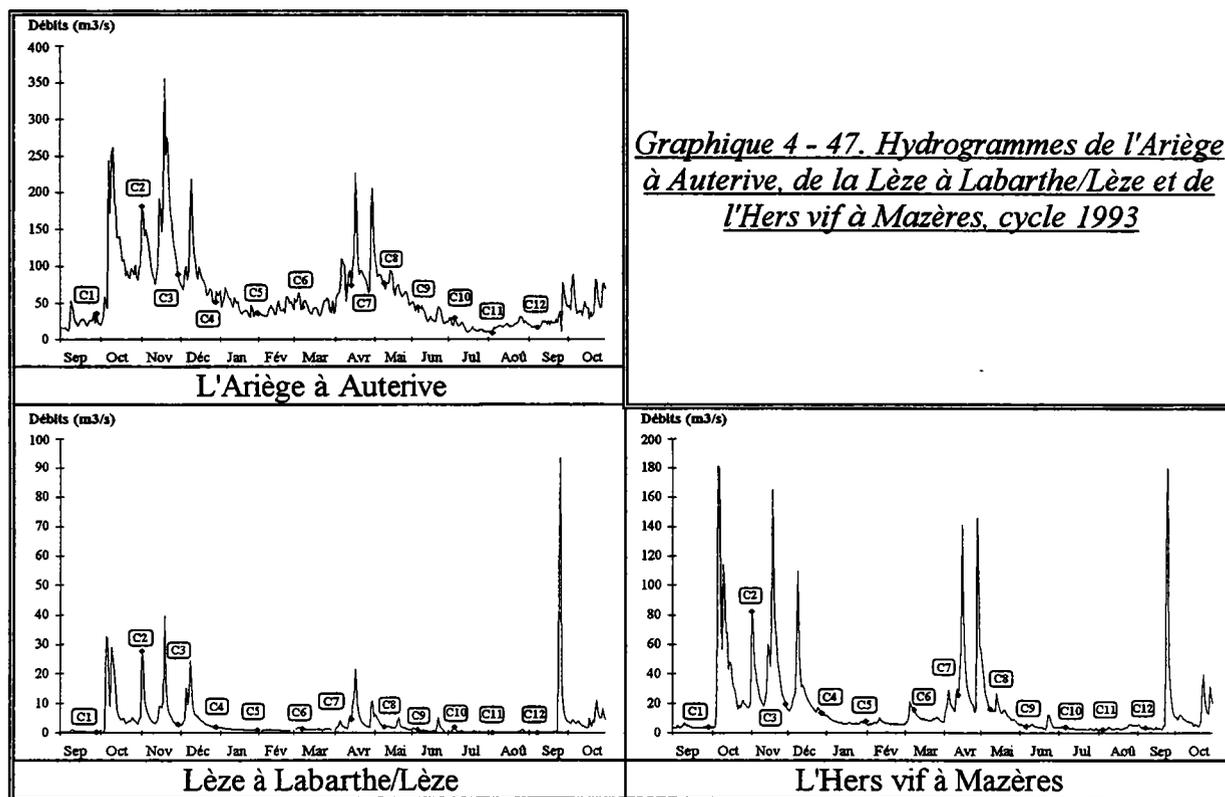
- une station à l'exutoire du bassin : *la station de Lacroix-Falgarde*;
- une station en amont de la nappe alluviale : *la station de Crampagna*. Elle permet de connaître l'hydrochimie des eaux en amont du bassin;
- trois stations entre les deux précédentes : *la station de Saverdun*, *la station de Cintegabelle* et *la station en amont de la confluence de l'Ariège et de la Lèze*.

Les principaux affluents de l'Ariège ont aussi fait l'objet d'un suivi. Il s'agit de *l'Hers vif* et de *la Lèze*.



Carte 4 - 4. Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques sur le bassin de l'Ariège

Les prélèvements ont été effectués au pas mensuel, ce qui permet de suivre l'évolution de l'hydrochimie sur les quatre périodes du cycle 1993 (cf. graphique 4-47).



Graphique 4 - 47. Hydrogrammes de l'Ariège à Auterive, de la Lèze à Labarthe/Lèze et de l'Hers vif à Mazères, cycle 1993

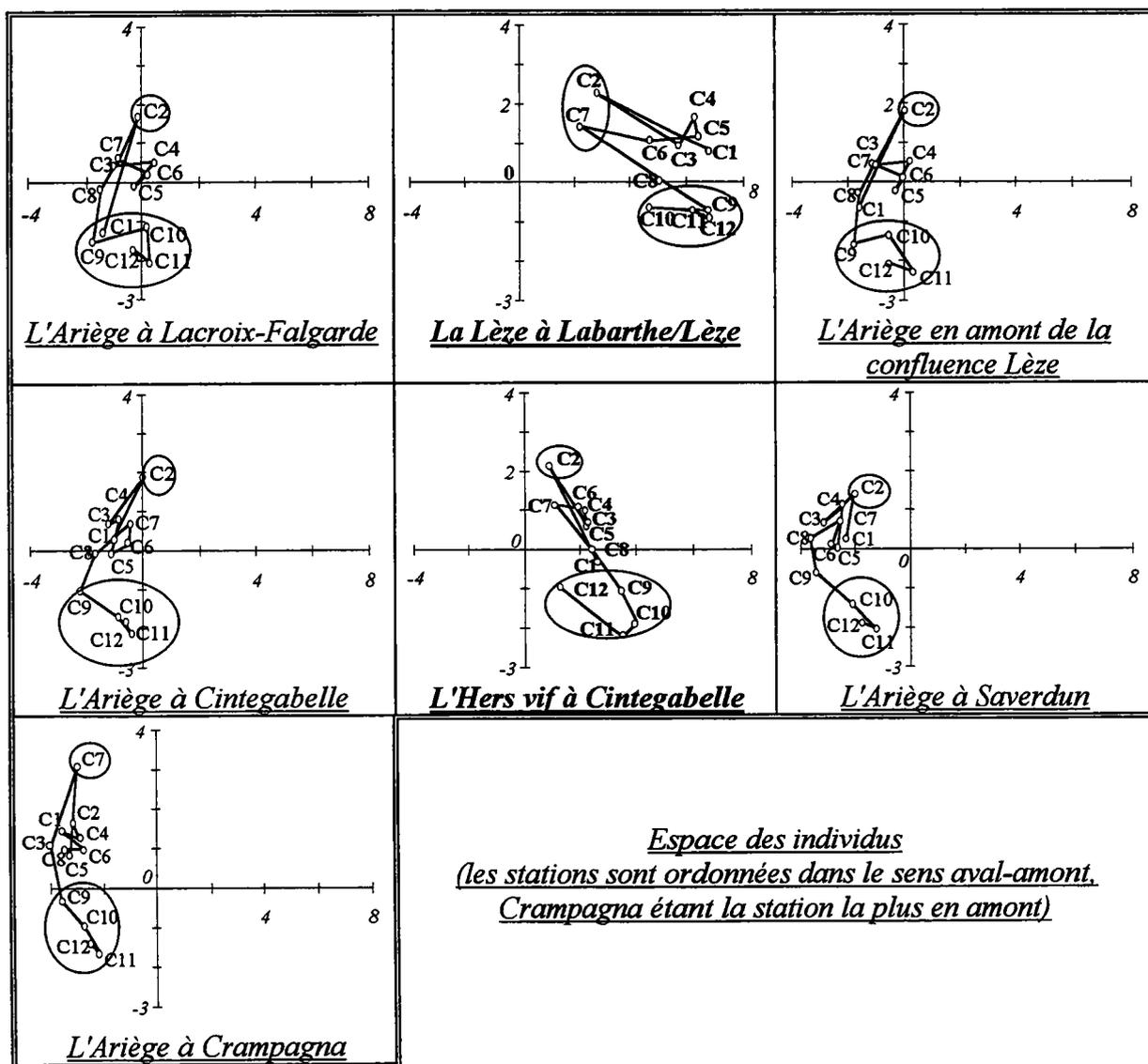
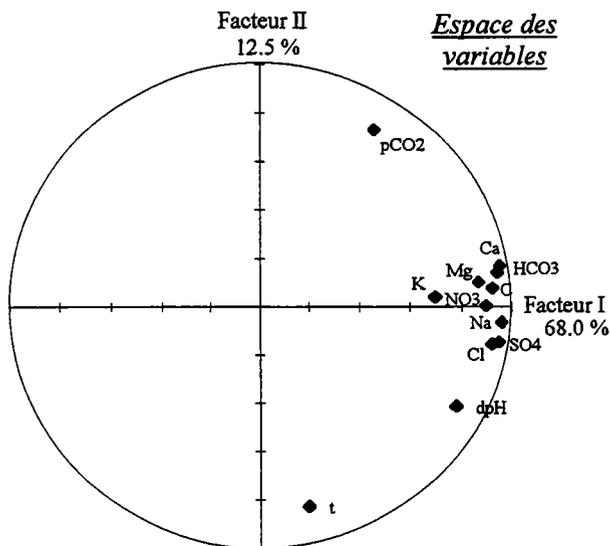
4.2.6.1.1. ACP sur les eaux du bassin de l'Ariège

Cette analyse intègre les douze variables physico-chimiques habituellement étudiées des douze échantillons de chacune des sept stations du bassin (soit 84 échantillons au total).

Dans l'espace des variables, le facteur I représente 68 % de la variance exprimée (cf. graphique 4-48). C'est le facteur principal. Il oppose des eaux peu minéralisées à des eaux plus minéralisées. Le facteur II (12.5 % de la variance) est caractérisé par la température et la pCO₂.

La position des échantillons dans l'espace des individus montre :

- que l'évolution de l'hydrochimie durant le cycle est pratiquement identique pour toutes les stations;
- que l'hydrochimie évolue essentiellement sur le facteur II;
- que les eaux de début de cycle (C2) ont une position extrême dans l'espace des individus. Elles sont caractérisées par des pCO₂ importantes et des températures faibles. C'est un indice d'apports souterrains;
- une augmentation de la minéralisation sur l'Ariège de l'amont vers l'aval du bassin;
- la forte minéralisation des eaux de l'Hers vif et de la Lèze;
- que l'on rencontre les eaux les plus chaudes à la fin du cycle (C9, C10, C11, C12).



Graphique 4 - 48. ACP sur les eaux du bassin de l'Ariège, cycle 1993

4.2.6.1.2. Mise en évidence des apports de la nappe

Nous avons étudié l'évolution temporelle de quelques variables physico-chimiques choisies par rapport à l'ACP, et notamment celle des nitrates, car ils proviennent exclusivement de la nappe alluviale.

4.2.6.1.2.1. Les bicarbonates

Sur les stations de l'Ariège, les courbes de concentrations présentent des fluctuations parallèles, relativement groupées (cf. graphique 4-49). L'augmentation la plus sensible se situe entre l'Ariège à Saverdun et l'Ariège à Cintegabelle. Elle est due aux apports de l'Hers vif, qui est nettement plus concentré. Par contre, la Lèze, en dépit de teneurs élevées, ne provoque pas de hausse sensible entre l'amont de sa confluence et Lacroix-Falgarde. **La minéralisation carbonatée provient donc essentiellement du bassin en amont de Crampagna et du bassin de l'Hers vif. La nappe ne participe que très faiblement à cette minéralisation.**

La courbe de l'Ariège à Cintegabelle se trouve parfois au-dessus de celle de l'Ariège à Lacroix-Falgarde (C1 et C2). C'est-à-dire que les eaux à Cintegabelle sont plus concentrées que celles à Lacroix-Falgarde. Ceci s'explique par une dilution en aval du bassin due à du ruissellement.

Les teneurs les plus élevées sont atteintes sur l'Ariège en début de cycle (C2) et durant l'étiage hivernal (C4 et C6). Après la baisse des concentrations au printemps (C7, C8, C9) provoquée par la fonte des neiges et les crues, on note une petite remontée des teneurs.

4.2.6.1.2.2. Les sulfates et le sodium

L'évolution générale de ces éléments sur l'Ariège est quasi-identique à celle des bicarbonates. Cependant, l'étiage hivernal et l'étiage final sont marqués par des concentrations plus élevées.

Les apports de l'Hers vif provoquent une augmentation des teneurs de l'Ariège à Cintegabelle. A part cette augmentation, il n'existe pas de hausse sensible. **Les apports de la nappe en sulfates sont donc faibles** durant le cycle.

Pour le sodium, on note une hausse de concentration entre l'Ariège à Cintegabelle et l'Ariège en amont de la confluence avec la Lèze. Celle-ci peut être due à des pollutions domestiques ou à des apports provenant de la nappe.

L'Hers vif et la Lèze possèdent les plus fortes concentrations en sodium et en sulfates. L'évolution temporelle de ces éléments est quasi-similaire, mis à part pour la période d'étiage où, pour la Lèze, les concentrations augmentent, et, pour l'Hers vif, elles diminuent. Cette divergence peut s'expliquer par une dilution provoquée par les eaux du barrage de Montbel sur l'Hers vif, qui est destiné au soutien d'étiage et à l'irrigation.

4.2.6.1.2.3. Les nitrates

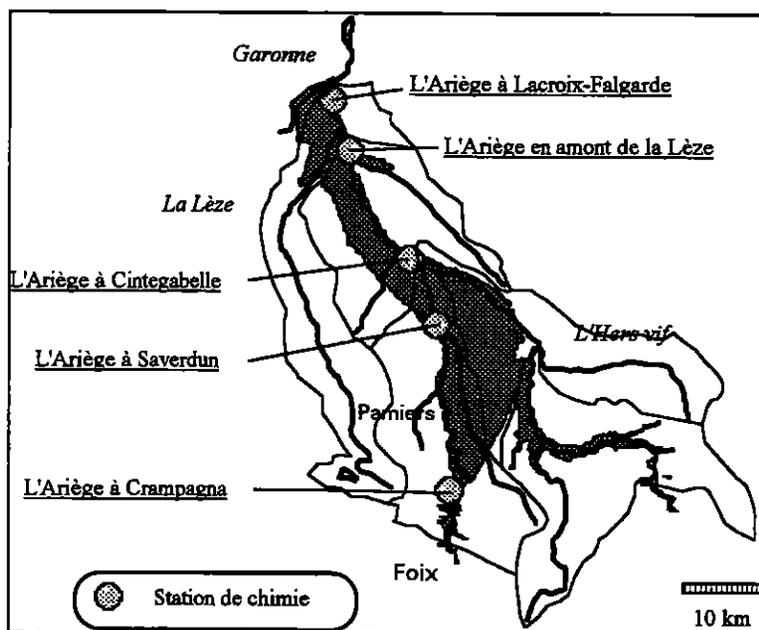
L'étude des concentrations en nitrates est intéressante, car elle permet de mettre en évidence les apports de la nappe alluviale. Cette dernière détient, en effet, des concentrations très élevées provenant de l'usage d'engrais pour l'agriculture.

A Crampagna (cf. carte 4-5), les teneurs sont faibles et pratiquement constantes durant le cycle (2.5 mg/l). A Saverdun, les teneurs sont plus fortes, ce qui met en évidence des apports souterrains provenant de la nappe (cf. graphique 4-50). Ces derniers sont présents durant la totalité du cycle, mais ils sont moins importants au printemps (C7, C8, C9), la montée des eaux en cette période impliquant une participation plus faible de l'aquifère.

Les apports de l'Hers vif provoquent une augmentation brutale des concentrations sur l'Ariège à Cintegabelle.

On note une nouvelle augmentation des concentrations sur l'Ariège entre la station de Cintegabelle et la station en amont de la confluence de la Lèze. Elle est encore une fois liée aux apports de la nappe. Ceux-ci sont importants en début cycle (saison traditionnelle d'épandage) et durant l'étiage hivernal.

Si on considère que les concentrations en nitrates sont constantes dans la nappe, on s'aperçoit que les apports, entre Crampagna et Saverdun, d'une part, et entre Cintegabelle et Lacroix-Falgarde, d'autre part, sont différents (cf. graphique 4-51). **Dans le premier cas, la contribution est présente sur tout le cycle, dans le deuxième cas, les apports se situent principalement en début de cycle et durant l'étiage hivernal.** Ceci implique que les réserves sont plus abondantes en amont de Saverdun, ce qui est tout à fait compatible avec les perméabilités et les épaisseurs connues des formations alluviales.

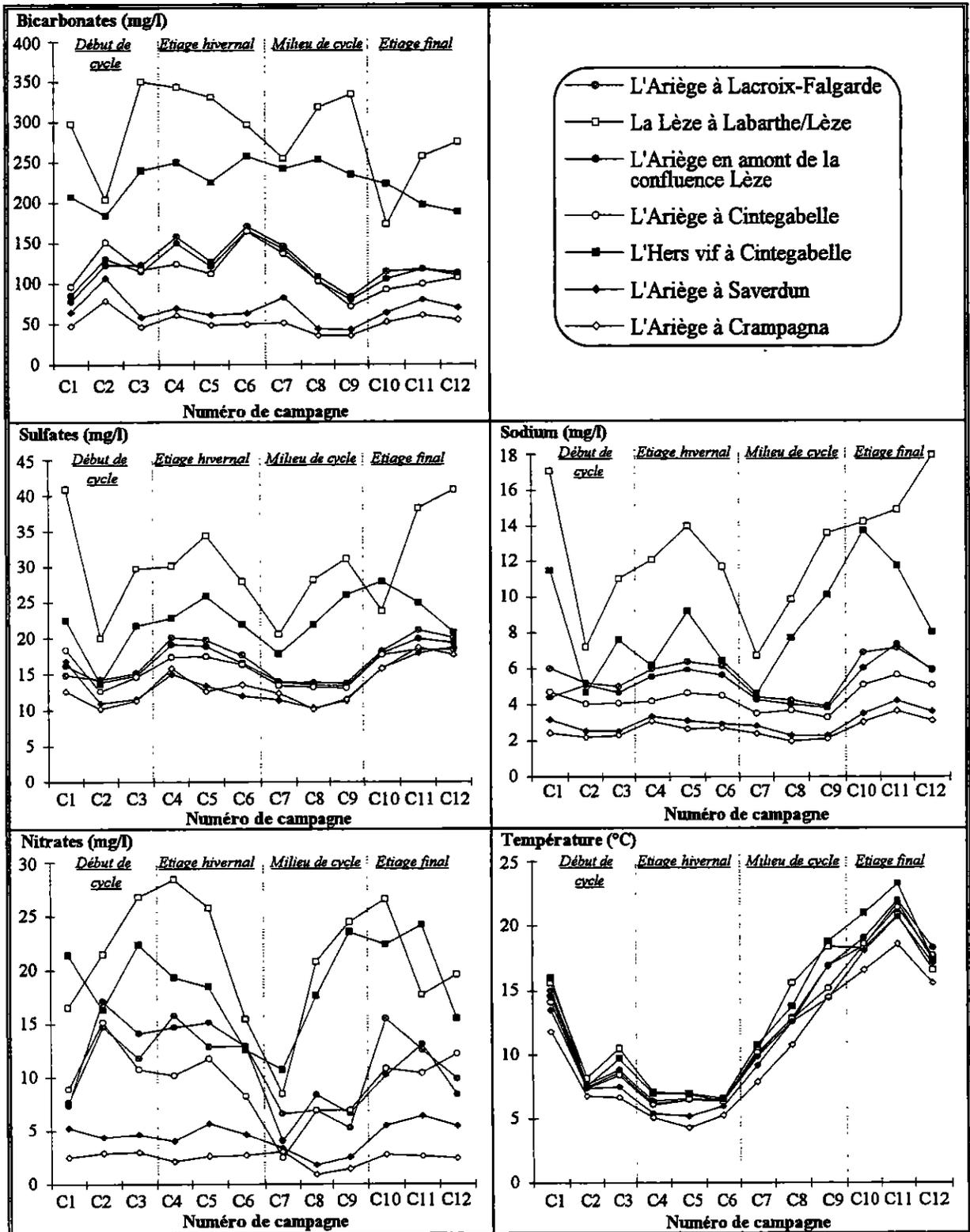


Carte 4 - 5. Nappe alluviale de l'Ariège

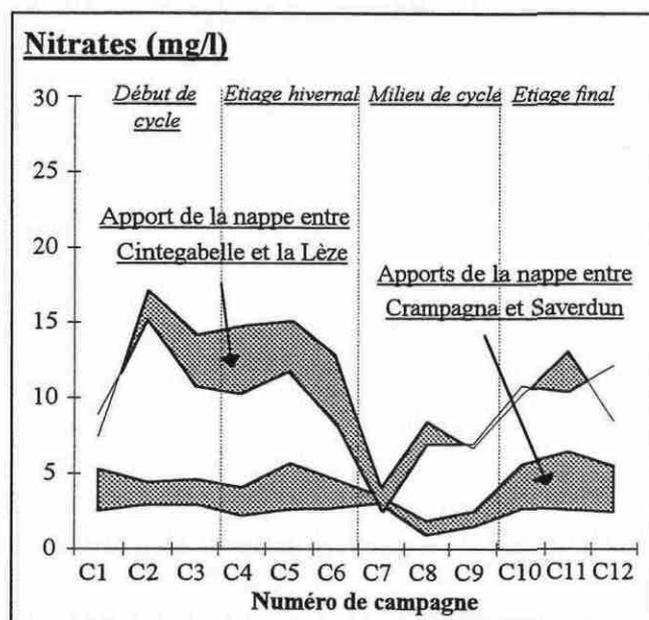
4.2.6.1.2.4. La température

C'est un paramètre complètement indépendant des autres éléments. Il est lié aux variations climatiques.

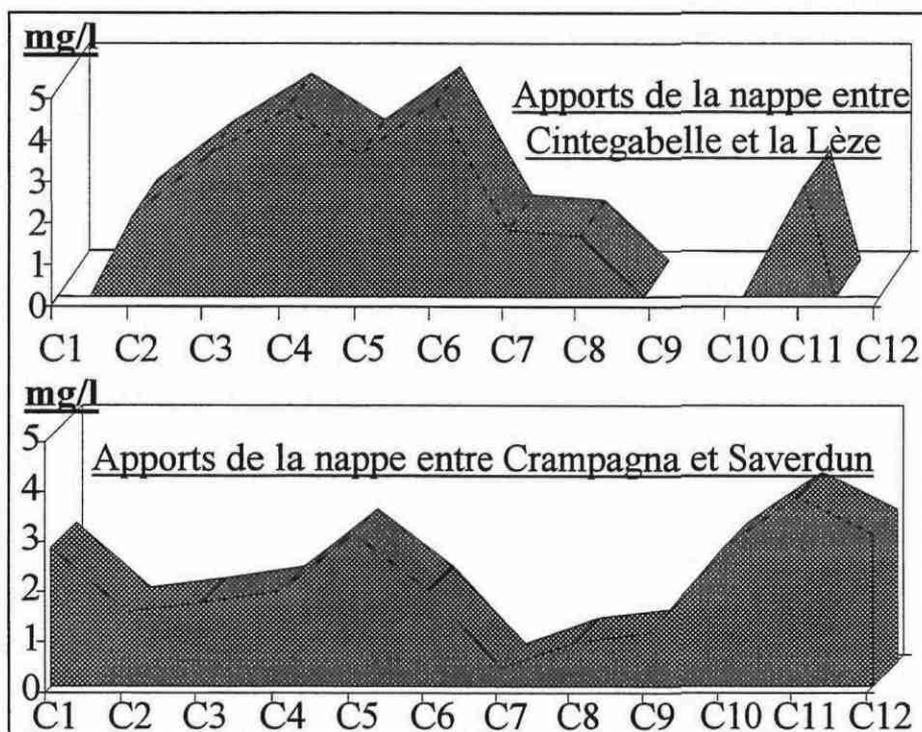
L'évolution de la température est similaire sur toutes les stations, comme d'ailleurs sur tous les autres affluents. Après une diminution jusqu'en mars, les températures augmentent progressivement jusqu'en août.



Graphique 4 - 49. Evolution de quelques paramètres physico-chimiques durant le cycle 1993 sur le bassin de l'Ariège



Graphique 4 - 50. Mise en évidence des apports de la nappe de l'Ariège, par le biais des nitrates

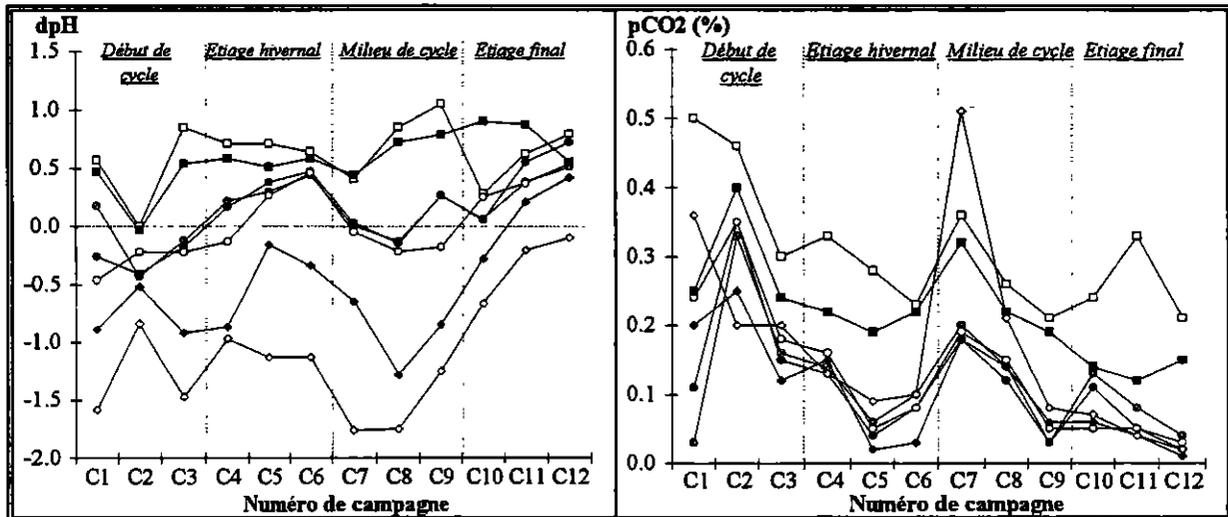


Graphique 4 - 51. Apports des nitrates par la nappe de l'Ariège

4.2.6.1.2.5. Le dpH et la pCO₂

Les eaux de l'Ariège ont un dpH qui augmente sensiblement de Crampagna à Cintegabelle où la saturation est atteinte (cf. graphique 4-52). La pCO₂, par contre, reste pratiquement constante sur l'ensemble des stations de l'Ariège.

Durant l'étiage hivernal et l'étiage final, le dpH augmente. Ceci est lié à une augmentation de la minéralisation carbonatée, due à une mise en solution plus importante dans l'aquifère.



Graphique 4 - 52. Evolution du dpH et de la pCO₂ durant le cycle 1993 sur le bassin de l'Ariège

4.2.6.2. Evolution des eaux sur le bassin du Salat

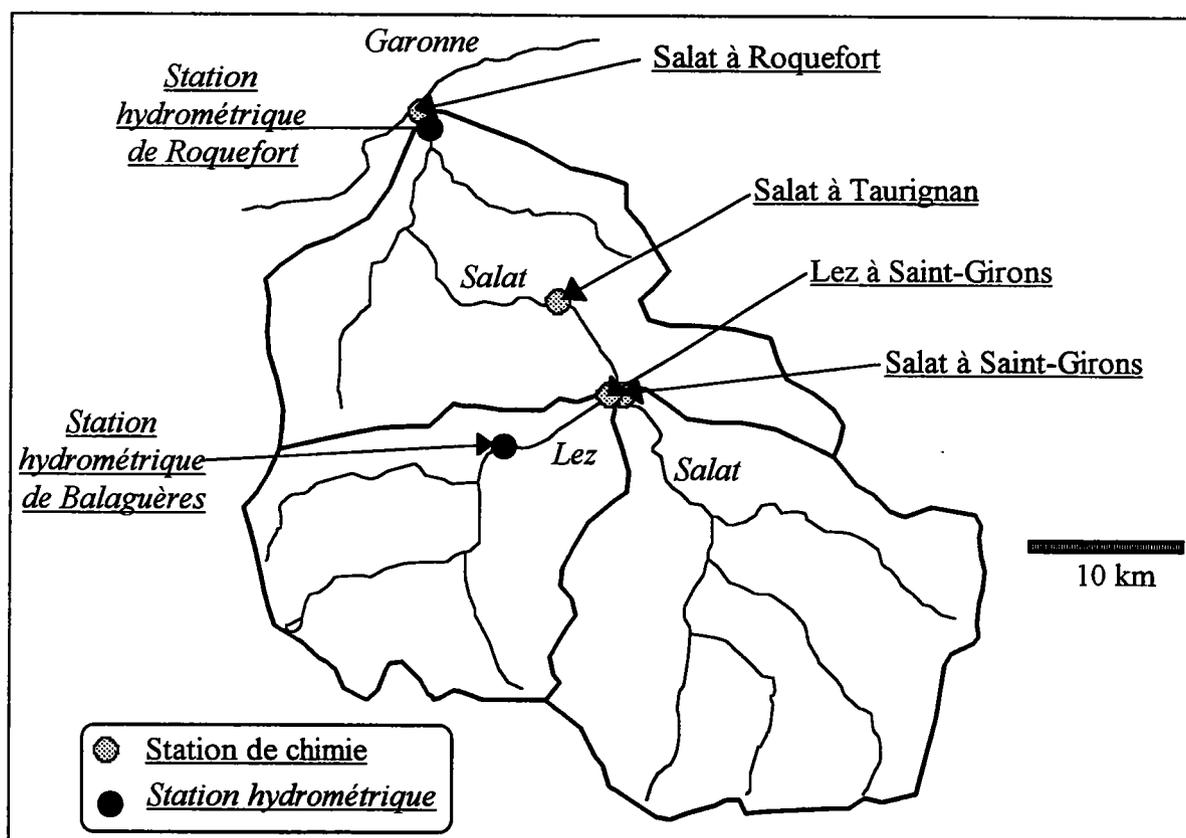
Quatre stations de prélèvements ont été choisies afin de connaître l'hydrochimie du bassin et d'estimer les apports de la nappe alluviale entre Saint-Girons et Roquefort/Garonne. Il s'agit des stations de Roquefort, de Taurignan et de Saint-Girons sur le Salat, et de la station de Saint-Girons, sur le Lez, affluent le plus important du Salat (cf. carte 4-6).

Les chapitres précédents ont montré que le Salat possède des eaux bicarbonatées calciques et sulfatées. En outre, la minéralisation de ses eaux est l'une des plus faible du bassin, car les formations carbonatées ne sont pas nombreuses, et la neige, présente dans la partie amont, provoque des dilutions importantes.

4.2.6.2.1. ACP sur les eaux du bassin du Salat

Les variables étudiées sont toujours les mêmes. Dans l'espace des variables, le plan I-II représente 68.5 % de la variance exprimée. Les données sont donc moyennement structurées.

Le facteur I met en évidence des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (cf. graphique 4-53). Certaines de ces eaux, situées entre le facteur I et le facteur II, sont salées et chaudes. Deux variables ne sont pas bien représentées, il s'agit des nitrates et de la pCO₂.



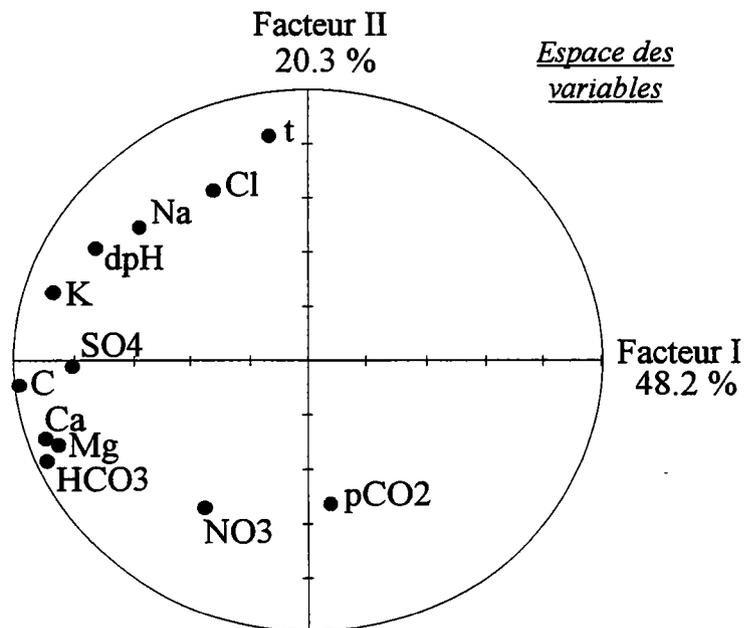
Carte 4 - 6. Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques sur le bassin du Salat

Dans l'espace des individus, nous avons séparé les échantillons de chaque station pour mieux illustrer les variations hydrochimiques. On note une augmentation de la minéralisation de l'amont vers l'aval du bassin. Le Lez contribue largement à cette minéralisation.

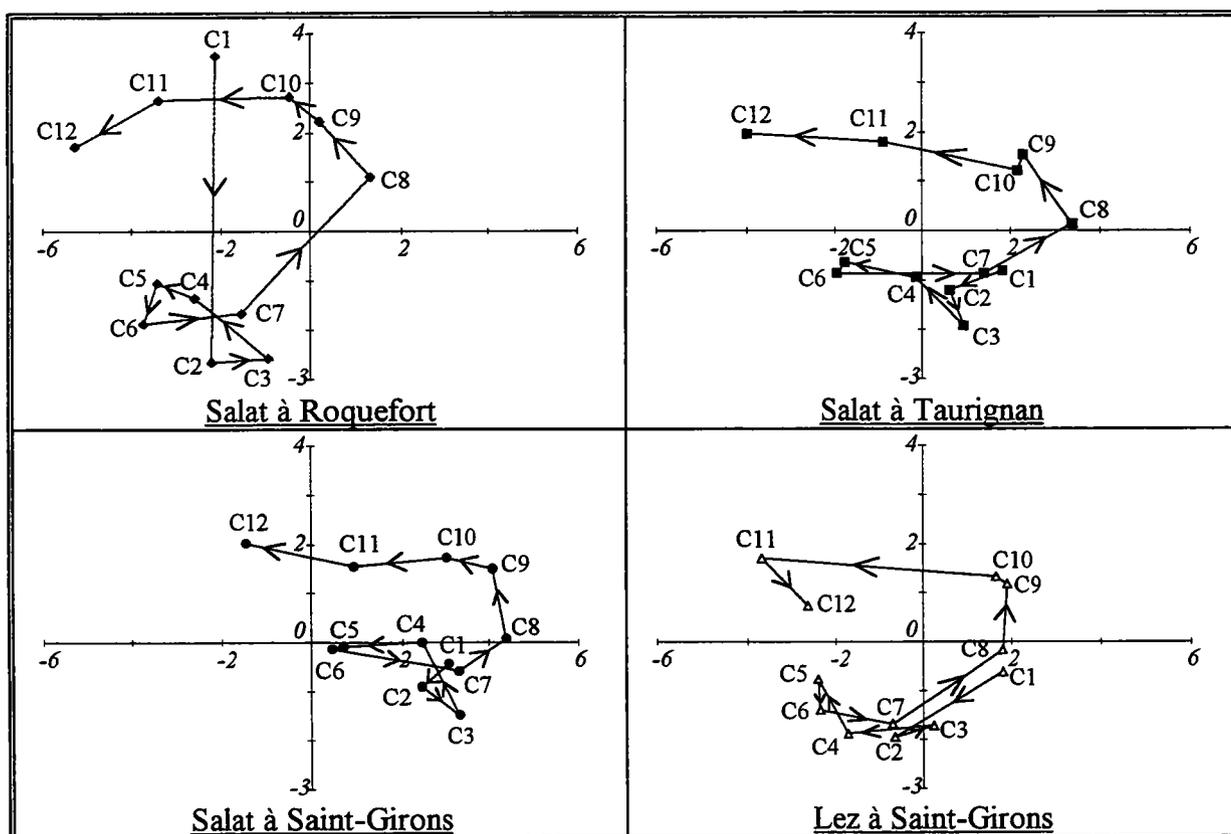
L'évolution des eaux durant le cycle est quasi-similaire pour toutes les stations :

- les eaux de début de cycle et d'étiage hivernal ont une composition chimique proche. Elles ont une minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne;
- à partir de C8, les eaux sont diluées par la fonte des neiges (cf. graphique 4-54);
- les eaux reprennent ensuite une minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne, avec des teneurs en sels, un dpH et des températures plus élevés.

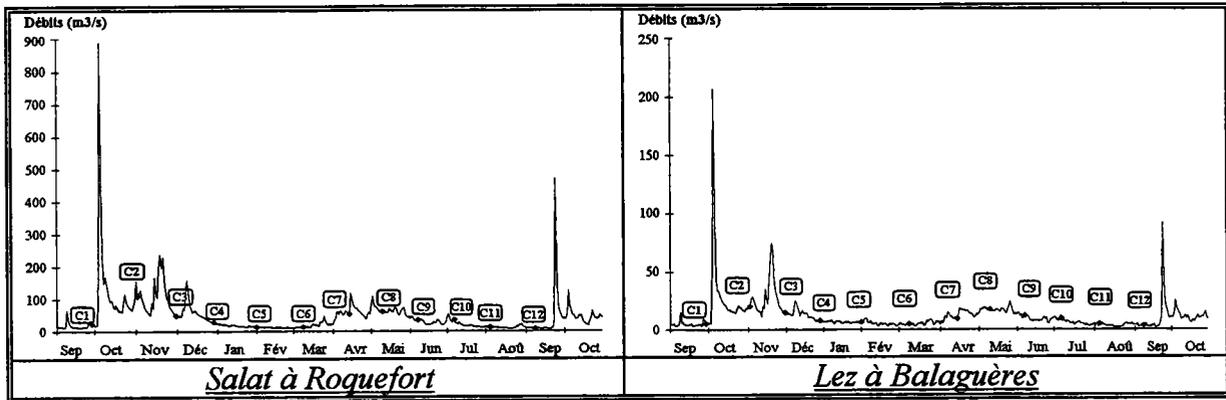
Sur le Salat à Roquefort, l'échantillon de la campagne C1 se distingue. Il se caractérise, en effet, par des teneurs élevées en sels (NaCl) provenant des rejets des eaux thermales de Salies-du-Salat.



Espace des individus



Graphique 4 - 53. ACP sur les eaux du bassin du Salat, cycle 1993



Graphique 4 - 54. Hydrogrammes du Salat à Roquefort/Garonne et du Lez à Balaguères, cycle 1993

4.2.6.2.2. Evolution temporelle et spatiale de quelques variables physico-chimiques

Les variables étudiées, tirées des résultats de l'ACP, sont : les bicarbonates, les sulfates, les chlorures, le sodium, le potassium, les nitrates, le dpH et la pCO₂.

4.2.6.2.2.1. Les bicarbonates

Sur le Salat, les concentrations en bicarbonates augmentent régulièrement de Saint-Girons à Roquefort (cf. graphique 4-55). Le Lez participe largement à cette augmentation. Entre Taurignan et Roquefort, l'augmentation est essentiellement due aux apports de l'Arbas en rive gauche (affluent possédant des réserves karstiques importantes) et du Lens en rive droite.

La différence de concentrations entre les eaux du Salat à Saint-Girons et celles du Salat à Roquefort varie suivant la période. Elle est comprise entre 10 et 40 mg/l.

L'évolution temporelle des teneurs est identique sur toutes les stations de prélèvement :

- en début du cycle, on observe un pic lié à la vidange des réservoirs souterrains;
- durant l'étiage hivernal, les concentrations augmentent car la dilution s'atténue et le temps de séjour des eaux dans l'aquifère est plus long, ce qui permet une meilleure mise en solution;
- en milieu cycle, les concentrations baissent du fait, essentiellement, de la fonte des neiges;
- durant l'étiage final, les concentrations augmentent de nouveau, pour les mêmes raisons qu'au moment de l'étiage précédent.

4.2.6.2.2.2. Les sulfates

Ils suivent pratiquement la même évolution temporelle que les bicarbonates. Une différence est à noter tout de même : le début de cycle est marqué par une diminution des teneurs et non par une augmentation.

Les concentrations sont inversement proportionnelles aux débits. Lorsque ces derniers sont faibles, les concentrations augmentent.

Sur le Salat, on note une hausse sensible des concentrations entre Saint-Girons et Taurignan. Cette augmentation est liée aux **apports du Lez, riches en sulfates** qui proviennent des marnes de l'Albo-Cénomaniens, des dolomies jurassiques, des formations triasiques et paléozoïques. Entre Taurignan et Roquefort, les apports sulfatés sont quasiment nuls.

4.2.6.2.2.3. Les chlorures et le sodium

Mis à part les concentrations en chlorures et en sodium du Salat à Roquefort, l'évolution temporelle des deux éléments est identique. On a deux périodes avec des teneurs basses : le début cycle et le milieu de cycle; et deux périodes avec des teneurs plus fortes : l'étiage hivernal et l'étiage final.

Les eaux du Lez sont les moins chargées en chlorures et en sodium. Elles induisent une diminution des teneurs sur le Salat à Taurignan.

Entre Taurignan et Roquefort, il apparaît une **augmentation singulière des concentrations** pour la campagne C1 et entre les campagnes C8 et C12. Cette hausse est d'ailleurs plus marquée pour les chlorures que pour le sodium. **Ce sont les rejets des thermes de Salies-du-Salat, ouverts de mai à octobre, qui provoquent cet accroissement.**

Les eaux des thermes sont renouvelées périodiquement à partir de plusieurs forages, de l'ordre de 300 m de profondeur, qui pénètrent dans les couches salifères du Trias. Elles sont ensuite stockées et mélangées à l'eau de ville pour les soins.

La composition chimique de ces eaux est particulière. En effet, les éléments principaux sont les chlorures et le sodium qui proviennent du sel gemme :

<u>Anions</u> (g/l)		<u>Cations</u> (g/l)	
Chlorures	186.80	Sodium	119.80
Bromures	0.19	Potassium	1.40
Iodures	0.04	Calcium	1.10
Sulfates	4.80	Magnésium	0.40

Le volume journalier des rejets déversé dans le Salat est de 100 m³ (soit environ 1 l/s). Ce volume est faible, mais les concentrations en sels sont élevées, ce qui provoque une montée importante des teneurs sur le Salat.

4.2.6.2.2.4. Le potassium

Les périodes de hautes eaux provoquent des dilutions et c'est en étiage que l'on rencontre les teneurs les plus fortes.

C'est à Roquefort que le Salat est le plus concentré.

4.2.6.2.2.5. Les nitrates

Ils ne sont pas corrélés aux autres éléments. Sur toutes les stations, l'évolution temporelle est très saccadée.

Les pics en nitrates, sur l'évolution temporelle, ne sont pas concomitants entre les différentes stations. Les eaux du Lez, par exemple, sont parfois très chargées en nitrates, mais elles ne provoquent pas d'augmentation sur les eaux du Salat (on observe même, des dilutions). On peut en déduire que les nitrates ont pour origine essentielle les pollutions domestiques. De ce fait, l'évolution des concentrations sur le Salat ne correspond pas à celle sur l'Ariège (pollutions agricoles).

On peut néanmoins, décrire une évolution temporelle :

- en début de cycle, les teneurs sont les plus élevées. Elles proviennent du lessivage des sols;
- on note ensuite une diminution des teneurs, puis une stagnation vers la fin du cycle.

Entre Taurignan et Roquefort, on a une augmentation pratiquement constante, mais il est difficile de dire si cette dernière est liée à un accroissement naturel, aux pollutions agricoles de la nappe ou aux pollutions domestiques.

4.2.6.2.2.6. La température

On observe toujours les mêmes variations. De septembre à décembre, les températures chutent, puis à partir de janvier elles augmentent progressivement (cf. graphique 4-56). L'amplitude de température est d'environ 17 °C.

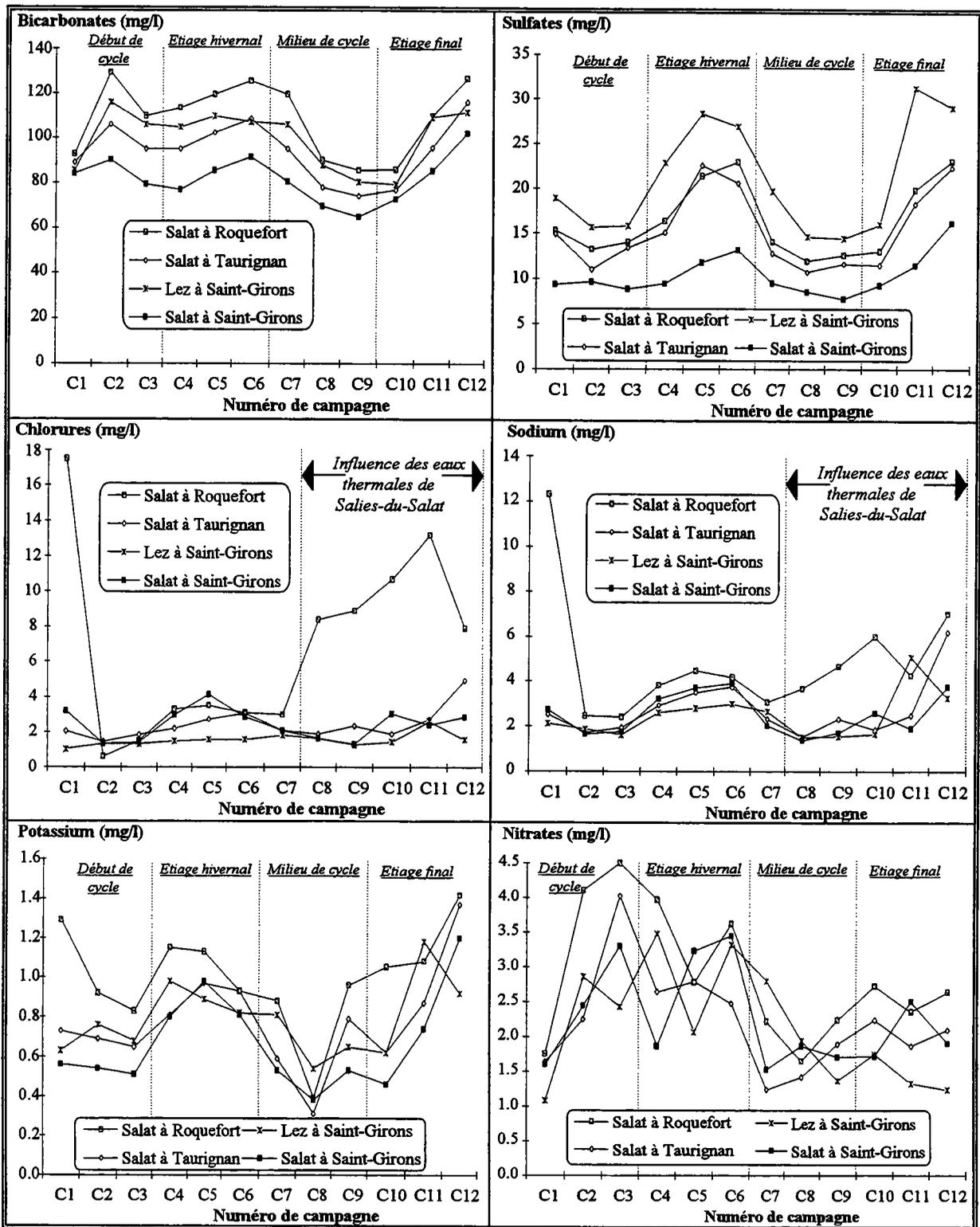
Les courbes de chaque station sont pratiquement confondues, les températures augmentant faiblement de l'amont vers l'aval du bassin.

4.2.6.2.2.7. Le dpH et la pCO₂

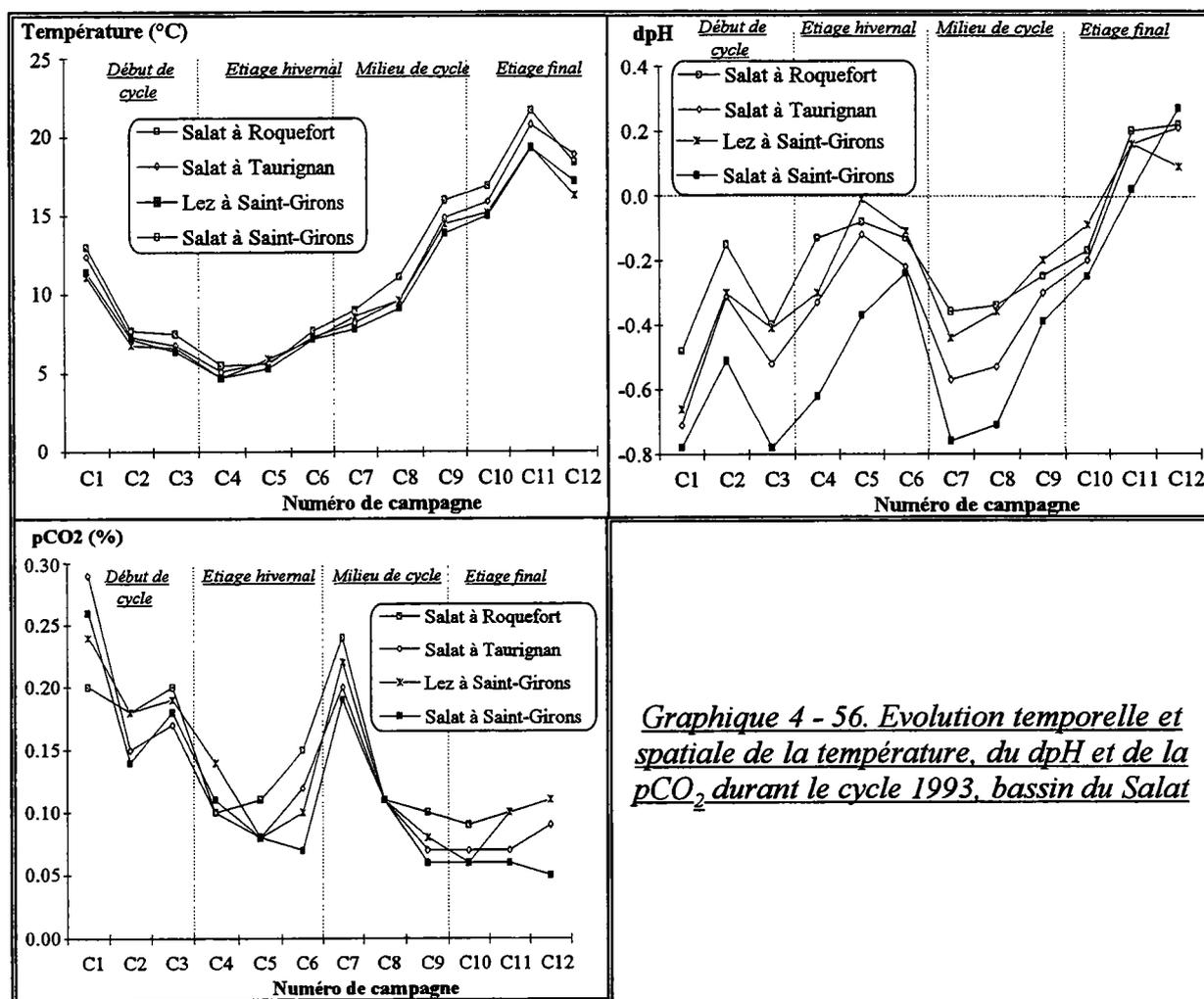
Les eaux du Salat sont pratiquement toujours sous-saturées. Elles n'atteignent la saturation qu'en fin de cycle.

Les valeurs de pCO₂ sont nettement supérieures à 0.03 %. Elle varient entre 0.3 et 0.05 %, ce qui indique l'existence d'une contribution souterraine durant tout le cycle.

Les variations temporelles du dpH et de la pCO₂ sont identiques à celles observées sur l'Ariège. Les périodes correspondant à des fortes pCO₂ couplées à des faibles dpH révèlent des écoulements souterrains rapides. C'est le cas en début de cycle et en milieu de cycle. A l'inverse, les périodes où la pCO₂ diminue et où le dpH augmente indiquent des temps de séjour des eaux plus long dans l'aquifère, ce qui permet d'atteindre la saturation (étiage hivernal et étiage final).



Graphique 4 - 55. Evolution temporelle et spatiale de quelques éléments majeurs durant le cycle 1993, bassin du Salat



Graphique 4 - 56. Evolution temporelle et spatiale de la température, du dpH et de la pCO₂ durant le cycle 1993, bassin du Salat

4.2.6.3. Evolution des eaux de la Neste

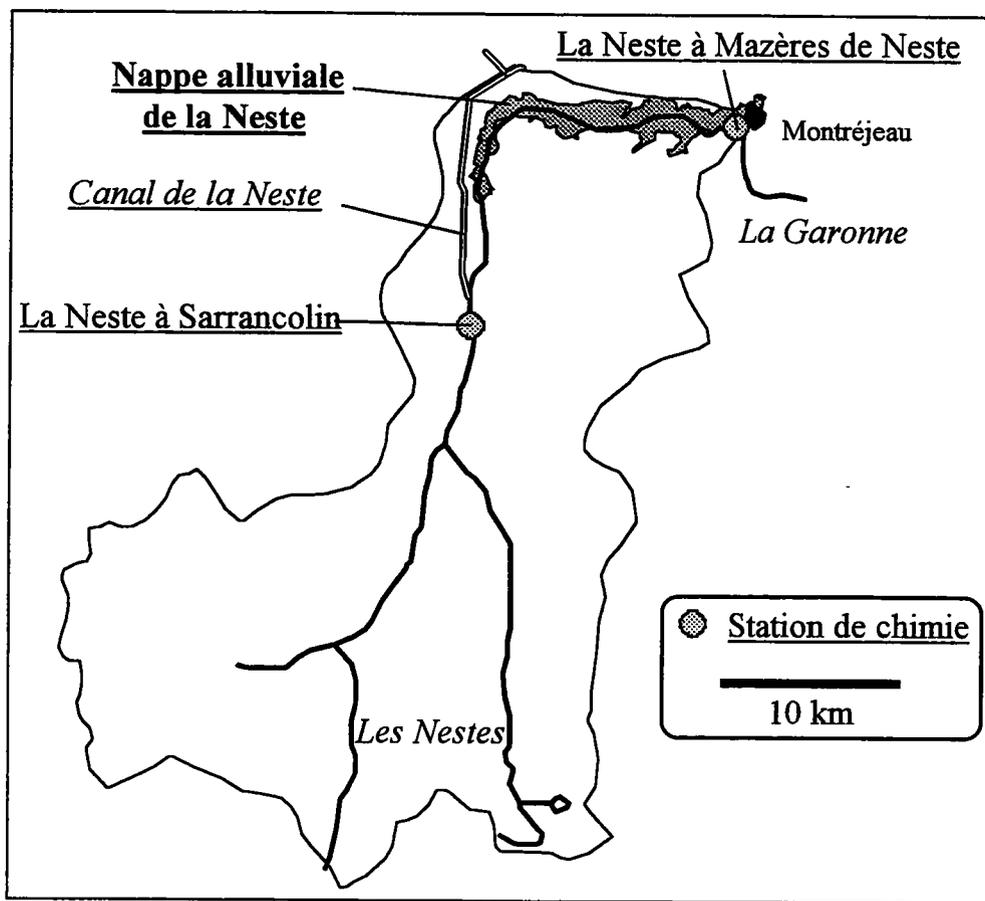
Deux stations ont été choisies (cf. carte 4-7) :

- la station de Sarrancolin, pour apprécier la chimie des eaux de la zone montagnarde;
- la station de Mazères de Neste, pour connaître les apports intermédiaires.

La nappe alluviale est constituée par des alluvions de différentes tailles, disposées en terrasses étagées. Sa superficie totale est d'environ 25 km², ce qui correspond à 5 % de la superficie de la nappe de l'Ariège (460 km²). C'est donc un petit aquifère. Aucune étude hydrogéologique n'a été effectuée dans ce secteur, et on ne sait pas dans quelle mesure, la nappe contribue à l'alimentation de la Neste.

Les autres apports intermédiaires sont issus du massif calcaire :

- de Barousse-Nistos, en rive droite, qui est très karstifié. Quelques sources à forts débits sont connues : la Gourdiolle et Plan de Pouts;
- des Baronnie, en rive gauche, qui est lui aussi bien karstifié, mais qui ne détient pas de sources importantes (mis à part celles de Sarrancolin).



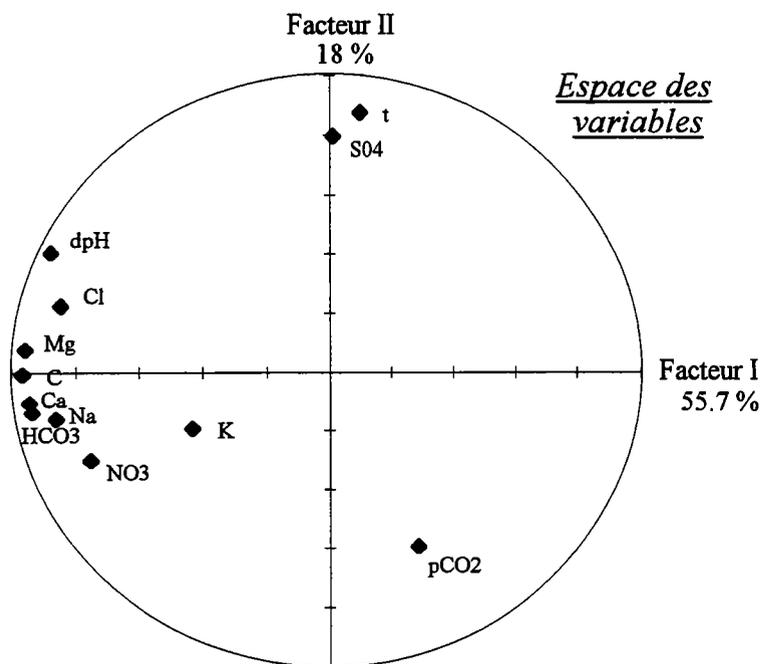
Carte 4 - 7. Position des stations de prélèvements sur le bassin de la Neste

4.2.6.3.1. ACP sur les eaux de la Neste

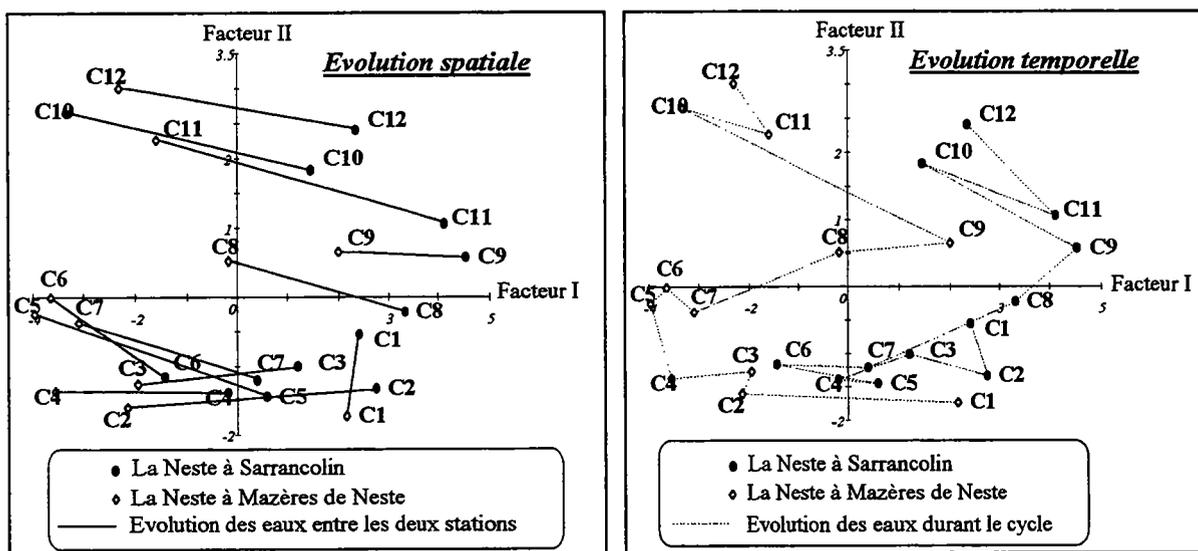
Le facteur I regroupe un bon nombre de variables (cf. graphique 4-57). Il représente la minéralisation des eaux. Sur le facteur II, sont présents, la température, les sulfates et la pCO_2 . Les sulfates ont une origine géologique : ils proviennent de formations sulfatées. Une variable n'est pas bien représentée dans le plan I-II, c'est le potassium, qui se trouve sur le facteur III.

L'évolution des eaux entre les deux stations a principalement lieu sur le facteur I. Ceci indique une augmentation de la minéralisation dans le sens Sarrancolin-Mazères. **Les apports intermédiaires sont donc plus minéralisés.**

L'évolution temporelle des eaux est plus complexe. Les eaux de début de cycle et de l'étiage hivernal sont les plus minéralisées. Au printemps, la fonte des neiges provoque une dilution très nette (C8, C9). A la fin du cycle, les eaux retrouvent leur minéralisation de début de cycle, mais elles se caractérisent par des teneurs en sulfates et des températures plus élevées.



Espace des individus



Graphique 4 - 57. ACP sur les eaux de la Neste, cycle 1993

4.2.6.3.2. Evolution temporelle et spatiale de quelques variables physico-chimiques

4.2.6.3.2.1. Les bicarbonates et les chlorures

On note une augmentation très nette des teneurs entre les deux stations (cf. graphique 4-58). Cette hausse est aussi présente sur les autres variables caractérisant le facteur I. Les concentrations en bicarbonates et en chlorures augmentent, en moyenne, respectivement, de 20 mg/l et 0.7 mg/l.

4.2.6.3.2.2. Les sulfates

La minéralisation sulfatée est acquise dès Sarrancolin. Les apports intermédiaires ne sont donc pas très riches en sulfates.

4.2.6.3.2.3. La température

L'évolution de la température est équivalente à celle des autres bassins. Après une diminution jusqu'en février, les températures augmentent régulièrement. La différence de températures entre les deux stations s'accroît du début vers la fin du cycle car les débits diminuent au moment de l'étiage final, et les écoulements sont plus lents en aval du bassin.

4.2.6.3.2.4. Le dpH et la pCO₂

Les eaux à Mazères de Neste possèdent un dpH plus élevé que celles de Sarrancolin. Elles restent tout de même sous-saturées. La contribution des aquifères carbonatés et le dégazage des eaux (la pCO₂ diminue entre Sarrancolin et Mazères) sont à l'origine de l'augmentation de dpH entre les deux stations. L'évolution temporelle est identique à celle de l'Ariège et du Salat.

La pCO₂, quant à elle, marque une contribution des eaux souterraines durant le cycle. Son évolution temporelle est quasi-identique pour les deux stations.

4.2.6.3.3. Quantification des apports intermédiaires

Ces derniers sont caractérisés par une minéralisation plus élevée qu'à Sarrancolin, mais peu sulfatée.

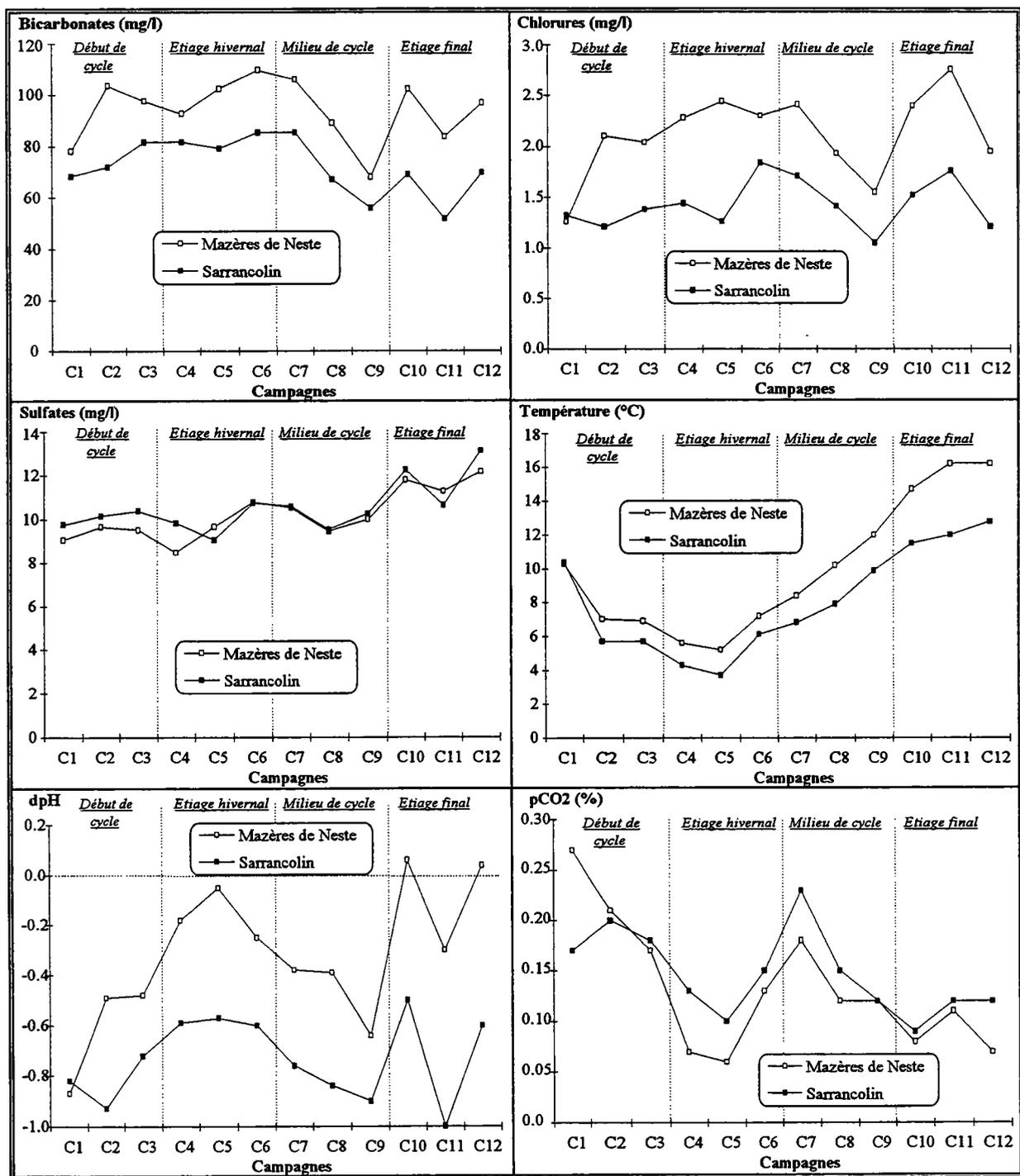
Les concentrations des éléments majeurs et le débit des apports intermédiaires peuvent être approchés en utilisant l'équation des flux :

$$(Q_{\text{amont}} \cdot C_{\text{amont}}) + (Q_{\text{intermédiaire}} \cdot C_{\text{intermédiaire}}) = (Q_{\text{aval}} \cdot C_{\text{aval}});$$

avec :

Q : débit;

C : concentration.



Graphique 4 - 58. Evolution temporelle et spatiale de quelques paramètres physico-chimiques durant le cycle 1993, bassin de la Neste

Appliquée entre les deux stations, on a :

$$(Q_{\text{Sarrancolin}} \cdot C_{\text{Sarrancolin}}) + (Q_{\text{apports intermédiaires}} \cdot C_{\text{apports intermédiaires}}) = (Q_{\text{Mazères}} \cdot C_{\text{Mazères}});$$

en abrégé :

$$(Q_S \cdot C_S) + (Q_{ai} \cdot C_{ai}) = (Q_M \cdot C_M);$$

Les concentrations des éléments majeurs à Sarrancolin et Mazères sont connues. Mais les débits du cycle 1993 ne sont pas disponibles. On ne connaît que le débit moyen pluriannuel à Sarrancolin qui est estimé à 13 m³/s. C'est pourquoi, nous utiliserons la relation suivante :

$$C_{ai} = \frac{Q_S \times (C_M - C_S)}{Q_{ai}} + C_M$$

$$\text{avec : } Q_S + Q_{ai} = Q_M;$$

Cette équation permet de connaître C_{ai}, concentration des apports intermédiaires, en choisissant une valeur pour Q_{ai}, débit des apports intermédiaires.

Pour estimer les apports, nous utiliserons la concentration moyenne en bicarbonates, élément d'origine non anthropique et qui est, de plus, caractéristique des apports intermédiaires.

Le calcul est effectué pour plusieurs débits, six au total, compris entre 1 m³/s et 11 m³/s (intervalle vraisemblable des apports) :

Solution (numéro)	Qi (m ³ /s)	Ci (mg/l)
1	1	379
2	3	189
3	5	151
4	7	135
5	9	126
6	11	120

La connaissance des concentrations en bicarbonates de quelques sources carbonatées (Plan de Pouts, Gourdiolle in : R. GUERIREM (1988), source du Vivier à Sarrancolin) et de la nappe (captages de St-Paul-de-Neste et St-Laurent-de-Neste) ne permet pas de trouver une solution unique parmi les six proposées.

Par contre, si on émet l'hypothèse que le débit augmente proportionnellement à l'accroissement du bassin, on trouve un Q_i d'environ 5 m³/s, ce qui correspond à une concentration intermédiaire de 151 mg/l. Ce résultat est tout à fait compatible avec l'hydrochimie des aquifères du bassin.

Conclusions

Durant les campagnes de prélèvements, un problème d'échantillonnage est apparu. En effet, s'il existe des apports latéraux en amont du point de prélèvement (par exemple la confluence d'un autre cours d'eau), le mélange entre les différentes eaux n'est parfois pas bien réalisé. Ce phénomène s'est produit au niveau de quelques stations. Il aurait alors fallu attendre plusieurs méandres pour obtenir un bon mélange des eaux, c'est-à-dire parfois plusieurs kilomètres.

Ce chapitre a permis :

- de caractériser l'hydrochimie du bassin de la Garonne;
- d'étudier les variations de l'hydrochimie durant le cycle 1993;
- de connaître le fonctionnement et l'influence des principaux aquifères (alluviaux et carbonatés) sur le chimisme des eaux;
- de mettre en évidence les influences anthropiques.

Les eaux de la Garonne et celles des principaux affluents ont toutes une minéralisation bicarbonatée calcique prédominante, ce qui met en évidence l'existence sur le bassin d'importantes formations carbonatées.

Le deuxième point intéressant concerne les valeurs de la $p\text{CO}_2$ sur le bassin de la Garonne. En effet, durant le cycle 1993, **la $p\text{CO}_2$ est toujours nettement supérieure à 0.03 %**, ce qui montre une participation permanente des eaux souterraines aux écoulements de surface (et non pas seulement au moment de l'étiage).

Un autre résultat important apparaît au terme de ce chapitre : **le bassin est fortement anthropisé**. Outre, les barrages à vocation énergétique qui perturbent les débits, et par là même les concentrations chimiques (l'eau des barrages est, en général, peu minéralisée), les eaux de la Garonne sont influencées par les effluents d'industries diverses et les rejets d'eaux domestiques usées.

C'est ce que l'on constate lors de l'étude de l'évolution du sodium le long de la Garonne. **Les concentrations ont une origine naturelle seulement en amont de Montréjeau. Par la suite, les teneurs sont influencées par les rejets anthropiques** (papeterie de St-Gaudens, industries de Boussens, thermes de Salies-du-Salat, la SNPE et la Grande Paroisse). En aval de Toulouse, l'Aussonnelle, l'Hers mort, la Save et la Gimone (rivières très anthropisées) contribuent aussi fortement à l'augmentation des concentrations.

Comme la Garonne, **la majorité des affluents n'ont plus d'hydrochimie naturelle**. Ces rivières possèdent de fortes teneurs en éléments d'origine anthropique tels que le potassium, le sodium, les chlorures, les nitrates et les sulfates. **Le cours d'eau le plus marqué par l'anthropisation est l'Aussonnelle** où les teneurs maximales relevées sont de 65 mg/l pour le sodium, de 50 mg/l pour les nitrates et les sulfates, et de 80 mg/l pour les chlorures.

Certains bassins, comme le Ger, l'Arize et l'Hers vif, sont marqués par des eaux salées, qui proviennent, non pas de pollutions anthropiques, mais de dépôts évaporitiques du Trias. La contribution de ces eaux dans les écoulements est faible. Sur

le Ger, un calcul au moment de l'étiage final a permis d'estimer cette participation entre 2 et 3 %.

L'anthropisation apparaît donc comme un facteur de la variabilité hydrochimique des affluents, au même titre que l'hydrogéologie et l'hydrologie. Ceci est mis en évidence sur une ACP comprenant l'ensemble des échantillons prélevés sur les affluents. Cette analyse montre que la **variabilité temporelle hydrochimique** est :

- ***importante*** : pour les affluents en aval de Toulouse;
- ***faible*** : pour les affluents en amont du bassin;
- ***très faible*** : pour le Ger (ceci confirme l'homogénéisation et la régulation importantes des apports sur ce bassin).

Sur la Garonne, on note une augmentation de la minéralisation des eaux de l'amont vers l'aval du bassin avec :

- **des eaux à l'exutoire du bassin beaucoup plus minéralisées durant l'étiage hivernal et durant l'étiage final**, car on a une mise en solution plus importante des éléments dans les aquifères, et les eaux de ruissellement, peu minéralisées, sont alors négligeables;
- **une différence de minéralisation, entre les stations les plus extrêmes, plus élevée pour les eaux de l'étiage hivernal et de l'étiage final**. Ce phénomène s'explique par des vitesses d'écoulement lentes durant ces périodes.

Certains affluents participent, de façon notable, à l'augmentation de la minéralisation naturelle (bicarbonates, calcium, magnésium) sur la Garonne : l'Ourse, en amont de Montréjeau, et le Ger, en aval de Saint-Gaudens. En aval de Toulouse, on constate aussi une légère augmentation des concentrations, liée aux apports très bicarbonatés de l'Aussonnelle, de l'Hers mort, de la Save et de la Gimone.

Malgré les perturbations de nombreux barrages et dérivations, une campagne de prélèvements, effectuée en septembre 1993, a permis de caractériser l'hydrochimie **des sources de la Garonne, dans le val d'Aran**. Les eaux apparaissent bicarbonatées calciques et sulfatées. Elles proviennent, pour l'essentiel, des aquifères carbonatés du Cambro-Ordovicien et du Dévonien. La source historique de la Garonne contient, de plus, des sels qui proviennent du salage des routes durant l'hiver.

L'étude de l'évolution du chimisme des eaux sur les trois affluents principaux de la Garonne (l'Ariège, le Salat et la Neste) révèle qu'il existe, comme pour la Garonne, une augmentation systématique de la minéralisation de l'amont vers l'aval. Cet accroissement est parfois lié aux apports des nappes alluviales.

- ***Pour l'Ariège :***

- la minéralisation carbonatée provient des eaux en amont de Crampagna et de celles du bassin de l'Hers vif. La nappe ne participe que très faiblement à cette minéralisation;
- **les apports de la nappe alluviale sont mis en évidence par les teneurs en nitrates**. Entre Crampagna et Saverdun, les apports sont présents durant tout le cycle (sauf au printemps). Par contre, entre Cintegabelle et Lacroix-Falgarde, ils se situent principalement en début de cycle et durant l'étiage hivernal. Les réserves participant à l'écoulement de l'Ariège sont donc plus abondantes en amont de Saverdun.

- Pour le Salat :

- les apports de la nappe alluviale, présente entre Saint-Girons et Roquefort, apparaissent négligeables;
- le Lez (affluent du Salat) participe nettement à l'augmentation de la minéralisation carbonatée et sulfatée;
- **les rejets des thermes de Salies-du-Salat provoquent une augmentation des teneurs en sels, très marquée de mai à octobre (période d'ouverture des thermes).**

- Pour la Neste :

- on note une augmentation de la minéralisation dans la partie aval du bassin. Il est difficile, actuellement, de savoir si cette augmentation est due aux apports de la nappe alluviale ou à ceux des formations carbonatées (surtout présentes en rive droite);
- ces apports ont pu être estimés à environ 5 m³/s.

Enfin, durant le cycle 1993, il faut noter que **toutes les eaux du bassin (celles des affluents et celles de la Garonne) possèdent la même courbe d'évolution de la température** (elle diminue jusqu'au mois de février pour remonter progressivement par la suite). Cette dernière est complètement indépendante des autres variables, car elle est liée uniquement aux changements climatiques.

Dans ces développements, nous n'avons étudié l'évolution chimique des eaux qu'au cours d'un cycle hydrologique. Mais cette évolution se répète-t-elle à chaque nouveau cycle ?

Pour répondre à cette question, nous avons analysé de longues chroniques de données hydrochimiques établies par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne concernant :

- une rivière peu anthropisée : le Salat à Mazères;
- une rivière anthropisée : la Garonne à Gagnac.

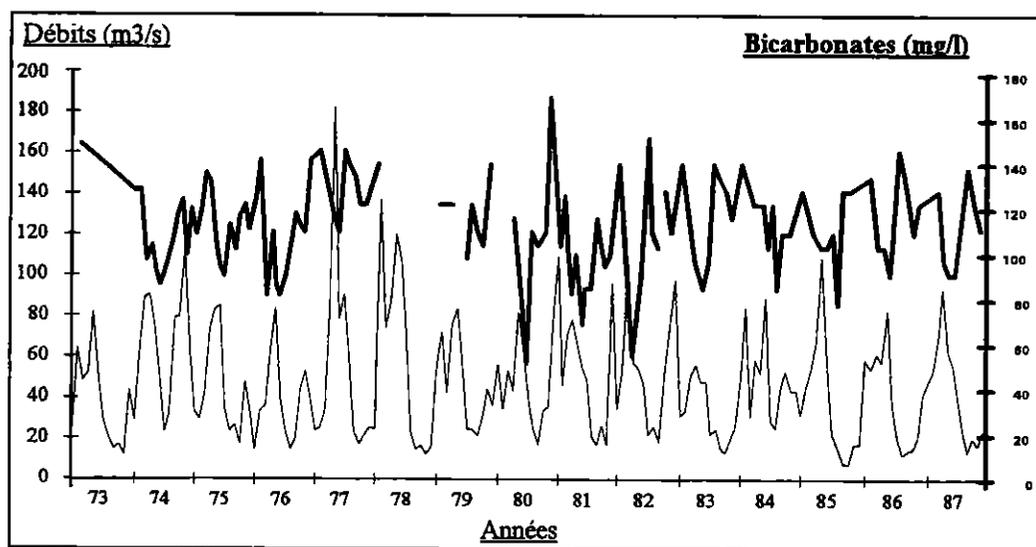
**4.3. EVOLUTION PLURIANNUELLE DU CHIMISME DES
EAUX SUR LE SALAT A MAZERES ET SUR LA
GARONNE A GAGNAC**

Depuis 1971, un réseau de mesures de qualité a été implanté par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne sur l'ensemble du bassin. Huit à douze échantillons sont prélevés chaque année.

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous intéresserons à l'évolution pluriannuelle des bicarbonates sur le Salat. Dans un deuxième temps, nous analyserons l'évolution pluriannuelle de la température et de plusieurs éléments chimiques (choisis par rapport aux résultats de l'ACP) sur la Garonne.

4.3.1. Evolution des bicarbonates sur le Salat à Mazères

Le nombre d'échantillon n'est pas très élevé sur cette station. Il apparaît cependant, une évolution saisonnière avec des teneurs fortes en étiage et en début de cycle, et un effet de dilution au printemps (cf. graphique 4-59), qui traduit, sur une longue période, la répétition de l'évolution hydrochimique du cycle hydrologique.



Graphique 4 - 59. Evolution des teneurs en bicarbonates et des débits à la station de Roquefort/Garonne sur le Salat, période 1973 à 1987

4.3.2. Evolution de quelques éléments chimiques et de la température sur la Garonne à Gagnac

Cette station prend en compte l'ensemble des eaux du bassin en amont de Toulouse : les eaux de l'Ariège et celles du Touch y sont bien mélangées, ce qui n'est pas le cas au niveau de la station de Blagnac, plus en amont.

L'évolution pluriannuelle et la tendance (moyenne mobile sur 24 valeurs) sont étudiées de 1971 à 1994.

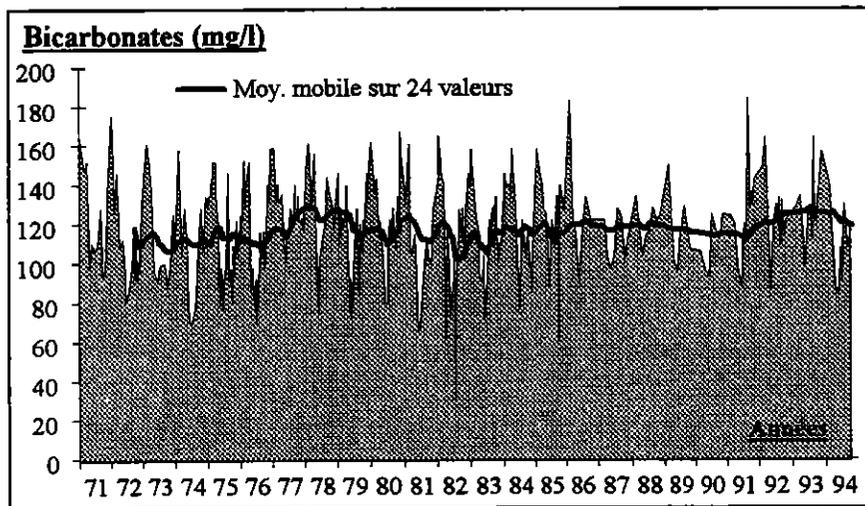
4.3.2.1. Les bicarbonates

Les valeurs varient, grosso modo, entre 80 et 160 mg/l (cf. graphique 4-60), la moyenne étant de 117 mg/l

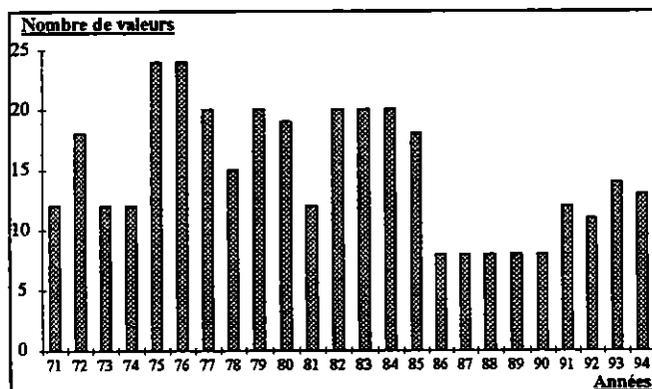
Comme pour le Salat, il existe un cycle saisonnier bien visible.

Entre 1986 et 1990, les variations apparaissent plus faibles. Ceci n'est pas dû à un changement des conditions hydrochimiques, mais à une diminution des campagnes d'échantillonnages sur le bassin (cf. graphique 4-61).

La courbe de tendance est assez constante et ne montre pas d'écarts particuliers.



Graphique 4 - 60. Evolution des teneurs en bicarbonates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance



Graphique 4 - 61. Evolution du nombre d'analyses effectuées sur les bicarbonates de 1971 à 1994, station de Gagnac sur la Garonne

4.3.2.2. Les chlorures, le sodium, les sulfates et les nitrates

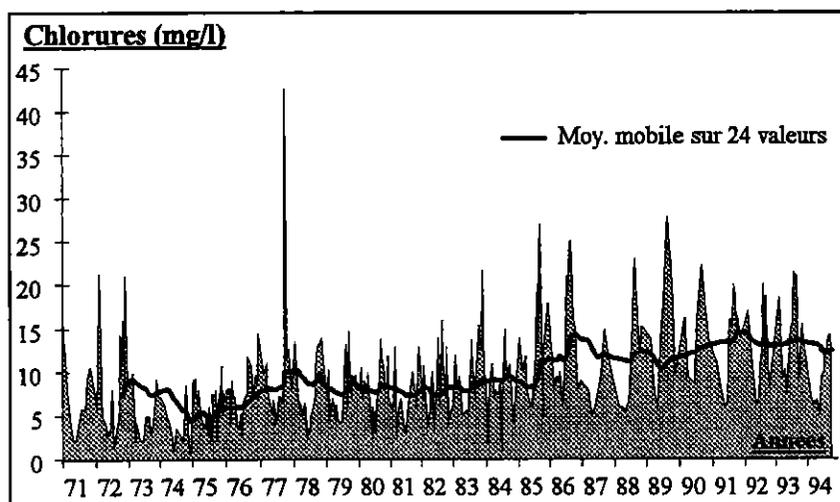
Sur la Garonne, nous l'avons vu précédemment, ces éléments ont essentiellement une origine anthropique. Les concentrations moyennes, sur la période 1971-1994, sont de 9.3 mg/l

pour les chlorures, 7.2 mg/l pour le sodium, 18.1 mg/l pour les sulfates et 8.5 mg/l pour les nitrates.

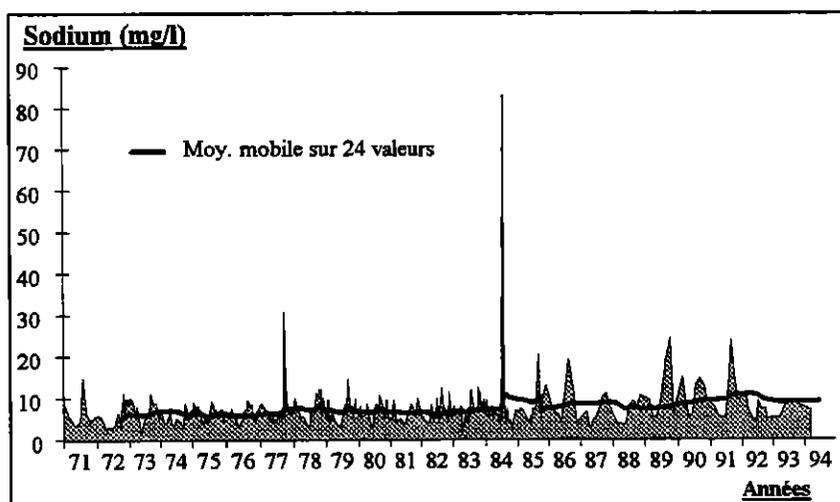
Il existe aussi une évolution saisonnière des concentrations, qui est liée à l'évolution hydrologique (cf. graphique 4-62, graphique 4-63, graphique 4-64, graphique 4-65). Lorsque les débits sont élevés, on a une dilution, et les concentrations sont basses. Lorsque les débits sont faibles, les concentrations augmentent.

Quelques pics de concentrations sont à noter. Ils mettent en évidence des rejets ponctuels.

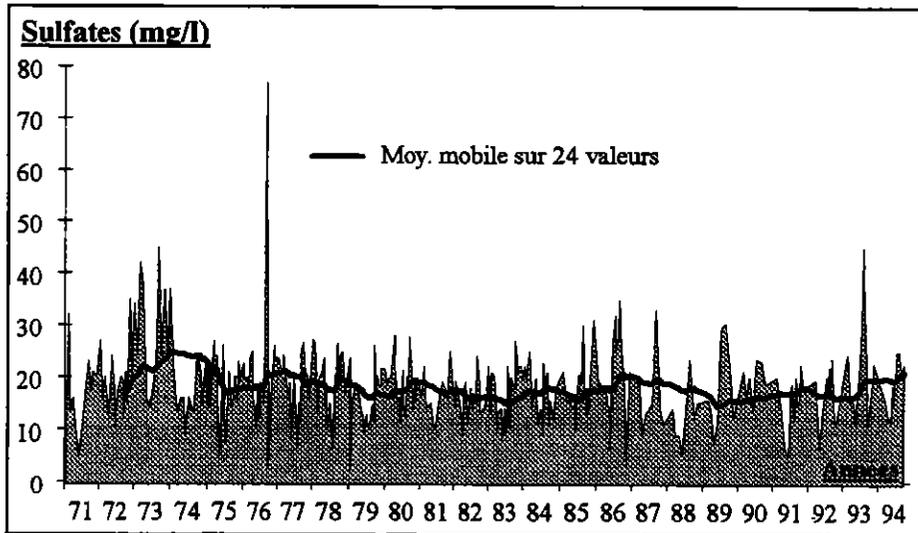
L'anthropisation sur le bassin conduit à une augmentation de concentrations des chlorures et du sodium. Ceci est bien visible sur la courbe de tendance. Pour les nitrates, l'utilisation intensive d'engrais azotés, couplée à une baisse des débits, conduit, entre 1986 et 1990, à une très forte hausse des concentrations.



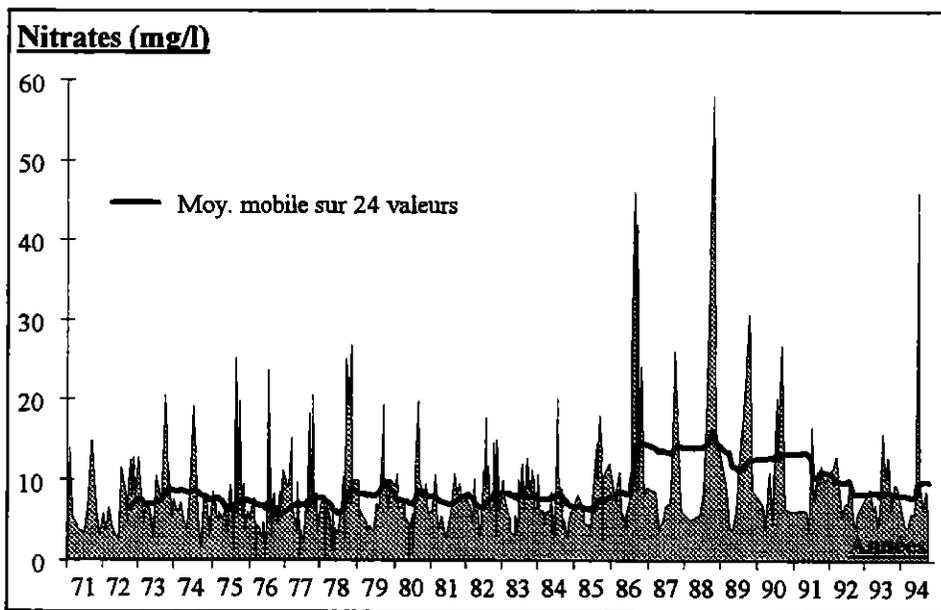
Graphique 4 - 62. Evolution des teneurs en chlorures sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance



Graphique 4 - 63. Evolution des teneurs en sodium sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance



Graphique 4 - 64. Evolution des teneurs en sulfates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance

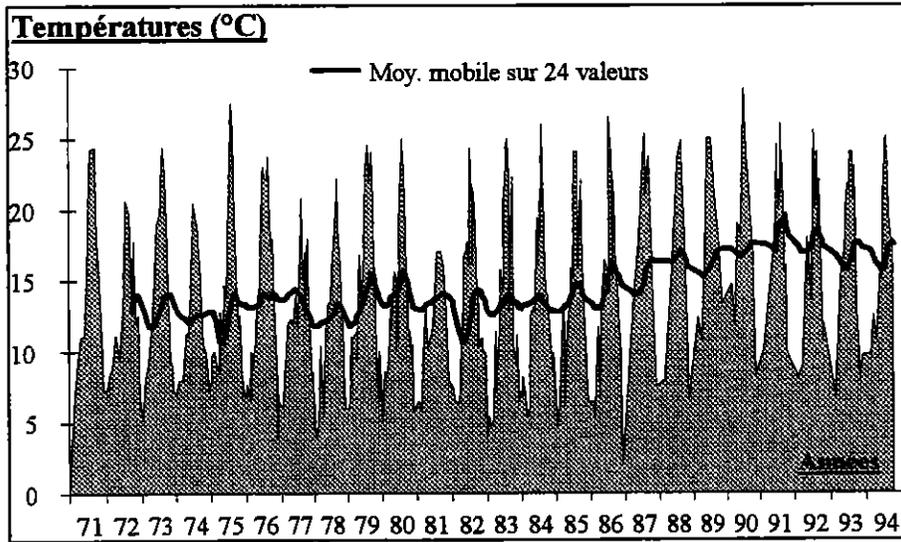


Graphique 4 - 65. Evolution des teneurs en nitrates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance

4.3.2.3. La température

Le cycle saisonnier est bien prononcé (cf. graphique 4-66). L'amplitude de variation des températures est d'une dizaine de degrés.

Durant les dernières années, la courbe de tendance est croissante. La température des eaux de la Garonne a augmenté de quelques degrés entre 85 et 94. Ce réchauffement doit provenir de la sécheresse récente qui a entraîné une baisse des débits de la Garonne (Y. TARDY, 1986). Mais cette hypothèse est à vérifier.



Graphique 4 - 66. Evolution de la température sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance

Conclusions

L'évolution pluriannuelle des bicarbonates, des chlorures, du sodium, des sulfates, des nitrates et de la température met en évidence un cycle saisonnier, qui est fonction des conditions hydrologiques. Cette évolution existe aussi pour les autres éléments majeurs. Il y a donc répétition de l'évolution hydrochimique du cycle hydrologique.

Il apparaît en outre, des tendances à long terme pour les éléments marqueurs de pollutions (chlorures, sodium et nitrates) et sur la température. Ces tendances pourraient être déterminées plutôt par la diminution des débits, liée à celles des précipitations (cf. graphique 3-40) qu'à un accroissement des rejets pollués.

Après avoir caractérisé et étudié l'évolution des eaux sur le bassin de la Garonne, nous consacrerons le chapitre suivant à la décomposition chimique de l'hydrogramme, afin de déterminer la composante souterraine de l'écoulement. Les résultats seront confrontés à ceux de la décomposition hydrodynamique.

4.4. DECOMPOSITION CHIMIQUE DE L'HYDROGRAMME

Après avoir rappelé la méthode habituellement utilisée et ses variantes, une décomposition est effectuée sur la Garonne à Portet et sur quelques affluents, pour le cycle 1993.

4.4.1. Connaissances actuelles

La détermination des composantes de l'hydrogramme au moment de la crue est généralement basée sur le modèle de G.F. PINDER & J.F. JONES (1969) qui utilise le principe de conservation des masses :

$$C \cdot Q = \sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i,$$

avec :

- C correspondant, soit à :
 - la conductivité (L.G. TOLER, 1965, G.R. KUNKLE, 1965, A.P. VISOCKY, 1970, R. NAKAMURA, 1971);
 - la concentration chimique d'un élément (G.F. PINDER & J.F. JONES, 1969);
 - une teneur isotopique : deutérium, tritium par exemple;
- Q : débit associé à la composante de l'écoulement;
- n : nombre de composantes de l'écoulement.

Le choix de C dans l'équation des flux doit être judicieux. Dans l'absolu, les concentrations isotopiques sont préférables, car les isotopes constituent intrinsèquement la molécule d'eau et sont insensibles aux pollutions anthropiques (P. OLIVE, 1970, E. CROUZET et al., 1970, W.G. MOOK et al., 1974, P. FRITZ et al., 1976, B. BLAVOUX, 1978, P. HUBERT, 1989). Ce n'est pas le cas des concentrations ioniques qui intègrent les pollutions, et encore moins de la conductivité qui prend en compte tous les éléments.

De plus, dans l'hypothèse où C représente la concentration chimique, la part des composantes varient en fonction de l'élément pris en compte. En effet, les processus chimiques tels que la diffusion, la dispersion, et les réactions en milieu aqueux (précipitations, dissolutions, processus d'oxydo-réduction et complexation des ions) sont différentes d'un ion à l'autre.

Certains auteurs prennent en considération plusieurs composantes : le ruissellement (R), l'écoulement hypodermique (H), deux types d'écoulement souterrain (S1 et S2) et une source de pollution (P). L'équation des flux est alors la suivante :

$$C \cdot Q = C_R \cdot Q_R + C_H \cdot Q_H + C_{S1} \cdot Q_{S1} + C_{S2} \cdot Q_{S2} + C_P \cdot Q_P$$

Dans la pratique, on distingue une composante de ruissellement et une composante souterraine globale (n = 2). En effet, il est difficile d'isoler les autres composantes car les débits et les concentrations ne sont pas tous connus. On a alors :

$$C \cdot Q = C_R \cdot Q_R + C_S \cdot Q_S$$

$$\text{et } Q = Q_R + Q_S$$

Ces équations permettent de déterminer le débit souterrain, Q_S :

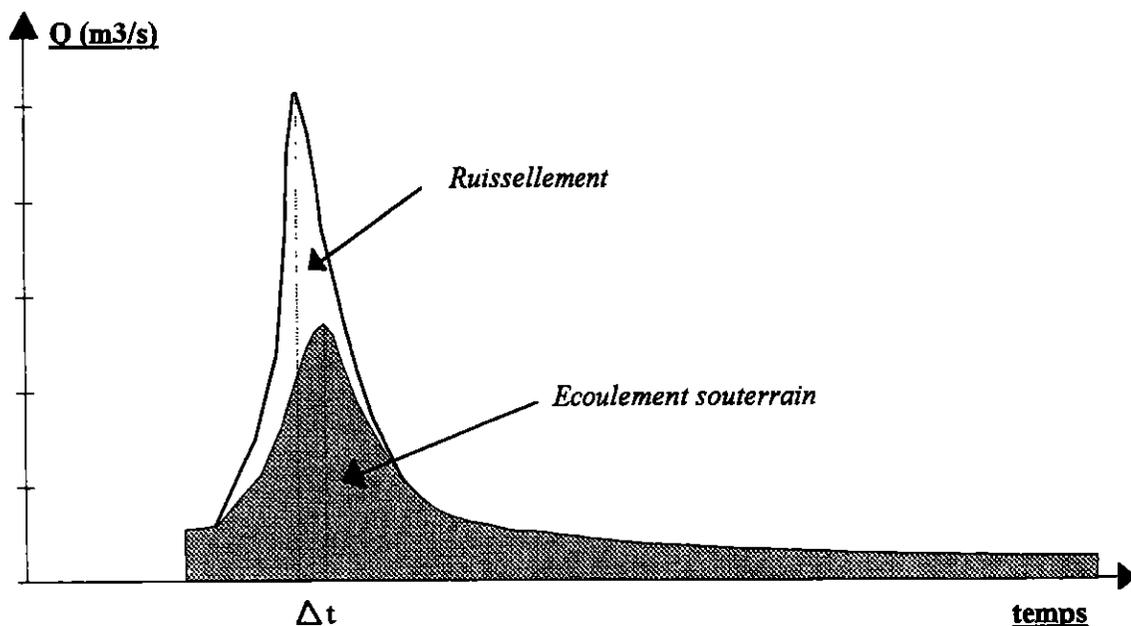
$$Q_S = Q \cdot \frac{(C - C_R)}{(C_S - C_R)}$$

- Q et C sont généralement connus;
- C_R est déterminée, soit :
 - au moment de la pointe de crue. Mais cette solution semble aujourd'hui caduque, car des études récentes (P. HUBERT, 1989) montrent qu'il existe une contribution importante des eaux souterraines pendant cette période;
 - sur un ruisseau temporaire;
 - sur une partie haute du bassin versant étudié;
- C_S est donnée soit :
 - par les eaux d'étiage;
 - à partir de mesures dans les aquifères.

L'utilisation de l'équation des flux suppose tout de même certaines conditions :

- aucune interaction chimique au cours du mélange des eaux (un mélange homogène);
- une composition sensiblement constante des eaux souterraines au cours de la crue;
- un contraste des teneurs entre la partie souterraine et le ruissellement.

Les résultats mettent en évidence une contribution importante des eaux souterraines au moment de la crue et un décalage temporel (Δt) de la pointe de crue de l'écoulement souterrain (P. OLIVE, 1970, D. HEYDARPOUR, 1974, B. BLAVOUX, 1978).



Ce décalage temporel a parfois une réalité physique, car l'écoulement de l'eau souterraine est différée. Mais il peut aussi s'expliquer par un phénomène physico-chimique. En effet, des études (J. GUIZERIX, R. MARGRITA, J. MOLINARI, 1976) montrent qu'il existe une différence entre "le transfert de masses" et "le transit" (M. BAKALOWICZ, 1974, et A. MANGIN, non publié). Le transfert d'énergie étant plus rapide que le transport des éléments (ralenti par des processus chimiques), un décalage temporel se produit entre la pointe de crue du ruissellement (transit) et celle de l'écoulement souterrain (transfert de masses).

A l'échelle de la crue, ce décalage est à prendre en considération pour déterminer la part de l'écoulement souterrain. Cependant, à l'échelle du cycle hydrologique, il peut-être négligé.

4.4.2. Essai de décomposition sur quelques affluents et sur la Garonne à Portet, pour le cycle 1993

4.4.2.1. Méthode adoptée

Habituellement, la décomposition chimique s'effectue sur une crue. Dans cette étude, elle est réalisée sur une plus longue période : le cycle hydrologique 1993, cycle étudié précédemment. Nous avons choisi le modèle de conservation des masses, en prenant en compte deux composantes de l'écoulement : une de ruissellement et une souterraine.

$$C \cdot Q = C_R \cdot Q_R + C_S \cdot Q_S$$

$$\text{Le débit } Q_S \text{ est donné par : } Q_S = Q \cdot \frac{(C - C_R)}{(C_S - C_R)}$$

Pour valeur de C, nous avons choisi les concentrations en bicarbonates car ces derniers proviennent de la dissolution des roches carbonatées, principaux aquifères du bassin, et sont indépendants des phénomènes de pollutions. Il aurait été préférable d'utiliser l'oxygène-18, mais nous ne disposons que de quatre analyses isotopiques sur le cycle.

Comme nous ne possédons que de douze valeurs de C et Q sur le cycle, nous supposons une représentativité mensuelle de chaque prélèvement.

C_R , représentant la concentration des bicarbonates dans le ruissellement, est considérée comme nulle car l'eau de pluie n'est que très faiblement chargée ($C < 5 \text{ mg/l}$). C_S , concentration en bicarbonates des eaux souterraines, est supposée être égale à la valeur la plus forte des douze campagnes.

4.4.2.2. Résultats

La décomposition est effectuée sur la Garonne à Portet et sur six de ses affluents : le Ger, le Salat, le Volp, l'Arize, la Noue et l'Aussonnelle.

La concentration maximale en bicarbonates, correspondant à C_S , ne se situe pas forcément en fin de cycle. En effet, pour le Ger, le Salat et le Volp, elle se trouve en début de

cycle; pour l'Aussonnelle, l'Arize et la Garonne à Portet, à l'étiage hivernal; et pour la Noue, au printemps (cf. tableau 4-10).

Ces différences dépendent de la particularité hydrochimique des bassins (cf. chapitre 4.2.3) :

- Sur le Salat, les concentrations en bicarbonates augmentent pendant les périodes d'étiage;
- Le Ger présente des teneurs quasi-constantes;
- L'évolution des bicarbonates sur l'Aussonnelle est surtout liée aux dilutions;
- Sur l'Arize, la Noue et le Volp, les plus fortes concentrations apparaissent après les crues;
- Enfin sur la Garonne, les concentrations augmentent progressivement jusqu'à la fin de l'étiage. Au printemps, elles diminuent; puis, elles remontent à la fin du cycle.

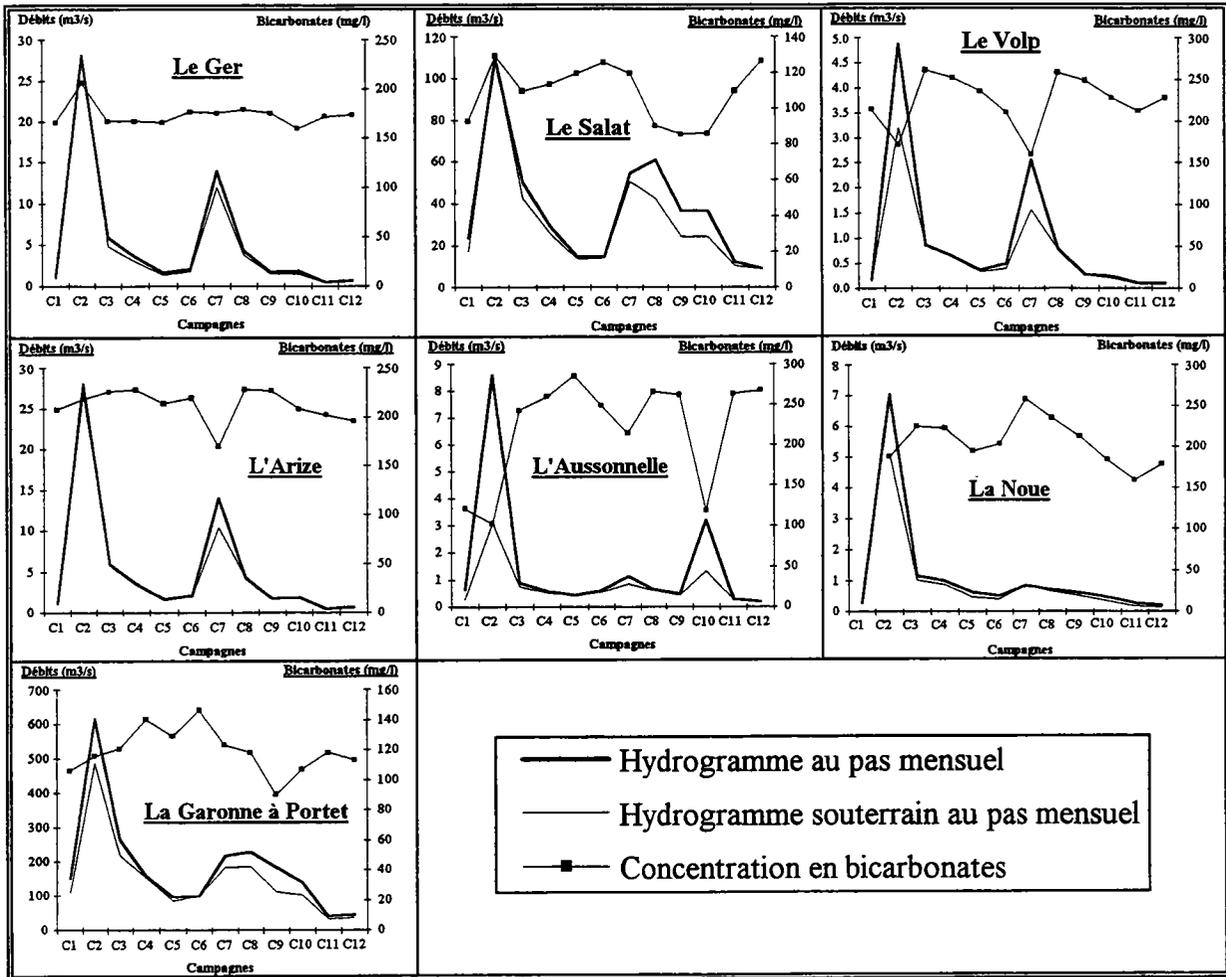
Bassin	Caractéristiques du bassin		Décomposition chimique	
	Présence de réserves neigeuses	Perturbations par les aménagements	Date du maximum en bicarbonates (numéro de campagne)	Contribution souterraine (%)
Ger	Non	Non	Début de cycle (C2)	91
Salat	Oui	faibles	Début de cycle (C2)	85
Volp	Non	Non	Début de cycle (C3)	74
Arize	Non	Non	Etiage hivernal (C4)	92
Aussonnelle	Non	Non	Etiage hivernal (C5)	52
Noue	Non	faibles	Printemps (C7)	78
Garonne à Portet	Oui	fortes	Etiage hivernal (C6)	80

Tableau 4 - 10. Contribution souterraine de l'écoulement de quelques bassins pour le cycle 1993 (déterminée par décomposition chimique)

La composante souterraine de l'écoulement, estimée à partir des teneurs en bicarbonates et des débits moyens mensuels, est de 52 % pour l'Aussonnelle, de 74 % pour le Volp, de 78 % pour la Noue, de 85 % pour le Salat, de 91 % pour le Ger, de 92 % pour l'Arize et de 80 % pour la Garonne à Portet (cf. graphique 4-67). Ces résultats apparaissent élevés par rapport à ceux de la décomposition hydrodynamique qui estiment à 47 % et entre 46 % et 60 % la composante souterraine sur le Salat et sur la Garonne à Portet.

De plus, sur le Ger et le Salat, la teneur en bicarbonates de début de cycle, prise pour la concentration des eaux souterraines, est trop forte. Elle ne correspond pas à l'hydrochimie moyenne des eaux souterraines, mais plutôt à celle de masses d'eau mises en mouvement au début du cycle.

Ces mauvais résultats proviennent essentiellement de l'insuffisance du nombre d'échantillons prélevés durant le cycle. C'est pourquoi, il serait intéressant de disposer de concentrations au pas journalier, pour estimer de façon plus précise la contribution souterraine. En attendant, l'estimation de l'écoulement souterrain effectuée à partir de la décomposition hydrodynamique paraît plus réaliste.



Graphique 4 - 67. Hydrogrammes souterrains au pas mensuel sur le bassin du Ger, du Salat, du Volp, de l'Arize, de l'Aussonnelle, de la Noue et de la Garonne à Portet, cycle 1993

Dans le chapitre suivant, une autre méthode sera envisagée pour caractériser les apports souterrains durant la période d'étiage 1993. Elle n'utilise pas les éléments chimiques classiques, mais les isotopes (tritium et carbone 13). Pour déterminer l'origine et l'altitude moyenne de recharge des eaux de la Garonne, nous utiliserons aussi l'oxygène-18 et le deutérium.

**5. LES ISOTOPES DU MILIEU
DES EAUX DU BASSIN DE LA
GARONNE**

Introduction

Les résultats isotopiques sur le bassin de la Garonne sont relatifs aux prélèvements de la campagne d'étiage du cycle 1993 et à ceux effectués sur trois bassins, caractéristiques du point de vue hydrogéologique et hydrologique :

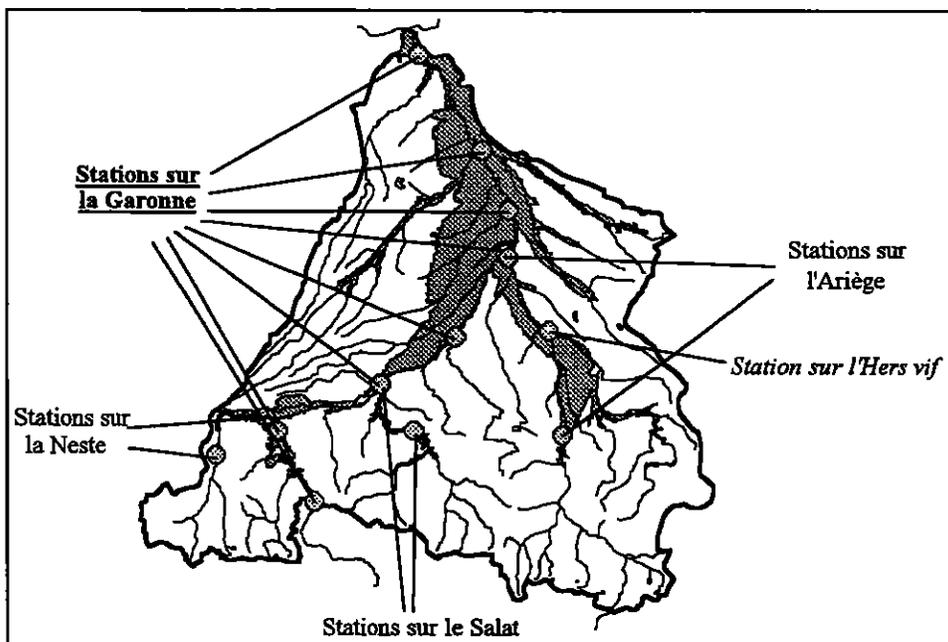
- *le Volp* (bassin où les eaux de ruissellement prédominent);
- *le Ger* (bassin où les eaux souterraines prédominent);
- *le Salat* (bassin où se combinent eaux de ruissellement, eaux souterraines et eaux provenant de la fonte des neiges).

Les résultats doivent permettre :

- de caractériser et de déterminer les apports souterrains du bassin;
- d'estimer l'altitude de recharge des eaux de la Garonne;
- de connaître la nature des eaux.

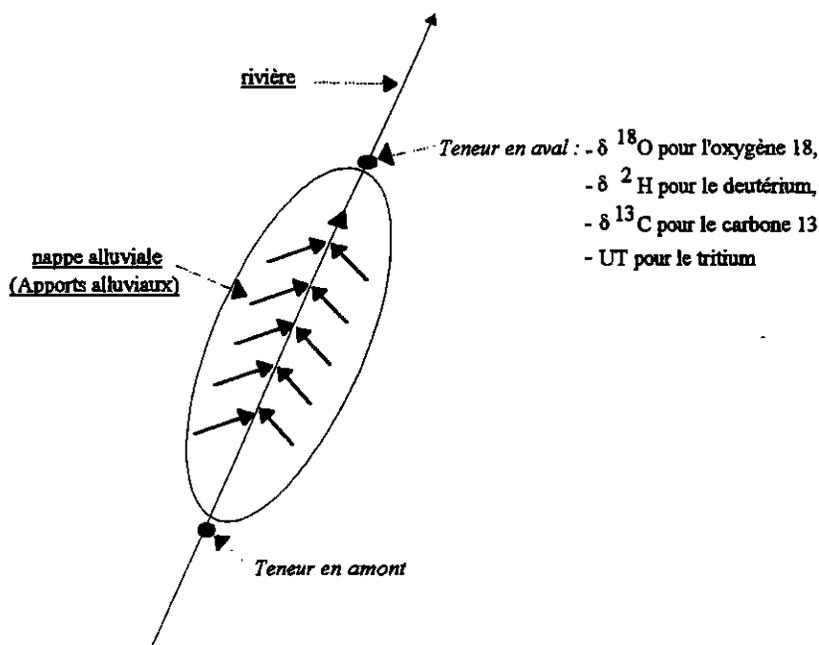
5.1. Campagne d'étiage 1993

Plusieurs prélèvements (15 au total) ont été effectués le long de la Garonne et sur ses trois affluents principaux : l'Ariège (avec l'Hers vif), le Salat et la Neste. Ils ont été répartis en amont et en aval de chaque grande nappe alluviale (cf. carte 5-1), afin de déterminer les apports intermédiaires (apports alluviaux et apports des affluents). Les stations de prélèvements correspondent à celles utilisées dans l'étude des éléments majeurs.



Carte 5 - 1. Stations de prélèvements isotopiques de la campagne d'étiage du cycle 1993

Dans l'hypothèse où les apports sont strictement alluviaux, l'existence de ces apports doit se manifester par une différence entre la teneur isotopique en amont et celle en aval de la nappe (cf. figure).



Pour l'oxygène-18 et le deutérium : les apports alluviaux contribueraient à une augmentation de la teneur isotopique, car l'eau de ruissellement, provenant de la partie amont du bassin, est moins riche en isotopes lourds que l'eau de la nappe alluviale, située à une altitude inférieure (cf. 5.1.5.1.1). Il faut cependant que les variations saisonnières soient faibles dans les eaux de la nappe. Si la teneur en amont est égale à la teneur en aval, les apports intermédiaires sont inexistantes.

Pour le tritium : une différence entre la teneur en amont et celle en aval est aussi le signe d'apports. Une information est aussi apportée sur l'âge des eaux souterraines, suivant que la concentration augmente ou diminue de l'amont vers l'aval.

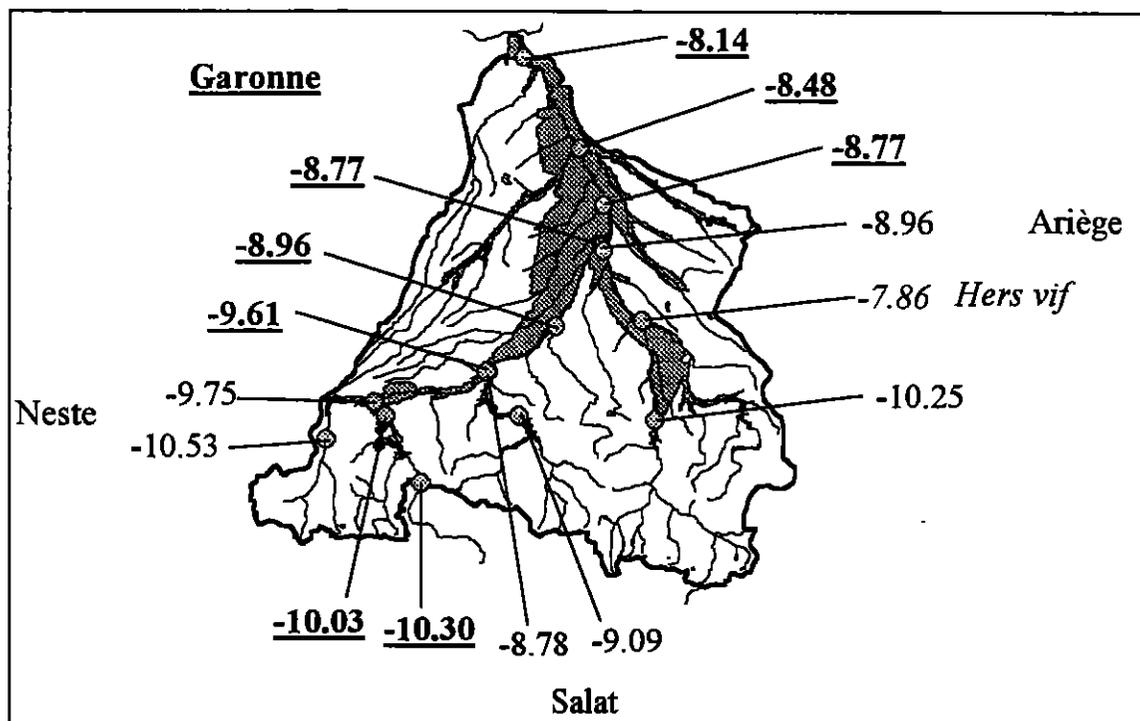
Lorsque les apports intermédiaires proviennent à la fois de la nappe alluviale et d'un affluent, l'interprétation est plus complexe.

5.1.1. L'oxygène-18

On note un enrichissement systématique des teneurs en oxygène-18 de l'amont du bassin vers l'aval du bassin (cf. carte 5-2). Au Pont-du-Roi, le $\delta^{18}\text{O}$ est de -10.30 ‰ et à l'exutoire du bassin il est de -8.14 ‰.

La relation oxygène-18-altitude montre que l'enrichissement en oxygène-18 le long de la Garonne est plus ou moins constant (cf. graphique 5-1). Ainsi, on note un net enrichissement :

- entre 5 et 6, lié aux apports du Salat;
- à partir de 3, lié aux apports des affluents en aval de Toulouse.



Carte 5 - 2. Teneurs en oxygène-18 sur le bassin de la Garonne, étiage 1993

La droite reliant les eaux de la Garonne est pratiquement identique à celle des eaux de précipitations calculée dans les Pyrénées orientales (M. CREMMISSA, 1993). Le gradient altitudinal est d'environ 0.24 ‰ par 100 m. Il est équivalent aux gradients déjà trouvés dans les Pyrénées :

- 0.30 ‰ par 100 m, pour les eaux issues de trois systèmes karstiques Pyrénéens : le Baget, Aliou et Fontestorbes (M. BAKALOWICZ, B. BLAVOUX, A. MANGIN, 1974);
- 0.29 ‰ par 100 m, à partir des teneurs pondérées des pluies de l'été 1974 en Ariège (P. EBERENTZ, 75);
- 0.20 ‰ par 100 m, à partir des pluies sur le bassin karstique de l'Arbas (S. PUYOO, 1976).

La teneur en oxygène-18 du Volp est très proche de celle des eaux météoriques. Ce n'est pas étonnant car c'est un bassin dont la part des eaux ruisselées est importante dans l'écoulement et dont l'amplitude de variation altitudinale est faible. La teneur du Volp valide, a fortiori, la relation ^{18}O -altitude des eaux météoriques.

A partir de cette relation, on peut déterminer l'altitude moyenne de recharge des eaux de surface. L'équation de la droite des précipitations est la suivante :

$$\delta^{18}\text{O} = (-0.0024 \times h) - 6.4$$

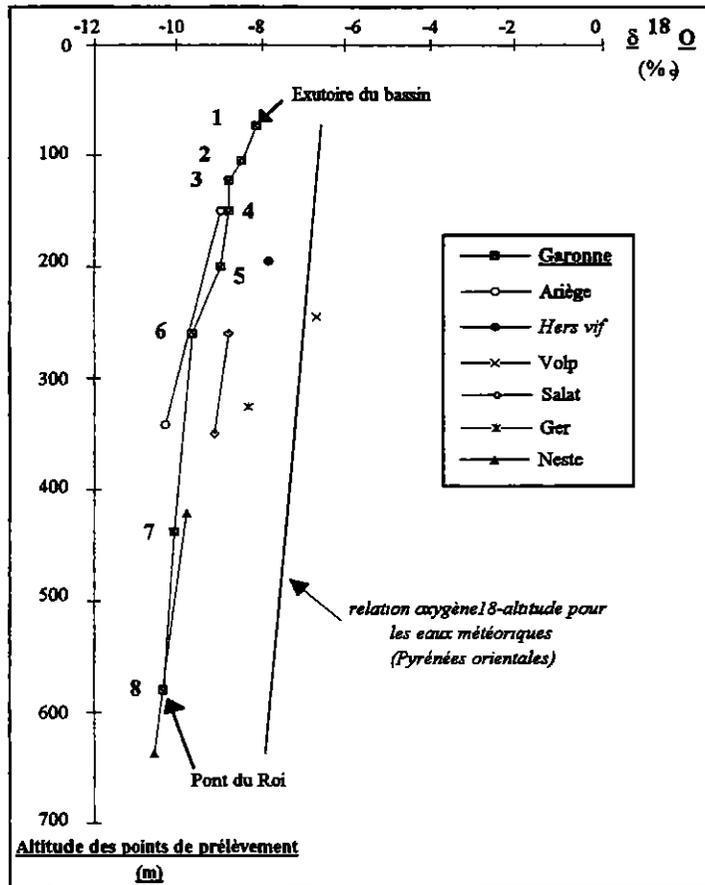
avec :

h : altitude.

Ce qui permet de déduire h :

$$h = -418.4 (\delta^{18}\text{O} + 6.4)$$

Cette relation permet de calculer l'altitude moyenne de recharge des eaux de la Garonne et de ses affluents (cf. tableau 5-1).



Graphique 5 - 1. Relation oxygène-18-altitude des stations de prélèvements sur le bassin de la Garonne, étiage 1993

<u>Point de prélèvement</u>	<u>$\delta^{18}\text{O}$ (‰)</u>	<u>Altitude du point de prélèvement (m)</u>	<u>altitude moyenne de recharge (m)</u>
Garonne, exutoire du bassin	-8.14	73	730
Garonne, Toulouse	-8.77	123	990
Garonne, Pont-du-Roi	-10.30	580	1630
Ariège, Lacroix-Falgarde	-8.96	150	1070
Hers vif, Cintegabelle	-7.86	195	610
Salat, Roquefort/Garonne	-8.78	260	1000 (800)
Neste, Mazères de Neste	-9.75	421	1400
Ger, Pointes-Inard	-8.32	326	800

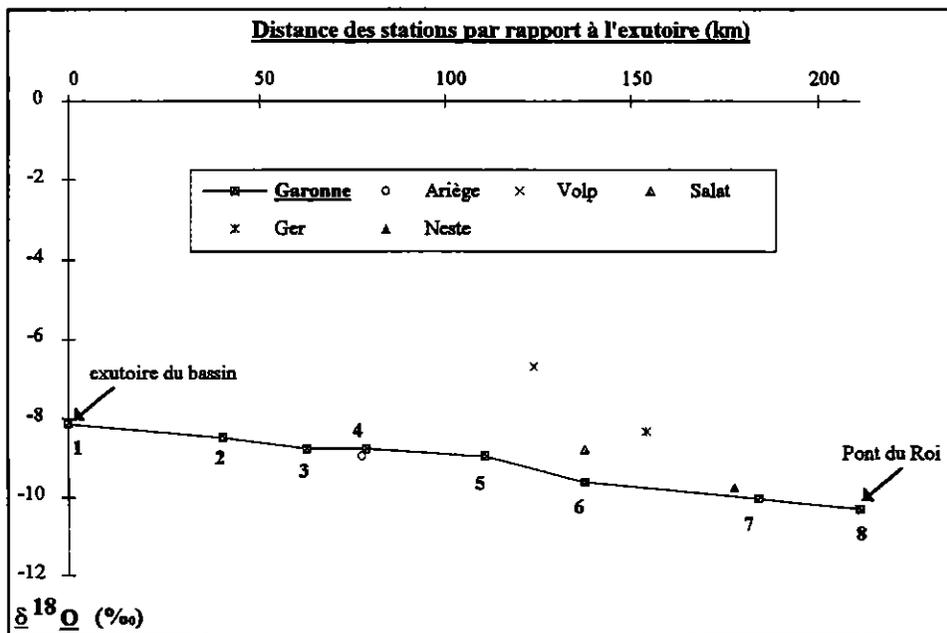
() : altitude moyenne du bassin versant.

Tableau 5 - 1. Altitude moyenne de recharge des eaux de quelques stations, étiage 1993

Sur la Garonne, on constate qu'à chaque point de prélèvement correspond une altitude moyenne de recharge très élevée. A Toulouse (altitude de 123 m), les eaux de la Garonne proviennent d'une altitude moyenne égale à 990 m (au Pont-du-Roi l'altitude est de 580 m). Comme l'altitude moyenne du bassin versant est d'environ 650 m (Agence de l'Eau Adour-Garonne), les eaux d'étiage ont une origine montagnarde.

L'Ariège (150 m) et le Salat (260 m) possèdent des altitudes moyennes de recharge à peu près équivalentes, qui sont respectivement de 1070 m et de 1000 m. Les eaux de la Neste par contre (421 m), proviennent d'une altitude moyenne plus élevée, égale à 1400 m. Quant à l'Hers vif (195 m) et le Ger (326 m), ils ont des altitudes moyennes de recharge respectives de 610 m et de 800 m.

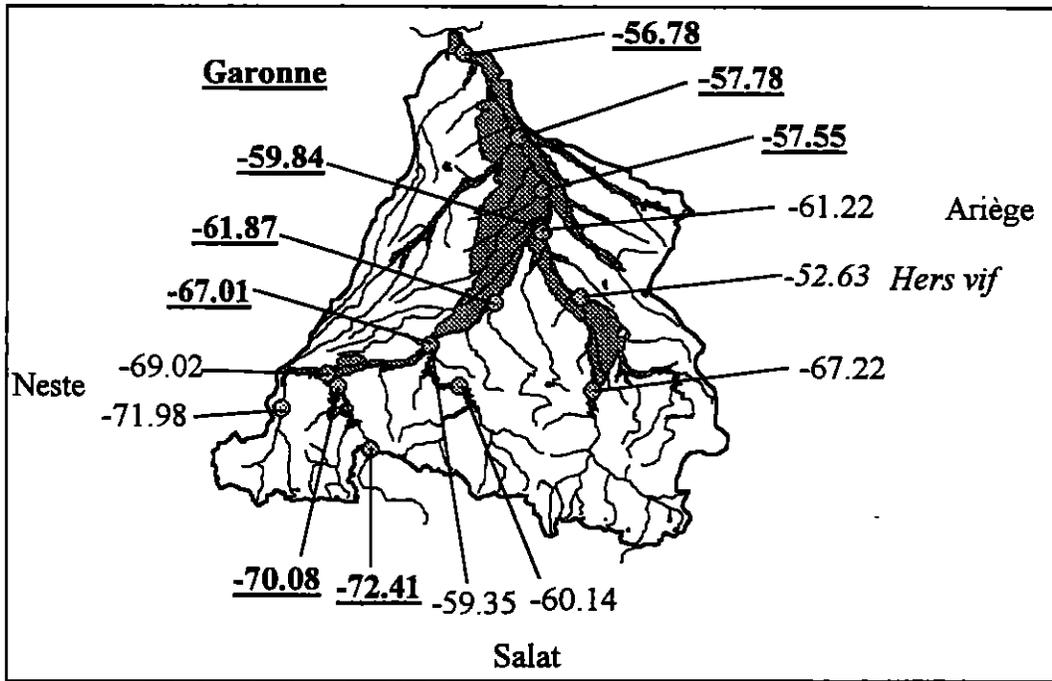
L'étude de l'évolution de la teneur en oxygène-18 des eaux de la Garonne en fonction de la distance entre l'exutoire du bassin (1) et chaque station de prélèvement (cf. graphique 5-2) permet d'apprécier l'influence des apports intermédiaires. La pente, pratiquement constante, indique un enrichissement régulier en oxygène-18. On note, tout de même, un changement de pente à partir de Roquefort (6). Ceci est lié à l'arrivée des eaux du Salat, plus riches en oxygène-18. D'ailleurs, parmi les trois affluents principaux de la Garonne, seul le Salat possède une teneur en oxygène-18 nettement plus élevée que celle de la Garonne à la même altitude.



Graphique 5 - 2. Evolution des teneurs en oxygène-18 le long de la Garonne, étiage 1993

5.1.2. Le deutérium

A l'instar de l'oxygène-18, on remarque que les eaux de surface s'enrichissent en deutérium, de l'amont vers l'aval du bassin (cf. carte 5-3). D'autre part, les relations deutérium-altitude de prélèvement et deutérium-distance entre les stations sont équivalentes à celles de l'oxygène-18 (les deux isotopes évoluent donc de la même façon).



Carte 5 - 3. Teneurs en deutérium sur le bassin de la Garonne, étiage 1993

5.1.3. Corrélation ^{18}O - ^2H

La relation oxygène-18-deutérium montre (cf. graphique 5-3) :

- tout d'abord, une bonne corrélation entre les deux isotopes;
- un alignement des points sur la droite de CRAIG. Les eaux de surface proviennent donc des eaux météoriques et il n'y a pas de phénomène d'évaporation;
- une influence océanique très nette. L'influence méditerranéenne sur les eaux d'étiage est inexistante.

La droite correspondant à la relation oxygène-18-deutérium pour les eaux de surface possède donc la même équation que la droite des eaux météoriques (droite de CRAIG) :

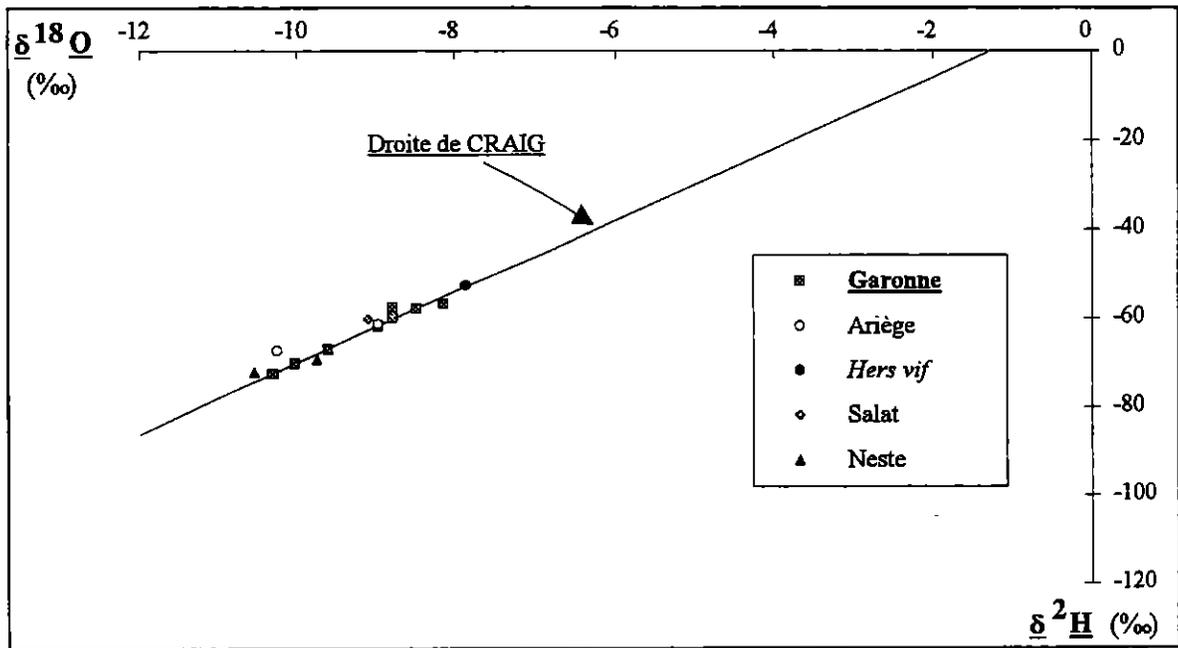
$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

Les points de prélèvements le plus en amont sur les bassins de l'Ariège, du Salat et de la Neste ne sont pas tout à fait sur la droite de CRAIG. Ils présentent un excès en deutérium ou un appauvrissement en oxygène-18.

5.1.4. Le tritium

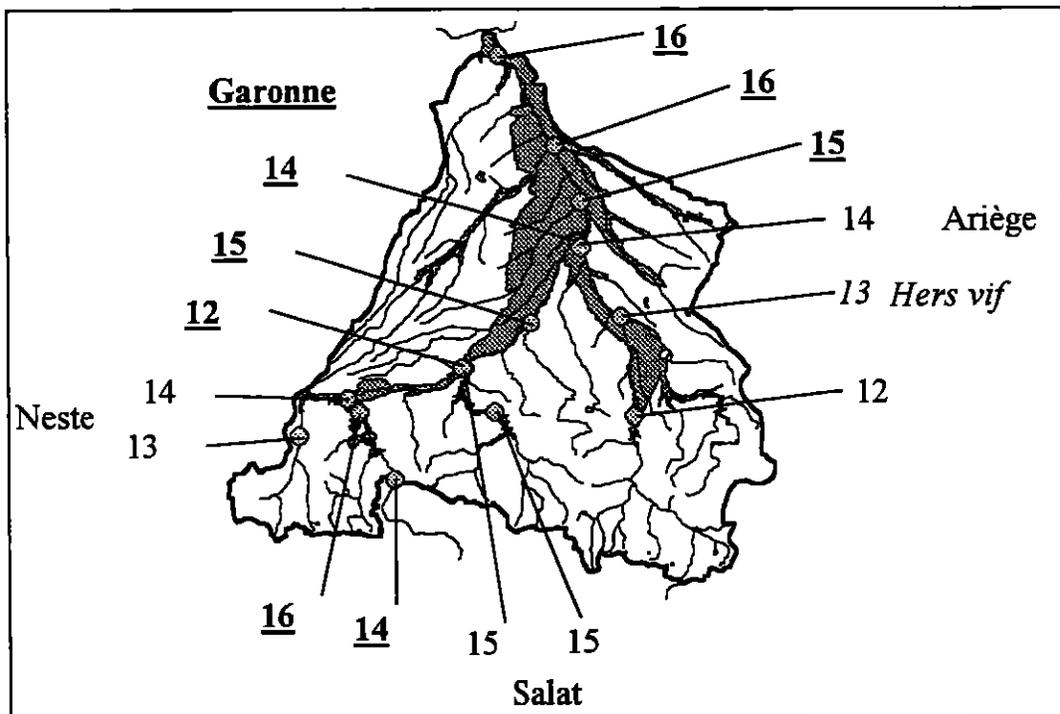
Les teneurs sur le bassin sont comprises entre 12 et 16 UT. Elles correspondent, globalement, à des eaux récentes (cf. carte 5-4).

On constate une légère augmentation vers l'aval du bassin de la Garonne. Ce qui suppose un apport d'eaux souterraines ayant des temps de séjour un peu plus long. Cette évolution est aussi constatée sur l'Ariège et sur la Neste.



Graphique 5 - 3. Corrélation oxygène-18-deutérium sur le bassin de la Garonne, campagne d'été 1993

Sur la Garonne, entre Labroquère et Mancieux (en amont de la confluence du Salat), on note une baisse significative des teneurs, puisqu'on passe de 16 à 12 UT. Les apports de la Neste (14 UT) ne suffisent pas à expliquer cette baisse. Il faut plutôt chercher la cause du changement dans les apports du Ger (7 UT) et peut être aussi dans les apports de la plaine de Rivière entre Montréjeau et Saint-Gaudens.



Carte 5 - 4. Teneurs en tritium sur le bassin de la Garonne, été 1993

5.1.5. Le carbone 13

5.1.5.1. Evolution sur l'ensemble du bassin

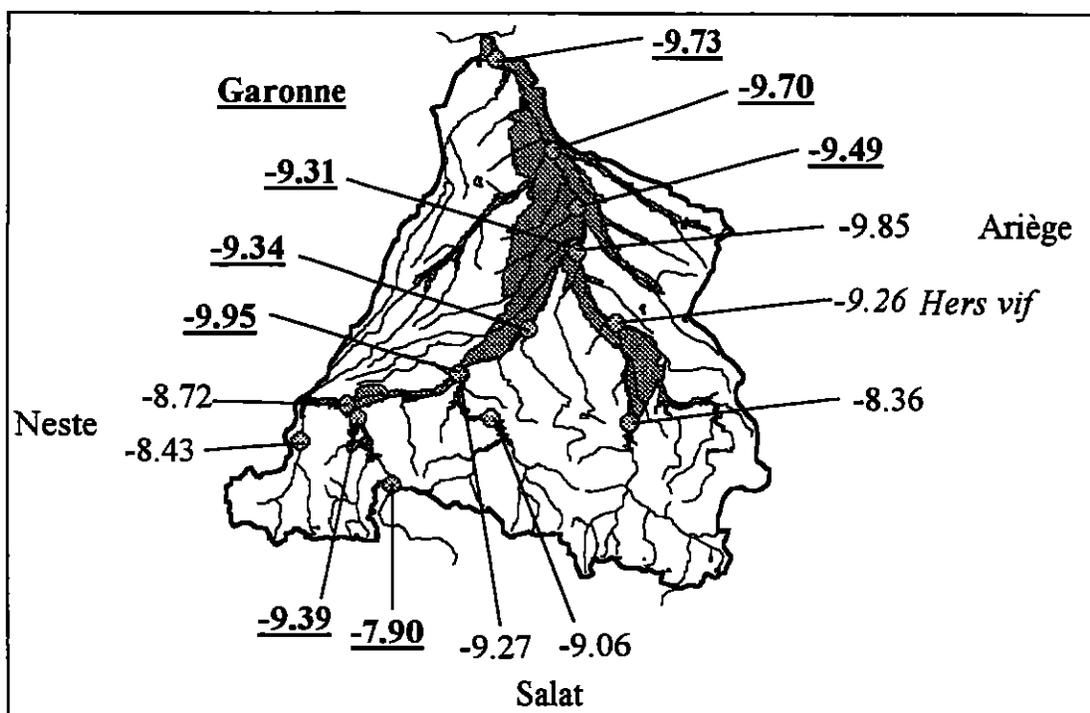
A l'inverse de l'oxygène-18 et du deutérium, les teneurs en carbone 13 s'appauvrissent de l'amont du bassin vers l'aval du bassin (cf. carte 5-5). Elles sont comprises entre -9.95 ‰ et -7.90 ‰.

Les valeurs fortes, présentes en amont des bassins de la Garonne, de l'Ariège, du Salat et de la Neste, sont l'indice d'un mélange des eaux avec le CO₂ atmosphérique (le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ atmosphérique est égal à -6.8 ‰). Par contre, l'appauvrissement des teneurs vers l'aval des bassins s'explique par des apports d'eaux carbonatées, issues d'un système "ouvert" ou "fermé".

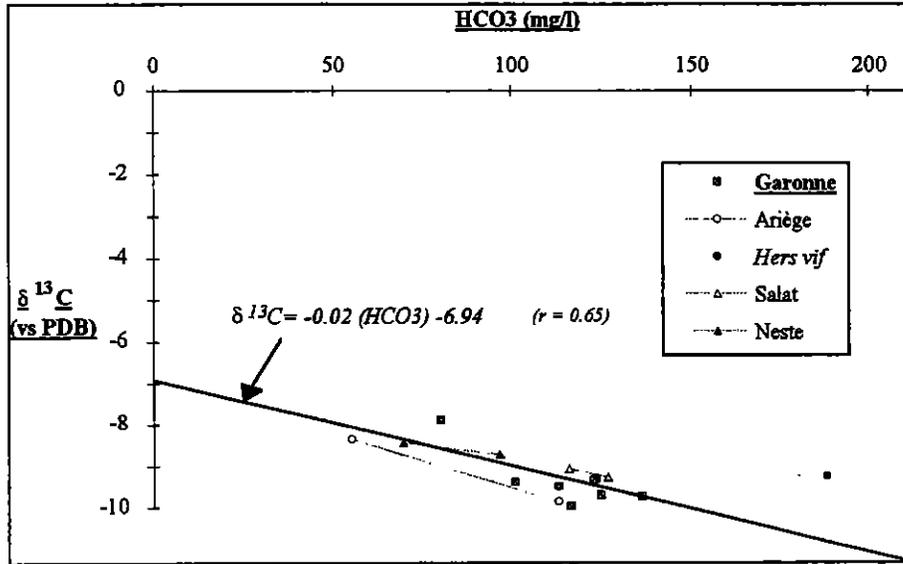
Cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par la relation carbone 13-bicarbonates (cf. graphique 5-4). En effet, lorsque les teneurs en carbone 13 diminuent, les teneurs en bicarbonates augmentent. Par contre, il n'y a pas de relation entre la pCO₂ et le carbone 13.

La détermination du type de système ("ouvert" ou "fermé"), rendant compte des teneurs en carbone 13, n'est pas facile, car les eaux d'étiage proviennent d'un mélange de deux eaux :

- des eaux de surface, issues du système ouvert;
- des eaux souterraines, correspondant au système fermé, mais parfois aussi à un état transitoire entre les deux modèles (M. FLEYFEL, 1979).



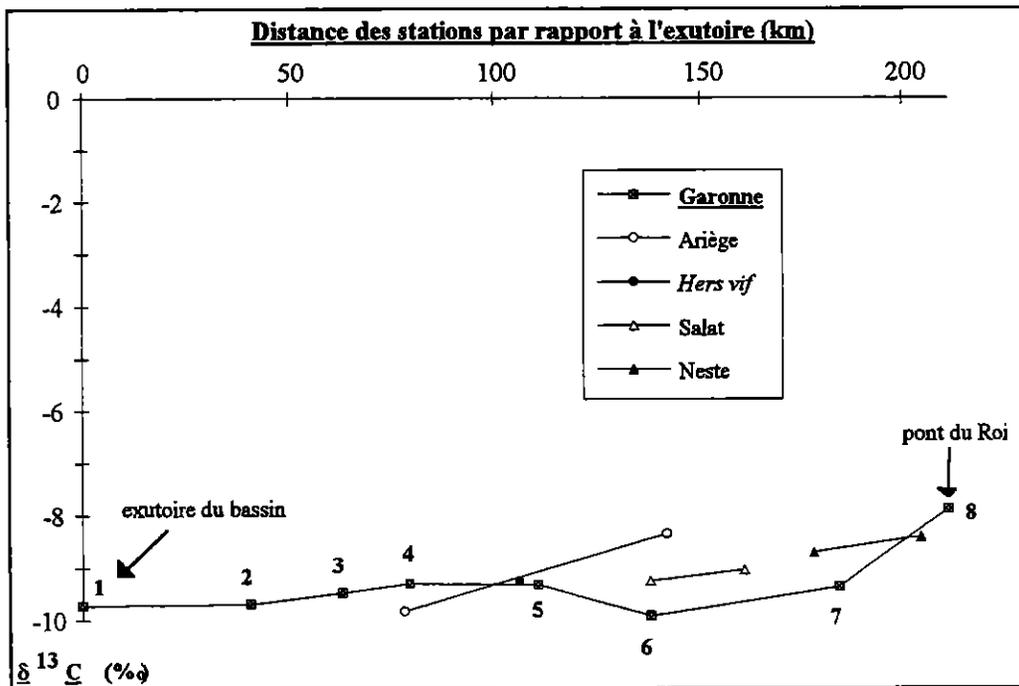
Carte 5 - 5. Teneurs en carbone 13 sur le bassin de la Garonne, étiage 1993



Graphique 5 - 4. Corrélation carbone 13-bicarbonates sur le bassin de la Garonne, étiage 1993

L'appauvrissement des teneurs en carbone 13 le long de la Garonne n'est pas constant (cf. graphique 5-5). En effet, on distingue :

- une remontée des teneurs en (5), du fait de l'arrivée des eaux du Salat, plus riches en carbone 13;
- une baisse des teneurs en (3), liée aux apports de l'Ariège.



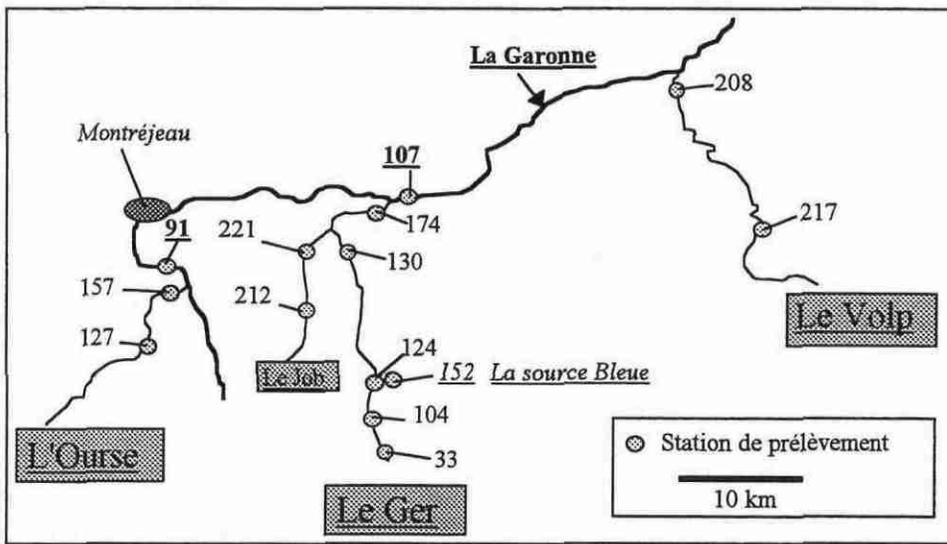
Graphique 5 - 5. Evolution des teneurs en carbone 13 le long de la Garonne, étiage 1993

5.1.5.2. Evolution sur trois sous-bassins : l'Ourse, le Ger et le Volp (campagne 1994)

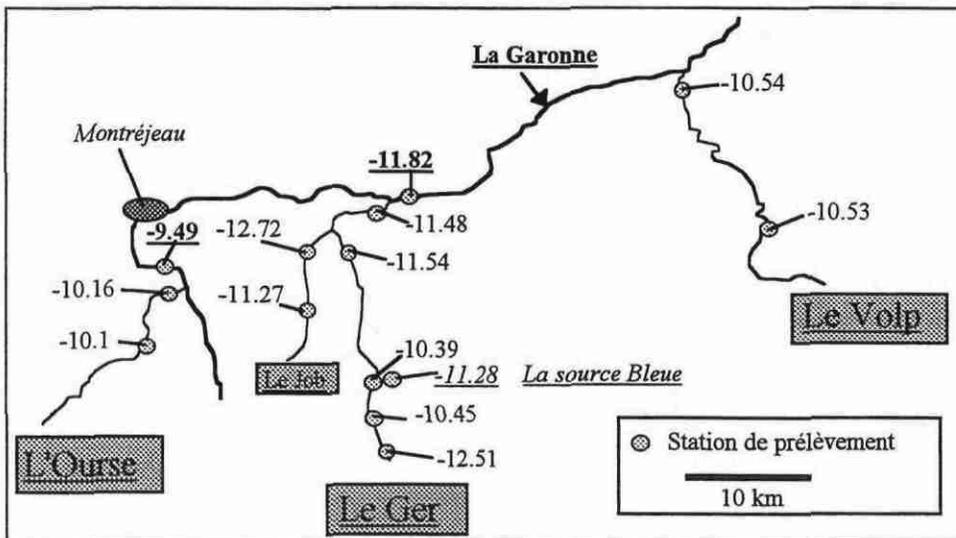
Une partie de l'écoulement de ces bassins provient d'aquifères carbonatés. Certaines sources sont connues, comme, par exemple, la Source Bleue du Ger, ou la Gourdiolle de l'Ourse (source captée).

L'évolution des bicarbonates, de l'amont vers l'aval des bassins, est croissante sur l'Ourse et le Ger (cf. carte 5-6). Elle met en évidence des apports carbonatés des aquifères karstiques.

Le Job, affluent principal du Ger, possède les teneurs en bicarbonates les plus élevées. Ses apports contribuent à environ 50 % de la minéralisation bicarbonatée du Ger.



Carte 5 - 6. Teneurs en bicarbonates (en mg/l) sur les bassins du Ger, de l'Ourse, du Volp, et sur la Garonne, septembre 1994



Carte 5 - 7. Teneurs en carbone 13 (vs PDB) sur les bassins du Ger, de l'Ourse, du Volp, et sur la Garonne, septembre 1994

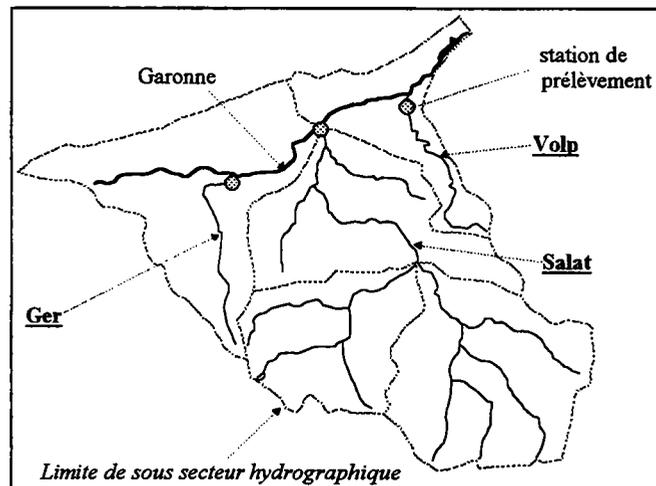
L'évolution des teneurs en carbone 13 sur ces bassins est similaire à celle observée sur le bassin de la Garonne en septembre 1993 (cf. carte 5-7). En effet, on constate une diminution des concentrations de l'amont vers l'aval des bassins. Cette baisse est faible sur les bassins de l'Ourse et du Volp. Elle est davantage marquée sur le Ger et la Garonne.

Sur le Ger, la teneur en amont du bassin (-12.51 ‰) et celle de l'exutoire (-11.48) apparaissent erronées. En effet, en amont du bassin, on aurait pu s'attendre à une teneur plus forte en ^{13}C provenant d'un mélange des eaux avec le CO_2 atmosphérique. A l'exutoire, les apports du Job aurait dû, en théorie, conduire à une teneur intermédiaire (-12.1 ‰ environ contre -11.48 ‰ mesurée). Il est possible qu'en aval le sous écoulement contribue fortement à modifier les teneurs en ^{13}C .

5.2. Etude des variations isotopiques sur trois bassins spécifiques : le Volp, le Ger et le Salat

Ces bassins sont géographiquement très proches (cf. carte 5-8). Mais, leurs types d'écoulement sont différents. Le Volp est un bassin dont l'écoulement est essentiellement dû au ruissellement. Le Ger possède, lui, un écoulement souterrain important. Quant au Salat, son écoulement est lié à la fois au ruissellement, aux apports souterrains et aux apports neigeux.

Le débit moyen (période 1973-87) est de : 1.1 m³/s pour le Volp (91 km²), de 3.0 m³/s pour le Ger (95 km²) et de 47.1 m³/s pour le Salat (1570 km²).



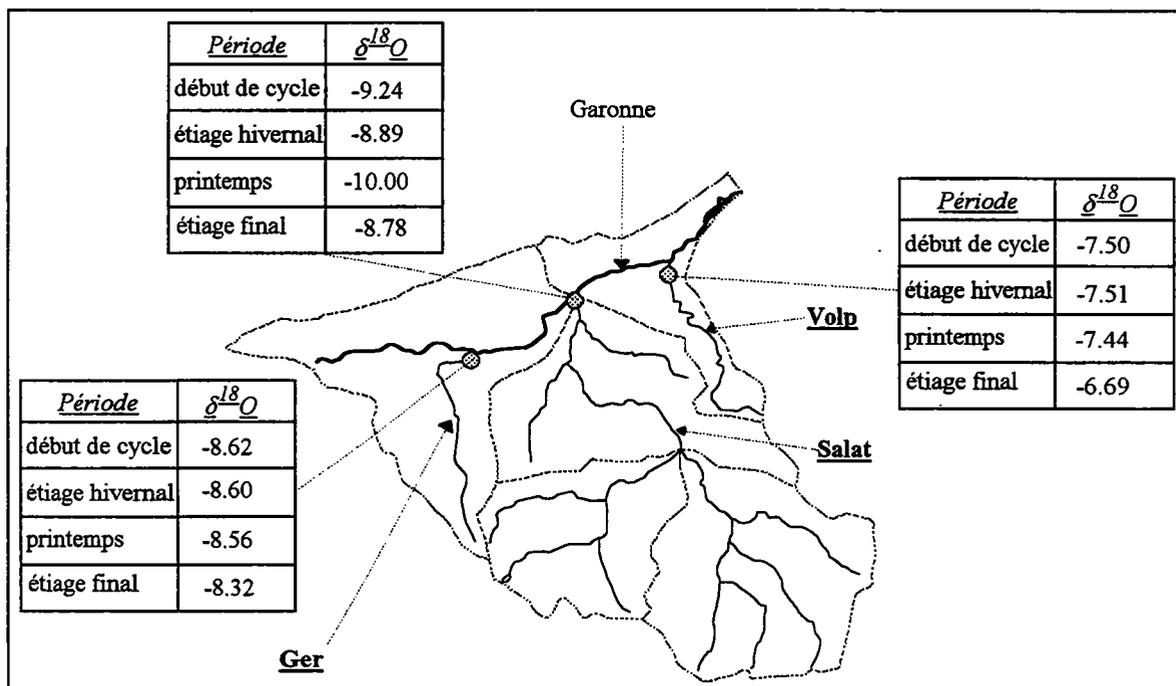
Carte 5 - 8. Localisation des bassins du Volp, du Ger et du Salat

5.2.1. L'oxygène-18

Durant le cycle 1993, les variations des teneurs en oxygène-18 diffèrent suivant le bassin (cf. carte 5-9) (cf. graphique 5-6).

Pour les quatre périodes du cycle analysées (début de cycle, étiage hivernal, printemps et étiage final), le Volp et le Ger ont des teneurs en oxygène-18 quasi-constantes. On note, cependant, un enrichissement en fin de cycle, dû à des précipitations estivales plus riches en

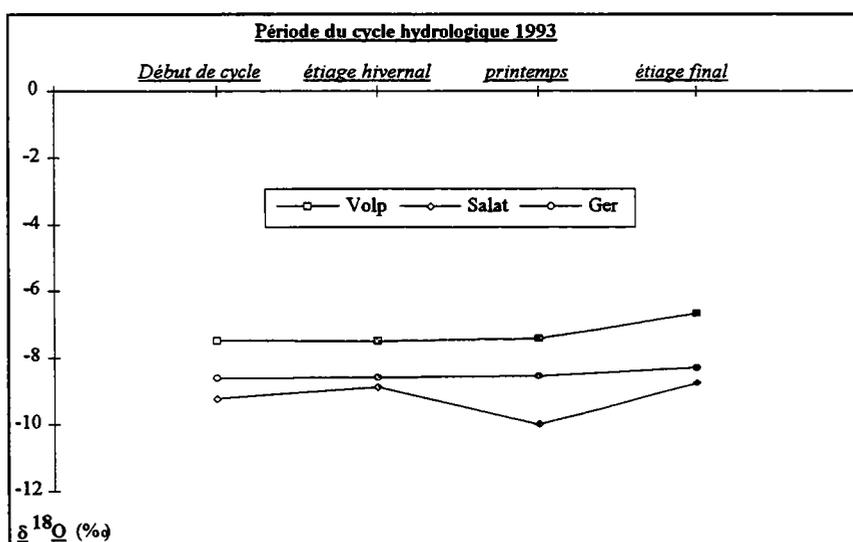
oxygène-18. Ce phénomène est d'ailleurs plus marqué sur le Volp où le ruissellement est important.



Carte 5 - 9. Teneurs en oxygène-18 à l'exutoire des bassins du Volp, du Ger et du Salat, durant le cycle 1993

En revanche, le Salat présente de nettes variations en oxygène-18. On constate en début de cycle et au printemps, un appauvrissement lié à la fonte des neiges. Les teneurs passent de -8.89 ‰ pour l'étiage hivernal, à -10.0 ‰ au printemps.

Le Ger apparaît donc comme le bassin le moins sensible aux changements climatiques. Ceci confirme le pouvoir régulateur de ses aquifères.



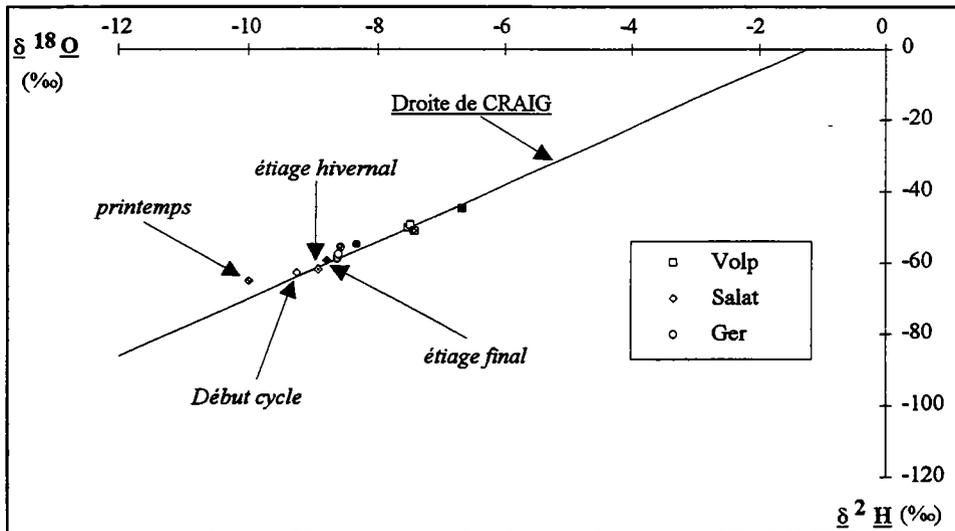
Graphique 5 - 6. Variations des teneurs en oxygène-18 sur le Volp, le Ger et le Salat, durant le cycle hydrologique 1993

5.2.2. Le deutérium

Son évolution durant le cycle hydrologique 1993 est identique à celle de l'oxygène-18.

5.2.3. Corrélation ^{18}O - ^2H

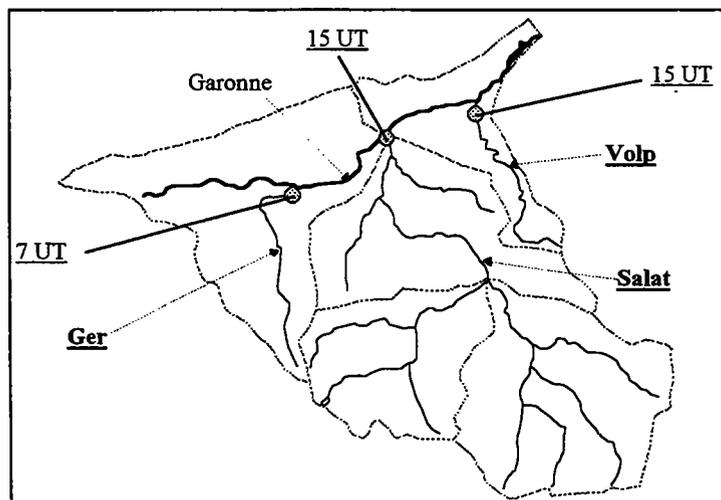
Les points s'alignent parfaitement sur la droite de CRAIG (cf. graphique 5-7). Les eaux des bassins proviennent donc d'eaux météoriques ayant comme origine la vapeur océanique.



Graphique 5 - 7. Corrélation oxygène-18-deutérium sur le Volp, le Ger et le Salat, durant le cycle hydrologique 1993

5.2.4. Le tritium

Comme pour la Garonne, cet isotope est étudié à l'étiage final du cycle 93. Sur le Salat et le Volp, les teneurs sont de 15 UT. Elles correspondent à des eaux récentes (cf. carte 5-10).



Carte 5 - 10. Teneurs en Tritium sur le Ger, le Salat et le Volp, étiage 1993

Par contre, **le Ger possède une teneur de 7 UT**. Une telle valeur permet d'affirmer que des eaux souterraines, nettement plus anciennes, possédant des temps de séjour plus longs dans les aquifères, participent en quantité importante à l'écoulement du Ger.

Conclusions

L'étude des isotopes du milieu a permis de caractériser les eaux du cycle 1993, et notamment celles de l'étiage final. **Il apparaît que les rivières étudiées sont alimentées par des eaux ayant une origine océanique** (elles n'ont pas subi d'évaporation).

En outre, à partir des teneurs en oxygène-18 des précipitations et des eaux de surface, **une altitude moyenne de recharge** est calculée pour les eaux de la Garonne à Toulouse. Elle est **d'environ 990 m**. Comparée à l'altitude moyenne du bassin qui est de 650 m, on s'aperçoit que **les eaux de la Garonne, en étiage, proviennent essentiellement de la partie montagnarde** qui apparaît donc comme **un lieu essentiel de stockage et d'alimentation**.

L'étude du carbone 13 montre une augmentation des apports souterrains carbonatés de l'amont vers l'aval du bassin.

Le tritium, quant à lui, met en évidence des temps de séjour des eaux un peu plus élevés en aval du bassin, et indique une participation croissante d'eaux souterraines peu récentes.

Il faut aussi signaler **le comportement particulier du Ger**. Ses eaux présentent des teneurs en oxygène-18 et en deutérium assez constantes, ce qui indique une régulation importante des apports. De plus, **la teneur en tritium des eaux d'étiage (7 UT)**, la plus faible du bassin, correspond à des apports importants d'eaux anciennes. Ces résultats amènent aux mêmes conclusions que l'hydrodynamique : le Ger est un bassin dont les aquifères introduisent un pouvoir régulateur important.

CONCLUSIONS GENERALES

Elle est composée de trois parties. La première est une synthèse des principaux résultats. Dans une deuxième partie, nous exposerons les méthodes qui ont été utilisées dans cette étude pour estimer les réserves souterraines, l'écoulement souterrain, les apports alluviaux et l'écoulement neigeux. Les perspectives seront évoquées dans la dernière partie.

1. Les origines des eaux souterraines de la Garonne

A) Selon les types d'aquifères

- 1) les aquifères karstiques.

Les principaux aquifères sont présents dans la partie montagnarde du bassin de la Garonne :

- *en Ariège* où le karst Fontestorbes alimente l'Hers vif. Ses réserves sont, en moyenne, de 24 millions de m³;
- *sur le bassin du Ger* (affluent de la Garonne) qui possède des réserves importantes estimées à 21 millions de m³ en 1985;
- *dans le Val d'Aran.*

Les apports des aquifères karstiques au réseau de surface varient suivant la saison. Ils dépendent de la nature du karst, de sa dynamique et de son altitude. Ainsi, l'apport est-il maximal, en hiver et au printemps, pour le Baget; et en hiver et en étiage, pour Fontestorbes.

A l'échelle pluriannuelle, les ACS (Analyses Corrélatoires et Spectrales) mettent en évidence le caractère régulateur de ces aquifères, du fait de leur capacité de stockage importante.

- 2) les nappes alluviales.

Elles prennent une extension intéressante le long des grands cours d'eau, dans leur partie piémontaise et dans la plaine.

Les apports alluviaux au réseau de surface varient aussi suivant la saison. L'étude hydrodynamique de la nappe alluviale entre Foix et Saverdun, le long de l'Ariège, révèle que les apports de la nappe — qui sont d'ailleurs réduits — ont lieu en période de crue.

Les apports de la nappe sont aussi mis en évidence par les teneurs en nitrates qui indiquent, qu'entre Crampagna et Saverdun, les apports sont présents durant tout le cycle (sauf au printemps). Par contre, entre Cintegabelle et Lacroix-Falgarde, les apports se situent principalement en début de cycle et durant l'étiage hivernal. Les réserves seraient donc plus abondantes en amont de Saverdun.

Les aquifères alluviaux semblent plus sensibles à une recharge annuelle déficiente que les aquifères karstiques. Il faut donc prendre en compte ce phénomène dans l'exploitation des aquifères alluviaux.

- 3) les petits aquifères poreux et les formations colluviales.

L'existence de ces réservoirs souterrains est apparue lors de l'étude du tarissement du bassin du Lez (affluent du Salat). Ces aquifères sont encore mal connus et sous-estimés. Ils ne fournissent pas d'émergences importantes, mais une multitude de petites sources dont les débits sont faibles.

Il est important, dans l'avenir, de tenir compte de l'existence de ces formations colluviales dans les plans d'aménagement territoriaux, car ces aquifères superficiels sont probablement très sensibles aux modifications de l'environnement.

B) Selon les affluents

L'étude des apports des différents affluents montre que **la Garonne reçoit, indépendamment de la saison, la plus grande part de son eau entre la station de Valentine et celle de Portet, de l'Ariège et du Salat.**

Pour l'étiage du cycle 1993, les isotopes permettent de préciser l'origine des apports. En effet, l'étude de l'oxygène-18 fournit une altitude moyenne de recharge des eaux de la Garonne d'environ 990 m. **Ces eaux proviennent donc essentiellement de la partie montagnarde du bassin.**

Le débit moyen de la Garonne à Portet est de 199 m³/s (période 1973-1987), compris entre 145 m³/s, pour le cycle le plus sec (cycle 1986), et 250 m³/s, pour le cycle le plus humide (cycle 1977). A Valentine, pour la même période, les débits sont respectivement de 64 m³/s, 50 m³/s et 84 m³/s.

Mais, ces débits sont influencés par de nombreux aménagements :

- à l'échelle pluriannuelle, le bilan des apports est biaisé par les débits prélevés pour les canaux (canal de Sarrancolin, canal de Saint-Martory et canal latéral). L'effet des barrages à vocation énergétique est, par contre, négligeable;
- à l'échelle mensuelle, l'influence des aménagements peut atteindre 30 % et 60 % de l'écoulement total, respectivement à Portet et à Verdun.

C) Estimation des réserves

1) Par l'analyse du tarissement

L'étude du tarissement fournit une estimation des réserves souterraines de quelques affluents. Les réserves les plus importantes sont présentes dans les bassins :

- **de l'Ariège : 142 millions de m³;**
- **du Salat : 111 millions de m³;**
- **du Ger : 21 millions de m³.**

Fontestorbes est l'aquifère karstique qui présente les réserves spécifiques les plus fortes : 400 l/m². Pour les affluents de la Garonne, c'est le Ger avec 224 l/m², en relation probable aussi avec des aquifères karstiques.

A la station de Portet, les réserves souterraines sont estimées par l'analyse du tarissement en 1985, à 1 milliard de m³. En moyenne, elles sont de 800 millions de m³. Ceci en fait la principale réserve d'eau du bassin, trois fois supérieure aux réserves à vocation énergétique et huit fois supérieure aux barrages destinés au soutien d'étiage et à l'irrigation.

2) Par la décomposition de l'hydrogramme

Pour ce qui est de la part de l'écoulement souterrain dans l'écoulement total de la Garonne à Portet, elle est comprise entre 46 % et 60 % en 1993 (elle est déterminée à partir de la décomposition hydrodynamique et l'extrapolation du tarissement). Le ruissellement représente, quant à lui, de 34 % à 48 % de l'écoulement total. La composante neigeuse est estimée à 6 %.

La décomposition hydrodynamique permet aussi de réévaluer le volume des réserves souterraines. Ce dernier est compris entre 2.1 et 2.9 milliard de m³, et représente, de façon encore plus nette, le principal réservoir d'eau du bassin, précédent le réservoir neigeux estimé à 371 millions de m³.

La décomposition chimique de l'hydrogramme s'est avérée, quant à elle, inutilisable du fait de l'insuffisance d'échantillons durant le cycle 1993 (les résultats apparaissent anormalement élevés : 80 % de l'écoulement total).

3) Le cas du Ger

Enfin, toutes les données mettent en évidence un bassin possédant une hydrogéologie particulière. C'est le Ger, petit affluent de la Garonne, en aval de Saint-Gaudens, dont la superficie est de 95 km². Il possède :

- des réserves importantes estimées à 21 millions de m³ en 1985;
- les plus fortes réserves spécifiques : 224 l/m²;
- le bassin le moins sensible aux changements climatiques;
- une variabilité hydrochimique faible;
- des teneurs en oxygène-18 et en deutérium constantes durant le cycle hydrologique;
- des eaux d'étiage anciennes, car la teneur en tritium est de 7 UT (c'est la plus faible du bassin).

Tous ces résultats convergent vers l'existence d'une régulation importante des apports qui proviennent de nombreux aquifères karstiques. Mais l'hydrogéologie et la géologie du bassin du Ger sont encore mal connues, et elles mériteraient d'être étudiées plus en détail.

D) Les données de l'hydrochimie

En ce qui concerne l'hydrochimie de la Garonne, on note une augmentation des concentrations de chaque élément chimique de l'amont vers l'aval du bassin. C'est aussi le cas du carbone 13, ce qui met en évidence une augmentation des apports bicarbonatés, liées aux apports souterrains en étiage. Quelques affluents participent de façon notable à la hausse de la minéralisation naturelle (bicarbonates, calcium, magnésium) : l'Ourse, en amont de Montréjeau, et le Ger, en aval de Saint-Gaudens.

Les autres éléments (potassium, sodium, chlorures, nitrates et sulfates) sont influencés par les effluents d'industries diverses et les rejets d'eaux domestiques usées. Cette anthropisation implique que la Garonne en aval de Montréjeau et la majorité des affluents ne présentent plus d'hydrochimie naturelle, même sur les seuls éléments minéraux majeurs et mineurs.

En étiage, les eaux de la Garonne proviennent de la partie montagnarde qui s'avère être un lieu essentiel de stockage et d'alimentation.

2. Méthodologie

L'étude de la contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface a rarement été entreprise à l'échelle d'un tel bassin (15 000 km²).

Pour cette raison, **une démarche originale de "l'hydrogéologue-hydrologue" a été créée**. Hydrogéologue, car les résultats doivent être validés avec un savoir faire d'hydrogéologue qui lie les caractéristiques des écoulements à la géologie, et hydrologue, car la matière première est constituée principalement par les historiques de débits des cours d'eau sur des stations situées pour les besoins de l'hydrologie.

Ainsi, l'estimation des réserves souterraines et de l'écoulement souterrain a-t-elle nécessité la mise au point et l'utilisation de méthodes et d'outils spécifiques d'analyses.

Certaines de ces méthodes ont été développées par le CNRS de Moulis pour l'étude des aquifères karstiques. Il s'agit :

- **des Analyses Corrélatoires et Spectrales (ACS)** (A. MANGIN) qui permettent, par l'intermédiaire du spectre et du corrélogramme, d'estimer l'importance des réserves souterraines et d'évaluer leur rôle dans la régulation du système.
- **de l'analyse du tarissement, basée sur la formule de Maillet** (A. MANGIN) qui est choisie en raison de ses propriétés mathématiques intéressantes :
 - α est indépendant de Q_0 ;
 - la dérivée d'une exponentielle est une exponentielle;
 - en unité semi-logarithmique, la fonction de MAILLET est une droite, ce qui permet d'identifier facilement le tarissement sur un graphique semi-log.
- **du calcul des équilibres calco-carboniques** (M. BAKALOWICZ) avec notamment l'emploi du dpH et de la pCO₂, variables qui caractérisent le rôle du CO₂ et distinguent eaux souterraines et eaux de surface.

Sur ces bases, des méthodes originales ont été développées :

- 1) Pour estimer les apports alluviaux

La méthode, appliquée à la nappe alluviale de l'Ariège située entre Foix et Saverdun, **utilise les débits de deux stations hydrométriques** (une en amont et une en aval de la nappe). Elle est basée sur l'hypothèse qu'une augmentation régulière du débit est proportionnelle à la superficie du bassin versant intermédiaire.

La démarche est la suivante :

- pour s'affranchir de la corrélation importante des débits entre les deux stations, les chroniques sont discrétisées suivant un pas précis, à partir duquel la corrélation est nulle. Ce pas est déterminé sur le corrélogramme des débits;
- on calcule ensuite la régression entre les débits des nouvelles chroniques discrétisées, en prenant comme référence la station en amont. Cette relation donne l'augmentation moyenne des débits entre les deux stations;
- la régression permet ensuite de reconstituer une chronique théorique pour la station en aval;
- enfin, on compare les débits réels aux débits calculés : c'est le résidu. **Ce dernier permet de connaître le fonctionnement et le comportement de la nappe.** Le résidu est alors traité comme une chronique de débit. S'il est structuré, il représente bien les effets d'un dispositif (aquifère, réservoir) modifiant les écoulements dans leur quantité.

- 2) Pour estimer les apports neigeux

La méthode proposée dans cette étude consiste à comparer l'hydrogramme d'un bassin neigeux, dont on veut déterminer la part de l'écoulement neigeux dans l'écoulement total, à l'hydrogramme d'un bassin sans réservoir neigeux. Cette opération doit s'effectuer sur un même cycle hydrologique, en centrant et réduisant les débits pour annuler les effets de dimension de bassin et de gradients de précipitations. De plus, les deux bassins doivent appartenir à la même province géographique et climatique. Deux conditions sont aussi nécessaires :

- 1) les bassins doivent réagir de la même façon aux précipitations;
- 2) le débit à l'exutoire doit être proportionnel à la superficie du bassin (linéarité spatiale).

La comparaison des deux chroniques met en évidence la fonte des neiges, au moment du printemps, et permet de connaître, avec précision, les dates de début et de fin de l'influence neigeuse. **Le volume neigeux (correspondant à la partie de la chronique influencée) est ensuite calculé en le pondérant par le rapport des superficies des bassins.**

La méthode comporte donc quatre étapes principales :

- 1) choix d'un bassin non neigeux;
- 2) comparaison des chroniques centrées et réduites des deux bassins, sur un cycle hydrologique;
- 3) détermination des dates de l'influence neigeuse;
- 4) calcul du volume neigeux en pondérant par le rapport des superficies des bassins.

- 3) Pour estimer l'écoulement souterrain total

La méthode consiste à différencier toutes les composantes de l'écoulement :

- composante de ruissellement;
- composante souterraine;
- composante neigeuse pour les bassins montagneux.

Au préalable, une reconstitution de l'hydrogramme naturel est nécessaire, si la rivière est influencée par des aménagements. Pour les bassins comportant un écoulement neigeux, la composante neigeuse est déterminée.

La composante de ruissellement et la composante souterraine sont ensuite estimées à partir de la décomposition de l'hydrogramme, fondée sur l'extrapolation de la courbe de tarissement vers la pointe de crue de l'écoulement résiduel (écoulement sans l'influence des aménagements et sans la contribution neigeuse).

Ces nouvelles méthodes d'évaluation permettent d'avoir une meilleure connaissance de la contribution souterraine aux écoulements des rivières, et par là même de mettre en oeuvre une gestion intégrée et maîtrisée des systèmes fluviaux et des ressources en eaux. **Elles trouveront leurs applications principales dans les plans directeurs d'aménagements, les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagements et de Gestion des Eaux) et les SAGE.**

3. Perspectives

Les rivières de Midi-Pyrénées sont globalement alimentées pour moitié par les eaux souterraines; c'est pourquoi, la gestion des cours d'eau implique une connaissance approfondie des aquifères. Si, en général, l'hydrologie est bien connue, il existe un manque manifeste d'informations en ce qui concerne les nappes alluviales et les aquifères karstiques.

En effet, on note, sur le bassin de la Garonne, **un décalage sensible entre la densité du réseau d'observation des eaux de surface et celui du réseau d'observation des eaux souterraines.** Le premier réseau comprend une centaine de stations hydrométriques (gérées par la DIREN, la CACG et EDF), alors que le deuxième n'est constitué que par quelques stations de mesure :

- pour les nappes alluviales : 2 piézomètres dans le même secteur en tout et pour tout, un à St-Porquier et l'autre à Finhan (DIREN). Dans le cadre d'un contrat de plan état-région, une dizaine de piézomètres sont en cours de mise en place sur les principales nappes par le BRGM, suite à une demande de la région Midi-Pyrénées;
- pour la nappe inframolassique : 15 piézomètres, mais avec seulement une valeur tous les 2 mois (BRGM et ELF);
- pour le karst :
 - 3 stations en Ariège : le Baget, Aliou et Fontestorbes (CNRS);
 - 7 stations en Aveyron : l'Esperelle (ANTEA / CNRS).

Ce sont donc les nappes alluviales qui sont les plus mal connues. **L'installation de piézomètres de référence sur les principales nappes alluviales doit être un objectif prioritaire.** Ceux-ci permettront enfin d'étudier de façon concrète le fonctionnement des nappes, leurs apports dans les écoulements de surface et leur comportement sous l'effet des sollicitations de l'homme (captage, irrigation).

L'analyse des hydrogrammes (tarissement et décomposition hydrodynamique) est souvent difficile en raison de l'influence : des aménagements (canaux et barrages), et, de façon moindre, des prélèvements pour l'AEP, pour l'irrigation et pour les industries. Les influences des canaux sont mesurées par le biais de stations hydrométriques. Cependant, les perturbations occasionnées par les barrages à vocation énergétique (gérés par EDF) ne sont connues qu'au pas mensuel, ce qui limite considérablement les conclusions de l'étude. **La connaissance des**

influences à un pas plus faible (la semaine voire la journée) permettrait d'établir des estimations plus précises des réserves et des écoulements souterrains. La réalisation d'un tel projet passera forcément par une action concertée avec les principaux gestionnaires.

La part moyenne du volume de tarissement écoulé par rapport au volume de tarissement total représente 3/5 des réserves souterraines. Il serait intéressant d'étudier les possibilités de déstockage des 2/5 des réserves souterraines restantes, provenant des principaux aquifères, afin de soutenir le débit de la Garonne. Si actuellement, il existe de nombreux pompages dans les nappes alluviales, les aquifères karstiques sont encore peu exploités.

Les mécanismes et les réserves du bassin de la Garonne en amont du confluent du Tarn sont maintenant un peu mieux connus. Il est alors possible de définir des variables d'état et de construire un modèle qui permettrait, par exemple, de prévoir l'impact, sur les débits d'été, de la diminution des réserves souterraines ou du stock neigeux, ou qui permettrait de mieux gérer les différents réservoirs.

L'étude des affluents de la Garonne, que ce soit par l'hydrodynamique ou par l'hydrochimie, montre que le Ger est un bassin remarquable dont les aquifères karstiques fournissent un débit important et assez constant. Ces aquifères pourraient être utilisés pour l'alimentation en eau potable de plusieurs communes. Une étude détaillée de cet ensemble aquifère devrait fournir des informations précises sur son fonctionnement. C'est pourquoi il est indispensable, dans un premier temps, d'implanter une station hydrométrique à l'exutoire du bassin du Ger.

La mise en évidence de l'importance du stockage dans les formations superficielles sur certains bassins (colluvions) doit inciter à bien maîtriser l'aménagement de l'espace. Il serait intéressant d'estimer ces réserves sur des petits bassins versants.

L'étude montre aussi l'importance des prélèvements non répertoriés, particulièrement forte en années sèches. Il serait nécessaire de mieux connaître ces prélèvements afin d'avoir une estimation plus juste de la contribution des différents systèmes hydrologiques.

Enfin, l'étude de l'hydrochimie de la Garonne conduit à proposer l'installation, en aval de Toulouse, d'une station de mesure de la conductivité des eaux, afin d'acquérir des enregistrements continus pour :

- estimer la composante souterraine de l'écoulement (pour cela, il est nécessaire de coupler l'enregistrement de la conductivité à des mesures hebdomadaires sur les bicarbonates);
- connaître les variations chimiques des eaux au cours des crues;
- repérer les pollutions, parfois ponctuelles, qui ne sont pas détectées par des mesures discontinues;
- mettre en évidence des évolutions à long terme de la qualité sous l'effet du climat et ou de l'anthropisation.

BIBLIOGRAPHIE

AFOUDA A., 1974, Contribution à l'étude des systèmes hydrologiques non linéaires, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, 122p.

AGENCE DE BASSIN ADOUR-GARONNE, 1977, Etude des débits sur le bassin de la Garonne, 1^{ère} partie (2 tomes) : la Garonne et ses affluents à l'amont de Toulouse, 2^{ème} partie (2 tomes) : bassin de l'Ariège, 3^{ème} partie (2 tomes) : la Garonne et ses affluents à l'aval de Toulouse (bassins du Tarn et du Lot exclus).

A.I.E.A., 1981, Stable isotope hydrology. Deutérium and oxygen-18 in the water cycle, Tech. Rep. Ser. N°210, I.A.E.A., Vienna.

A.I.E.A., 1983, Guidebook on nuclear techniques in hydrology, Tech. Rep. Ser. N°91, I.A.E.A., Vienna.

AMINOT A., 1974, Géochimie des eaux d'aquifères karstiques, les analyses chimiques en hydrogéologie karstique, Ann. Spéleo., 29, 4, p.461-483.

AMIOTTE SUCHET P., 1994, Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transfert vers les océans, thèse 3^{ième} cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 182p.

B.R.G.M., 1983, Atlas des ressources du sous-sol du département de l'Ariège, 29p.

BAKALOWICZ M. & FLEYEL M., 1980, Etude géochimique et isotopique du carbone minéral dans un aquifère karstique, Col. Soc. Géol. Fr., p231-245.

BAKALOWICZ M. & JUSSERAND C., 1986, Etude de l'infiltration en milieu karstique par les méthodes géochimiques et isotopiques, cas de la grotte de Niaux (Ariège, France), bulletin du centre d'hydrogéologie n° 7, p265-283.

BAKALOWICZ M. & MANGIN A., 1989, Orientations de la recherche scientifique sur le milieu karstique, influences et aspects perceptibles en matières de protection, Spelunca n° 35.

BAKALOWICZ M., 1974, Géochimie des eaux d'aquifères karstiques, relation entre minéralisation et conductivité, Ann. Spéleo., 29, 2, p. 167-173.

BAKALOWICZ M., 1975, Variation de la conductivité d'une eau en fonction de la température, et précision des mesures, Ann. Spéleo., 30, 1, p. 3-6.

BAKALOWICZ M., 1977, Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle, C.R. Acad. Sc. Paris, t. 284, série D, p2463-2466.

BAKALOWICZ M., 1979, Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification, thèse d'état, Université P. & M. Curie - Labor. Sout. CNRS à Moulis, 269p.

BAKALOWICZ M., 1979, L'anhydride carbonique dans la karstogénèse, Actes du symposium international sur l'érosion karstique U.I.S., p41-48.

BAKALOWICZ M., 1980, Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-Carbonate, 17-18 novembre 1980, Bordeaux, p.11-23.

BAKALOWICZ M., 1982, La genèse de l'aquifère karstique vue par un géochimiste, Article, Réunion Monografica sobre el karst (Larra 1982).

BAKALOWICZ M., 1984, Water chemistry of some karst environments in Norway, Norsk géogr. Tidsskr, vol. 38, p209-214.

BAKALOWICZ M., 1986, De L'hydrogéochimie en karstologie, Article, Karst Euskadi 1986, vol 2.

BAKALOWICZ M., 1986, La karstification : processus, modèles et exemples, 9^{ième} congreso Int. de Espeleologia, Espana 1986, Vol.3.

BAKALOWICZ M., BLAVOUX B., MANGIN A., 1974, Apports du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique, teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées, France, J. of Hydrology, 23, p. 141-158.

BARBUT M. & FOUGEAUD C., 1971, Eléments d'analyse mathématique des chroniques, Hachette Université, 207p.

BATES B. DAVIES P., 1988, Effect of baseflow separation procedures on surface runoff models, CSIRO, Div. Water Resour. Res., Wembley, West. Aust., Australia; Water Auth. West. Aust., Australia, Journal-of-Hydrology. 103. (3-4). p. 309-322.

BERKALOFF E., 1966, Limite de validité des formules courantes de tarissement du débit, rapport B.R.G.M. (DS 66 A29), 22p.

BLAVOUX B., 1978, Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium, possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée, thèse de doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 333p.

BLAVOUX B., MUDRY Y., 1983, Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques, Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur, 4, p.269-278.

BOUCHAALA A., 1991, Hydrogéologie d'aquifères karstiques profonds et relations avec le thermalisme, thèse 3^{ième} cycle, Université de Franche-Comté, 403p.

BOUREL L., 1988, Influences de l'irrigation sur les régimes d'étiages des cours d'eau de la basse plaine de l'Ariège, mémoire de D.E.A., Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 75p.

BOUROCHE J.M. & SAPORTA G., 1980, L'analyse des données, Collection "Que sais-je ?", P.U.F, Paris, 125p.

BOX. G.E.P. & JENKINS. G.M., 1976, Time series analysis, forecasting and control, Revised Edition Holden Day, San Francisco, 575p.

BREMOND R. & VUICHARD R., 1973, Paramètres de la qualité des eaux, éd. la documentation Française, Paris, 179p.

C.A.C.G., 1978, Exploitation de la nappe alluviale du Crieu, proposition pour une gestion de la ressource, 114p.

C.A.C.G., 1982, Schéma d'aménagement des eaux du bassin Garonne-Pyrénées, plusieurs fascicules.

C.A.C.G., 1984, Etude de faisabilité des barrages de la Gimone et de Charlas, plusieurs fascicules.

CAINE N., 1989, Hydrograph separation in a small alpine basin based on inorganic solute concentrations, Univ. Colo., Dep. Geogr., Boulder, CO, United-States, Journal-of-Hydrology. 112. (1-2). p. 89-101.

CALMELS P., 1985, Application de l'analyse-système à l'exploitation des données hydrométriques et isotopiques en hydrologie, thèse 3^{ième} cycle, Université scientifique et médicale de Grenoble, 255p.

CASTANY G. & MARGAT J., 1977, Dictionnaire français d'hydrogéologie, 249p.

CASTANY G., 1963, Traité pratique des eaux souterraines.

CASTANY G., 1967, Introduction à l'étude des courbes de tarissement, chron. d'hydrogéol. B.R.G.M., 7, p.51 à 77.

CASTANY G., 1970, Méthode d'évaluation rapide des ressources en eaux d'une région, rapport B.R.G.M. (70 SGN 266 HYD), 30p.

COMITE DE BASSIN ADOUR-GARONNE, 1991, Amélioration de la ressource en eau et écologie des rivières, rapport de la commission d'étude, 16p.

CORRIGNAN P. & VERRIERE H., 1985, Etude hydrogéologique des systèmes aquifères thermonifères de la zone Nord-Pyrénéenne entre l'Ariège et la Garonne, exemple d'Ussat, d'Aulus et d'Audignac, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier Toulouse, 323p.

COTTEZ S., 1967, Applications hydrogéologiques de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau, rapport B.R.G.M. (DS 67 A42), 24p.

CRAIG H., 1957, Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide, Géochim. Cosmochim. Acta., 12, pp. 133-149.

CRAIG H., 1961a, Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science, 133, 1833-1834.

CRAIG H., 1961b, Isotopic variations in meteoric waters, Science, 133, 1702-1703.

CROUZET E., HUBERT P., OLIVE P., SIWERTZ E., MARCE A., 1970, Le tritium dans les mesures de surface, détermination expérimentale du coefficient de ruissellement, J. Hydrology, 11, p. 217-229.

CUGNY M.T., 1980, Aptitude à l'aménagement de la plaine alluviale de l'Ariège, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier Toulouse, 193p.

DANIEL C., 1990, Comparison of selected hydrograph separation techniques for estimating ground-water recharge from streamflow records, U. S. Geol. Surv., Raleigh, NC, United-States, Anonymous. Geological Society of America, Southeastern Section, 39th annual meeting. Abstracts-with-Programs-Geological-Society-of-America. 22. (4). p. 9-10.

D.G.R.S.T., 1970, Méthodes d'étude régionale des ressources en eau, application au bassin de l'Allier, 133p.

DANNEVILLE L., 1991, Etude de la fontaine des Chartreux à Cahors (Lot), mémoire de DEA, université d'Orsay (Paris XI), 176p.

DANNEVILLE L., 1993, Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne de ses sources à la confluence du Tarn, Rapport d'avancement, 2 fascicules, fascicule 1 : 108p.

DANSGAARD W., 1964, Stable isotopes in precipitation, Tellus, 16(4), 436-468.

DASSIBAT C., TORRENT H., 1980, Etude hydrogéologique de la basse vallée de l'Ariège entre Pamiers et Saverdun, rapport B.R.G.M. (69 SGL 094 MPY).

DELAROZIERE-BOUILLIN O. & MARGAT J., 1971, Adaptation des réseaux hydrométriques aux études hydrogéologiques, rapport B.R.G.M. (71 SGN 305 HYD), 22p.

DELAROZIERE-BOUILLIN O., 1970, Etude sommaire de la distribution des ressources en eau souterraine de la France, rapport n° 2 B.R.G.M. (70 SGN 299 HYD), 48p.

DELAROZIERE-BOUILLIN O., 1983, Etat des réseaux piézométriques dans le bassin Adour-Garonne au 1er novembre 1982, rapport B.R.G.M. (83 SGN 414 EAU), 41p.

DELHOMME J.P., 1976, Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau, thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 160p.

DEVER L., 1978, Teneurs ioniques et isotopiques des eaux de surface en période d'hydraulicité exceptionnelle et mécanismes de décharge des nappes : cas du bassin de la Seine en 1976-1977, thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 108p.

DREISS S.J., 1989, Regional scale transport in a karst aquifer; 1, Component separation of spring flow hydrographs, Univ. Calif., Dep. Earth Sci., Santa Cruz, CA, United-States, Water-Resources-Research. 25. (1). p. 117-125.

DUBOE A., 1963, Monographie hydrologique du bassin supérieur du Salat, Soc. Hydr. de France, 4 tomes.

EBERENTZ P., 1975, Apports des méthodes isotopiques à la connaissance de l'aquifère karstique, thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 70p.

ETCHANCHU D., 1988, Géochimie des eaux du bassin de la Garonne, transfert de matières dissoutes et particulaires vers l'océan Atlantique, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 178p.

FABRE J.P., 1983, Etude hydrogéologique de la partie sud-ouest du Causse de Martel, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 342p.

FLEYFEL M., 1979, Etude hydrologique, géochimique et isotopique des modalités de minéralisation et de transfert du carbone dans la zone d'infiltration d'un aquifère karstique : le Baget, thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 221p.

FONTES J.C., 1976, Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects, thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

FORKASIEWICZ J. & PALOC H., 1967, Régime de tarissement de la Foux de la Vis, étude préliminaire, chronique d'hydrogéologie 10, p.59-73.

FRAGONARD E., GALHARAGUE J., ROCHE J., TRUPIN G., 1976, Synthèse des données géologiques, lithologiques, hydrogéologiques et géotechniques du val de Garonne, entre Saint-Martory (Haute-Garonne) et Langon (Gironde), rapport B.R.G.M. (76 SGN 309 MPY), 18p.

FRITZ P., CHERRY J.A., WEYER K.U., SKLASH M., 1976, Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, Panel Proc. Ser., I.A.E.A., Vienna, p. 11-130.

FRITZ P. & FONTES J-C., 1980, Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment, Fritz & Fontes Eds., Elsevier Publ. Co. Amsterdam, 1.

G.R.P.H., 1988, Brochure générale présentant le groupe régional de production hydraulique Pyrénées, 30p.

GRUNBERGER O., 1985, Etude du système karstique du Goueil Di Her à l'aide des chroniques des pluies et des débits, emploi des méthodes corrélatrices et spectrales, Université Paris XI, 100p.

GUERIREM R., 1988, Etude hydrogéologique de la couverture septentrionale de la moyenne Barousse, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 211p.

GUIZERIX J., MARGRITA R., MOLINARI J., 1976, Etude par traceurs des modalités de transfert dans un réseau hydrographique, revue, la Houille Blanche, n°3, pp. 277-284.

HALL-A-J. 1971, Baseflow recessions and the baseflow hydrograph separation problem, in Hydrology Papers 1971, p. 159-170, illus.. Inst. Eng. Sydney.

HALL F.R., 1971, Dissolved solids-discharge relation ships 2, Application to field data, Water resource, 7, 3, p591-601.

HAUBERT M., 1975, Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Dranse de Bellevaux (Brevon, Haute-Savoie), thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 331p.

HAUBERT M., 1975, Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Dranse de Bellevaux (Brevon), Haute-Savoie, thèse 3^{ième} cycle, Université Paris VI, 203p.

HEYDARPOUR D., 1974, Estimation de la composante souterraine de l'hydrogramme par les méthodes physico-chimiques, thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 198p.

HORDON R.M., 1988, Estimating ground-water yields by hydrograph separation, Rutgers Univ., Dep. Geogr., New Brunswick, NJ, United-States; Environ. Hydrol. and Eng., Minneapolis, MN, United-States, Csallany, Sandor C. International conference on Advances in ground-water hydrology; program with abstracts. Environ. Hydrol. and Eng., Minneapolis, MN, United-States. p. 27.

HORDON R.M., 1988, Estimating ground-water yields by hydrograph separation, Rutgers Univ., Dep. Geogr., New Brunswick, NJ, United-States, Hydrological-Science-and-Technology-Short-Papers. 4. (1-4). p. 328-333.

HORDON R.M., 1989, Estimating ground-water yields by hydrograph separation, Rutgers Univ., Dep. Geogr., New Brunswick, NJ, United-States; U. S. Geol. Surv., Reston, VA,

United-States; Wis. Geol. and Nat. Hist. Surv., United-States; Environ. Geol. and Eng., United-States; Gurr. and Assoc., United-States, Moore, John E., Zaporozec, Alexander A., Csallany, Sandor C., Varney, Timothy C. Recent advances in ground-water hydrology. U. S. Geol. Surv., Reston, VA, United-States. p. 328-333.

HUBERT P., 1989, La séparation de l'hydrogramme, apport des méthodes isotopiques, revue, *Hydrogéologie*, n°3, pp. 143-150.

JACCON G., 1986, Manuel d'hydrométrie, tracé de la courbe de tarage et calcul des débits (tomeV), O.R.S.T.O.M., 225p.

JENKINS G.M. & WATTS O.G., 1968, Spectral analysis and its applications, Holden day, San Francisco, 525p.

KRIMISSA M., 1995, Applications des méthodes isotopiques pour l'estimation des temps de résidence des eaux thermales en milieu granitique (Pyrénées, France), thèse 3^{ième} cycle, Université Paris Sud.

KRIMISSA M., CHERY L., FOUILLOC C. & MICHELOT J.L., 1995, Origin and recharge altitude of the thermomineral waters of the Eastern Pyrenees, *isotopenprexis* (1994), vol.30, pp 317-331.

KRIMISSA M., CHERY L., FOUILLOC C., 1993, Isotopic study of thermomineral springs in the Eastern Pyrenees : correlation with the origin of the air masses and the altitude of recharge, In : *Isotope techniques in the study of post and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere*, IAEA Vienna, 583-586.

KUDELIN, 1957, Principes nouveaux pour distinguer ce qui est dû à l'écoulement souterrain sur l'hydrographe des fleuves, *Bull. Ass. Inter. hydrologie scientifique*, n° 7, p. 25-35.

KUNKLE G.R., 1965, Computation of ground water discharge to streams during floods, or to individual reaches during base flow, by use of specific conductance, U.S.G.S. Prof. Paper, 525-D, 207-210.

LABORATOIRE SOUTERRAIN DU C.N.R.S. A MOULIS & CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, DEPARTEMENT OF GEOGRAPHY, 1993, Structure, functioning and evolution of karst aquifers and landforms in conical karst, Guizhou, China, 213p.

LAMBERT R., 1975, Recherches hydrologiques dans le sud-est du bassin Garonnais, thèse de doctorat d'état, 2 tomes, 750p.

LAMBERT R., 1984, Cartes pluviométriques du bassin de la Garonne.

LAMBERT R., LAMI J.M., SENGES F., 1991, analyse hydraulique de la sécheresse 1990 à l'amont du Mas d'Agenais, Université de Toulouse le Mirail.

LANGBEIN W.B., 1940, Some channel storage and unit hydrograph studies, *Trans. Am. Geophys. Union* Vol, 21 pp., 620-627.

LEOPOLDO P.R., MARTINEZ J.C., MORTATTI J., 1987, Estimation of the base flow contribution by oxygen-18, Univ. Kebangsaan, Selangor, Malaysia, Awadalla, S., Noor, Ismail Mohamed. Groundwater and the environment; proceedings of the International groundwater conference. Univ. Kebangsaan, Selangor, Malaysia. p. I14-I23.

LIBRA R.D., HALLBERG G.R., 1983, Application of hydrograph separation techniques to karst groundwater studies, Iowa Geol. Surv., Iowa City, IA, United-States, The Geological

Society of America, 96th annual meeting. Abstracts-with-Programs-Geological-Society-of-America. 15. (6). p. 627.

LOIJE P.M.D., 1990, Isotopic and chemical hydrograph separation for a forested headwater Mediterranean stream flood; a critical view, Ec. Norm. Super., Inst. Biogeochem. Mar., Montrouge, France, Hooghart, J. C., Posthumus, C. W. S., Warmerdam, P. M. M. Hydrological research basins and the environment; proceedings of the international conference. Verslagen-en-Medelingen-Commissie-voor-Hydrologisch-Onderzoek-T.N.O.-=- roceedings-and-Information-Committee-for-Hydrological-Research-T.N.O. 44. p. 189-198.

MANGIN A. & BAKALOWICZ M., 1982, Orientation de la recherche scientifique sur le milieu karstique, Influence et aspects perceptibles en matière de protection, Spélunca Mém., n° 35.

MANGIN A., 1970, Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de courbe de décrue et de tarissement, Ann.Spéléo., t 25, 3, p.581-609.

MANGIN A., 1975, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, thèse Doct. Sci. nat., Université de Dijon, in : Ann Spéléo., 29, 3, p.283-332, 4, p.495-601, 30, 1, p.21-124.

MANGIN A., 1981a, Utilisation des analyses corrélatoires et spectrales dans l'approche des systèmes hydrologiques, C.R. Acad. Sc. Paris, t.293, p.401-404.

MANGIN A., 1981b, Apports des analyses corrélatoires et spectrales dans l'approche des systèmes hydrologiques, C.R. Acad. Sc. Paris, t.293, p.1011-1014.

MANGIN A., 1982, Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques, 3^{ième} coll. d'hydro. en pays calcaire, Neufchâtel, Mémoire n°1, p.159-179.

MANGIN A., 1983, Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, Journal of Hydrology, 67, p.25-43.

MANGIN A., 1985, Exemples d'application du traitement des séries chronologiques en Hydrologie : réflexion sur les méthodes, Symposium sur l'approche stockastique des écoulements souterrains, Montvillargenne juin 1985, p.146-148.

MANGIN A., Modèle descriptifs en traitement des données : Application à l'hydrogéologie (sous presse), Lab. sout. du CNRS à Moulis.

MANGIN A., ROCHE J., 1986, Evaluation des potentiels en eau des karsts situés entre les vallées de la Garonne et de l'Aude, rapport B.R.G.M. (86 SGN 096 MPY).

MARCHAND D., 1990, Hydrogéologie du système karstique de plan de pouts, Mémoire de DEA, Université Paris XI, 148p.

MARCHET P., 1991, Approche de la structure et de l'évolution des systèmes karstiques par l'analyse de leur fonctionnement : application au Nord-Ouest du Causse de Martel, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 297p.

MARGAT J., 1969, Ressources en eau souterraine et bilan des nappes, rapport B.R.G.M. (69 SGL 208 HYD), 67p.

MARGAT J., 1984, Comptes des eaux continentales, essai d'application à un groupe de bassins de Basse-Normandie Calvados, rapport B.R.G.M. (84 SGN 357 EAU), 228p.

MARSAUD B., 1991, Connaissance hydrogéologique de la ride Roquefort-Créon-Barbotan par l'approche systémique de la piezométrie de la nappe du Crétacé supérieur au forage de Betbezer, utilisation des analyses corrélatoires et spectrales, mémoire de D.E.A., Université Paris XI, 84p.

MARSAUD B., 1995, Approche du fonctionnement de la zone saturée du karst, thèse 3^{ième} cycle, Université d'Orsay, Paris XI.

MARSILY (de) G., 1981, Hydrogéologie quantitative, Masson, Paris, 215p.

MASSON J.M., 1977, Définition d'une méthode d'analyse régionale des débits moyens, objectifs et plan d'étude, Laboratoire d'hydrologie mathématique, Université des sciences et techniques du Languedoc, 48p.

MATHERON G., 1965, Les variables régionalisés et leur estimation, Masson, Paris, 305p.

MILLER A.M., 1984, Comparison of manual baseflow separation techniques to a computer baseflow separation program and application to six drainage basins, Oklahoma State University, United-States; Master's, 161 p.

MOOK W.G., GROENEVELD D.J., BROUWN A.E., VAN GANSWIJK A.J., 1974, Analysis of a runoff hydrograph by means of natural ¹⁸O, Isotopes techniques in groundwater hydrology, I.A.E.A., Vienna, 1, p. 145-156.

MUDRY J., 1987, Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés, thèse 3^{ième} cycle, U.F.R. des sciences et techniques de Franche Comté-Besançon, 381p.

MUET P., 1985, Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes karstiques du nord du Causse de Martel (Corrèze), thèse 3^{ième} cycle, Université d'Orléans, Mat. premières, minérales et énergétiques, 386p + 229p.

NAKAMURA R., 1971, Runoff analysis by electrical conductance of water, J. Hydrology, 14, p. 197-212.

OLIVE P., 1970, Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium, thèse de doctorat d'état, Université Paris VI, 138p. p71-79.

PARDE, 1935, Le régime de la Garonne, revue géographique des Pyrénées et du sud-ouest.

PAYET Olivier, 1971, Hydrogéologie des terrasses alluviales de la Garonne entre Montréjeau et Martres-Tolosane, rapport B.R.G.M. (71 SGN 382 MPY), 116p.

PINDER G.F. & JONES J.F., 1969, Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff, Water Resources Research, 5, p. 438-445.

PLAFCAN M., 1987, Evaluating the significance of stream-aquifer interaction in the Mississippi alluvial plain of eastern Arkansas using hydrograph analysis and a numerical ground-water flow model, University of Arkansas, Fayetteville, United-States; Master's, unknown p.

PLOTNIKOV N.A., 1962, Ressources en eaux souterraines : classification et méthodes d'évaluation, Gauthier-Villars, Paris, 194p.

- PROBST J.L.**, 1983, Hydrologie du bassin de la Garonne, modèle de mélanges, bilans de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 148p.
- PUYOO S.**, 1976, Etude hydrogéologique du massif karstique d'Arbas (Haute-Garonne), thèse 3^{ième} cycle, Université Pierre et Marie Curie, 201p.
- RAMBERT B.**, 1971, Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain, rapport préliminaire B.R.G.M. (71 SGN 389 HYD), 34p.
- RAMBERT B.**, 1971, Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain, examen critique des divers procédés d'analyse utilisés sur les hydrogrammes de dix cours d'eau Français, rapport n° 2 B.R.G.M. (71 SGN 371 AME), 60p.
- REMENERIAS G.**, 1960, L'hydrologie de l'ingénieur, 2^{ième} éd. Eyrolles, Paris, 456p.
- RGPSO** (Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest), 1991, Population du Sud-Ouest, tome 62, fasc. 4, 180p.
- RIJCKBORST H.**, 1967, Hydrology of the upper Garonne basin (Valle de Aran, Spain), Leidse Geol. Meded. Vol. 40, p. 1-74, illus. (incl. map).
- RIJCKBORST H.**, 1967, Hydrology of the upper-Garonne basin (valle de Aran, Spain), 74p.
- ROBSON A, NEAL C.**, 1990, Hydrograph separation using chemical techniques; an application to catchments in mid-Wales, Inst. Hydrol., Wallingford, United-Kingdom; Inst. Hydrol., Wallingford, United-Kingdom; Inst. Territ. Ecol., United-Kingdom, Neal, Colin, Hornung, Michael. Transfer of elements through the hydrologic cycle. Inst. Hydrol., Wallingford, United-Kingdom. Journal-of-Hydrology. 116. (1-4). p. 345-363.
- ROCHE M.**, 1963, Hydrologie de surface, Gauthier-Villars, Paris, 430p.
- ROCHE P.A., THIERY D.**, 1984, Hydrologie de bassin et modélisation globale, rapport B.R.G.M., 166p.
- ROQUES H.**, 1964, Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate, Ann. Spléleo. 19, 2, p.255-484.
- ROUCHEUX D.**, 1990, Etude hydrogéologique et hydrodynamique d'un karst d'altitude : le karst de Bentailou (Pyrénées Ariégeoises), apports de l'analyse corrélatoire et spectrale, thèse de géologie appliquée au C.N.A.M., 192p.
- S.I.E.E.**, 1991, Contrat de rivière Salat, étude de l'état physique de la rivière, rapport intermédiaire, 143p.
- S.O.G.R.E.A.**, 1991, interaction nappe rivière, 7 fascicules.
- S.R.A.E.**, 1975, Eléments pour un programme général d'aménagement hydraulique, Ministère de l'Agriculture Région Midi-Pyrénées, 79p.
- SCHOELLER H.**, 1962, Les eaux souterraines, Masson, Paris, 642p.
- SEGUIN J.J.**, 1980, Modélisation du transfert des pollutions azotées dans la nappe alluviale de l'Ariège, thèse 3^{ième} cycle, Université Paul Sabatier Toulouse, 168p.

SOULE J.C., 1982, Hydrogéologie de la plaine alluviale de l'Ariège, rapport B.R.G.M. (82 SGN 868 MPY), 21p.

SOULE J.C., 1993, Etude de faisabilité d'un projet d'embouteillage de la source du Vivier en qualité "eau de source", rapport B.R.G.M. (MPY 4S 93), 10p.

SOULE J.C., LANDREAU A., NARTET M., 1982, Projet de mise en place d'un réseau de contrôle quantitatif et qualitatif de la nappe alluviale de la Garonne entre Toulouse et Malause, rapport B.R.G.M. (82 SGN 434 MPY), 23p.

SOUQUET P., PEYBERNES B., BILOTTE M. et DEBROAS E.J., 1977, La chaîne alpine des Pyrénées, Géol. alpine, 53, p. 193-216.

SOUQUET P. et SOLE SUGRANES L., 1980, La chaîne alpine des Pyrénées, 26^{ième} congrès géologique international, Bull. Cent. Rech. Explor. - Prod. Elf-Aquitaine, Mém. 3, p. 157-196.

SNYDER-WILLARD M., 1968, Subsurface implications from surface hydrograph analysis., Ga. Inst. Technol., Sch. Civ. Eng., Atlanta, GA, United-States, Myers, Lloyd E. Proceedings, Second Seepage symposium. U. S. Water Conserv. Lab., Phoenix, AZ, United-States. Proceedings-[of-the]-Seepage-Symposium. 2. p. 35-45.

TARDY Y., 1986, Le cycle de l'eau, édition Masson, 338p.

THIERY D., 1987, Le modèle MARTHE, modélisation d'aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour le calcul hydrodynamique des écoulements, rapport B.R.G.M. (87 SGN 545 EAU), 78p.

THIERY D., 1987, Un modèle couplé bilan hydrologique nappe-rivière, description du modèle DYNANIA et application à l'étude de l'influence de la variabilité climatique, rapport B.R.G.M. (87 SGN 710 EAU), 64p.

THIRION CH., 1951, L'hydrogéologie de la grande vallée alluviale de l'Ariège entre Varilhes et le confluent de l'Ariège et de l'Hers, Ministère de l'Agriculture, 66p.

TOLER L.G., 1965, Relation between chemical quality and water discharge in Spring Creek, Southwestern Georgia, U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 525-C, p C209-C213.

VISOCKY A.P., 1970, Estimating the groundwater contribution to storm runoff by the electrical conductance method, Groundwater, 8, p. 5-10.

WALLISER B., 1977, Systèmes et modèles, Introduction critique à l'analyse des systèmes, Ed. du Seuil, Paris, 255p.

WELS C., CORNETT R.J., LAZERTE B.D., 1991, Hydrograph separation; a comparison of geochemical and isotopic tracers, Trent Univ., Watershed Ecosyst. Program, Peterborough, ON, Canada; Chalk River Nucl. Lab., Canada; Ont. Minist. Environ., Canada, Journal-of-Hydrology. 122. (1-4). p. 253-274.

**LISTE DES GRAPHIQUES,
FIGURES, TABLEAUX ET
CARTES**

GRAPHIQUES

Graphique 1 - 1. Pluviométrie annuelle à Toulouse Blagnac, période 1947-1989	24
Graphique 1 - 2. Hydrogramme de ruissellement de la Garonne à Toulouse, exemple du cycle 1993.....	30
Graphique 2 - 1. Mise en évidence des stockages et déstockages des barrages à vocation énergétique à Auterive (Ariège), période 1973-1987	39
Graphique 2 - 2. Différence entre débits mesurés et débits naturels de la Garonne à Arlos, Valentine, Portet et Verdun, période 1973 à 1987.....	40
Graphique 2 - 3. Différence entre débits mesurés et débits naturels à Beyrede (Neste), à Roquefort (Salat) et à Auterive (Ariège), période 1973 à 1987	41
Graphique 2 - 4. Influences des aménagements sur le débit mesuré de la Garonne à Arlos, à Valentine, à Portet et à Verdun, période 1973-1987	42
Graphique 2 - 5. Influences des aménagements sur le débit mesuré des affluents à Beyrede (Neste), à Roquefort (Salat) et à Auterive (Ariège), période 1973-1987	43
Graphique 2 - 6. Débits moyens prélevés sur la Neste pour le canal de Sarrancolin, période 1973-1987	43
Graphique 2 - 7. Débits moyens prélevés sur la Garonne pour le canal de Saint-Martory, période 1973-1987	44
Graphique 2 - 8. Différence entre débits moyens mesurés et débits moyens naturels à Larra (Save), période 1973-1987	44
Graphique 2 - 9. Différence entre débits moyens mesurés et débits moyens naturels à Castelferrus (Gimone), période 1973-1987.....	45
Graphique 2 - 10. Part des apports artificiels dans le débit mesuré à Larra (Save), période 1973-1987	45
Graphique 2 - 11. Part des apports artificiels dans le débit mesuré à Larra (Save), période 1973-1987	45
Graphique 2 - 12. Origine des prélèvements pour l'AEP en 1991 (181 prélèvements connus).....	46
Graphique 2 - 13. Répartition des débits prélevés pour l'AEP en 1991 (débit total prélevé = 3.67 m ³ /s)	46
Graphique 2 - 14. Origine des prélèvements pour l'industrie en 1991 (110 prélèvements recensés).....	48
Graphique 2 - 15. Répartition des débits prélevés pour l'industrie en 1991 (prélèvements totaux = 10.4 m ³ /s)	48
Graphique 2 - 16. Origine des prélèvements pour l'irrigation en 1991 (805 prélèvements recensés).....	49
Graphique 2 - 17. Répartition des débits prélevés pour l'irrigation en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m ³ /s)	49
Graphique 2 - 18. Répartition des prélèvements pour l'irrigation par secteur en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m ³ /s)	50

Graphique 2 - 19. Répartition des irrigants par secteur en 1991 (788 irrigants recensés).....	50
Graphique 2 - 20. Répartition des cultures par secteurs (RGA 1988).....	51
Graphique 2 - 21. Origine des apports (débits mesurés) à la station de Verdun.....	53
Graphique 2 - 22. Origine des apports (débits naturels) à la station de Verdun.....	53
Graphique 2 - 23. Origine des apports à la station de Valentine, période 1973-1987.....	53
Graphique 2 - 24. Origine des apports à la station de Portet, période 1973-1987.....	54
Graphique 2 - 25. Origine des apports à la station de Verdun, période 1973-1987.....	54
Graphique 2 - 26. Pluviométrie moyenne journalière par cycles hydrologiques à Blagnac, période 1973 à 1987.....	55
Graphique 2 - 27. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1977.....	56
Graphique 2 - 28. Origine des apports à la station de Valentine, cycle 1977.....	56
Graphique 2 - 29. Origine des apports à la station de Portet, cycle 1977.....	58
Graphique 2 - 30. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1977.....	58
Graphique 2 - 31. origine des apports à la station de Verdun, cycle 1986.....	60
Graphique 2 - 32. Origine des apports à la station de Valentine, cycle 1986.....	60
Graphique 2 - 33. Origine des apports à la station de Portet, cycle 1986.....	61
Graphique 2 - 34. Origine des apports à la station de Verdun, cycle 1986.....	61
Graphique 2 - 35. Origine des apports à la station de Valentine, août 1976.....	63
Graphique 2 - 36. Origine des apports à la station de Portet, août 1976.....	64
Graphique 2 - 37. Origine des apports à la station de Verdun, août 1976.....	64
Graphique 2 - 38. Origine des apports à la station de Valentine, novembre 1974.....	66
Graphique 2 - 39. Origine des apports à la station de Portet, novembre 1974.....	66
Graphique 2 - 40. Origine des apports à la station de Verdun, novembre 1974.....	66
Graphique 2 - 41. Part des Superficies et des apports mensuels naturels des bassins intermédiaires à la station de Verdun.....	71
Graphique 2 - 42. Superficie des bassins des différents affluents de la Garonne.....	72
Graphique 2 - 43. Débits spécifiques naturels des différents affluents de la Garonne.....	72
Graphique 3 - 1. Corrélogramme des débits à Foix et à Saverdun, période 1906-1944, fenêtre [1, 125] et filtre de Tukey.....	84
Graphique 3 - 2. Régression au pas de 70 jours entre les débits à Saverdun et les débits à Foix, période 1906-1944.....	85
Graphique 3 - 3. Hydrogrammes réel et calculé à Saverdun, exemple de l'année 1926.....	85
Graphique 3 - 4. Corrélogramme (1, 125) et spectre (10, 1250) du résidu.....	85
Graphique 3 - 5. Tarrisement de l'Ariège à Foix et Saverdun, étiage 1928 et 1944.....	86
Graphique 3 - 6. Hydrogrammes du Baget et du Lez à Balaguères, cycle 1980.....	91
Graphique 3 - 7. Courbes des débits moyens mensuels interannuels du Lez à Balaguères et du Baget, cycles 1971 à 1983.....	91
Graphique 3 - 8. Apports mensuels du Baget, système karstique, aux débits du Lez à Balaguères, cycles 1971 à 1983.....	92
Graphique 3 - 9. Courbes des débits moyens par cycles sur le Lez à Balaguères et au Baget, cycles 1971 à 1983.....	92
Graphique 3 - 10. Apports du Baget (système karstique) par cycles au Lez à Balaguères, cycles 1971 à 1983.....	93
Graphique 3 - 11. Hydrogrammes du Baget, du Lez à Bordes et Balaguères, cycle 1971.....	94
Graphique 3 - 12. Tarrisement du Baget et du Lez à Bordes et Balaguères, cycle 1971.....	95
Graphique 3 - 13. Hydrogrammes de la source de Fontestorbes et de l'Hers à Bélesta, cycle 1973.....	96

Graphique 3 - 14. Courbes des débits moyens mensuels interannuels de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, cycles 1973 à 1979	97
Graphique 3 - 15. Apports de Fontestorbes (système karstique) au débit de l'Hers à Bélesta, cycles 1973 à 1979	97
Graphique 3 - 16. Courbes des débits moyens par cycles sur l'Hers à Bélesta et à Fontestorbes, cycles 1973 à 1979	98
Graphique 3 - 17. Apports par cycles de Fontestorbes (système karstique à l'Hers à Bélesta, cycles 1973 à 1979	98
Graphique 3 - 18. Tarrissement sur l'Hers à Bélesta et à Fontestorbes, cycle 1973	99
Graphique 3 - 19. Apports moyens mensuels des systèmes karstiques du Baget et de Fontestorbes au réseau de surface	100
Graphique 3 - 20. Corrélogrammes et spectres simples de la pluie à Saint-Girons, fenêtre [1, 125 jours] et [10, 1250 jours], période 1971-1983	101
Graphique 3 - 21. Corrélogrammes du Lez à Balaguères et du Baget, fenêtre [1, 125 jours], période 1971-1983	102
Graphique 3 - 22. Corrélogrammes du Lez à Balaguères et du Baget, fenêtre [10, 1250 jours], période 1971-1983	102
Graphique 3 - 23. Corrélogrammes de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, fenêtre [1, 125 jours], période 1971-1983	103
Graphique 3 - 24. Corrélogrammes de l'Hers à Bélesta et de Fontestorbes, fenêtre [10, 1000 jours], période 1971-1983	104
Graphique 3 - 25. Chroniques la pluie à Blagnac , des débits de la Garonne à Portet , des débits de l'aquifère karstique du Baget , de la piézométrie à Saint-Porquier et à Finhan , période 1982 à 1990	108
Graphique 3 - 26. Corrélogrammes et spectres de la pluie, des débits et de la piézométrie, pas hebdomadaire, fenêtre [1 (7 jours) à 125 (2.4 ans)], filtre de Tukey, période 1982 à 1990.....	110
Graphique 3 - 27. Corrélogrammes croisés et fonctions de cohérence des analyses croisées pluie-débit et pluie-piézométrie, pas hebdomadaire, fenêtre [1 (7 jours) à 125 (2.4 ans)], période 1982-1990	111
Graphique 3 - 28. Corrélogrammes simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987	116
Graphique 3 - 29. Corrélogrammes simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	117
Graphique 3 - 30. Spectres simples sur trois systèmes karstiques : Aliou, le Baget et Fontestorbes, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	117
Graphique 3 - 31. Corrélogrammes simples sur la Garonne, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987	118
Graphique 3 - 32. Corrélogrammes simples sur la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	118
Graphique 3 - 33. Spectres simples sur la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987.....	119
Graphique 3 - 34. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive droite de la Garonne, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987	120
Graphique 3 - 35. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive droite de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	120
Graphique 3 - 36. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive gauche de la Garonne, fenêtre : [1,125], période 1973 à 1987	121
Graphique 3 - 37. Corrélogrammes simples sur les affluents de la rive gauche de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	122

Graphique 3 - 38. Spectres simples sur trois affluents de la Garonne, fenêtre : [10,1250], période 1973 à 1987	123
Graphique 3 - 39. Comparaison de la tendance sur la chronique des pluies Blagnac (précipitations journalières), et sur la chronique des débits à Portet (débits moyens journaliers), pour la période 1947-1989 (moyenne mobile d'amplitude 1460 jours, 4 ans).....	124
Graphique 3 - 40. Chronique de Portet (1910-1991, débits moyens journaliers) filtrée avec une moyenne mobile d'amplitude 1460 jours (4 ans)	126
Graphique 3 - 41. Evolution de tendance des débits de la source karstique du Baget (Ariège, 1969-1992). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours	126
Graphique 3 - 42. Evolution de la tendance sur la Garonne (stations d'Arlos, Valentine et Portet, 1973-1987). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours.	127
Graphique 3 - 43. Evolution de la tendance sur les différents affluents de la Garonne (période 1973-1987). Moyenne mobile d'amplitude 1460 jours	129
Graphique 3 - 44. Evolution de la tendance, pour un bassin sans réserves souterraines (la Gimone), et un bassin avec des réserves souterraines (le Ger), période 1973 à 1987, moyenne mobile d'amplitude 1460 jours.....	130
Graphique 3 - 45. Exemples de coefficients de tarissement.....	139
Graphique 3 - 46. Hydrogrammes des aquifères karstiques du Baget, d'Aliou et de Fontestorbes, cycle 1985	140
Graphique 3 - 47. Représentation du volume de tarissement pour le système karstique du Baget, cycle 1985.....	141
Graphique 3 - 48. Tarissement des aquifères karstiques du Baget, d'Aliou et de Fontestorbes, cycle 1985	141
Graphique 3 - 49. Coefficients de tarissement moyens des aquifères.....	142
Graphique 3 - 50. Hydrogrammes des affluents de la rive droite de la Garonne ordonnés dans le sens amont-aval, cycle 1985	143
Graphique 3 - 51. Tarissement des affluents de la rive droite, cycle 1985	144
Graphique 3 - 52. Hydrogramme du Salat, cycle 1985	144
Graphique 3 - 53. Tarissement du Salat, cycle 1985.....	145
Graphique 3 - 54. Hydrogrammes des affluents de la rive gauche de la Garonne, cycle 1985	146
Graphique 3 - 55. Hydrogrammes de l'Ariège et de la Neste, cycle 1985	146
Graphique 3 - 56. Tarissement de l'Ariège, cycle 1985	147
Graphique 3 - 57. Volume de tarissement des aquifères karstiques et de quelques affluents, cycle 1985	148
Graphique 3 - 58. Réserves souterraines spécifiques en l/m ² des aquifères karstiques et de quelques affluents, cycle 1985.....	148
Graphique 3 - 59. Hydrogrammes de la Garonne à Arlos, Valentine, Portet et Verdun, cycle 1985	150
Graphique 3 - 60. Tarissement de la Garonne, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977	151
Graphique 3 - 61. Importance des différents réservoirs d'eau pour le bassin en amont de Toulouse	152
Graphique 3 - 62. Débits moyens mensuels prélevés sur la Neste pour le canal de Sarrancolin, période 1973-1987	160
Graphique 3 - 63. Mise en évidence des stockages et déstockages des barrages à vocation énergétique à Auterive (Ariège), période 1973-1987	160

Graphique 3 - 64. Exemple de mise en évidence de l'influence neigeuse sur le bassin du Salat en Ariège. La comparaison est faite avec le bassin du Baget non neigeux (non neigeux)	162
Graphique 3 - 65. Comparaison des dates d'influence neigeuse sur deux bassins, le Salat et l'Ariège : pour le cycle 1985	162
Graphique 3 - 66. Détermination des dates d'influence de la neige sur le bassin du Salat pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87	164
Graphique 3 - 67. Volumes d'écoulement neigeux et hydrogrammes du Salat à Roquefort, sans l'influence neigeuse, pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87	165
Graphique 3 - 68. Part de l'écoulement neigeux dans l'écoulement total pour le Salat à Roquefort, cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87	166
Graphique 3 - 69. Débit de la Garonne (en haut) et piézométrie à Saint-Porquier (en bas) pour la période 1982-1990	168
Graphique 3 - 70. Hydrogramme unitaire de la Garonne à Portet et limnigramme unitaire de la piézométrie à Saint-Porquier, période 1982-1990, pas hebdomadaire	168
Graphique 3 - 71. Débit de la Garonne et du système karstique du Baget pour la période 1982-1990	169
Graphique 3 - 72. Hydrogramme unitaire de la Garonne à Portet et du système karstique du Baget, période 1982-1990, pas hebdomadaire	169
Graphique 3 - 73. Influence mensuelle des aménagements hydroélectriques (m ³ /s) sur le Salat à Roquefort, cycle 1993	171
Graphique 3 - 74. Influence des aménagements sur les débits mesurés sur le Salat à Roquefort, cycle 1993	171
Graphique 3 - 75. Détermination de la période d'influence neigeuse sur le Salat, cycle 1993	172
Graphique 3 - 76. Hydrogramme résiduel du Salat (sans les aménagements et sans la neige), cycle 1993	172
Graphique 3 - 77. Hydrogramme souterrain du Salat à Roquefort avec et sans déphasage, cycle 1993	173
Graphique 3 - 78. Influence mensuelle des aménagements (m ³ /s) sur la Garonne à Portet, cycle 1993	175
Graphique 3 - 79. Influence des aménagements sur les débits mesurés à la station de Portet sur la Garonne, cycle 1993	175
Graphique 3 - 80. Hydrogrammes de la Garonne avec et sans les aménagements, cycle 1993	176
Graphique 3 - 81. Détermination de la période d'influence neigeuse sur la Garonne à Portet, cycle 1993	176
Graphique 3 - 82. Hydrogramme résiduel de la Garonne (sans les aménagements et sans la neige), cycle 1993	177
Graphique 3 - 83. Hydrogramme souterrain de la Garonne à Portet avec ou sans déphasage, cycle 1993	178
Graphique 3 - 84. Esquisse de l'hydrogramme de ruissellement de la Garonne à Portet, cycle 1993	180
Graphique 3 - 85. Comparaison du réservoir souterrain à Portet, avec les autres formes de stockage, cycle 1993	180
Graphique 4 - 1. Précipitations mensuelles à Blagnac pour le cycle 1993	205
Graphique 4 - 2. Précipitations journalières à Blagnac pour le cycle 1993	205

Graphique 4 - 3. Hydrogrammes du Salat à Roquefort et de l'Arize à Rieux-Volvestre, cycle 1993	205
Graphique 4 - 4. Hydrogramme et débits moyens mensuels de la Garonne à Portet, cycle 1993	205
Graphique 4 - 5. Evolution de la moyenne de la B.I. des campagnes	206
Graphique 4 - 6. alances ioniques des échantillons des affluents et sous-affluents de la Garonne, cycle 1993	207
Graphique 4 - 7. Teneurs en bicarbonates pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	209
Graphique 4 - 8. Teneurs en calcium pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne	209
Graphique 4 - 9. Teneurs en magnésium pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	209
Graphique 4 - 10. Teneurs en sulfates pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne	209
Graphique 4 - 11. Teneurs en sodium pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne	212
Graphique 4 - 12. Teneurs en potassium pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	212
Graphique 4 - 13. Teneurs en chlorures pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	212
Graphique 4 - 14. Teneurs en nitrates pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne	212
Graphique 4 - 15. Valeurs de la conductivité pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	214
Graphique 4 - 16. Valeurs de la température pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	214
Graphique 4 - 17. Valeurs du dpH pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne.....	214
Graphique 4 - 18. Valeurs de la pCO ₂ pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne	214
Graphique 4 - 19. Cercles des corrélations pour les différents affluents et sous affluents de la Garonne, cycle hydrologique 1993	220
Graphique 4 - 20. ACP sur l'ensemble de l'hydrochimie des affluents de la Garonne, cycle 1993, 204 échantillons.....	224
Graphique 4 - 21. Evolution temporelle des teneurs en bicarbonates sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93	227
Graphique 4 - 22. Evolution temporelle du dpH sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93.....	229
Graphique 4 - 23. Evolution temporelle de la pCO ₂ sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93	230
Graphique 4 - 24. Evolution temporelle des teneurs en sodium sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93	231
Graphique 4 - 25. Evolution temporelle des températures sur les affluents de la Garonne durant le cycle 93	232
Graphique 4 - 26. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Salat	233
Graphique 4 - 27. Résultats de ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Ger.....	234
Graphique 4 - 28. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur le Volp	235
Graphique 4 - 29. Résultats de l'ACP et hydrogramme du cycle 1993 sur l'Aussonnelle.....	236

Graphique 4 - 29. Résultats de l'ACP sur les affluents de la Garonne, cycle 1993, 204 échantillons	236
Graphique 4 - 30. Hydrogrammes de la Garonne à Valentine, Portet/Garonne et Verdun, cycle 1993	239
Graphique 4 - 31. ACP sur les eaux de la Garonne, cycle 1993	241
Graphique 4 - 32. Evolution des échantillons des différentes campagnes dans l'espace des individus	242
Graphique 4 - 33. Amplitudes de variations et moyennes des différentes variables physico-chimiques sur la Garonne (toutes stations confondues)	243
Graphique 4 - 34. Evolution des bicarbonates le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993	245
Graphique 4 - 35. Représentation des variations de concentrations en bicarbonates sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne des bicarbonates sur la Garonne)	245
Graphique 4 - 36. Evolution de la pCO ₂ le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993	247
Graphique 4 - 37. Représentation des variations de la pCO ₂ sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne de la pCO ₂ sur la Garonne)	247
Graphique 4 - 38. Evolution du dpH le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993	248
Graphique 4 - 39. Représentation des variations du dpH sur la Garonne et sur les affluents, cycle 1993 (la courbe représente l'évolution moyenne du dpH sur la Garonne)	248
Graphique 4 - 40. Evolution du sodium le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993	249
Graphique 4 - 41. Evolution de la température le long de la Garonne, du Pont-du-Roi à St-Aignan, durant le cycle 1993	250
Graphique 4 - 42. Evolution des teneurs en Silice sur le bassin de la Garonne, étiage 1992	251
Graphique 4 - 43. Augmentation des débits de la Garonne en fonction des affluents	252
Graphique 4 - 44. Concentrations des principaux éléments chimiques des eaux du Val d'Aran	254
Graphique 4 - 45. Analyse en composantes principales de la Garonne et de ses affluents dans le Val d'Aran	256
Graphique 4 - 46. Evolution de quelques variables physico-chimiques sur les eaux du Val d'Arran	258
Graphique 4 - 47. Hydrogrammes de l'Ariège à Auterive, de la Léze à Labarthe/Lèze et de l'Hers vif à Mazères, cycle 1993	260
Graphique 4 - 48. ACP sur les eaux du bassin de l'Ariège, cycle 1993	261
Graphique 4 - 49. Evolution de quelques paramètres physico-chimiques durant le cycle 1993 sur le bassin de l'Ariège	264
Graphique 4 - 50. Mise en évidence des apports de la nappe de l'Ariège, par le biais des nitrates	265
Graphique 4 - 51. Apports des nitrates par la nappe de l'Ariège	265
Graphique 4 - 52. Evolution du dpH et de la pCO ₂ durant le cycle 1993 sur le bassin de l'Ariège	266
Graphique 4 - 53. ACP sur les eaux du bassin du Salat, cycle 1993	268
Graphique 4 - 54. Hydrogrammes du Salat à Roquefort/Garonne et du Lez à Balaguères, cycle 1993	269

Graphique 4 - 55. Evolution temporelle et spatiale de quelques éléments majeurs durant le cycle 1993, bassin du Salat	272
Graphique 4 - 56. Evolution temporelle et spatiale de la température, du dpH et de la pCO ₂ durant le cycle 1993, bassin du Salat	273
Graphique 4 - 57. ACP sur les eaux de la Neste, cycle 1993	275
Graphique 4 - 58. Evolution temporelle et spatiale de quelques paramètres physico-chimiques durant le cycle 1993, bassin de la Neste.....	277
Graphique 4 - 59. Evolution des teneurs en bicarbonates et des débits à la station de Roquefort/Garonne sur le Salat, période 1973 à 1987.....	285
Graphique 4 - 60. Evolution des teneurs en bicarbonates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance	286
Graphique 4 - 61. Evolution du nombre d'analyses effectuées sur les bicarbonates de 1971 à 1994, station de Gagnac sur la Garonne.....	286
Graphique 4 - 62. Evolution des teneurs en chlorures sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance	287
Graphique 4 - 63. Evolution des teneurs en sodium sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance	287
Graphique 4 - 64. Evolution des teneurs en sulfates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance	288
Graphique 4 - 65. Evolution des teneurs en nitrates sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance	288
Graphique 4 - 66. Evolution de la température sur la Garonne à Gagnac de 1971 à 1994 et courbe de tendance.....	289
Graphique 4 - 67. Hydrogrammes souterrains au pas mensuel sur le bassin du Ger, du Salat, du Volp, de l'Arize, de l'Aussonnelle, de la Noue et de la Garonne à Portet, cycle 1993	297
Graphique 5 - 1. Relation oxygène-18-altitude des stations de prélèvements sur le bassin de la Garonne, étiage 1993.....	304
Graphique 5 - 2. Evolution des teneurs en oxygène-18 le long de la Garonne, étiage 1993	305
Graphique 5 - 3. Corrélation oxygène-18-deutérium sur le bassin de la Garonne, campagne d'étiage 1993	307
Graphique 5 - 4. Corrélation carbone 13-bicarbonates sur le bassin de la Garonne, étiage 1993	309
Graphique 5 - 5. Evolution des teneurs en carbone 13 le long de la Garonne, étiage 1993	309
Graphique 5 - 6. Variations des teneurs en oxygène-18 sur le Volp, le Ger et le Salat, durant le cycle hydrologique 1993	312
Graphique 5 - 7. Corrélation oxygène-18-deutérium sur le Volp, le Ger et le Salat, durant le cycle hydrologique 1993.....	313

FIGURES

Figure 1 - 1. Réservoirs participant à l'alimentation de la Garonne.....	26
Figure 1 - 2. Le pont neuf à Toulouse sans les eaux souterraines.....	29
Figure 2 - 1. Schéma hydraulique du bassin de la Garonne	36

Figure 2 - 2. Exemple de courbe de capacité d'un réservoir	38
Figure 2 - 3. Débits moyens pluriannuels sur la Garonne et les principaux affluents, période 1973-1987	52
Figure 2 - 4. Débits moyens de la Garonne et des principaux affluents, cycle 1977	57
Figure 2 - 5. Débits moyens de la Garonne et des principaux affluents, cycle 1986	59
Figure 2 - 6. Débits moyens mensuels de la Garonne et des principaux affluents en août 1976.....	62
Figure 2 - 7. Débits moyens mensuels de la Garonne et des principaux affluents, novembre 1974.....	65
Figure 2 - 8. Débits spécifiques naturels de la Garonne et des principaux affluents, août 1976.....	70
Figure 3 - 1. Représentation schématique de l'aquifère karstique par A. MANGIN (Dessin R. ROUCH, informatisation B. MARSAUD)	88
Figure 3 - 2. Décomposition de l'hydrogramme en plusieurs composantes.....	158
Figure 3 - 3. Types d'échanges aquifère-rivière	167
Figure 4 - 1. Diagramme triangulaire définissant la nomenclature des roches carbonatées en fonction de leur composition (d'après M.W. LEIGHTON & C. PENDEXTER, tiré de A. MANGIN, 1975)	195
Figure 4 - 2. Déformations du calcaire et de l'argile.....	195
Figure 4 - 3. Modèle de H. ROQUES, 1964	196

TABLEAUX

Tableau 1 - 1 Population en 1990 par départements.....	25
Tableau 1 - 2 Principaux barrages à vocation énergétique et capacité maximale de stockage.....	28
Tableau 2 - 1 Liste des aménagements en amont des stations hydrométriques de la Garonne, de la Neste, du Salat et de l'Ariège.....	38
Tableau 2 - 2 Influence moyenne des aménagements sur la Garonne, la Neste, le Salat et l'Ariège, période 1973-1987.....	42
Tableau 2 - 3 Pluviométrie par cycles et moyenne journalière sur le cycle à Blagnac de 1973 à 1987	55
Tableau 2 - 4 Distribution des apports à la station de Verdun, août 1976	63
Tableau 2 - 5 Comparaison des apports par cycles (cycles humide et sec) et des apports mensuels (période de hautes eaux et basses eaux), à la station de Verdun	67
Tableau 2 - 6 Comparaison des apports par cycles (cycles humide et sec) et des apports mensuels (période de hautes eaux et basses eaux), à la station de Valentine, Portet et Verdun.....	68
Tableau 2 - 7 Superficie des bassins versants en amont des stations hydrométriques situées sur la Garonne.....	69
Tableau 2 - 8 Superficie des bassins des différents affluents de la Garonne	71
Tableau 3 - 1 Périodes d'enregistrements des stations hydrométriques dans le bassin de l'Ariège	83

Tableau 3 - 2 Fiche signalétique du Baget (aquifère libre)	89
Tableau 3 - 3 Fiche signalétique de Fontestorbes (aquifère semi-captif).....	90
Tableau 3 - 4 Effet mémoire des différents systèmes étudiés, période 1973 à 1987	123
Tableau 3 - 5 Phases de la crue.....	133
Tableau 3 - 6 Volume et coefficient de tarissement des systèmes karstiques et de quelques affluents, cycle 1985, 1986 et 1977	147
Tableau 3 - 7 Coefficients et volumes de tarissement pour la Garonne à Portet, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977	150
Tableau 3 - 8 Volumes de tarissement écoulés à Portet, cycles 1985, 1973, 1978, 1981, 1986 et 1977.....	152
Tableau 3 - 9 Précipitations totales et moyennes pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87; station d'Antichan (St-Girons).....	163
Tableau 3 - 10 Périodes d'influence neigeuse pour les cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87	164
Tableau 3 - 11 Volume neigeux et hauteur de neige associée sur le bassin du Salat, cycles 73, 77, 78, 81, 86, et 87	165
Tableau 3 - 12 Résultats de l'étude du tarissement, cycle 1993	173
Tableau 3 - 13 Volume des réservoirs souterrains du bassin du Salat calculé avec et sans extrapolation de tarissement, cycle 1993.....	174
Tableau 3 - 14 Contribution des composantes dans l'écoulement naturel du bassin du Salat, cycle 1993	174
Tableau 3 - 15 Résultats de l'étude du tarissement, cycle 1993	177
Tableau 3 - 16 Volume des réservoirs souterrains du bassin de la Garonne à Portet avec ou sans déphasage, cycle 1993	178
Tableau 3 - 17 Contribution des composantes dans l'écoulement naturel du le bassin de la Garonne à la station de Portet, cycle 1993	179
Tableau 4 - 1 Origine des éléments dans les eaux de surface.....	194
Tableau 4 - 2 Equilibres calco-carboniques et constantes d'équilibre (Bakalowicz, 1992)	197
Tableau 4 - 3 Statistiques sur la balance ionique, campagnes 1992-93	207
Tableau 4 - 4 Classement des affluents par concentrations ou valeurs physico- chimiques décroissantes	215
Tableau 4 - 5 Pourcentage de variance exprimée par les deux premiers facteurs de l'ACP pour les différents affluents	216
Tableau 4 - 6 Position des variables dans le cercle des corrélations	221
Tableau 4 - 7 Corrélations entre variables	222
Tableau 4 - 8 Position et code des stations sur la Garonne	237
Tableau 4 - 9 Stations de prélèvement dans le val d'Aran	253
Tableau 4 - 10 Contribution souterraine de l'écoulement de quelques bassins pour le cycle 1993 (déterminée par décomposition chimique).....	296
Tableau 5 - 1 Altitude moyenne de recharge des eaux de quelques stations, étiage 1993	304

CARTES

Carte 1 - 1 Localisation du bassin d'étude sur le territoire français.....	19
Carte 1 - 2 Position du bassin dans la région Midi-Pyrénées	20
Carte 1 - 3 Bassin d'étude et réseau hydrographique	21

Carte 1 - 4. Schéma structural du versant nord des Pyrénées (d'après P. SOUQUET et al, 1976).....	23
Carte 1 - 5 Aquifères carbonatés (fissurés et karstiques)	27
Carte 1 - 6 Les nappes alluviales.....	28
Carte 2 - 1. Localisation des sources pour l'AEP en 1991	47
Carte 2 - 2. Localisation des puits pour l'AEP en 1991.....	47
Carte 2 - 3. Localisation des prises en rivière pour l'AEP en 1991	48
Carte 2 - 4. Secteurs hydrographiques	50
Carte 3 - 1 Nappe de l'Ariège et réseau hydrométrique	82
Carte 3 - 1 Localisation des stations hydrométriques sur le bassin du Lez.....	89
Carte 3 - 2 Localisation des stations hydrométriques sur le bassin de l'Hers.....	90
Carte 3 - 3 Localisation des éléments de référence	106
Carte 3 - 4 Localisation des stations hydrométriques sur la Garonne	127
Carte 3 - 5 Localisation des affluents étudiés	128
Carte 3 - 6 Géologie du bassin du Salat	170
Carte 4 - 1 Numéro des sites de prélèvements et rivière étudiée	203
Carte 4 - 2 Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques le long de la Garonne	238
Carte 4 - 3 Position des stations de prélèvement dans le Val d'Aran (Espagne).....	253
Carte 4 - 4 Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques sur le bassin de l'Ariège.....	259
Carte 4 - 5 Nappe alluviale de l'Ariège.....	263
Carte 4 - 6 Position des stations de prélèvements et des stations hydrométriques sur le bassin du Salat	267
Carte 4 - 7 Position des stations de prélèvements sur le bassin de la Neste	274
Carte 5 - 1 Stations de prélèvements isotopiques de la campagne d'étiage du cycle 1993	301
Carte 5 - 2 Teneurs en oxygène-18 sur le bassin de la Garonne, étiage 1993	303
Carte 5 - 3 Teneurs en deutérium sur le bassin de la Garonne, étiage 1993	306
Carte 5 - 4 Teneurs en tritium sur le bassin de la Garonne, étiage 1993	307
Carte 5 - 5 Teneurs en carbone 13 sur le bassin de la Garonne, étiage 1993	308
Carte 5 - 6 Teneur en bicarbonates (en mg/l) sur les bassins du Ger, de l'Ourse, du Volp, et sur la Garonne, septembre 1994.....	310
Carte 5 - 7 Teneurs en carbone 13 (vs PDB) sur les bassins du Ger, de l'Ourse, du Volp, et sur la Garonne, septembre 1994.....	310
Carte 5 - 8 Localisation des bassins du Volp, du Ger et du Salat.....	311
Carte 5 - 9 Teneurs en oxygène-18 à l'exutoire des bassins du Volp, du Ger et du Salat, durant le cycle 1993.....	312
Carte 5 - 10 Teneurs en Tritium sur le Ger, le Salat et le Volp, étiage 1993	313

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	7
INTRODUCTION.....	13
1. PRESENTATION DU BASSIN D'ETUDE	17
1.1. LOCALISATION.....	19
1.2. DONNEES GENERALES.....	20
1.2.1. Hydrographie.....	20
1.2.2. Cadre géologique et structural.....	21
1.2.3. Climatologie.....	24
1.2.4. Données sociales et économiques	25
1.3. LES PRINCIPAUX RESERVOIRS D'EAU	26
1.3.1. Les aquifères carbonatés : fissurés et karstiques.....	26
1.3.2. Les aquifères alluviaux	27
1.3.3. Les barrages.....	28
1.4. LES EAUX SOUTERRAINES.....	29
1.4.1. Importance.....	29
1.4.2. Généralités.....	30
2. CONTRIBUTION DES AFFLUENTS AUX DEBITS DE LA GARONNE.....	33
INTRODUCTION.....	35
2.1. LES PERTURBATIONS APPORTEES AUX DEBITS	37
2.1.1. Les barrages à vocation énergétique	37
2.1.2. Les canaux.....	43
2.1.3. Les prélèvements sur le bassin.....	46
2.1.3.1. L'Alimentation en Eau Potable	46
2.1.3.2. Les industries.....	48
2.1.3.3. L'irrigation	49

2.2. APPORTS DES AFFLUENTS A LA GARONNE.....	51
2.2.1. Apports moyens sur une longue période (1973 à 1987)	51
2.2.2. Apports par cycles hydrologiques.....	55
2.2.2.1. Un cycle humide, le cycle 1977	56
2.2.2.2. Un cycle sec, le cycle 1986.....	58
2.2.3. Apports mensuels.....	61
2.2.3.1. Apports en période d'étiage : exemple du mois d'août 1976	61
2.2.3.2. Apports en période de hautes eaux : exemple du mois de novembre 1974	64
2.2.4. Comparaison entre cycle humide et cycle sec, et, mois d'étiage et mois de hautes eaux	67
2.2.5. Apports spécifiques en période d'étiage, exemple du mois d'août 1976.....	69
2.2.5.1. Evolution le long de la Garonne	69
2.2.5.2. Apports des différents affluents	71
CONCLUSIONS.....	73
3. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX DEBITS DES EAUX DE SURFACE	75
3.1. COMPORTEMENT ET APPORTS DES AQUIFERES.....	77
3.1.1. Détermination et approche du rôle des aquifères alluviaux : exemple de la nappe alluviale de l'Ariège.	79
Introduction.....	79
3.1.1.1. Méthodes de détermination des apports alluviaux et critiques	79
3.1.1.1.1. Utilisation des précipitations efficaces.....	79
3.1.1.1.2. Utilisation des débits de stations hydrométriques.....	79
3.1.1.1.3. Utilisation de niveaux piézométriques.	80
3.1.1.1.3.1. A un instant donné.	80
3.1.1.1.3.2. Avec un enregistrement continu.....	80
3.1.1.1.4. Décomposition de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin.	81
3.1.1.1.5. Utilisation de modèles.....	81
3.1.1.2. Apports de la nappe de l'Ariège.....	81
3.1.1.2.1. Présentation de la nappe	81
3.1.1.2.2. Données existantes.	82
3.1.1.2.3. Utilisation des débits des stations hydrométriques.	83
3.1.1.2.3.1. Les débits disponibles.....	83
3.1.1.2.3.2. Etude entre Foix et Saverdun.....	83
3.1.1.2.3.2.1. Apports durant l'année	83
3.1.1.2.3.2.2. Apport en étiage.....	86
Conclusion.....	86
3.1.2. Rôle des aquifères karstiques : exemples de la source du Baget et de la source de Fontestorbes.....	88
Introduction.....	88
3.1.2.1. Présentation des bassins et des systèmes karstiques.	89
3.1.2.1.1. Bassin du Lez	89
3.1.2.1.2. Bassin de l'Hers en amont de Bélesta	90
3.1.2.2. Apport quantitatif des systèmes karstiques au réseau hydrographique.....	90

3.1.2.2.1. La source du Baget.....	90
3.1.2.2.1.1. Apport journalier.....	90
3.1.2.2.1.2. Apport mensuel.....	91
3.1.2.2.1.3. Apport par cycles.....	92
3.1.2.2.1.4. Apport en étiage.....	93
3.1.2.2.2. Source de Fontestorbes.....	96
3.1.2.2.2.1. Apport journalier.....	96
3.1.2.2.2.2. Apport mensuel.....	96
3.1.2.2.2.3. Apport par cycles.....	97
3.1.2.2.2.4. Apport en étiage.....	98
3.1.2.2.3. Comparaison des apports du Baget et de Fontestorbes.....	99
3.1.2.3. Etudes des systèmes karstiques et des bassins hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales.....	100
3.1.2.3.1. Analyse des précipitations.....	101
3.1.2.3.2. Analyse du signal de sortie.....	101
3.1.2.3.2.1. Analyse des débits du Baget et du Lez à Balaguères (cycles 71 à 83).....	101
3.1.2.3.2.2. Analyse des débits de Fontestorbes et de l'Hers à Bélesta.....	103
Conclusions.....	103
3.1.3. Comparaison du comportement dynamique des aquifères karstiques et poreux et des systèmes hydrologiques de surface à partir des analyses corrélatoires et spectrales.....	106
Introduction.....	106
3.1.3.1. Les chroniques.....	107
3.1.3.2. Corrélogrammes et spectres.....	107
3.1.3.3. Analyses croisées pluies-débits et pluies-piézométries.....	109
Conclusions.....	112
3.2. MISE EN EVIDENCE DES RESERVES SOUTERRAINES ET VARIABILITE DU CLIMAT SUR LES ECOULEMENTS.....	113
3.2.1. Evaluation des réserves de la Garonne et des différents affluents par l'analyse corrélatoire et spectrale des chroniques de débits.....	115
Introduction.....	115
3.2.1.1. Les aquifères karstiques.....	116
3.2.1.1.1. Analyse à court terme.....	116
3.2.1.1.2. Analyse à long terme.....	116
3.2.1.2. La Garonne.....	117
3.2.1.2.1. Analyse à court terme.....	117
3.2.1.2.2. Analyse à long terme.....	118
3.2.1.3. Les affluents de la Garonne.....	119
3.2.1.3.1. Affluents de la rive droite.....	119
3.2.1.3.1.1. Analyse à court terme.....	119
3.2.1.3.1.2. Analyse à long terme.....	120
3.2.1.3.2. Affluents de la rive gauche.....	121
3.2.1.3.2.1. Analyse à court terme.....	121
3.2.1.3.2.2. Analyse à long terme.....	121
Conclusions.....	122
3.2.2. Etude de la tendance des débits à Portet (1910-1991) et sur les différents affluents.....	124
Introduction.....	124

3.2.2.1. Evolution hydrologique actuelle : étude des débits à Portet de 1910 à 1991	125
3.2.2.2. Evolution de la tendance le long de la Garonne : période 1973 à 1987	126
3.2.2.3. Evolution de la tendance pour différents affluents de la Garonne	127
Conclusions	128
3.3. ESTIMATION DES APPORTS SOUTERRAINS ET DES RESERVES SOUTERRAINES SUR LE BASSIN.....	131
3.3.1. Etude du tarissement	133
Introduction.....	133
3.3.1.1. Connaissances actuelles.....	133
3.3.1.1.1. Cas d'un seul réservoir souterrain.....	133
3.3.1.1.1.1. Modèles et fonctions mathématiques définissant le tarissement	134
3.3.1.1.1.2. Utilisation de la formule de Maillet	136
3.3.1.1.2. Cas de plusieurs réservoirs souterrains.....	136
3.3.1.1.3. Les coefficients de tarissement.....	138
3.3.1.2. Tarissement des principaux affluents de la Garonne.....	139
3.3.1.2.1. Tarissement des aquifères karstiques du bassin : le Baget, Aliou et Fontestorbes	140
3.3.1.2.2. Tarissements peu perturbés par les aménagements : le Volp, l'Arize, la Lèze, l'Hers mort, le Girou et le Ger.....	142
3.3.1.2.3. Tarissement influencé par la neige : le Salat.....	144
3.3.1.2.4. Tarissements influencés par les aménagements : affluents de la rive gauche.....	145
3.3.1.2.5. Tarissements influencés par la neige et les aménagements : l'Ariège et la Neste.....	146
3.3.1.2.6. Comparaison des volumes de tarissement et conclusions.....	147
3.3.1.3. Tarissement de la Garonne.....	149
3.3.1.3.1. Evolution des débits de la Garonne (exemple du cycle 1985).....	149
3.3.1.3.2. Tarissement de la Garonne à Portet sur plusieurs cycles hydrologiques	149
Conclusions	153
3.3.2. Décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme	155
Introduction.....	155
3.3.2.1. Méthodes existantes.....	155
3.3.2.1.1. Décomposition d'une crue simple	155
3.3.2.1.1.1. Méthodes classiques	155
3.3.2.1.1.2. Méthode semi-logarithmique	156
3.3.2.1.1.3. Méthode de LANGBEIN.....	157
3.3.2.1.2. Décomposition de l'hydrogramme annuel	158
3.3.2.1.3. Conclusions	158
3.3.2.2. Nouvelle méthode proposée pour déterminer l'écoulement souterrain	159
3.3.2.2.1. Impacts des aménagements et des prélèvements sur les débits	159
3.3.2.2.2. Ecoulement lié à la fonte des neiges.....	161
3.3.2.2.2.1. Exposé de la méthode permettant d'estimer la contribution neigeuse	161
3.3.2.2.2.2. Validité de la méthode : exemple de deux bassins montagneux, le Salat et l'Ariège.....	162

3.3.2.2.2.3. Estimation des volumes neigeux sur le bassin du Salat pour quelques cycles.....	162
3.3.2.2.2.3.1. Périodes d'influence neigeuse.....	163
3.3.2.2.2.3.2. Volumes d'écoulement neigeux.....	163
3.3.2.2.3. Décomposition de l'hydrogramme en une composante souterraine et une composante de ruissellement.....	166
3.3.2.2.3.1. Comportement des aquifères poreux.....	167
3.3.2.2.3.2. Comportement des aquifères karstiques.....	169
3.3.2.3. Décomposition de l'hydrogramme du Salat à Roquefort, cycle 1993.....	170
3.3.2.3.1. Influence des aménagements et hydrogramme naturel.....	170
3.3.2.3.2. Influence de l'écoulement neigeux et hydrogramme résiduel.....	171
3.3.2.3.3. Hydrogramme souterrain.....	172
3.3.2.3.4. Conclusions.....	174
3.3.2.4. Décomposition de l'hydrogramme de la Garonne à Portet, cycle 1993.....	174
3.3.2.4.1. Influence des aménagements et hydrogramme naturel.....	175
3.3.2.4.2. Influence de l'écoulement neigeux et hydrogramme résiduel.....	176
3.3.2.4.3. Hydrogramme souterrain.....	177
3.3.2.4.4. Conclusions.....	179
Conclusions.....	179
CONCLUSIONS DU CHAPITRE 3.....	183
4. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES A LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE.....	187
INTRODUCTION.....	189
4.1. GENERALITES SUR LA CHIMIE DES EAUX.....	191
4.1.1. La chimie des carbonates.....	193
4.1.1.1. Les roches carbonatées.....	193
4.1.1.2. La dissolution des carbonates.....	196
4.1.1.3. Sursaturation et réprécipitation.....	198
4.1.2. Paramètres caractéristiques des eaux souterraines.....	198
4.2. CARACTERISATION ET EVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU BASSIN DE LA GARONNE DURANT LE CYCLE 1993 (STATION DU CNRS).....	201
Introduction.....	203
4.2.1. Le cycle hydrologique 1993 : pluviométrie et hydrologie.....	204
4.2.1.1. La pluviométrie (Station de Blagnac).....	204
4.2.1.2. L'hydrologie.....	204
4.2.2. Critique des données.....	206
4.2.2.1. Les moyens de détection.....	206
4.2.2.2. Les campagnes 1992-1993.....	206
4.2.3. Caractérisation physico-chimique des eaux des différents affluents.....	208
4.2.3.1. Concentrations des éléments et valeurs physico-chimiques.....	208
4.2.3.1.1. Les bicarbonates.....	208
4.2.3.1.2. Le calcium.....	208
4.2.3.1.3. Le magnésium.....	208

4.2.3.1.4. Les sulfates.....	210
4.2.3.1.5. Le sodium.....	210
4.2.3.1.6. Le potassium.....	210
4.2.3.1.7. Les chlorures.....	211
4.2.3.1.8. Les nitrates.....	211
4.2.3.1.9. La conductivité.....	211
4.2.3.1.10. La température.....	213
4.2.3.1.11. Le dpH.....	213
4.2.3.1.12. La pCO ₂	213
Conclusions.....	215
4.2.3.2. Corrélations entre les variables physico-chimiques de chaque affluent.....	216
4.2.3.2.1. Les pourcentages de variance exprimée.....	216
4.2.3.2.2. Les cercles des corrélations.....	217
4.2.4. Evolution du chimisme des eaux sur les affluents.....	222
4.2.4.1. A.C.P. d'ensemble.....	222
4.2.4.2. Evolution temporelle de quelques variables physico-chimiques.....	225
4.2.4.2.1. Les bicarbonates.....	225
4.2.4.2.2. Le dpH et la pCO ₂	226
4.2.4.2.3. Le sodium.....	228
4.2.4.2.4. La température.....	228
4.2.4.3. Quatre affluents caractéristiques.....	228
4.2.4.3.1. Le Salat.....	228
4.2.4.3.2. Le Ger.....	233
4.2.4.3.3. Le Volp.....	235
4.2.4.3.4. L'Aussonnelle.....	236
4.2.5. Evolution des eaux de la Garonne, du Pont-du-Roi à Saint-Aignan, et dans le Val d'Aran.....	237
Introduction.....	237
4.2.5.1. ACP des eaux de la Garonne.....	240
4.2.5.2. Amplitude de variation des variables.....	243
4.2.5.3. Evolution spatiale de quelques variables physiques et chimiques.....	243
4.2.5.3.1. Les bicarbonates.....	243
4.2.5.3.2. La pCO ₂ et le dpH.....	244
4.2.5.3.3. Le sodium.....	246
4.2.5.3.4. La température.....	246
4.2.5.3.5. La silice.....	251
4.2.5.4. Les sources de la Garonne : le Val d'Aran.....	253
4.2.5.4.1. ACP sur les eaux du Val d'Aran.....	255
4.2.5.4.2. Evolution spatiale de quelques variables physico-chimiques.....	257
4.2.5.4.2.1. Les bicarbonates, les sulfates et le magnésium.....	257
4.2.5.4.2.2. Les chlorures et le potassium.....	257
4.2.5.4.2.3. La température.....	257
4.2.5.4.2.4. La pCO ₂ et le dpH.....	257
4.2.6. Caractérisation et évolution du chimisme des eaux dans le bassin de l'Ariège, du Salat et de la Neste.....	259
4.2.6.1. Evolution des eaux dans le bassin de l'Ariège.....	259
4.2.6.1.1. ACP sur les eaux du bassin de l'Ariège.....	260
4.2.6.1.2. Mise en évidence des apports de la nappe.....	262
4.2.6.1.2.1. Les bicarbonates.....	262
4.2.6.1.2.2. Les sulfates et le sodium.....	262

4.2.6.1.2.3. Les nitrates	262
4.2.6.1.2.4. La température.....	263
4.2.6.1.2.5. Le dpH et la pCO ₂	266
4.2.6.2. Evolution des eaux sur le bassin du Salat.....	266
4.2.6.2.1. ACP sur les eaux du bassin du Salat.....	266
4.2.6.2.2. Evolution temporelle et spatiale de quelques variables physico- chimiques	269
4.2.6.2.2.1. Les bicarbonates	269
4.2.6.2.2.2. Les sulfates	269
4.2.6.2.2.3. Les chlorures et le sodium.....	270
4.2.6.2.2.4. Le potassium.....	270
4.2.6.2.2.5. Les nitrates	271
4.2.6.2.2.6. La température.....	271
4.2.6.2.2.7. Le dpH et la pCO ₂	271
4.2.6.3. Evolution des eaux de la Neste.....	273
4.2.6.3.1. ACP sur les eaux de la Neste.....	274
4.2.6.3.2. Evolution temporelle et spatiale de quelques variables physico- chimiques	276
4.2.6.3.2.1. Les bicarbonates et les chlorures	276
4.2.6.3.2.2. Les sulfates	276
4.2.6.3.2.3. La température.....	276
4.2.6.3.2.4. Le dpH et la pCO ₂	276
4.2.6.3.3. Quantification des apports intermédiaires.....	276
Conclusions.....	279
4.3. EVOLUTION PLURIANNUELLE DU CHIMISME DES EAUX SUR LE SALAT A MAZERES ET SUR LA GARONNE A GAGNAC.....	283
4.3.1. Evolution des bicarbonates sur le Salat à Mazères.....	285
4.3.2. Evolution de quelques éléments chimiques et de la température sur la Garonne à Gagnac.....	285
4.3.2.1. Les bicarbonates	286
4.3.2.2. Les chlorures, le sodium, les sulfates et les nitrates.....	286
4.3.2.3. La température.....	288
4.4. DECOMPOSITION CHIMIQUE DE L'HYDROGRAMME	291
4.4.1. Connaissances actuelles	293
4.4.2. Essai de décomposition sur quelques affluents et sur la Garonne à Portet, pour le cycle 1993	295
4.4.2.1. Méthode adoptée.....	295
4.4.2.2. Résultats.....	295
5. LES ISOTOPES DU MILIEU DES EAUX DU BASSIN DE LA GARONNE.....	299
INTRODUCTION.....	301
5.1. CAMPAGNE D'ETIAGE 1993	301
5.1.1. L'oxygène-18.....	302
5.1.2. Le deutérium.....	305
5.1.3. Corrélation 18O-2H	306

5.1.4. Le tritium	306
5.1.5. Le carbone 13.....	308
5.1.5.1. Evolution sur l'ensemble du bassin.....	308
5.1.5.2. Evolution sur trois sous-bassins : l'Ourse, le Ger et le Volp (campagne 1994)	310
5.2. ETUDE DES VARIATIONS ISOTOPIQUES SUR TROIS BASSINS SPECIFIQUES : LE VOLP, LE GER ET LE SALAT.....	311
5.2.1. L'oxygène-18.....	311
5.2.2. Le deutérium.....	313
5.2.3. Corrélation 18O-2H.....	313
5.2.4. Le tritium.....	313
CONCLUSIONS.....	314
CONCLUSIONS GENERALES	315
1. LES ORIGINES DES EAUX SOUTERRAINES DE LA GARONNE	317
A) Selon les types d'aquifères	317
B) Selon les affluents.....	318
C) Estimation des réserves	318
1) Par l'analyse du tarissement.....	318
2) Par la décomposition de l'hydrogramme.....	319
3) Le cas du Ger.....	319
D) Les données de l'hydrochimie	319
2. METHODOLOGIE.....	320
3. PERSPECTIVES	322
BIBLIOGRAPHIE.....	325
LISTE DES GRAPHIQUES, FIGURES, TABLEAUX ET CARTES.....	337
TABLE DES MATIERES	351
ANNEXES.....	361

ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

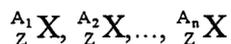
1. RAPPELS ET GENERALITES SUR LES ISOTOPES DU MILIEU	365
2. MESURE DES DEBITS JOURNALIERS SUR LES STATIONS HYDROMETRIQUES ETUDIEES.....	375
3. MESURES PHYSICO-CHIMIQUES ET METHODES D'ANALYSES DES ELEMENTS.....	381
4. L'ANALYSE DES CHRONIQUES : LES ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES	387
5. LES ANALYSES MULTIDIMENSIONNELLES : L'ACP (ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES) ET L'AFD (ANALYSE FACTORIELLE DISCRIMINANTE)	399
6. LOGICIELS UTILISES	411
7. PRELEVEMENTS PAR SOUS-SECTEURS HYDROGRAPHIQUES	415
8. TABLEAUX DES VALEURS PHYSICO-CHIMIQUES DES CAMPAGNES DU CYCLE 1993 SUR LE BASSIN DE LA GARONNE.....	419
LISTES DES GRAPHIQUES, FIGURES, TABLEAUX ET CARTES DES ANNEXES.....	435

**1. RAPPELS ET GENERALITES
SUR LES ISOTOPES DU
MILIEU**

1. Rappels et généralités sur les isotopes du milieu

1.1. Introduction

Les isotopes sont des éléments chimiques, qui, se trouvant dans une même case du tableau de MENDELIEV, ont même numéro atomique Z . Par conséquent, les isotopes ont le même nombre de protons dans le noyau. Ils se différencient entre eux par le nombre de neutrons. D'une façon générale, ils se représentent par :



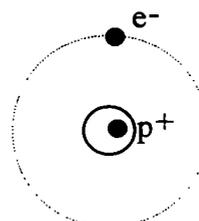
avec :

- X : élément chimique;
- A_n : nombre de masses;
- Z : nombre de charges ou numéro atomique.

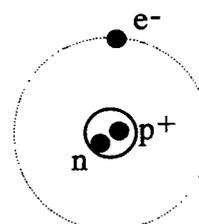
Les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, mais n'ont pas le même comportement.

L'hydrogène, par exemple, possède quatre isotopes dont le deutérium et le tritium sont les plus importants.

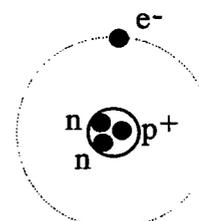
L'hydrogène ordinaire ${}^1_1\text{H}$ possède 1 proton et 1 électron :



Le deutérium ${}^2_1\text{H}$ possède 1 proton, 1 électron et 1 neutron :



Le tritium ${}^3_1\text{H}$ possède lui 1 proton, 1 électron et 2 neutrons :



Il existe deux sortes d'isotopes : les isotopes stables et les isotopes instables ou radioactifs. Les isotopes stables ne se désintègrent pas, alors que les isotopes radioactifs se transforment en un autre élément.

1.2. Isotopes utilisés en hydrologie

Les plus utilisés sont les isotopes constitutifs de la molécule d'eau et des éléments en solution (cf. tableau 1) :

- le deutérium, l'oxygène-18 et le carbone 13 : isotopes stables;
- le tritium et le carbone 14 : isotopes radioactifs.

<u>Eléments</u>	<u>Isotopes</u>	<u>Abondance naturelle moyenne (%)</u>	<u>Propriétés</u>
<u>Hydrogène</u>	^1H	99.985	stable
	^2H	0.015	stable
	$^3\text{H}^*$	10^{-15}	période : 12.26 ans
<u>Oxygène</u>	^{16}O	99.76	stable
	^{17}O	0.04	stable
	^{18}O	0.20	stable
<u>Carbone</u>	^{12}C	98.89	stable
	^{13}C	1.11	stable
	$^{14}\text{C}^*$	10^{-10}	période : 5730 ans

* : isotopes radioactifs.

Tableau 1. Abondance naturelle et propriétés des principaux isotopes utilisés en hydrologie

1.3. Analyses et mesures

Après préparation, les isotopes stables (^{18}O , ^2H , et ^{13}C) sont mesurés à l'aide d'un spectromètre de masse :

- ^{18}O : après équilibration avec l'anhydride carbonique à 25°C pendant 24 heures (méthode décrite par DANSGAARD, 1953; et J.C. FONTES et al., 1965), l'oxygène-18 du CO_2 équilibré est comparé avec un CO_2 étalon;
- le ^2H : il est mesuré sur l'hydrogène issu de la réduction de l'eau;
- le ^{13}C : il est mesuré sur le CO_2 dégagé par une attaque acide sur le sédiment ou le précipité de carbonate.

Les isotopes radioactifs émettent, en se désintégrant, un rayonnement α , ce qui permet leur détection par comptage. Le compteur Geiger mesure l'activité de l'isotope. Pour le ^3H , une activité de 0.118 Bq/l correspond à une unité tritium.

1.4. Résultats

1.4.1. Les isotopes stables

La teneur (δ) d'un échantillon en isotope stable X est exprimée par rapport à un étalon de référence (standard) :

$$\delta_X = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{étalon}}} - 1 \right] \times 1000$$

avec :

R_i : rapport entre le nombre d'atomes de l'isotope rare X et celui de l'isotope banal dans la solution i.

Les étalons utilisés sont :

- *le SMOW (Standard Mean Ocean Water)* pour l'¹⁸O et le ²H de la molécule d'eau. Il est égal à la composition isotopique moyenne de l'eau de mer (H. CRAIG, 1961a);
- *le PDB (Peedee Formation Belemnoid)* pour le ¹³C et l'¹⁸O des carbonates. C'est la composition isotopique de la calcite d'un rostre de *Belemitella americana* de la formation de Pee Dee (Crétacé supérieur) en Caroline du Nord (H. CRAIG, 1957).

Les incertitudes sur les mesures sont de :

- ± 0.2 ‰ pour l'¹⁸O;
- ± 2 ‰ pour le ²H;
- ± 0.005 ‰ pour le ¹³C.

1.4.2. Les isotopes radioactifs

Ils suivent une décroissance exponentielle du type :

$$N_t = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

avec :

- N_t : nombre d'atomes radioactifs au temps t;
- N_0 : nombre d'atomes radioactifs à t = 0;
- λ : constante de désintégration égale à $(\ln 2) / (T_{1/2})$.

Pour le tritium, le résultat est exprimé en unité tritium (1 UT = 1 atome de tritium pour 10¹⁸ atomes d'hydrogène).

1.5. Origines des isotopes et traçage en isotopes

1.5.1. Les isotopes stables

1.5.1.1. Oxygène-18 et deutérium des eaux

Ces isotopes ont une origine naturelle et sont régis par un fractionnement qui se produit lors de l'évaporation et de la condensation.

La phase liquide, restante ou formée, est plus riche en isotopes lourds que la phase vapeur. Cet enrichissement dépend de la température et de la fraction évaporée ou condensée.

Dans les eaux de pluie, on définit ainsi quatre types de traçages liés à la température :

- 1) un traçage en latitude : quand la latitude augmente, la température diminue et le nombre d'isotopes lourds diminue. On a ainsi une relation linéaire et universelle : $\delta^{18}\text{O} = 0.69t - 13.6$ (DANSGAARD, 1964) avec, t : température moyenne annuelle au niveau du sol;
- 2) un traçage en altitude : quand l'altitude augmente, la température diminue. Donc la vapeur d'eau et parallèlement les précipitations s'appauvrissent en isotopes lourds. Par exemple, lorsqu'une masse d'air océanique atteint une barrière montagneuse, elle subit un refroidissement et une condensation, c'est l'effet de continentalité. Au fur et à mesure qu'elle progresse, les précipitations sont de plus en plus pauvres en isotopes lourds;
- 3) un traçage saisonnier : les pluies d'hiver, plus froides, sont moins riches en isotopes lourds que les pluies d'été;
- 4) un traçage paléoclimatique : les périodes plus froides, telles que les glaciations, ont des teneurs en isotopes lourds plus faibles que les périodes interglaciaires.

Le marquage lié à la température s'applique aussi bien à l' ^{18}O qu'au ^2H . CRAIG, en 1961, a montré que les teneurs en ^{18}O et en ^2H sont corrélées de façon linéaire dans les eaux de pluie.

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

Cette équation représente la droite des eaux météoriques à l'échelle mondiale (cf. figure 1). Mais aussi la droite des eaux de surface.

D'autres travaux ont montré que la relation ^{18}O - ^2H est différente dans le cas où les eaux ont subi une évaporation ou un échange géothermique.

D'une façon générale, la relation ^{18}O - ^2H peut donc s'écrire sous la forme :

$$\delta^2\text{H} = p \times \delta^{18}\text{O} + d$$

avec :

- p : pente de la droite, variable suivant l'origine de l'eau :
- $p=8$ pour les eaux météoriques;

- $3 < p < 5$ pour les eaux d'évaporation;
- $p=0$ pour les eaux ayant subi des réactions d'échange;
- d : ordonnée à l'origine, variable suivant l'origine de la vapeur d'eau :
 - $d=10$ pour la vapeur océanique;
 - $d=22$ pour la vapeur méditerranéenne.

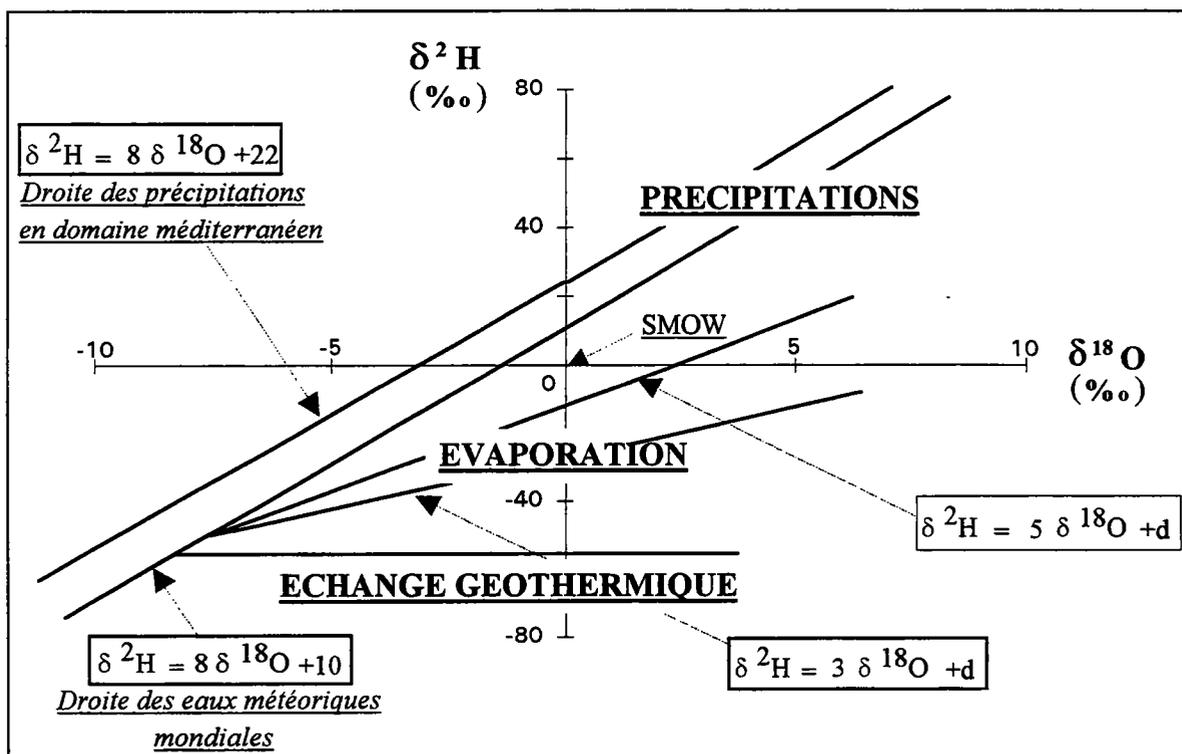


Figure 1. Relations oxygène-18-deutérium dans les eaux naturelles

1.5.1.2. Le carbone 13 des carbonates dissous dans l'eau

Le carbone 13 des carbonates dissous, ou du CITD (Carbone Inorganique Total Dissous), a plusieurs origines :

- biogénique (CO₂ du sol);
- gazeuse (CO₂ atmosphérique);
- minérale (CO₂ des carbonates marins);
- CO₂ profond (CO₂ dû à la décarbonatation ou au dégazage du manteau).

Le CO₂ biogénique provient du CO₂ atmosphérique qui est mis en solution, via le couvert végétal, selon la chaîne des équilibres carboniques (cf. chapitre 4.1).

La teneur isotopique en carbone 13 du CO₂ biogénique dépend du type végétation. En effet, suivant l'espèce et le cycle photosynthétique, les teneurs moyennes en carbone 13 peuvent varier de -31 à -10 ‰ vs PDB (cf. tableau 2). Dans les Pyrénées, le carbone 13 est compris entre -25 et -20 ‰ vs PDB (M. FLEYFEL, 1979).

Les autres réservoirs de carbone ont une teneur en carbone 13 plus élevée. Le CO₂ atmosphérique a une teneur en ¹³C de -6.8 ‰ vs PDB et les carbonates marins ont une concentration en ¹³C de 0 ± 2 ‰ vs PDB.

Deux modèles rendent compte du CITD selon qu'il est "ouvert" ou non sur un réservoir de CO₂ gazeux considéré comme infini et homogène par rapport à la solution.

<u>Cycle photosynthétique</u>	<u>Type de couvert végétal</u>	<u>$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ biogénique}}$ (‰ vs PDB)</u>
CALVIN et BENSON (cycles à trois atomes de carbone, en abréviation : C3)	Espèces sylvestres, le riz, le blé, le seigle, etc...	-31 à -17
HATCH et SLACK (C4)	Maïs, mil, canne à sucre, sorgho; Herbacées.	-19 à -10
C.A.M. (Crassulacean Acid Metabolism) : cycle mixte (C3 + C4)	Plantes crassulentes.	-15 à -12

Tableau 2. Teneur en $\delta^{13}\text{C}$ du CO₂ biogénique suivant le cycle photosynthétique

Si le CITD est "ouvert" sur un réservoir de CO₂, c'est-à-dire si le système comporte trois phases (solide, liquide et gaz), il se produit un échange continu entre le CO₂ gazeux et CITD. La composition isotopique du CITD dépend alors que des proportions respectives du CO_{2aq}, des bicarbonates, des carbonates et du fractionnement isotopique entre le CO₂ gazeux et les formes dissoutes du CITD. Selon FONTES (1976), on a alors :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}} = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2\text{aq}} \cdot (\text{CO}_{2\text{aq}}) + \delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-} \cdot (\text{HCO}_3^-) + \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot (\text{CO}_3^{2-}))}{(\text{CITD})}$$

Les eaux ont, en général, un pH compris entre 7 et 8, ce qui induit une prédominance des bicarbonates. La teneur isotopique en carbone 13 est alors donnée par :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-} = \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ biogénique}} - \varepsilon^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ biogénique}/\text{HCO}_3^-}$$

avec :

$\varepsilon^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ biogénique}/\text{HCO}_3^-}$: facteur d'enrichissement entre le CO₂ biogénique et les bicarbonates.

Si le CITD est "fermé" sur un réservoir de CO₂, c'est-à-dire si le système ne comporte que deux phases (solide et liquide), le bilan chimique de la dissolution de carbonates à l'équilibre chimique exprime que, pour une mole de CO₂ dissous, une mole de carbonate solide passe en solution. On a alors :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2\text{aq}} \cdot (\text{CITD}/2) + \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ roche}} \cdot (\text{CITD}/2))$$

En réalité, la solution n'est pas toujours à l'équilibre et il faut faire la part du CITD liée à la dissolution du CO₂ gazeux et celle liée à la dissolution de la roche. Aux valeurs habituellement observées de pH, on a :

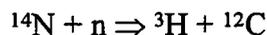
$$\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ biogénique}} / 2) + (\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2 \text{ roche}} / 2)$$

Les teneurs en ^{13}C des bicarbonates permettent donc de savoir si "le système est ouvert ou fermé". De plus, l'évolution spatiale des teneurs rend compte des apports carbonatés.

1.5.2. Le tritium de l'eau

1.5.2.1. Origine

La production naturelle est provoquée par l'interaction des neutrons provenant du rayonnement cosmique sur l'azote atmosphérique :



Le tritium est ensuite oxydé et distribué sur la surface de la terre par le biais des précipitations. Sa teneur dans les précipitations atteint 5 à 10 UT suivant le lieu et la saison.

Dans les années 60, une quantité importante de tritium a été produite et injectée dans l'atmosphère, suite à la multiplication des réacteurs de puissance, aux essais et aux bombes thermonucléaires. La teneur en tritium est passée de quelques UT à plusieurs milliers d'UT. Ce sont ces fortes teneurs qui permettent, aujourd'hui, dans certains cas, de dater les eaux souterraines. Les pollutions industrielles actuelles maintiennent les teneurs entre 10 et 20 UT.

1.5.2.2. Marquage en tritium

La production naturelle du tritium dépend de plusieurs facteurs :

- la latitude : la production est maximale dans les zones polaires (20 UT) et elle est minimale dans la zone équatoriale (5 UT);
- la saison, on a un minimum en hiver et un maximum en été, liés aux mouvements de la tropopause;
- la distance à la mer : les concentrations en tritium sont plus élevées à l'intérieur des terres. Cet effet provient d'une dilution de la vapeur tritiée par la vapeur marine faiblement concentrée;

Aujourd'hui, le tritium d'origine naturelle à une part prépondérante dans les précipitations. Mais, dans les années 50, 60, 70 et 80, la production artificielle de tritium a été telle que le tritium d'origine naturelle n'apparaissait plus dans la distribution. Cette dernière était fonction de :

- l'hémisphère, car les essais thermonucléaires aériens ont été beaucoup plus nombreux et puissants dans l'hémisphère nord;
- la période, car on a eu deux pics en tritium : l'un en 1958 (pic mineur), l'autre en 1963 (pic majeur). En 1963, date du moratoire des essais thermonucléaires, le tritium naturel ne représentait que le millième du tritium artificiel.

Le marquage des eaux souterraines en tritium permet d'identifier des zones d'apports et de connaître les temps de séjour des eaux dans les aquifères. Les flux souterrains sont rarement de type "effet piston", mais plutôt de type dispersif. Il est donc assez difficile de déterminer avec précision les temps de séjour. Mais on peut envisager une classification grossière :

- si les teneurs sont inférieures à 2 UT : le temps de séjour moyen des eaux est long. Les eaux d'infiltration sont antérieures à 1952, date du début des essais;
- si les teneurs sont supérieures à 100 UT (tritium artificiel) : les eaux sont récentes (postérieures à 52). Il est possible de déterminer le temps séjour, si on possède la chronique d'entrée du tritium dans les précipitations;
- si les teneurs sont de l'ordre de 10 à 20 UT : les eaux sont très récentes (le temps de séjour est court), ou les eaux sont moins récentes et ont subi la décroissance radioactive.

**2. MESURE DES DEBITS
JOURNALIERS SUR LES
STATIONS HYDROMETRIQUES
ETUDIEES**

2. Mesure des débits journaliers sur les stations hydrométriques étudiées

Les méthodes de détermination des débits journaliers varient en fonction des gestionnaires. Ces derniers sont au nombre de 5 sur le bassin de la Garonne :

- le Service Hydrologique Centralisateur du bassin de la Garonne (S.H.C.);
- le Service Régional d'Aménagement des Eaux (S.R.A.E.);
- la Compagnie d'Aménagement des Côtes de Gascogne (C.A.C.G.);
- Electricité De France (E.D.F.);
- le Centre National de Recherche Scientifique de Moulis (C.N.R.S.).

Les débits moyens journaliers utilisés dans la thèse résultent de l'analyse d'enregistrements continus des hauteurs d'eau. Les mesures faites directement sur l'échelle, imprécises, n'ont pas été retenues. Les principales données proviennent du S.H.C. et du S.R.A.E. qui sont aujourd'hui regroupés sous la direction de la D.I.R.E.N.

2.1. Le S.R.A.E.

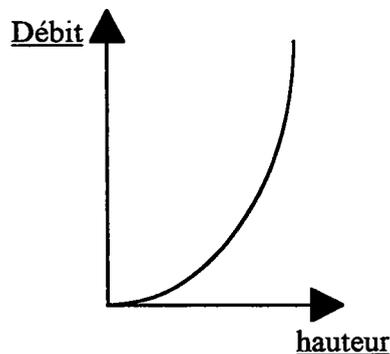
Cet organisme appartenait au ministère de l'Agriculture. Il gère les rivières non domaniales.

2.1.1. L'enregistrement des hauteurs

Il est effectué au moyen d'un limnigraphe analogique à flotteur possédant un enregistrement graphique.

2.1.2. La relation hauteur-débit

Les débits en rivière sont calculés par exploration du champ des vitesses à l'aide d'un moulinet fixé sur un saumon (25, 50, 100 kg suivant les cas). Plusieurs jaugeages sont effectués (15 à 20) pour établir la courbe de tarage :



La courbe $Q=f(h)$ est tracée manuellement et extrapolée pour les faibles et les forts débits. Plusieurs jaugeages de contrôle sont réalisés chaque année, afin de vérifier la stabilité du bief. S'il y a une modification, une autre courbe de tarage est établie.

2.1.3. Calcul des débits moyens journaliers (Q_j)

Il est réalisé à partir du limnigramme qui enregistre les hauteurs d'eau. La méthode employée est la méthode dite des "cerises". Elle consiste à placer des points (cerises) sur les principales variations de l'enregistrement, afin de numériser les valeurs (cf. figure 2).

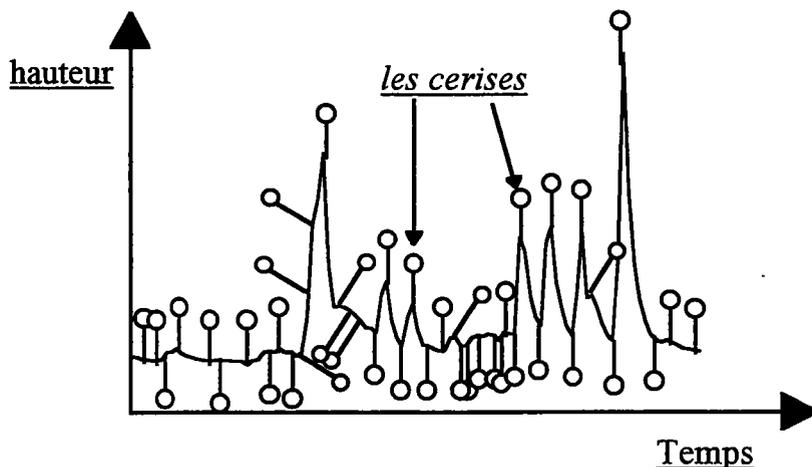


Figure 2. Illustration de la méthode des cerises

La numérisation s'effectue en calant le limnigramme en temps et en hauteur. Les hauteurs numérisées sont transformées en débits par l'intermédiaire de la courbe de tarage. On obtient alors un hydrogramme. Le débit journalier (Q_j) est obtenu en intégrant la courbe entre 0 et 24 heures :

$$Q_j = \frac{V_j}{86400}$$

Avec V_j : volume journalier en m^3 .

2.1.4. Discussion sur la méthode

La méthode des cerises rend compte de toutes les variations de hauteurs, et par conséquent de débits. Elle est parfaitement fiable si le calage est correct. Les erreurs sur les Q_j peuvent provenir de la courbe de tarage et surtout, de son extrapolation pour les faibles débits et les forts débits.

2.2. Le S.H.C.

Cet organisme appartenait au ministère de l'environnement. Il a changé plusieurs fois de dénomination : grande force hydraulique du sud-ouest, 5^{ème} circonscription électrique (C.E.S.O.), service hydrologique centralisateur, et aujourd'hui D.I.R.E.N. Il gère des stations hydrométriques, ayant pratiquement un siècle d'existence, comme celles de Valentine, Portet/Garonne et Roquefort/Garonne sur le Salat.

2.2.1. L'enregistrement des hauteurs

Les premières stations implantées sur le bassin avaient pour vocation l'annonce des crues. Les mesures s'effectuaient à l'échelle, à des heures plus ou moins fixes. A partir de 1910, les stations ont été équipées d'un limnigramme à flotteur de type "Richard" sans retournement.

De nos jours, les stations sont équipées d'un limnigramme à flotteur de type OTT à possibilité de retournement. Les enregistrements sont relevés en moyenne tous les 15 jours.

2.2.2. Obtention des débits instantanés en rivière

Depuis 1988, le SHC utilise une perche intégratrice pour les hauteurs supérieures à 20 cm. Auparavant, les jaugeages étaient effectués grâce à un treuil (ou une perche) auquel était suspendu un saumon muni d'une hélice. Le calcul des vitesses se faisait point par point.

Trois à quatre jaugeages annuels sont réalisés en moyenne pour chaque station.

2.2.3. Calcul des débits moyens journaliers (Qi)

Il se fait par l'intermédiaire d'une hauteur moyenne journalière reportée sur la courbe de tarage. Depuis 1988, la méthode "des cerises" est aussi utilisée.

2.2.4. Discussion sur la méthode

Le calcul à partir d'une hauteur moyenne n'est pas très bon, car la relation hauteur-débit n'est pas linéaire mais exponentielle. Une imprécision sur la hauteur moyenne apporte une incertitude notable. Les résultats diffèrent de 3 à 6 % par rapport à ceux obtenus par la méthode des "cerises".

2.3. Le C.N.R.S.

2.3.1. L'enregistrement des hauteurs

Les stations sont équipées d'un enregistreur de type OTT 16. Le bief est choisi pour avoir une station stable et sensible.

2.3.2. La relation hauteur-débit

Les jaugeages se font au moulinet hydrométrique par intégration. Celui-ci est remonté à vitesse constante sur les verticales étudiées. L'erreur relative sur les mesures est d'environ 1 %.

La courbe de tarage possède des imprécisions, liées à la lecture de l'échelle, de 5 à 10 % pour les débits faibles et de 2 % pour les débits moyens.

2.3.3. Calcul des débits moyens journaliers (Q_j)

Le limnigramme est dépouillé grâce à une réglette graduée par rapport à la courbe de tarage. Elle indique, pour une hauteur donnée, le débit correspondant. Lorsque les variations de hauteurs sont faibles, 5 valeurs de débits sont prises, et la moyenne détermine le débit moyen journalier. En période de crue, une valeur est prise toutes les deux heures. Le débit moyen est donc alors établi à partir de 13 points.

2.3.4. Discussion sur la méthode

Les jaugeages et la courbe de tarage sont déterminés avec précision. Le procédé de calcul du débit moyen journalier est rigoureux, car ce dernier n'est pas déterminé à partir de 2 valeurs de débits ou avec une hauteur moyenne, mais à partir d'un nombre de valeurs dépendant des conditions hydrologiques.

**3. MESURES PHYSICO-
CHIMIQUES ET METHODES
D'ANALYSES DES ELEMENTS**

3. Mesures physico-chimiques et méthodes d'analyses des éléments

3.1. Mesures physico-chimiques

Les mesures de température, de pH et de conductivité sont toutes effectuées sur le terrain (cf. tableau 3). En laboratoire, le pH est de nouveau mesuré lors de l'analyse des bicarbonates (dosage acidimétrique).

Les valeurs du pH mesuré en laboratoire sont généralement différentes de celles mesurées sur le terrain. Ceci est due :

- à l'instrumentation : les pH mètres utilisés ne sont pas identiques ,
- à l'évolution chimique de la solution : les échantillons tendent à perdre une partie de leur CO₂; donc leur pH et leur dpH croient (effet de température et de l'agitation).

<u>Mesures physico-chimiques</u>	<u>Lieu de mesure</u>	<u>Appareil utilisé</u>
<i>La Température</i>	terrain	pH mètre Quick 93 314 avec sonde, Bioblock Scientific
<i>le pH</i>	terrain et laboratoire	pH mètre Quick 93 314, Bioblock Scientific; pH mètre numérique portatif type P 500, Tacussel électronique
<i>La Conductivité</i>	terrain	Hanna instruments, HI 8733

Tableau 3. Mesures physico-chimiques

3.2. Méthodes d'analyses des éléments

3.2.1. Les bicarbonates : dosage acidimétrique à pH = 4.45

Les teneurs en bicarbonates proviennent du TAC (Titre Alcalimétrique Complet). Ce dernier représente la concentration en bicarbonates et carbonates. Comme le pH des eaux étudiées est compris entre 6.5 et 8.0, les bicarbonates sont très largement prédominants dans la solution.

Le TAC est mesuré par dosage acidimétrique qui consiste à neutraliser les bicarbonates par l'acide chlorhydrique 0.02 N jusqu'à pH = 4.45. Le volume d'acide donne la teneur du TAC en degrés Français.

Pour obtenir la concentration en bicarbonates en mg/l, on utilise la relation suivante :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{mg/l}} = [\text{TAC}]_{\text{deg F}} \times (12.2)$$

3.2.2. Le calcium : différence entre le TH (dosage complexométrique) et le magnésium (Spectrométrie d'absorption atomique)

La concentration du calcium en mg/l est donnée par :

$$[\text{Ca}]_{\text{mg/l}} = \left(\frac{[\text{TH}]_{\text{deg F}}}{5} - \frac{[\text{Mg}]_{\text{mg/l}}}{12.156} \right) \times 20.04$$

avec :

- le TH ou dureté totale, obtenu par addition d'un agent complexant le calcium et le magnésium. Le volume ainsi ajouté, correspondant à la complexation des cations, Ca et Mg (un indicateur coloré, le noir ériochrome, permet de déterminer la fin de la complexation), donne la valeur du TH en degrés Français.

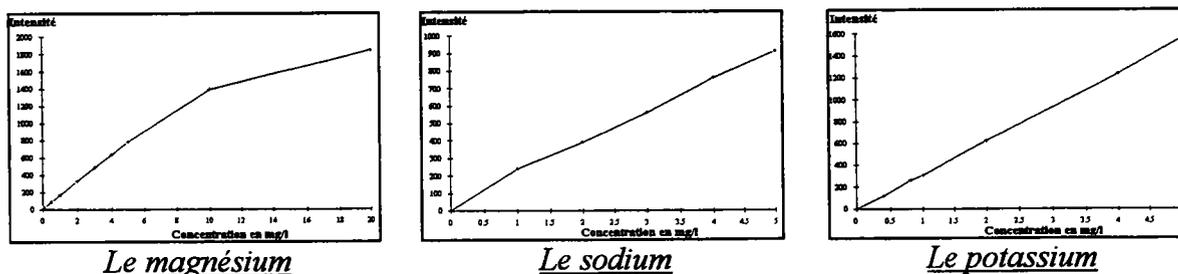
L'agent complexant est l'EDTA ou acide EthylèneDiamineTétrAcétique;

- la concentration du magnésium, obtenue en absorption atomique (cf. paragraphe suivant).

3.2.3. Le magnésium, le sodium, le potassium : spectrométrie d'absorption atomique

Ces éléments sont analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique. La solution contenant l'élément est injectée dans une flamme air-acétylène. Chaque élément excité thermiquement absorbe les émissions de longueurs d'onde caractéristiques, proportionnellement à l'abondance de l'ion.

Une gamme d'étalons, de l'élément à analyser, est préparée, afin d'évaluer les concentrations des solutions (cf. graphique 1). On utilise un tampon spectral pour améliorer les résultats: le chlorure de lanthane.

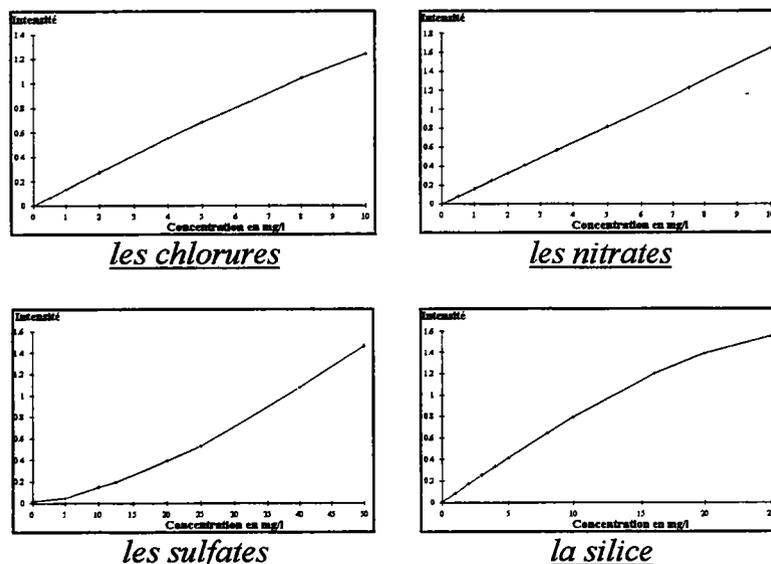


Graphique 1. Exemples de courbes d'étalonnages utilisées pour le magnésium, le sodium et le potassium (campagne de chimie sur le bassin de la Garonne durant le cycle 1993)

3.2.4. Les chlorures, les nitrates, les sulfates, la silice : colorimétrie

Le dosage des éléments est effectué avec un colorimètre. Ce dernier permet de mesurer l'intensité d'absorption de la lumière d'une solution contenant l'élément à analyser, sous forme d'un complexe coloré. L'intensité d'absorption est proportionnelle à la concentration de l'élément.

De la même façon que l'absorption atomique, une gamme d'étalons est préparée pour connaître la concentration de l'élément dans les solutions (cf. graphique 2).



Graphique 2. Exemples de courbes d'étalonnages utilisées pour les chlorures, les nitrates, les sulfates et la silice (campagne de chimie sur le bassin de la Garonne durant le cycle 1993)

Les méthodes utilisées sont les suivantes :

- les chlorures : le thiocyanate mercurique permet de complexer les ions chlorures et de libérer des ions thiocyanates. Et, en présence d'ions ferriques et en milieu acide, les ions thiocyanates donnent un complexe coloré en rouge.

L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en chlorures dans la solution.

Les réactifs utilisés sont : le thiocyanate mercurique en solution saturée dans l'éthanol, l'alun ferrique et l'acide nitrique.

- les nitrates : la présence de nitrates est mise en évidence par le salicylate de sodium qui donne un précipité jaune : le para-nitro-salicylate de sodium.

- les sulfates : on utilise le chlorure de baryum en milieu acidifié. Ce dernier permet d'obtenir un précipité insoluble que l'on maintient à l'état dispersé et en suspension par un réactif de dispersion. L'intensité du trouble est ensuite mesurée.

- *la silice* : elle est mise en évidence, en pH acide, grâce au molybdate d'ammonium. La réaction produit de l'acide molybdosilicique de couleur plus ou moins jaune suivant la teneur en silice dans l'échantillon.

3.2.5. Tableau récapitulatif

(cf. tableau 4)

<u>Eléments</u>	<u>Méthodes d'analyse</u>	<u>Erreurs</u>
HCO ₃ ⁻	<u>Dosage acidimétrique</u> à pH = 4.45	± 0.6 %
Ca ²⁺	Obtenu par différence entre le TH : dureté totale (<u>dosage complexométrique</u>) et le magnésium (<u>Spectrométrie d'absorption atomique</u>)	± 1 %
Mg ²⁺	<u>Colorimétrie d'absorption atomique</u>	± 2 à 5 %
Na ⁺	<u>Colorimétrie d'absorption atomique</u>	± 2 à 5 %
K ⁺	<u>Colorimétrie d'absorption atomique</u>	± 2 à 5 %
Cl ⁻	<u>Colorimétrie</u> , dosage par le thiocyanate mercurique	± 2 à 5 %
NO ₃ ⁻	<u>Colorimétrie</u> , méthode au salicylate de sodium	± 2 %
SO ₄ ²⁻	<u>Colorimétrie</u> , méthode néphélométrique (précipitation du sulfate de baryum)	± 5 %
SiO ₂	<u>Colorimétrie</u> , méthode au molybdate d'ammonium	± 3 à 5 %

Tableau 4. Récapitulatif des méthodes d'analyses et erreurs sur les mesures

**4. L'ANALYSE DES
CHRONIQUES : LES
ANALYSES CORRELATOIRES
ET SPECTRALES**

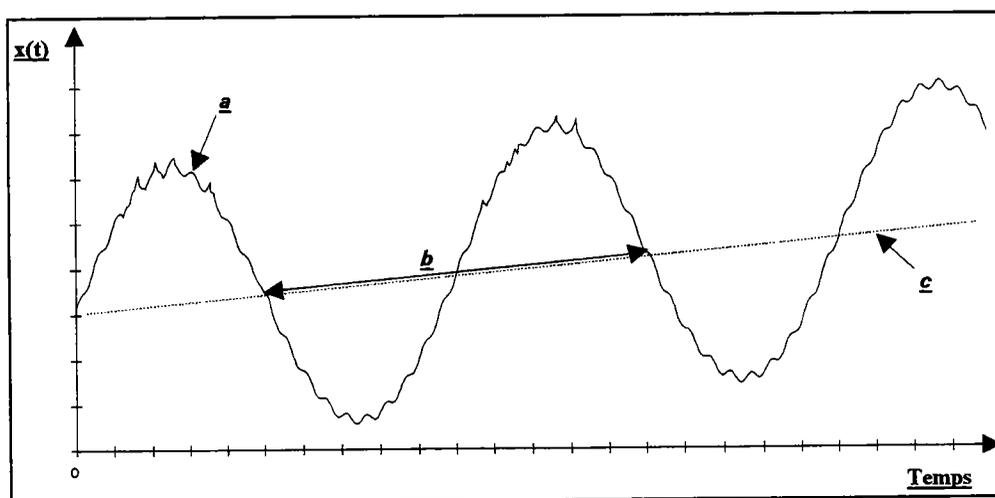
4. L'analyse des chroniques : les analyses corrélatoires et spectrales

4.1. Introduction

L'analyse corrélatoire et spectrale est une méthode descriptive de séries chronologiques. Elle permet de caractériser, de décomposer et de "radiographier" la chronique étudiée.

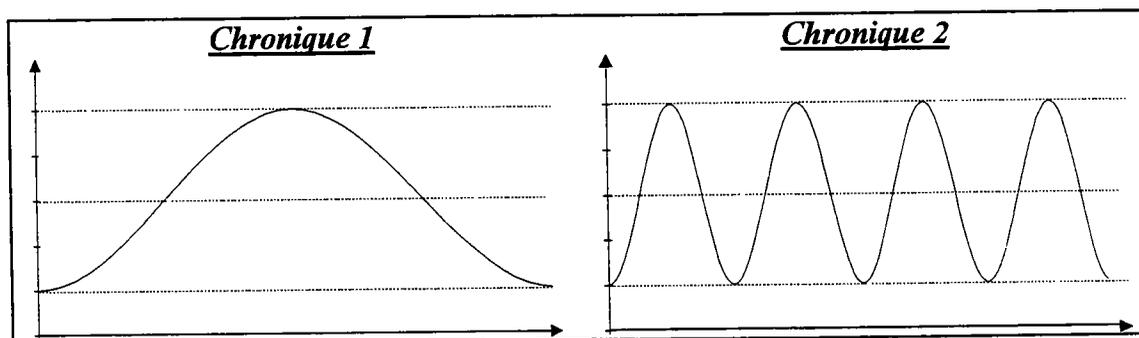
Si on prend, par exemple, la chronique suivante (cf. graphique 3), elle comporte :

- une partie aléatoire (a),
- une partie structurée qui peut-être périodique (b) et ou tendancielle (c).



Graphique 3. Exemple de chronique comportant une partie aléatoire et une partie structurée

La différenciation des composantes de la chronique (composante aléatoire, composante périodique et composante tendancielle) ne peut pas s'effectuer en utilisant les outils classiques de la statistique. En effet, deux chroniques ayant même moyenne et même variance peuvent être différentes (cf. graphique 4).



Graphique 4. Chroniques possédant même moyenne et même variance

C'est pour cela, qu'on emploie d'autres outils : le corrélogramme, le variogramme et le spectre de densité de variance.

4.2. Les outils

Pour décrire une chronique, on peut travailler dans un espace physique (corrélogramme) ou dans un espace fréquentiel (le spectre de densité de variance). Ce dernier est peut-être un peu plus abstrait dans notre esprit, mais il met en évidence, de façon plus claire, les composantes de la chronique (composantes périodiques notamment).

Dans l'espace physique, l'outil utilisé est donc le corrélogramme. Dans l'espace fréquentiel, on utilise simplement la variance, et l'outil est le spectre de densité de variance. D'où le terme générique d'Analyse Corrélatoire et Spectrale (ACS) pour l'étude des chroniques.

Lorsque l'on veut étudier une chronique, on a recours au corrélogramme et au spectre simple : c'est *l'analyse simple*. Par contre, pour définir une relation entre deux chroniques, on utilise le corrélogramme et le spectre croisé : c'est *l'analyse croisée*.

Enfin, il faut signaler que l'utilisation des ACS nécessite une chronique possédant des valeurs continues et régulièrement espacées.

4.2.1. L'analyse simple

4.2.1.1. Le corrélogramme

Le corrélogramme permet de regarder comment les valeurs de la chronique sont liées, pour des pas de plus en plus grands. Cette relation s'exprime par le biais du coefficient d'autocorrélation (r_k).

Après de nombreux essais, et en raison de propriétés mathématiques, on est amené à utiliser la formule proposée par JENKINS et WATTS pour calculer ce coefficient. Cette formule revient à introduire un filtre linéaire qui permet de ne pas donner la même importance aux données proches et aux données lointaines.

$$r_k = \frac{C_k}{C_0}$$

avec :

$$C_k = n^{-1} \cdot \sum_1^{n-k} [(X_t - \bar{X}) \cdot (X_{t+k} - \bar{X})]$$

et :

- n : nombre de données;
- X_t : valeurs de la série;
- \bar{X} : moyenne de la série;
- k = 0, 1, 2, ..., m.

Pour $k = 1$, on compare X_0 à X_1 , X_1 à X_2 , X_2 à X_3 ...etc.

Le choix du pas (k), de la troncature (m) et de la fenêtre d'observation (de k à m) est primordial pour la description du système étudié :

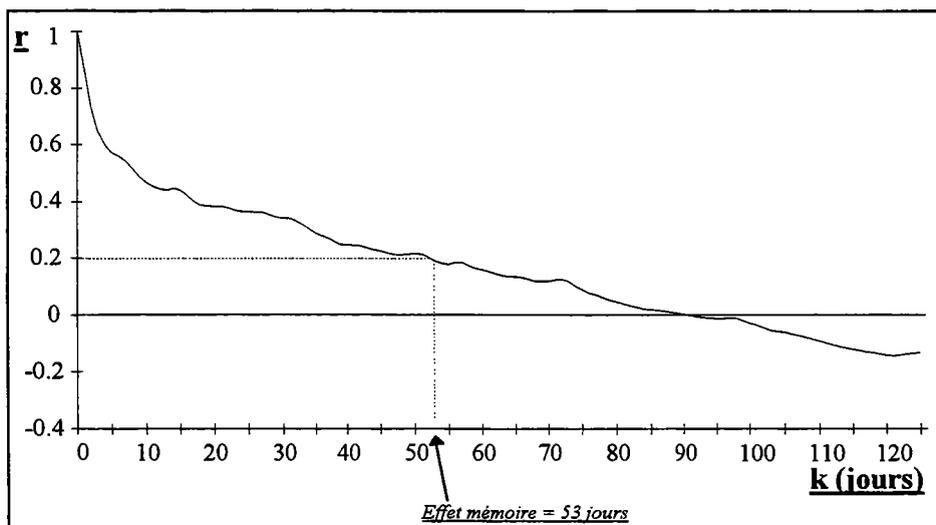
- m : des travaux empiriques ont montré des résultats satisfaisants pour $m < n/3$ (n étant le nombre de données);
- k : son choix dépend du phénomène à caractériser. Par exemple, pour mettre en évidence un phénomène journalier, il faudra, au moins, deux valeurs journalières. Cette condition provient du théorème de SHANNON qui énonce le principe suivant : "il faut au moins deux observations dans un intervalle de temps défini pour caractériser un phénomène dans cet intervalle";
- la fenêtre d'observation : elle est prise en fonction du phénomène à mettre en évidence. Par exemple, si on possède une longue chronique de débits journaliers sur une rivière, on prendra pour caractériser les phénomènes :
 - à court terme, $k = 1$ à 125;
 - à long terme, $k = 10$ à 1250.

En général, on ne calcule pas le corrélogramme pour des pas négatifs, car il est identique à celui pour des pas positifs (on a une symétrie par rapport à l'axe des ordonnées).

Applications en hydrologie :

Le corrélogramme caractérise la mémoire, pour des pas de plus en plus grands, du système étudié (aquifère karstique, nappe libre ou bassin hydrographique). L'importance des réserves peut être estimée à partir de l'effet mémoire qui s'exprime en jours. Ce dernier correspond à une autocorrélation égale à 0.2 (cf. A MANGIN, 1981).

Pour illustrer ces propos, nous avons pris le corrélogramme de la chronique des débits de la Garonne à la station de Portet (période 1973 à 1987) (cf. graphique 5). Celui-ci décroît progressivement et montre un effet mémoire d'environ 53 jours, ce qui dénote l'existence d'importantes réserves d'eau en amont de la station de Portet.



Graphique 5. Corrélogramme simple des débits moyens journaliers à Portet, $k = 1$ à 125, période 1973 à 1987

4.2.1.2. Le spectre de densité de variance

Il est obtenu en utilisant la transformée de FOURIER de la fonction d'autocorrélation. Il exprime, simplement, la décomposition de la variance totale dans le domaine fréquentiel. Ce changement permet de mettre plus facilement en évidence les phénomènes périodiques. Le spectre de densité de variance est exprimé par :

$$S_f = 2 \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_1^n (D_k + r_k \cdot \cos(2\pi f k)) \right]$$

avec :

- r_k : coefficient de corrélation;
- D_k : un filtre;
- et, $f = j/2m$: la fréquence considérée.

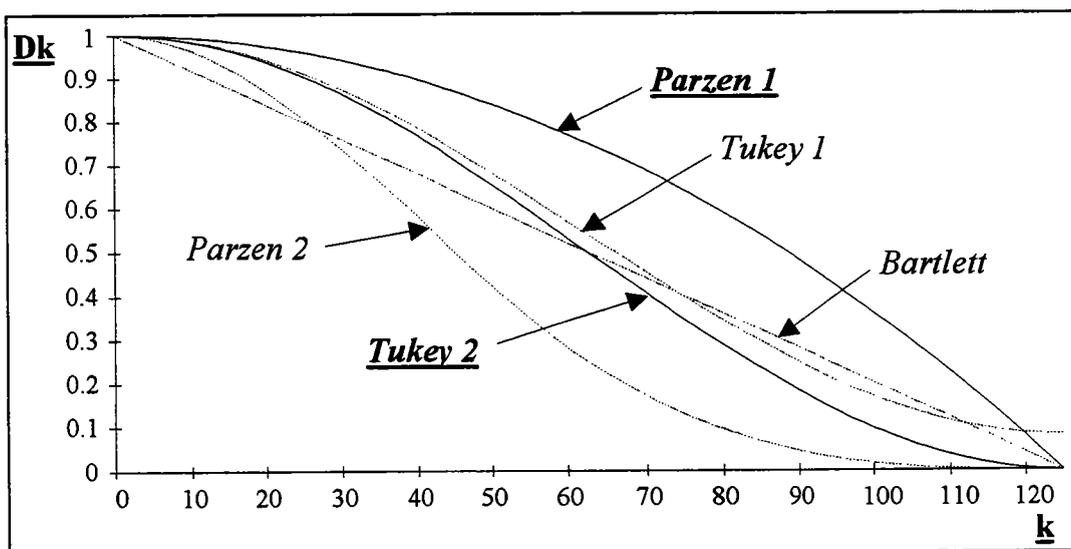
L'emploi d'un filtre est imputable à la transformée de FOURIER. Après plusieurs recherches, le filtre rectangulaire et le filtre BARTLETT, ou filtre triangulaire, ont été éliminés, car ils atténuent fortement le spectre. On a été retenu le filtre de TUKEY 2 et le filtre de PARZEN 1, car ils privilégient les événements proches, aux dépens des événements lointains. De plus, ces filtres offrent un bon lissage du spectre (cf. graphique 6). Tous deux possèdent des avantages et des inconvénients :

- TUKEY 2 : il garde beaucoup d'informations, mais il n'est pas très propre;
- PARZEN 1 : il filtre d'avantage, mais il a une largeur de bande étroite.

En pratique, on utilise TUKEY, puis PARZEN si nécessaire.

La formule du filtre de TUKEY est donnée par :

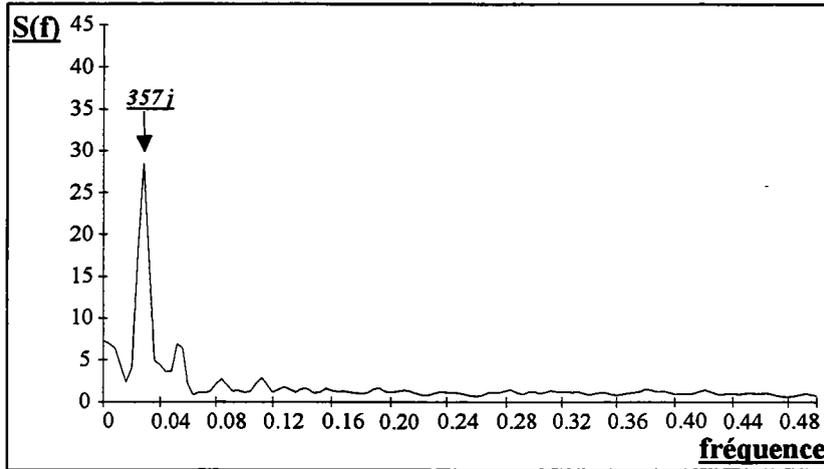
$$D_k = \frac{(1 + \cos(\pi k / m))}{2}$$



Graphique 6. Exemples de filtres

Applications en hydrologie :

Nous garderons l'exemple des débits de la Garonne à Portet (période 1973 à 1987). Le spectre, avec une fenêtre allant de $k = 1$ à 125 , montre une tendance à long terme. C'est pourquoi nous avons réalisé une analyse avec une fenêtre plus forte ($k =$ de 10 à 1250) (cf. graphique 7). Ce nouveau spectre présente un pic à 357 jours qui correspond à un cycle saisonnier. Ce dernier est induit par le système et se rencontre dans la plupart des systèmes hydrologiques.



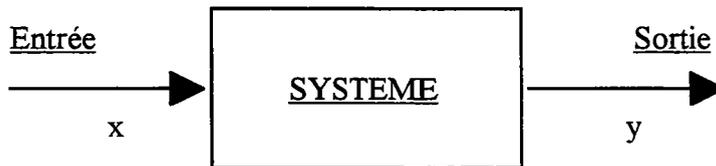
Graphique 7. Spectre simple sur les débits moyens journaliers à Portet, période 1973 à 1987, fenêtre = 10 à 1250

4.2.2. L'analyse croisée

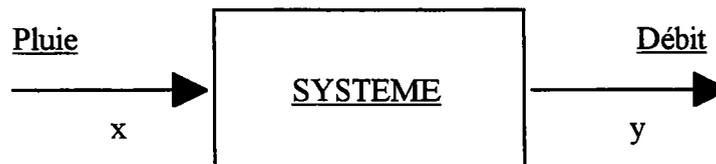
Elle permet d'étudier la relation entre deux chroniques : l'une est considérée comme l'entrée du système étudiée, l'autre comme la sortie.

4.2.2.1. Notion d'analyse systémique

Le système est considéré comme une boîte noire dans laquelle un opérateur transforme la fonction d'entrée en une autre fonction dite de sortie :



Pour un système hydrologique, on a :



Dans le cas d'une relation pluie-débit, l'analyse croisée fournit la réponse impulsionnelle du système qui n'est autre que l'hydrogramme unitaire, car la pluie est considérée comme quasi-aléatoire. Si le système est linéaire et invariant, on obtiendra toujours la même réponse impulsionnelle.

Mais dans d'autres cas, l'entrée n'est pas aléatoire et la sortie n'est plus la réponse impulsionnelle. Le jeu consiste alors à rechercher l'opérateur de transfert (z) qui a donné cette sortie, ce qui n'est pas évident.

L'opérateur (z) fait partie d'un produit de convolution. Si l'entrée est x et la sortie y, on a alors :

$$y = x * z$$

La détermination de z, par la déconvolution $z = y * x^{-1}$, n'a pas une solution unique. Elle n'est possible que par des méthodes indirectes comme l'analyse croisée.

4.2.2.2. Le corrélogramme croisé

Il permet de voir si l'entrée influence la sortie et, dans l'affirmative, de quelle manière. A la différence du corrélogramme simple, on ne calcule pas un coefficient d'autocorrélation, mais un coefficient d'intercorrélations pour les k positifs et les k négatifs. En effet, le corrélogramme croisé n'est pas symétrique. Le coefficient d'intercorrélations est donné par :

$$r_{+k} = r_{xy(k)} = \frac{C_{xy(k)}}{S_x \cdot S_y} \quad \text{et} \quad r_{-k} = r_{yx(k)} = \frac{C_{yx(k)}}{S_x \cdot S_y}$$

(pour la partie à droite
de l'axe des ordonnées)

(pour la partie à gauche
de l'axe des ordonnées)

avec :

$$C_{xy(k)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^{n-k} (x_t - \bar{x}) \cdot (y_{t+k} - \bar{y}) \quad \text{et} \quad C_{yx(k)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^{n-k} (y_t - \bar{y}) \cdot (x_{t+k} - \bar{x})$$

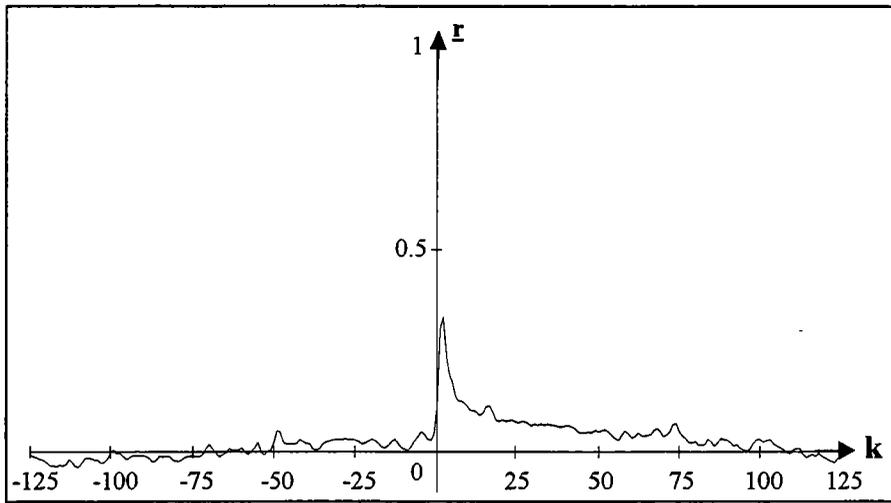
$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (x_t - \bar{x})^2} \quad \text{et} \quad S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (y_t - \bar{y})^2}$$

Si la fonction d'entrée d'un système est aléatoire, le corrélogramme croisé fournit la réponse impulsionnelle ($r_{-k} = 0$). Par contre, si r_{-k} est différent de 0, l'entrée est dite "non-causale".

Applications en hydrologie :

La relation entre les pluies à Blagnac et les débits à Portet donne une idée de l'hydrogramme unitaire du bassin de la Garonne (cf. graphique 8).

Cet hydrogramme unitaire présente une réponse rapide (pic prononcé pour le court terme) et une réponse tardive, indiquant la présence de réserves sur le bassin.



Graphique 8. Corrélogramme croisé entre les pluies à Blagnac et les débits moyens journaliers à Portet, période 1973 à 1987, k = 1 à 125

4.2.2.3. Le spectre croisé

C'est la transformée de FOURIER du corrélogramme croisé. Le spectre croisé établit dans le domaine fréquentiel les relations de type entrée-sortie. Il est défini par deux fonctions : la fonction d'amplitude et la fonction de phase.

$$\text{Spectre croisé} = |S_{xy(f)}| \cdot e^{(-i\theta_{xy(f)})}$$

avec :

- $S_{xy(f)}$: fonction d'amplitude;
- $\theta_{xy(f)}$: fonction de phase.

$$|S_{xy(f)}| = \sqrt{K_{xy(f)}^2 + q_{xy(f)}^2} \quad \text{avec} \quad K_{xy(f)} = 2 \cdot \left\{ r_{xy(0)} + \sum_1^m (r_{xy(k)} + r_{yx(k)}) \cdot D_k \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot k) \right\}$$

$$\text{et} \quad q_{xy(f)} = 2 \cdot \sum_1^m (r_{xy(k)} - r_{yx(k)}) \cdot D_k \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot k)$$

$$\text{et} \quad \theta_{xy(f)} = \arctang\left(\frac{q_{xy(f)}}{K_{xy(f)}}\right)$$

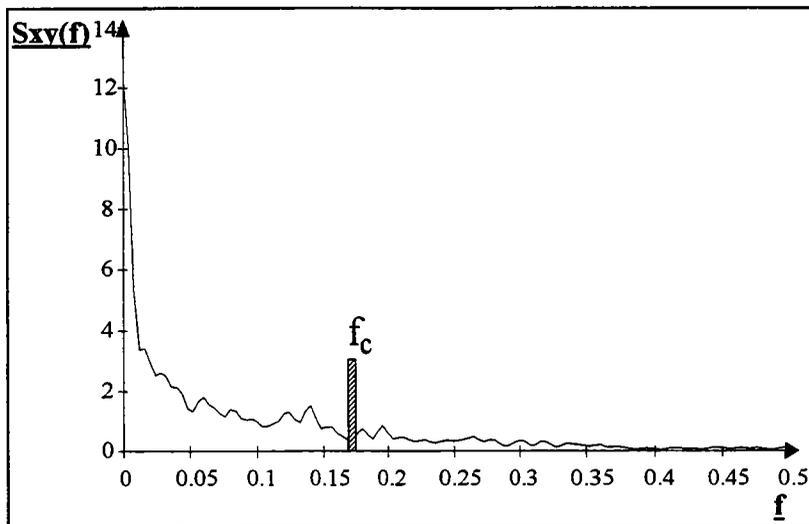
• **La fonction d'amplitude :**

Pour la relation entrée-sortie, elle exprime le domaine fréquentiel qui peut être interprété dans l'analyse (court terme, long terme ou périodicités). Ce domaine correspond, en général, à la première partie de la fonction d'amplitude.

La fonction d'amplitude permet, en plus, de connaître f_c (fréquence de coupure) à partir de laquelle on accède au déphasage moyen, entre l'entrée et la sortie, à l'aide de la fonction de phase.

Application en hydrologie :

La fréquence de coupure dans le cas de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet) est égal à 0.172 (cf. graphique 9).



Graphique 9. Fonction d'amplitude de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987.

• **La fonction de phase :**

Elle détermine le déphasage entrée-sortie (Γ) qui est donné par la relation suivante :

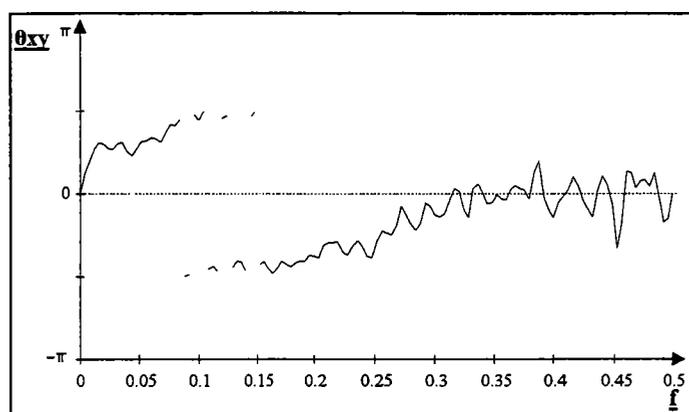
$$\Gamma = \frac{\theta_{xy}}{2\pi f}$$

avec :

- θ_{xy} : fonction de phase;
- f : fréquence considérée (fréquence de coupure).

Application en hydrologie :

Le déphasage entre la pluie et les débits de la Garonne à Portet est de 1.7 jours (cf. graphique 10).



Graphique 10. Fonction de phase de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987

4.2.2.4. La fonction de cohérence (C_{xy}) et la fonction de gain (G_{xy})

• La fonction de cohérence :

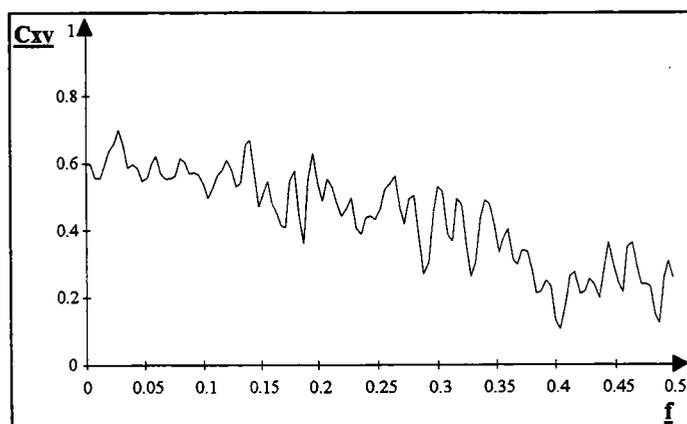
Elle est utilisée pour voir comment le système réagit au signal d'entrée. Si C_{xy} tend vers 1, le système peut être considéré comme linéaire. C'est-à-dire qu'il réagit toujours de la même façon.

L'expression de la fonction de cohérence est la suivante :

$$C_{xy(f)} = \frac{S_{xy(f)}}{\sqrt{S_{x(f)} \cdot S_{y(f)}}}$$

Application en hydrologie :

La fonction de cohérence de la relation pluie-débits à Portet est assez moyenne : elle tourne autour de 0.55 (cf. graphique 11). Le système étudié (le bassin hydrologique) ne possède pas un comportement tout à fait linéaire.



Graphique 11. Fonction de cohérence de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987

• **La fonction de Gain :**

Elle montre de quelle façon le signal est modifié par le système :

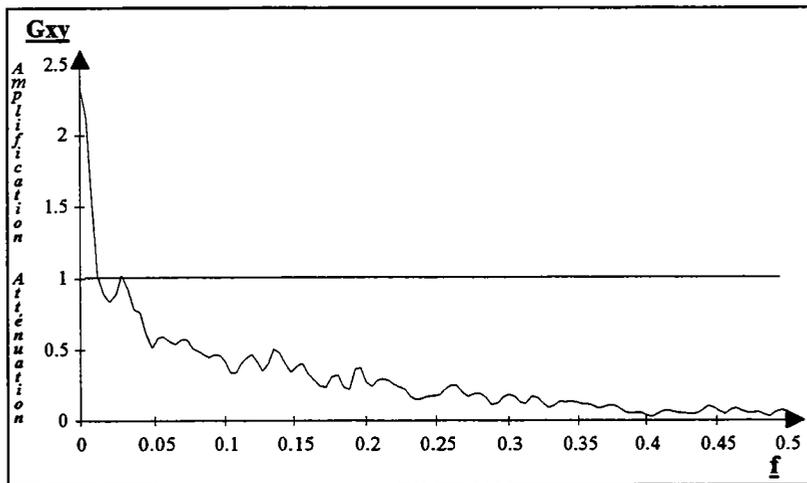
- si elle est supérieure à 1, le signal de sortie est amplifié par rapport au signal d'entrée;
- si elle est inférieure à 1, le signal de sortie est atténué par rapport au signal d'entrée.

L'expression de la fonction de gain est la suivante :

$$G_{xy(f)} = \frac{S_{xy(f)}}{S_{x(f)}}$$

Application en hydrologie :

La relation pluie-débits à Portet est toujours atténuée sauf pour le long terme (cf. graphique 12).



Graphique 12. Fonction de gain de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987

**5. LES ANALYSES
MULTIDIMENSIONNELLES :
L'ACP (ANALYSE EN
COMPOSANTES
PRINCIPALES) ET L'AFD
(ANALYSE FACTORIELLE
DISCRIMINANTE)**

5. Les analyses multidimensionnelles : l'ACP (Analyse en Composantes Principales) et l'AFD (Analyse Factorielle Discriminante)

5.1. Présentation

Dès que l'on possède de nombreuses données, leur traitement devient très vite un travail fastidieux. De plus, avec les méthodes classiques de description, il est difficile de prendre en compte, simultanément, la totalité des paramètres d'un tableau de données (ou matrice des données).

Ce dernier (cf. figure 3) contient, en général, p variables (caractères), et n échantillons (individus ou encore unités statistiques) :

p variables

X(1,1)	X(1,2)	X(1,3)	...		X(1,p)
X(2,1)	X(2,2)	X(2,3)			
X(3,1)	X(3,2)	X(3,3)			
...					
X(n,1)					X(n,p)

= MATRICE (X)

n individus

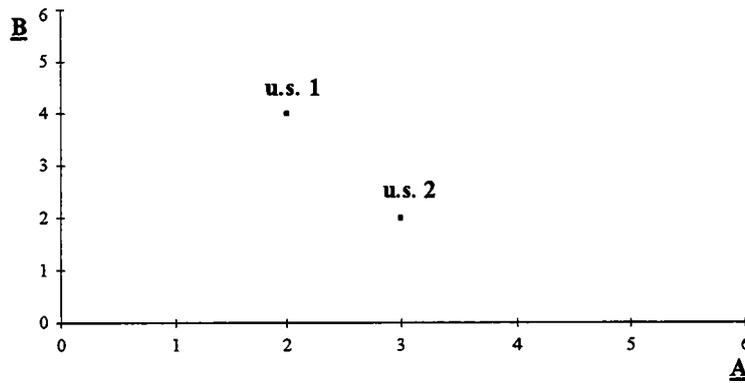
Figure 3. Matrice des données

Les données de ce tableau peuvent être représentées, sous forme graphique, à l'aide des méthodes classiques de description.

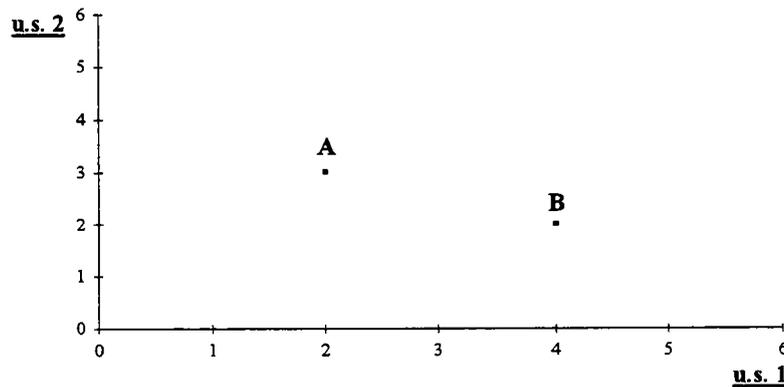
Prenons l'exemple simple d'un tableau contenant deux caractères et deux échantillons (cf. tableau ci dessous). La représentation graphique peut s'effectuer sur un graphique possédant deux axes, en considérant que chaque variable ou chaque unité statistique représente un vecteur.

	Variable A	Variable B
u.s. 1	2	4
u.s. 2	3	2

Dans l'espace des variables on a alors :



et dans l'espace des u.s. on a :



Si le tableau possède 3 variables ou 3 u.s., la représentation en 3D est encore possible. Mais, à partir de 4 variables, ou 4 u.s., la représentation devient impossible.

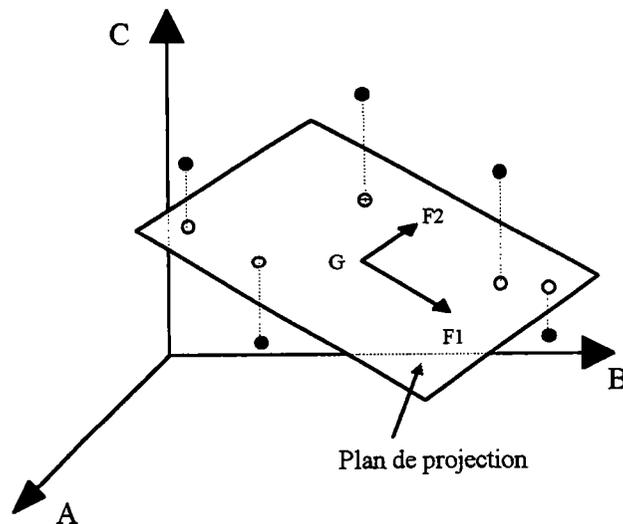
C'est pour cela qu'on a souvent recours aux analyses multidimensionnelles, car elles intègrent, et permettent de décrire, l'ensemble des données d'un tableau. Cette description s'effectue dans un espace à 2 dimensions où les axes (facteurs) sont représentés par une ou plusieurs variables.

Les analyses les plus utilisées sont : l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse factorielle discriminante (AFD).

5.2. L'ACP

5.2.1. Principe de la méthode

Afin de représenter les données dans un espace à 2D, on projette les échantillons sur un plan. Mais, ces projections raccourcissent les véritables distances entre les échantillons, ce qui provoque des distorsions. C'est pour cette raison qu'on essaie de respecter le mieux possible la forme du nuage composé des échantillons (point de vue de PEARSON et d'HOTELLING). Du fait de ces choix, le plan de projection (plan principal ou hyperplan) passe par le centre de gravité (G) du nuage (cf. figure 4).



- A, B, C : variables
- G : centre de gravité
- : unités statistiques
- : unités statistiques projetées
- F1, F2 : facteurs

Figure 4. Illustration du plan de projection

Pour déterminer le plan principal, on projette le nuage sur un axe décrivant le maximum de variance. Puis, on cherche l'axe perpendiculaire au premier qui décrira, aussi, le maximum de variance, et, ainsi de suite. Les axes ainsi déterminés sont appelés facteurs principaux ou axes principaux. L'ACP est donc une méthode factorielle, dans le sens où elle est une recherche de facteurs. Les derniers d'entre eux sont des combinaisons linéaires des premiers, c'est pourquoi on utilise le calcul matriciel.

5.2.2. Le calcul

La matrice des données est transformée en une matrice des variances-covariances (cf. figure 5). Ce calcul s'effectue sur les variables.

	<i>p variables</i>					
	X(1,1)	X(1,2)	X(1,3)	...		X(1,p)
	X(2,1)	X(2,2)	X(2,3)			
	X(3,1)	X(3,2)	X(3,3)			
	...					
	X(n,1)					X(n,p)
<i>n individus</i>						

= MATRICE (X)



Var (X1)	Cov (X1,X2)	...		
Cov (X2,X1)	Var (X2)			
...				
				Cov (X _j ,X _i)
				Var (X _p)

= MATRICE (V)

Figure 5. Transformation de la matrice des données en une matrice des variances et covariances

On a :

$$\text{Var (X1)} = \sum_n^1 (X1(j) - X1(m)) \cdot P1(j)$$

avec :

- X1 : première variable;
- X1(m) : moyenne de X1;
- P1(j) : Poids donné pour chaque valeur de X(1).

et :

$$\text{Cov (X1,X2)} = \sum_n^1 [(X1(j) - X1(m)) \cdot (X2(j) - X2(m)) \cdot P1(j) \cdot P2(j)]$$

La détermination de la matrice des variances-covariances (V) peut s'effectuer par une autre méthode. Cette dernière consiste à multiplier la matrice des variables par : sa transposée (^t(X)), la matrice des poids (θ) et la matrice unité (M).

$$(V) = (X) \cdot {}^t(X) \cdot \theta \cdot M$$

La matrice θ est importante, car il n'est pas donné le même poids à chaque valeur et à chaque variable (c'est le cas des analyses chimiques).

M est une métrique euclidienne qui suppose que la distance entre les variables ait un sens.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Les axes ou facteurs principaux exprimant le maximum de variance sont les vecteurs propres de la matrice des variances-covariances. La diagonalisation de la matrice permet de trouver ces vecteurs.

Une autre méthode peut être employée pour déterminer ces vecteurs. La recherche du premier vecteur propre V1 s'effectue par une démarche itérative (méthode de déflation). Les autres vecteurs propres sont déterminés de la même façon, à partir de la matrice résiduelle. La valeur propre associée au vecteur propre permet d'apprécier le pourcentage de variance exprimé par le vecteur.

5.2.3. Interprétation de l'ACP

La description et l'interprétation de l'analyse a lieu généralement dans le plan contenant les deux premiers facteurs dont le pourcentage de variance exprimée est le plus élevé.

Les paramètres associés à l'analyse sont représentés dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 5).

<u>Dans l'espace des variables</u>	<u>Dans l'espace des u.s.</u>
Le pourcentage de variance exprimée	La contribution des u.s. à l'inertie du nuage
Les saturations	Les composantes principales
Les corrélations variables-facteurs	La contribution des u.s. à la détermination des facteurs
Les carrés des corrélations multiples variables-variétés factorielles	Les carrés des M.cosinus des u.s. avec les variétés factorielles

Tableau 5. Paramètres fournis dans l'ACP

Dans l'espace des variables :

- le pourcentage de variance exprimée : il exprime le rôle joué par chaque facteur dans la structure des données.

- si le pourcentage du 1^{er} facteur est < 30%, les données sont peu structurées;
- si le pourcentage du 1^{er} facteur est > 90%, les données sont très structurées. A la rigueur, l'analyse est inutile. On peut, tout de même, rechercher une structure avec les autres facteurs.

Si, pour le premier facteur, le pourcentage de variance est faible, il faudra 5 ou 6 facteurs pour interpréter les résultats. En général, on s'arrête lorsque 90% de la variance est exprimée par les premiers facteurs. Une autre méthode (la méthode de DIDAY) consiste à construire l'histogramme des pourcentages de variances exprimées en fonction des facteurs (cf. figure 6) et à se servir de la rupture de pente pour déterminer le nombre de facteurs à conserver.

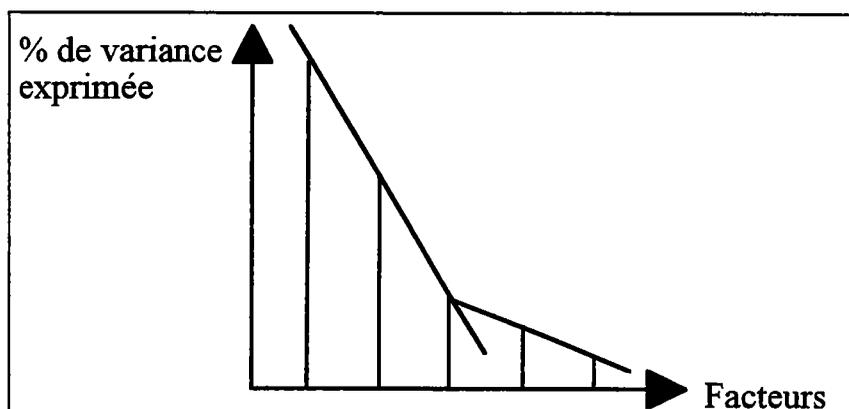


Figure 6. Histogramme des pourcentages de variances exprimées en fonction des facteurs (méthode de DIDAY)

- les saturations : ce sont les coordonnées des variables sur chaque axe factoriel (cf. figure 7). On parle d'espace des variables pour la représentation graphique.

La position des variables permet de caractériser les facteurs. Ces derniers peuvent, parfois, être définis par une seule variable.

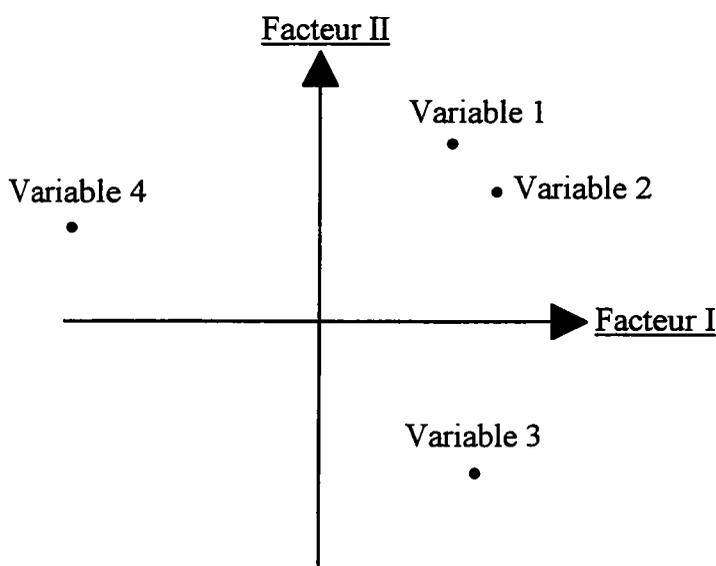


Figure 7. Représentation des saturations (espace des variables)

- les corrélations variables-facteurs : elles permettent de donner un nom au facteur et de lui attribuer un caractère;

- les carrés des corrélations multiples variables-variétés factorielles : ils indiquent comment les variables interviennent dans la caractérisation du facteur (une variable peut déterminer plusieurs facteurs).

Dans l'espace des u.s :

- la contribution des u.s à l'inertie du nuage : son usage est souvent lié à la recherche d'un échantillon constituant une valeur anormale. Si, par exemple, un échantillon présente une contribution très forte à l'inertie du nuage, il faut déterminer si cet échantillon présente des valeurs anormales. Pour cela, une analyse est faite en retirant cet échantillon.

- Si la structure des données est inchangée : l'échantillon possède des valeurs correctes;
- Par contre, si la structure est modifiée : l'échantillon présente une valeur anormale. Il faut alors l'éliminer de l'analyse (il tire vers lui un facteur) ou rechercher la valeur aberrante.

- les composantes principales (cf. figure 8) : ce sont les coordonnées des u.s sur chaque axe factoriel. On parle de l'espace des individus. Les facteurs ayant été caractérisés auparavant, on peut expliquer, dans l'espace des individus, la répartition des u.s.

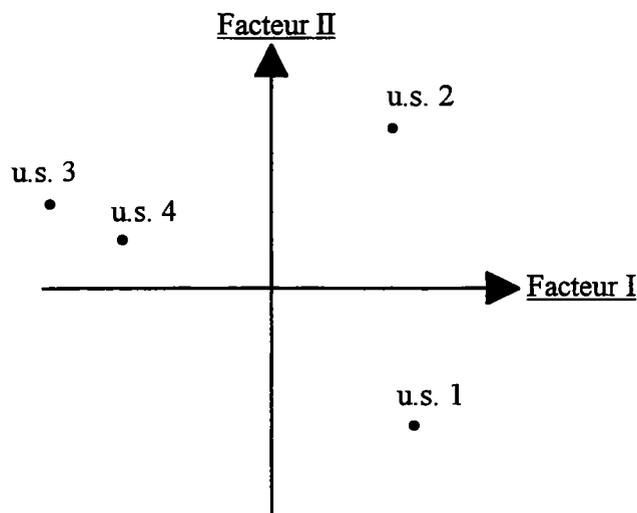


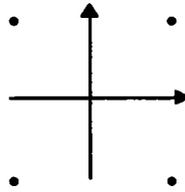
Figure 8. Représentation des u.s. dans l'espace des individus

- la contribution des u.s. à la détermination des facteurs : certaines u.s. peuvent aussi caractériser un facteur.

- les carrés des M-cosinus des u.s avec les variétés factorielles : ils indiquent comment les facteurs interviennent sur la position des échantillons dans le plan factoriel.

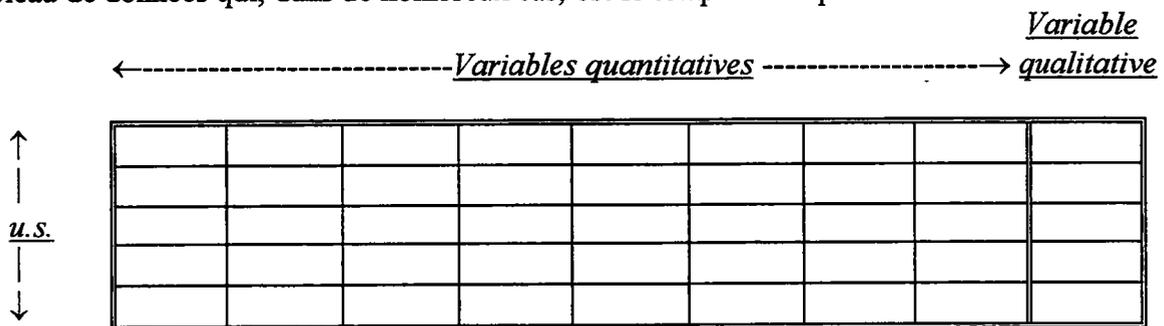
Remarques importantes :

- Si les saturations sont élevées et de même signe, on est dans le cas d'un facteur "taille". Le résultat de l'analyse est peu intéressant. L'ACP revient à une classification ni plus ni moins. Le facteur "taille" s'oppose au facteur "forme" qui rend compte des relations entre les variables.
- Si les variables et les u.s. sont placées sur les diagonales du plan de projection factoriel (cf. figures ci-dessous), on parle d'effet GUTTMAN. Les phénomènes recherchés sont unidimensionnels, et non multidimensionnels.



5.3. L'AFD

L'AFD (Analyse Factorielle Discriminante) introduit une variable qualitative dans un tableau de données qui, dans de nombreux cas, est le temps ou l'espace.



A partir de cette variable, on définit des groupes d'échantillons qui constituent une hypothèse de départ pour l'analyse.

Les calculs de l'AFD sont équivalents à ceux de l'ACP, mais on utilise une autre métrique : la métrique de MAHALANOBIS. Cette dernière élimine la notion de variance à l'intérieur de chaque groupe.

La véracité de l'hypothèse est mesurée par trois paramètres :

- 1) le pouvoir discriminant de chaque axe. Plus sa valeur est proche de 1, meilleure est la discrimination;
- 2) la distance de MAHALANOBIS entre les centres de gravité des groupes. Plus cette distance est grande, plus l'hypothèse initiale est bonne;
- 3) le pourcentage d'échantillons bien classés : il permet, pour chaque échantillon, de juger de l'affectation initiale.

Si l'hypothèse est vérifiée, l'analyse permet de :

- caractériser les groupes par rapport aux variables quantitatives;
- voir s'il existe une évolution intra-groupe et inter-groupe.

Afin d'illustrer nos propos, nous avons pris l'exemple d'une classe de terminale où l'on veut tester une hypothèse : les garçons âgés ont de meilleures notes dans les disciplines scientifiques que les filles et les garçons plus jeunes.

Pour vérifier cette hypothèse, on ajoute une variable qualitative au tableau de notes qui comprend n élèves et p disciplines. On attribue à la nouvelle variable la valeur 1 pour les garçons âgés, la valeur 2 pour les garçons plus jeunes, la valeur 3 pour les filles âgées, et la valeur 4 pour les filles plus jeunes. On réalise ensuite une AFD.

Cette analyse permet de savoir, par le biais du pouvoir discriminant, si la variable qualitative détermine ou non une discrimination par rapport aux notes dans les disciplines scientifiques. Suivant la valeur du pouvoir discriminant, l'hypothèse est acceptée ou rejetée.

Remarque : Une ACP est nécessaire avant d'effectuer une AFD. Ceci afin de voir si les données sont bien structurées et, si oui, comment.

5.4. Utilisation de l'ACP et de l'AFD dans le cas des analyses chimiques

Les tableaux de chimie se présentent généralement sous la forme suivante :

←-----p variables-----→

	n°	t	Q	pH	C	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	...
↑	1											
	2											
u.s.	3											
	...											
↓												

Les variables peuvent être de natures différentes :

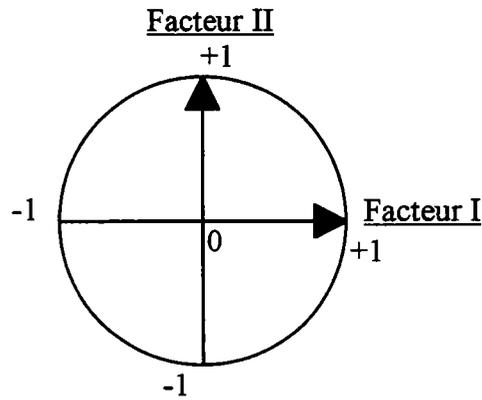
- *thermique* : température (t);
- *hydrodynamique* : débit (Q);
- *physique* : conductivité (C), pH;
- *hydrochimique* : Cl⁻, HCO₃⁻, K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻... ;
- *isotopique* : ²H, ¹⁸O, ¹⁴C, ³H;
- *qualitative* : le temps, l'espace.

Cas de l'ACP :

Il existe des différences importantes entre les valeurs des variables. Certaines, comme les bicarbonates, sont prédominantes dans l'analyse; d'autres, comme notamment les éléments traces, ont des valeurs faibles. Pour donner le même poids aux variables, on retranche, pour chaque valeur, la moyenne de la série, puis on divise par la variance totale. Cette opération revient à utiliser une ACP centrée et réduite.

Pour cette analyse :

- les saturations correspondent aux corrélations variables-facteurs;
- les saturations sont comprises entre -1 et +1;
- le plan de projection est alors matérialisé par un cercle.



Les variables à prendre en compte dans l'interprétation doivent être situées au moins au 2/3 du centre de gravité.

Dans le cercle, la corrélation entre deux variables est donnée par le cosinus de l'angle défini par deux droites issues du centre de gravité et passant par ces variables :

- si l'angle est égal à 0, $\cos(\text{angle}) = 1$: les variables sont proportionnelles;
- si l'angle est égal à 180, $\cos(\text{angle}) = -1$: les variables sont inversement proportionnelles;
- si l'angle est égal à 90, $\cos(\text{angle}) = 0$: les variables ne sont pas corrélées.

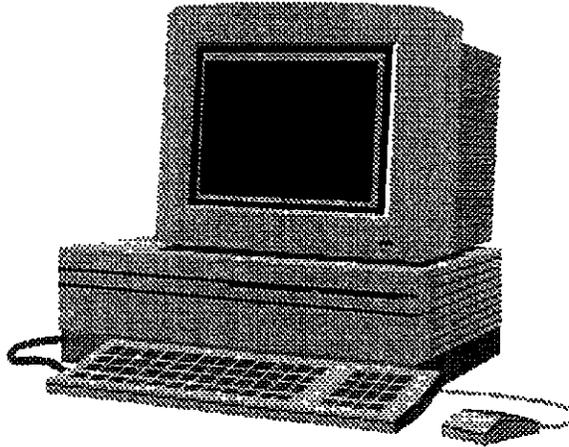
Remarque : des variables sont parfois redondantes. C'est par exemple le cas de la minéralisation et de la conductivité. Il est alors préférable de retirer une variable de l'analyse, car elles peuvent, à elles deux, attirer un facteur, et ainsi, cacher le reste de la structure.

Cas de l'AFD :

Du fait de la métrique utilisée (métrique de MAHALANOBIS), les corrélations entre les variables ne sont plus accessibles dans le plan de projection. L'espace des variables permet de caractériser les axes discriminants.

6. LOGICIELS UTILISES

6. Logiciels utilisés



Ils sont nombreux, on peut les ranger en deux groupes : un groupe de traitement des données et un groupe d'aide à la rédaction.

6.1. Logiciels de traitement des données

6.1.1. Hydrodynamique

- *Stochastos* (CNRS Moulis) : il permet d'étudier les chroniques et de faire des analyses corrélatoires et spectrales. Il crée de nouveaux fichiers de données, filtre, calcule des moyennes, sort des graphiques et les résultats de l'ACS.
- *Recess* (CNRS Moulis) : il analyse la décrue et le tarissement des hydrogrammes. Il donne le coefficient de tarissement, le volume de tarissement et les coefficients inhérents à la décrue.
- *Ondrec* (ANTEA) : il récupère des fichiers de débits et de pluies de différents gestionnaires.
- *Dbase* (IBM/MSDOS) : il permet tout type d'opérations sur les données

6.1.2. Hydrochimie

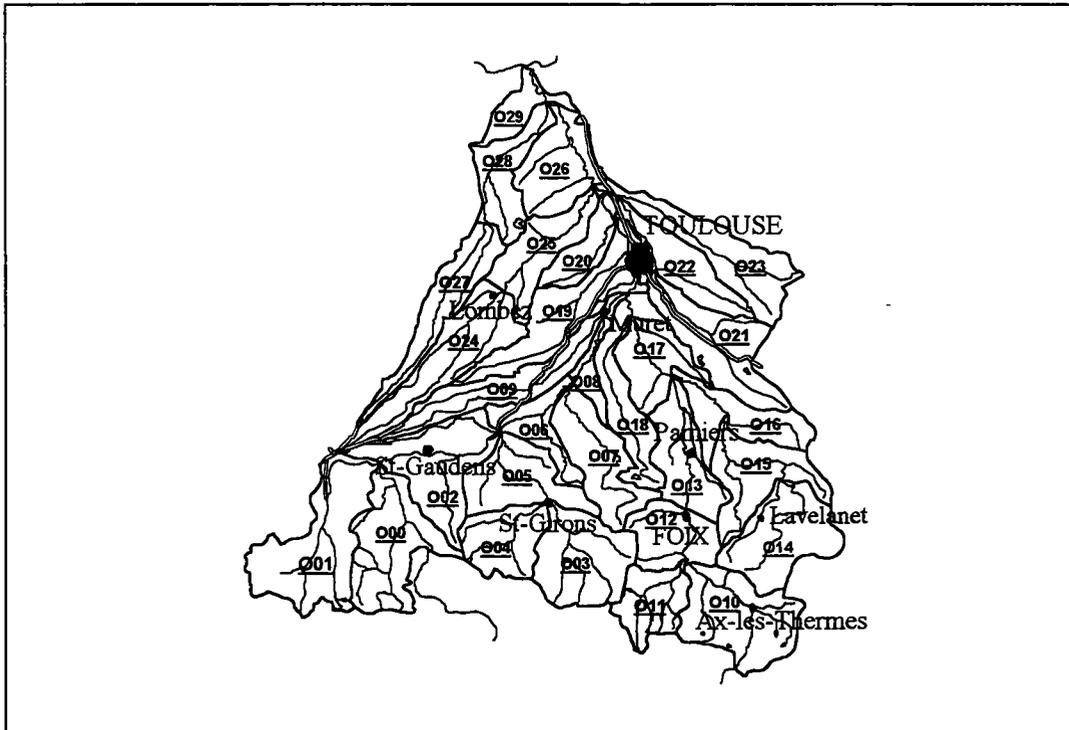
- *Calconc* (CNRS Moulis) : c'est programme de calcul des concentrations ioniques à partir des résultats d'analyses.
- *Soluteq* (CNRS Moulis) : il calcul les paramètres intervenant dans les équilibres calco-carboniques.
- *Statitcf* (ITCF : Institut technique des céréales et des fourrages) : permet entre autres l'analyse en composantes principales et l'analyse factorielle discriminante.

6.2. Logiciels d'aide à la rédaction

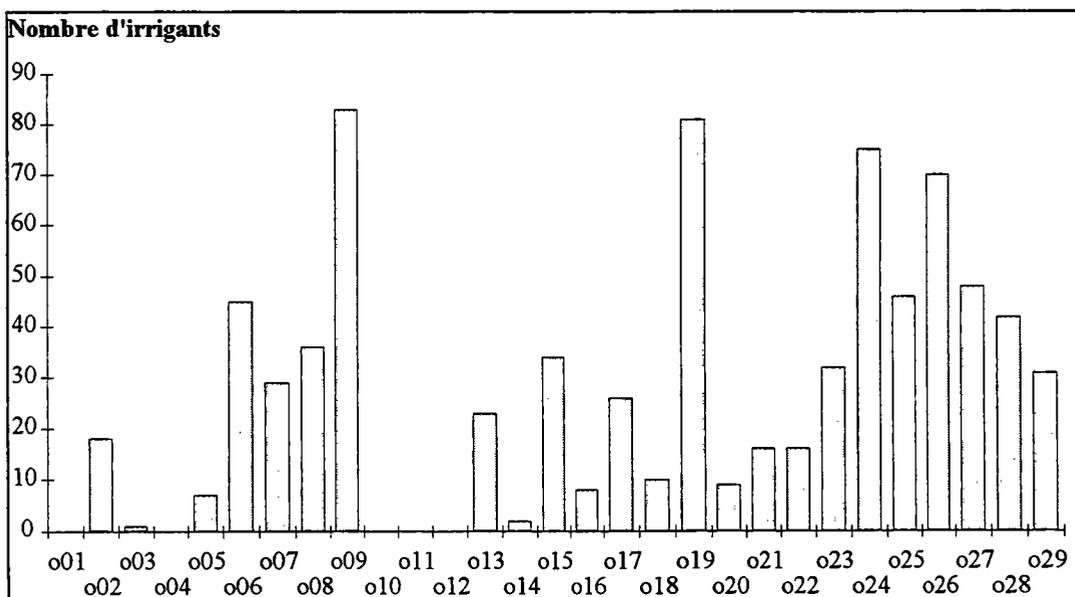
- *Winword* (MICROSOFT) : logiciel de traitement de texte;
- *Excell* (MICROSOFT) : tableur et graphique;
- *Map Info* (MISC) : logiciel de cartographie.

**7. PRELEVEMENTS PAR SOUS-
SECTEURS
HYDROGRAPHIQUES**

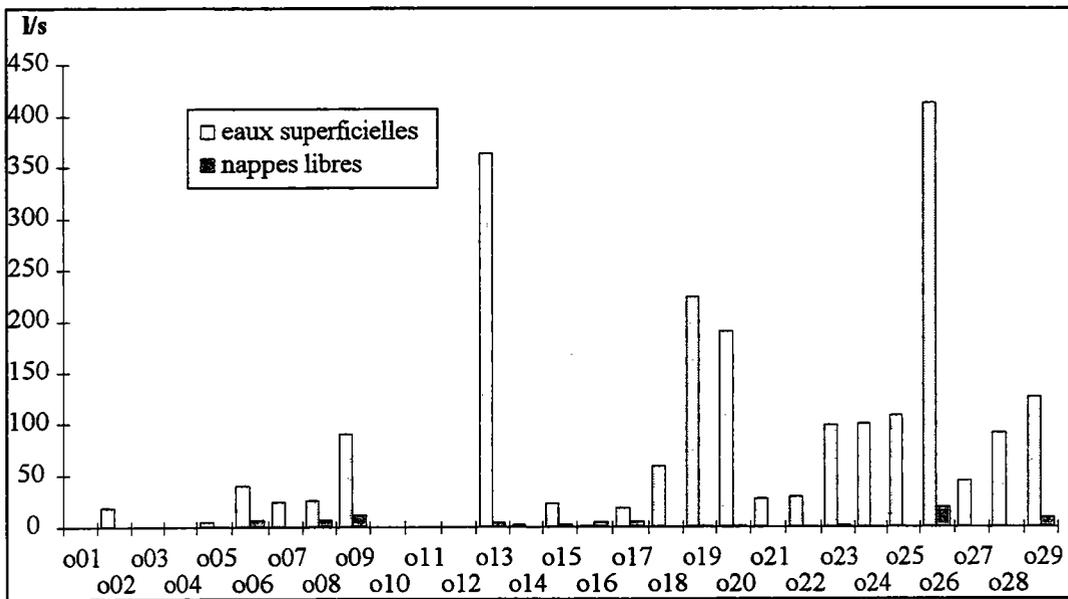
7. Prélèvements par sous-secteurs hydrographiques



Carte 1. Sous-secteurs hydrographiques



Graphique 13. Nombre d'irrigants par sous-secteurs en 1991 (788 irrigants recensés)



Graphique 14. Répartition des débits prélevés pour l'irrigation par sous-secteurs en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m3/s)

**8. TABLEAUX DES VALEURS
PHYSICO-CHIMIQUES DES
CAMPAGNES DU CYCLE 1993
SUR LE BASSIN DE LA
GARONNE**

8. Tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagnes :

<u>numéro</u>	<u>Date</u>	<u>Nombre d'échantillons</u>
1	28 et 29/09/92	40
2	1 et 2/11/92	41
3	29 et 30/11/92	42
4	28 et 29/12/92	42
5	31 et 1/02/93	42
6	8 et 9/03/93	41
7	13 et 14/04/93	42
8	9 et 10/05/93	41
9	6 et 7/06/93	41
10	6 et 7/07/93	41
11	4 et 5/08/93	41
12	7 et 8/09/93	41
13 (Val d'Aran)	10/09/93	10
		<u>total :</u> 505

Campagne n° 1 du 28 et 29/09/1992

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	IsDol %	pCO2	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	28/09/92	10:30	15.6	7.33	263	102.48	38.47	2.68	13.14	2.32	15.70	12.09	21.69	-0.62	-2.21	0.42	0.04
2	Gimone	avant confluence Garonne	28/09/92	10:56	15.4	7.91	510	242.78	91.11	8.43	13.80	2.42	37.30	18.59	24.38	0.63	0.42	0.25	0.56
3	Garonne	amont conf. Gimone	28/09/92	11:20	15.8	7.22	265	100.04	37.21	3.20	12.65	2.40	15.50	12.57	21.83	-0.75	-2.38	0.53	-0.04
4	Garonne	aval conf. Save	28/09/92	12:07	15.3	7.17	256	108.58	38.68	3.04	11.00	2.39	11.90	9.39	22.02	-0.78	-2.43	0.65	-0.10
5	Save	amont conf. Garonne	28/09/92	12:31	15.7	7.70	465	228.14	76.09	9.78	16.45	2.69	30.30	15.00	20.56	0.34	-0.03	0.39	0.75
6	Garonne	Grenade	28/09/92	12:56	15.4	7.35	266	107.36	38.77	2.98	12.73	2.35	11.90	10.89	22.53	-0.58	-2.09	0.42	0.99
7	Hers mort	amont conf. Garonne	28/09/92	13:29	14.3	7.49	416	174.46	68.43	6.14	13.97	4.49	27.00	20.17	25.47	-0.04	-0.96	0.48	1.87
8	Aussonnelle	Seilh	28/09/92	14:43	15.1	7.22	350	120.78	34.36	4.44	37.50	4.56	31.70	19.68	22.87	-0.73	-2.17	0.63	2.18
9	Garonne	Lespinasse	28/09/92	14:23	15.4	7.33	279	108.58	39.22	2.95	14.13	2.20	17.60	13.06	21.18	-0.59	-2.12	0.45	-1.00
10	Garonne	Pont de Bagnas, aval Toulouse	28/09/92	15:19	15.2	7.53	239	106.14	37.40	2.84	9.66	1.99	10.00	9.93	20.05	-0.42	-1.78	0.27	-0.56
11	Ariège	Laoroix-Falgarde	28/09/92	17:30	15.0	8.42	170	78.08	26.23	3.78	6.00	1.52	4.96	7.65	14.89	0.18	-0.29	0.03	1.82
12	Lèze	Laberthe/Lèze	28/09/92	20:47	15.6	7.70	602	297.68	107.00	11.19	17.09	3.05	32.90	16.55	40.90	0.57	0.34	0.50	1.16
13	Ariège	amont conf. Lèze	28/09/92	21:16	14.6	7.84	197	85.40	32.71	2.77	4.40	1.08	5.57	7.42	16.21	-0.26	-1.42	0.11	1.63
14	Ariège	Cintegabelle	28/09/92	21:56	14.1	7.55	221	96.38	36.92	2.89	4.70	1.22	6.00	8.89	18.40	-0.46	-1.85	0.24	0.90
15	Hers vif	amont conf. Ariège	28/09/92	22:22	16.0	7.85	425	207.40	78.68	4.30	11.49	1.72	15.70	21.42	22.53	0.47	-0.13	0.25	1.82
16	Ariège	Saverdun	28/09/92	22:48	13.5	7.45	154	64.66	24.65	2.31	3.17	0.96	3.01	5.28	16.80	-0.89	-2.65	0.20	0.10
17	Ariège	Crampagna	28/09/92	23:23	11.8	7.06	117	47.58	17.28	1.92	2.43	0.80	1.81	2.51	12.61	-1.58	-3.97	0.36	0.56
18	Garonne	Pinsaguel	28/09/92	17:59	15.2	7.53	220	107.36	37.65	2.69	5.17	1.35	5.64	4.35	17.20	-0.41	-1.78	0.28	0.27
19	Louge	Muret	28/09/92	20:13	14.5	7.47	229	107.36	36.99	3.09	6.02	1.91	7.50	8.15	16.01	-0.49	-1.88	0.32	-0.53
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	28/09/92	19:48	14.9	7.55	222	109.80	38.10	2.66	5.11	1.14	6.10	3.94	17.00	-0.38	-1.73	0.27	-0.38
21	Arize	Carbone	29/09/92	18:54	15.8	7.89	372	207.40	68.14	10.21	6.05	2.16	9.88	8.40	27.19	0.45	0.26	0.23	2.08
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	29/09/92	18:30	13.0	7.38	150	80.52	27.56	1.76	2.03	0.92	1.94	2.61	12.65	-0.83	-2.70	0.29	-1.47
24	Volp	Cazères	29/09/92	17:45	14.9	7.84	383	214.72	78.46	7.11	4.11	2.68	8.00	3.71	36.56	0.45	0.04	0.26	2.04
25	Garonne	Cazères	29/09/92	17:20	12.4	7.41	161	85.40	30.05	1.95	2.55	1.08	2.72	5.58	13.05	-0.75	-2.54	0.29	-1.11
26	Salat	Roquefort/Garonne	29/09/92	16:26	13.0	7.61	225	92.72	32.84	2.69	12.32	1.29	17.50	1.75	15.29	-0.48	-1.90	0.20	1.47
27	Salat	Taurignan	29/09/92	20:18	12.4	7.42	169	89.06	30.70	2.53	2.51	0.73	2.06	1.64	14.91	-0.71	-2.37	0.29	0.37
28	Lez	St-Girons	29/09/92	21:01	11.1	7.48	178	85.40	33.25	2.20	2.12	0.63	1.03	1.08	18.90	-0.66	-2.38	0.24	2.95
29	Salat	St-Girons	29/09/92	20:43	11.4	7.44	153	84.18	26.72	2.27	2.72	0.56	3.19	1.60	9.36	-0.78	-2.51	0.26	-1.14
30	Garonne	amont conf. Salat	29/09/92	16:04	11.9	7.41	175	85.40	30.86	1.70	1.74	0.80	1.79	3.14	12.93	-0.74	-2.61	0.28	0.17
31	Noue	Mancioux																	
32	Garonne	aval conf. Ger	29/09/92	15:25	11.2	7.49	163	84.18	30.03	1.72	1.75	0.85	1.69	2.68	12.97	-0.69	-2.50	0.23	-0.08
33	Ger	Pointes-Inard	29/09/92	15:03	13.2	8.14	301	165.92	60.60	7.00	2.88	1.30	4.30	4.72	34.26	0.52	0.25	0.10	1.82
34	Garonne	Montréalou	29/09/92	12:02	10.2	7.48	152	76.86	27.35	1.40	1.36	0.71	1.49	2.12	10.00	-0.79	-2.76	0.21	0.43
35	Neste	Mazères de Neste	29/09/92	12:24	10.3	7.39	148	78.08	27.47	1.33	1.23	0.59	1.26	2.33	9.06	-0.87	-2.94	0.27	0.24
36	Neste	Sarrancolin	29/09/92	13:13	10.4	7.52	137	68.32	25.41	1.12	1.26	0.84	1.32	1.46	9.76	-0.82	-2.90	0.17	1.90
37	Garonne	Labroquère	29/09/92	11:34	9.9	7.33	158	74.42	26.30	1.55	1.55	0.67	1.43	2.69	11.42	-0.97	-3.07	0.29	-0.55
38	Ourse	Iraot	29/09/92	11:11	10.8	7.94	236	134.20	45.11	3.27	1.73	0.71	1.84	2.43	13.77	0.10	-0.82	0.13	0.71
39	Garonne	Chaum	29/09/92	10:47	9.4	7.53	150	67.10	23.69	1.19	1.42	0.55	1.35	1.66	8.83	-0.86	-2.93	0.17	0.28
40	Pique	Marignac	29/09/92	10:23	8.3	7.18	128	58.56	21.31	0.93	1.32	0.53	1.11	1.72	8.54	-1.33	-3.94	0.32	0.60
41	Garonne	St-Béat	29/09/92	09:59	8.7	7.33	136	68.32	23.69	1.19	1.45	0.54	1.15	1.86	8.37	-1.06	-3.35	0.27	0.02
42	Garonne	Pont du Roy	29/09/92	09:37	7.4	7.39	155	76.86	27.66	1.21	1.42	0.46	1.15	1.64	8.83	-0.91	-3.13	0.26	1.69

Campagne n° 2 du 1 et 2/11/1992

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	01/11/92	09:28	8.7	7.64	286	143.96	50.98	5.06	7.59	1.94	12.30	13.35	17.71	-0.16	-1.24	0.27	0.76
2	Gimone	avant confluence Garonne	01/11/92	09:52	9.9	7.81	623	302.56	116.60	13.88	15.52	3.65	40.00	45.25	33.76	0.63	0.44	0.37	1.42
3	Garonne	amont conf. Gimone	01/11/92	10:12	8.5	7.59	278	140.30	49.69	4.87	7.17	1.69	12.60	12.61	17.30	-0.23	-1.39	0.29	0.27
4	Garonne	aval conf. Save	01/11/92	10:57	8.6	7.65	280	142.74	49.81	5.28	7.11	1.79	11.50	11.39	16.68	-0.16	-1.22	0.26	1.27
5	Save	amont conf. Garonne	01/11/92	11:15	9.7	7.89	505	263.52	94.23	11.16	13.47	4.14	32.10	27.37	22.90	0.58	0.33	0.27	1.40
6	Garonne	Grenade	01/11/92	11:43	8.3	7.53	232	117.12	41.71	3.63	5.65	1.55	7.10	8.53	15.43	-0.43	-1.85	0.28	1.69
7	Hers mort	amont conf. Garonne	01/11/92	12:00	9.0	7.80	603	305.00	120.36	9.41	16.05	2.92	33.70	38.36	38.57	0.63	0.23	0.37	1.27
8	Aussonnelle	Seilh	01/11/92	12:53	8.4	7.22	294	102.48	35.25	6.82	19.74	5.18	27.20	22.72	22.32	-0.88	-2.40	0.50	0.51
9	Garonne	Lespinasse	01/11/92	12:33	8.2	7.51	225	115.90	40.17	3.59	5.15	1.58	6.30	9.48	14.68	-0.47	-1.92	0.29	0.57
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	01/11/92	13:26	8.1	7.58	214	115.90	40.33	3.25	4.72	1.40	5.60	7.53	13.77	-0.40	-1.82	0.25	1.13
11	Ariège	Laorix-Falgarde	01/11/92	15:31	7.7	7.48	248	123.22	46.02	4.42	5.20	2.37	9.44	14.77	14.23	-0.43	-1.82	0.33	2.24
12	Lèze	Labarthe/lèze	01/11/92	16:47	8.2	7.55	369	203.74	67.83	9.18	7.20	3.81	14.20	21.47	20.00	0.00	-0.81	0.46	0.55
13	Ariège	amont conf. Lèze	01/11/92	17:11	7.5	7.47	248	130.54	47.10	3.52	5.09	2.56	8.77	17.14	13.90	-0.41	-1.89	0.35	-0.45
14	Ariège	Cintegabelle	01/11/92	17:54	7.4	7.54	264	151.28	54.88	2.69	4.03	2.85	7.70	15.18	12.65	-0.22	-1.69	0.35	0.05
15	Hers vif	amont conf. Ariège	01/11/92	18:18	7.6	7.56	315	184.22	67.86	2.84	4.68	3.22	8.00	16.37	13.69	-0.03	-1.38	0.40	1.48
16	Ariège	Saverdun	01/11/92	18:47	7.4	7.54	184	107.36	36.68	2.55	2.53	1.39	3.33	4.38	10.99	-0.52	-2.13	0.25	0.77
17	Ariège	Crampagna	01/11/92	19:27	6.8	7.50	138	79.30	25.27	2.66	2.19	0.82	1.98	2.90	10.20	-0.84	-2.61	0.20	-0.59
18	Garonne	Pinsaguel	01/11/92	15:08	7.8	7.55	213	119.56	40.62	3.56	3.68	1.36	5.41	5.28	13.27	-0.42	-1.83	0.27	0.84
19	Louge	Muret	01/11/92	16:23	8.0	7.55	291	147.62	52.08	5.12	8.26	4.06	14.80	14.75	15.31	-0.24	-1.42	0.33	1.33
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	01/11/92	16:06	8.0	7.56	210	117.12	40.88	3.65	3.21	1.45	4.58	5.19	13.65	-0.41	-1.81	0.26	2.07
21	Arize	Carbone	02/11/92	18:30	9.0	7.91	351	218.38	70.48	8.30	3.76	2.11	4.10	9.48	19.87	0.41	-0.02	0.21	1.85
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	02/11/92	18:12	7.3	7.69	216	122.00	41.78	3.10	2.88	1.73	3.97	5.90	12.40	-0.27	-1.61	0.20	0.91
24	Volp	Cazères	02/11/92	17:25	9.0	7.81	284	172.02	58.03	4.67	3.18	2.08	3.10	5.82	15.10	0.15	-0.72	0.21	2.36
25	Garonne	Cazères	02/11/92	17:08	7.9	7.69	215	125.66	42.46	3.42	3.33	1.13	4.32	6.71	13.11	-0.24	-1.51	0.21	0.23
26	Salat	Roquefort/Garonne	02/11/92	19:20	7.7	7.77	219	129.32	42.09	4.13	2.46	0.92	0.60	4.11	13.23	-0.15	-1.26	0.18	1.87
27	Salat	Taurignan	02/11/92	19:51	7.3	7.77	184	106.14	35.05	3.05	1.70	0.69	1.44	2.25	10.99	-0.31	-1.63	0.15	1.14
28	Lez	St-Girons	02/11/92	20:15	6.8	7.70	204	115.90	39.78	3.10	1.86	0.76	1.32	2.86	15.64	-0.30	-1.67	0.18	0.70
29	Salat	St-Girons	02/11/92	20:07	7.2	7.71	157	90.28	29.39	2.35	1.65	0.54	1.34	2.44	9.66	-0.51	-2.06	0.14	-0.36
30	Garonne	amont conf. Salat	02/11/92	16:04	8.0	7.56	217	117.12	41.69	2.67	3.48	0.92	4.89	4.84	13.56	-0.40	-1.93	0.26	1.19
31	Noue	Mancioux	02/11/92	15:46	9.3	7.71	336	187.88	70.81	2.51	4.17	3.15	15.50	16.01	13.36	0.17	-1.03	0.29	-0.64
32	Garonne	aval conf. Ger	02/11/92	15:14	7.8	7.53	212	115.90	40.09	2.67	3.45	0.81	4.17	4.11	13.15	-0.45	-2.02	0.28	0.72
33	Ger	Pointes-Inard	02/11/92	14:53	9.2	7.81	318	206.18	66.27	6.48	2.29	0.85	3.61	5.51	16.05	0.27	-0.38	0.26	0.75
34	Garonne	Montréal	02/11/92	14:17	6.9	7.56	179	97.60	34.16	2.13	1.76	0.68	2.00	2.95	11.90	-0.57	-2.30	0.22	0.58
35	Neste	Mezères de Neste	02/11/92	12:48	7.0	7.61	180	103.70	34.80	2.23	1.68	0.74	2.10	3.48	9.66	-0.49	-2.12	0.21	-0.10
36	Neste	Sarrancolin	02/11/92	12:05	5.7	7.46	134	71.98	25.41	1.12	1.34	0.39	1.21	2.66	10.16	-0.93	-3.19	0.20	-1.40
37	Garonne	Labroquère	02/11/92	11:15	5.8	7.47	167	89.06	31.91	2.04	1.83	0.67	1.86	2.65	14.19	-0.74	-2.66	0.24	0.18
38	Ourse	Iraout	02/11/92	10:56	6.4	7.75	219	142.74	45.70	2.91	1.57	0.71	1.86	1.49	10.45	-0.11	-1.39	0.20	-0.53
39	Garonne	Chaum	02/11/92	10:34	5.1	7.50	146	76.86	27.57	1.51	1.78	0.55	1.59	1.77	13.27	-0.84	-2.94	0.19	-0.57
40	Pique	Marignac	02/11/92	10:15	5.3	7.49	161	85.40	31.74	1.41	1.65	0.71	1.61	6.36	12.90	-0.75	-2.84	0.22	-0.74
41	Garonne	St-Béat	02/11/92	09:56	4.8	7.45	136	71.98	25.50	1.31	1.68	0.65	1.44	1.54	11.65	-0.95	-3.19	0.20	-0.61
42	Garonne	Pont du Roy	02/11/92	09:31	4.9	7.52	143	76.86	26.40	1.25	1.74	0.65	1.42	2.66	11.07	-0.84	-3.01	0.18	-1.99

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne de ses sources à la confluence du Tarn

Campagne n° 3 du 29 et 30/11/1992

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	29/11/92	09:45	8.8	7.51	324	150.06	51.54	4.96	7.43	1.48	11.70	15.56	18.86	-0.26	-1.46	0.37	-1.39
2	Gimone	avant confluence Garonne	29/11/92	10:10	9.8	7.92	782	344.04	130.74	16.00	17.02	1.81	46.00	61.83	37.78	0.83	0.85	0.32	0.41
3	Garonne	amont conf. Gimone	29/11/92	10:30	9.1	7.47	323	143.23	51.94	4.72	6.97	1.16	10.90	13.10	17.99	-0.31	-1.58	0.39	1.12
4	Garonne	aval conf. Save	29/11/92	11:13	9.1	7.56	328	147.62	54.56	4.59	6.59	1.05	10.10	14.75	18.73	-0.19	-1.37	0.33	1.24
5	Save	amont conf. Garonne	29/11/92	11:34	9.6	7.84	587	302.56	105.98	14.00	13.98	1.89	34.50	35.45	25.80	0.63	0.47	0.34	0.41
6	Garonne	Grenade	29/11/92	11:56	9.3	7.56	258	122.00	43.52	3.75	5.63	0.90	7.30	10.53	16.33	-0.35	-1.68	0.27	0.61
7	Hers mort	amont conf. Garonne	29/11/92	12:14	10.1	7.74	728	359.90	146.02	9.89	17.55	1.82	39.30	51.83	44.63	0.72	0.38	0.51	0.81
8	Aussonnelle	Seilh	29/11/92	13:08	10.3	7.56	654	242.78	79.83	13.18	50.00	3.65	67.80	43.88	45.94	0.14	-0.39	0.53	0.44
9	Garonne	Lespinasse	29/11/92	12:48	9.6	7.49	253	120.78	42.98	3.59	5.44	0.97	6.90	10.47	16.02	-0.43	-1.84	0.32	0.47
10	Garonne	Pont de Bagnac, aval Toulouse	29/11/92	13:35	9.9	7.51	243	120.78	43.23	3.44	5.82	0.91	6.90	9.55	15.54	-0.40	-1.80	0.31	1.23
11	Ariège	Lauroix-Falgarde	29/11/92	15:32	8.8	7.79	249	123.22	44.26	3.54	5.00	0.92	7.56	11.81	15.15	-0.12	-1.26	0.16	0.04
12	Lèze	Labarthe/lèze	29/11/92	15:55	10.5	7.96	636	350.14	116.38	15.08	11.01	1.71	23.40	26.81	29.74	0.85	0.92	0.30	0.83
13	Ariège	amont conf. Lèze	29/11/92	18:05	8.6	7.79	250	114.68	42.41	2.96	4.66	0.87	6.82	14.13	14.84	-0.17	-1.42	0.15	-0.47
14	Ariège	Cintegabelle	29/11/92	18:46	8.4	7.72	247	117.12	44.11	2.66	4.07	0.88	5.99	10.78	14.62	-0.22	-1.58	0.18	1.04
15	Hers vif	amont conf. Ariège	29/11/92	19:11	9.7	7.90	471	240.34	89.48	4.56	7.60	1.07	12.10	22.37	21.71	0.54	-0.11	0.24	1.05
16	Ariège	Saverdun	29/11/92	19:43	7.5	7.61	131	58.56	21.33	1.89	2.52	0.63	2.36	4.63	11.57	-0.92	-2.83	0.12	0.14
17	Ariège	Crampagna	29/11/92	20:16	6.7	7.27	111	46.36	16.57	1.86	2.29	0.61	1.71	2.96	11.31	-1.47	-3.85	0.20	0.18
18	Garonne	Pinsaguel	29/11/92	15:10	9.9	7.75	233	118.34	41.87	3.29	3.48	0.78	4.65	6.23	14.36	-0.18	-1.37	0.17	1.25
19	Louge	Muret	29/11/92	16:20	9.5	7.93	320	150.55	55.00	4.81	8.37	1.23	10.90	13.17	19.56	0.19	-0.59	0.14	2.09
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	29/11/92	16:40	9.5	7.75	223	114.68	40.27	3.14	3.12	0.60	3.93	5.32	15.10	-0.22	-1.45	0.17	0.80
21	Arize	Carbone	30/11/92	17:49	8.5	7.91	425	225.70	73.39	8.97	5.18	1.01	7.60	11.09	23.90	0.43	0.02	0.22	0.69
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	29/11/92	17:19	9.5	7.63	221	111.02	38.82	2.71	3.06	0.67	3.69	4.28	13.49	-0.36	-1.78	0.21	0.82
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	30/11/92	17:31	8.4	7.60	224	113.46	39.09	2.79	3.40	0.74	3.66	5.28	14.93	-0.40	-1.87	0.23	-0.26
24	Volp	Cazères	30/11/92	16:53	8.4	7.89	470	261.57	87.14	7.92	4.62	1.77	6.90	6.36	28.94	0.53	0.10	0.26	0.59
25	Garonne	Cazères	30/11/92	16:36	7.7	7.56	229	113.46	39.81	2.84	3.25	0.75	3.93	6.23	14.23	-0.44	-1.96	0.25	0.29
26	Salat	Roquefort/Garonne	30/11/92	18:36	7.5	7.65	215	109.80	36.39	3.70	2.41	0.83	1.50	4.50	13.97	-0.40	-1.74	0.20	0.94
27	Salat	Taurignan	30/11/92	19:12	6.8	7.65	190	95.16	31.99	2.72	1.94	0.65	1.84	4.03	13.40	-0.52	-2.07	0.17	-0.90
28	Lez	St-Girons	30/11/92	19:52	6.6	7.66	210	106.14	37.48	2.55	1.61	0.68	1.32	2.43	15.80	-0.41	-1.94	0.19	0.53
29	Salat	St-Girons	30/11/92	19:36	6.4	7.56	151	79.30	25.25	2.19	1.75	0.51	1.42	3.30	8.85	-0.78	-2.59	0.18	-1.56
30	Garonne	amont conf. Salat	30/11/92	16:07	8.4	7.62	239	115.90	40.99	2.61	3.98	0.77	4.89	5.82	15.41	-0.35	-1.82	0.23	0.02
31	Noue	Mancieux	30/11/92	15:49	8.6	7.30	465	225.70	83.69	3.21	5.06	1.59	12.10	15.68	15.63	-0.11	-1.57	0.90	0.90
32	Garonne	aval conf. Ger	30/11/92	15:14	7.8	7.45	234	109.80	39.77	2.62	4.54	0.77	4.69	5.25	17.64	-0.56	-2.25	0.32	0.71
33	Ger	Pointes-Inard	30/11/92	14:55	7.8	7.84	311	167.14	54.68	6.22	2.16	0.80	3.21	6.53	18.73	0.12	-0.64	0.19	0.45
34	Garonne	Montréal	30/11/92	13:25	7.0	7.57	183	95.65	34.16	2.13	1.89	0.68	1.90	4.28	12.88	-0.57	-2.29	0.21	0.54
35	Neste	Mazères de Neste	30/11/92	13:03	6.9	7.66	187	97.60	32.85	2.20	1.69	0.47	2.04	4.59	9.52	-0.48	-2.09	0.17	-0.62
36	Neste	Sarrancolin	30/11/92	12:22	5.7	7.57	160	81.74	28.90	1.19	1.54	0.41	1.38	2.58	10.39	-0.72	-2.80	0.18	-0.59
37	Garonne	Labroquère	30/11/92	11:32	6.3	7.52	184	93.94	33.81	2.10	1.92	0.62	1.76	3.95	13.71	-0.64	-2.45	0.23	0.55
38	Ourse	Iraout	30/11/92	11:11	6.5	7.72	198	115.90	38.79	2.73	1.54	0.80	1.65	3.42	9.32	-0.29	-1.70	0.18	1.20
39	Garonne	Cheum	30/11/92	10:50	5.8	7.47	162	84.18	30.10	1.68	1.79	0.68	1.55	3.09	12.75	-0.79	-2.81	0.23	-0.09
40	Pique	Marignac	30/11/92	10:33	5.7	7.47	178	90.28	32.62	1.46	1.74	0.57	1.50	2.82	12.57	-0.73	-2.78	0.24	0.25
41	Garonne	St-Béat	30/11/92	10:13	5.4	7.42	153	75.64	26.95	1.40	1.69	0.54	1.23	2.29	11.44	-0.93	-3.13	0.23	-0.07
42	Garonne	Pont du Roy	30/11/92	09:50	5.4	7.48	155	84.18	30.84	1.23	1.68	0.55	1.36	3.08	12.40	-0.77	-2.93	0.22	0.04

Campagne n° 4 du 28 et 29/12/1992

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	28/12/92	10:36	6.2	7.74	370	173.24	61.21	6.63	8.86	1.87	13.20	22.77	23.43	0.05	-0.84	0.25	-0.42
2	Gimone	avant confluence Garonne	28/12/92	10:57	6.9	7.93	752	328.18	120.32	19.40	17.20	2.17	44.10	48.84	36.68	0.75	0.75	0.29	1.44
3	Garonne	amont conf. Gimone	28/12/92	11:18	5.9	7.74	375	167.14	60.52	6.32	8.53	1.71	12.30	22.09	22.27	0.03	-0.90	0.24	0.63
4	Garonne	aval conf. Save	28/12/92	12:03	6.6	7.81	377	169.58	61.68	5.86	8.20	1.55	11.50	20.67	21.70	0.12	-0.74	0.21	0.88
5	Save	amont conf. Garonne	28/12/92	12:21	6.8	7.95	633	292.80	91.21	17.61	14.76	1.87	32.70	34.50	24.35	0.62	0.57	0.25	-0.72
6	Garonne	Grenade	28/12/92	12:49	6.3	7.84	313	142.74	51.45	4.77	6.95	1.33	8.20	17.71	18.17	0.01	-0.98	0.16	0.96
7	Hers mort	amont conf. Garonne	28/12/92	13:10	6.5	7.93	767	346.48	136.16	14.17	18.56	2.06	37.70	54.11	42.15	0.81	0.68	0.30	1.97
8	Aussonnelle	Seilh	28/12/92	13:59	6.5	7.79	758	259.86	77.80	17.72	58.80	4.21	64.30	44.95	46.78	0.32	0.04	0.32	1.53
9	Garonne	Lespinasse	28/12/92	13:41	6.4	7.88	319	142.74	51.50	4.74	6.88	1.32	8.20	17.53	19.10	0.05	-0.90	0.15	0.65
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	28/12/92	14:30	6.5	7.86	313	140.30	50.88	4.63	6.46	1.38	7.60	17.71	17.65	0.02	-0.97	0.15	1.11
11	Ariège	Leorrix-Falgarde	28/12/92	17:26	6.4	7.96	342	158.60	58.08	5.13	5.96	1.28	9.55	15.81	20.06	0.22	-0.58	0.14	1.02
12	Lèze	Lebarthe/lèze	28/12/92	18:12	7.1	7.90	681	342.82	110.08	19.29	12.07	2.03	24.20	28.48	30.10	0.71	0.71	0.33	1.86
13	Ariège	amont conf. Lèze	28/12/92	17:51	6.2	7.95	326	150.06	55.84	4.54	5.66	1.40	9.00	14.71	19.14	0.17	-0.72	0.13	1.34
14	Ariège	Cintegabella	28/12/92	20:33	6.1	7.80	273	124.44	46.27	3.78	4.17	1.24	6.04	10.21	17.40	-0.13	-1.31	0.16	1.77
15	Hers vif	amont conf. Ariège	28/12/92	20:55	7.0	7.95	489	250.10	92.37	4.99	6.17	1.43	10.50	19.36	22.78	0.58	-0.06	0.22	1.41
16	Ariège	Saverdun	28/12/92	21:24	5.4	7.57	166	69.54	24.24	3.53	3.33	1.14	2.86	4.05	15.02	-0.87	-2.56	0.15	2.35
17	Ariège	Crampagna	28/12/92	21:56	5.1	7.58	145	61.00	21.21	2.94	3.07	1.03	2.06	2.15	15.82	-0.97	-2.79	0.13	1.35
18	Garonne	Pinsaguel	28/12/92	16:59	6.3	7.91	260	127.37	44.39	4.19	3.69	1.16	5.12	7.01	18.89	-0.02	-1.04	0.12	1.00
19	Louge	Muret	28/12/92	18:37	6.3	7.91	328	147.62	54.38	4.94	6.95	1.44	9.30	13.26	18.68	0.11	-0.78	0.14	2.65
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	28/12/92	19:06	6.1	7.92	268	125.66	44.03	4.17	3.32	1.19	4.58	6.78	18.04	-0.03	-1.05	0.12	1.59
21	Arize	Carbone	29/12/92	17:45	6.3	8.13	446	228.14	73.23	11.50	5.96	1.60	7.80	10.50	27.26	0.61	0.45	0.13	2.21
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	28/12/92	19:47	6.5	7.76	243	115.90	41.46	3.78	3.09	0.98	3.81	5.96	15.02	-0.23	-1.47	0.16	2.54
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	29/12/92	18:07	6.5	7.98	242	117.12	40.62	3.56	3.17	0.92	3.85	5.76	15.36	-0.02	-1.06	0.10	0.84
24	Volp	Cazères	29/12/92	17:07	6.0	8.14	474	252.54	86.21	8.73	4.74	1.90	8.44	7.50	34.24	0.72	0.48	0.14	0.64
25	Garonne	Cazères	29/12/92	16:46	5.8	7.80	241	118.34	41.07	3.53	3.17	1.01	3.61	5.61	16.85	-0.20	-1.44	0.15	0.43
26	Salat	Roquefort/Garonne	29/12/92	18:45	5.5	7.93	232	113.46	37.40	4.30	3.82	1.15	3.30	3.97	16.34	-0.13	-1.19	0.10	1.26
27	Salat	Taurignan	29/12/92	19:19	5.1	7.87	200	95.16	32.08	3.88	2.91	0.81	2.20	2.64	15.06	-0.33	-1.57	0.10	2.26
28	Lez	St-Girons	29/12/92	19:59	4.7	7.78	229	104.92	39.75	3.36	2.61	0.98	1.48	3.48	22.85	-0.30	-1.68	0.14	2.31
29	Salat	St-Girons	29/12/92	19:42	4.7	7.76	160	76.86	25.31	2.64	3.23	0.80	2.96	1.87	9.46	-0.62	-2.23	0.11	2.24
30	Garonne	amont conf. Salat	29/12/92	16:16	5.8	8.04	224	107.36	38.76	2.99	2.59	1.05	3.09	4.86	13.48	-0.02	-1.14	0.08	2.57
31	Noue	Mancieux	29/12/92	15:55	6.9	8.08	441	223.26	84.91	3.44	4.96	1.66	13.00	17.14	14.42	0.63	-0.08	0.14	1.93
32	Garonne	aval conf. Ger	29/12/92	15:20	5.6	7.75	215	104.92	37.44	2.82	2.62	0.84	2.54	6.11	13.82	-0.34	-1.78	0.15	1.72
33	Ger	Pointes-Inard	29/12/92	15:02	6.5	8.12	328	167.14	55.62	7.59	2.67	0.83	3.45	4.17	26.64	0.38	-0.07	0.10	1.17
34	Garonne	Montréal	29/12/92	13:34	5.2	7.76	194	93.94	33.22	2.46	2.18	0.76	2.08	3.64	12.80	-0.42	-1.97	0.13	1.33
35	Neste	Mazères de Neste	29/12/92	13:14	5.6	8.02	183	92.72	31.88	2.54	1.93	0.78	2.28	5.76	8.49	-0.18	-1.44	0.07	1.35
36	Neste	Sarrancolin	29/12/92	12:34	4.3	7.71	165	81.74	29.38	1.63	1.73	0.55	1.44	3.94	9.85	-0.59	-2.45	0.13	1.23
37	Garonne	Labroquère	29/12/92	11:46	4.7	7.63	195	91.50	33.59	2.48	2.28	1.02	2.00	3.35	14.85	-0.57	-2.27	0.17	2.24
38	Ourse	Iraout	29/12/92	11:23	4.9	7.89	215	117.12	39.20	3.21	1.69	0.69	1.61	3.20	9.61	-0.14	-1.36	0.12	2.13
39	Garonne	Chaum	29/12/92	11:01	3.7	7.81	158	74.42	26.65	2.07	2.09	0.69	1.57	3.00	11.74	-0.78	-2.69	0.14	1.67
40	Pique	Marignac	29/12/92	10:45	4.3	7.59	192	92.72	34.27	1.82	2.11	0.74	1.69	3.58	12.51	-0.60	-2.48	0.19	2.24
41	Garonne	St-Béat	29/12/92	10:24	3.3	7.63	153	74.42	26.79	1.50	2.05	0.72	1.28	3.03	11.27	-0.76	-2.81	0.14	0.93
42	Garonne	Pont du Roy	29/12/92	10:00	2.9	7.62	185	91.50	33.27	1.70	2.09	0.68	1.40	2.96	12.42	-0.61	-2.54	0.17	1.70

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne n° 5 du 31 et 1/02/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	31/01/93	09:44	6.6	7.87	389	164.70	57.71	6.81	12.83	1.74	18.80	16.97	26.29	0.14	-0.62	0.17	-0.10
2	Gimone	avant confluence Garonne	31/01/93	10:06	6.2	7.86	699	303.78	105.85	18.94	16.88	2.09	43.20	43.11	34.45	0.59	0.46	0.32	0.12
3	Garonne	amont conf. Gimone	31/01/93	10:26	6.6	7.80	384	158.60	56.95	6.30	13.13	1.85	18.00	20.15	26.58	0.05	-0.83	0.20	-0.09
4	Garonne	aval conf. Save	31/01/93	11:10	6.6	7.60	377	157.38	56.07	5.86	12.40	1.69	15.30	17.14	25.96	-0.16	-1.26	0.31	0.46
5	Save	amont conf. Garonne	31/01/93	11:28	6.2	7.89	577	270.84	84.14	16.79	14.15	1.74	30.90	27.95	23.06	0.49	0.31	0.26	-0.01
6	Garonne	Grenade	31/01/93	11:51	7.0	7.80	335	139.08	48.36	5.43	11.82	1.54	13.80	14.39	26.93	-0.07	-1.03	0.17	-0.72
7	Hers mort	amont conf. Garonne	31/01/93	12:11	7.1	7.87	776	337.94	124.11	15.40	22.14	2.47	41.50	46.43	45.23	0.71	0.57	0.34	0.53
8	Aussonnelle	Seilh	31/01/93	12:54	8.0	7.70	813	285.48	78.67	17.92	65.10	6.15	72.60	50.00	49.83	0.30	0.02	0.44	-1.10
9	Garonne	Lespinasse	31/01/93	12:39	7.4	7.99	327	135.42	47.55	4.95	11.56	1.48	13.80	17.36	24.65	0.11	-0.70	0.11	-1.24
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	31/01/93	13:20	7.3	7.86	320	129.32	46.96	4.58	11.39	1.31	14.40	15.68	24.59	-0.04	-1.04	0.14	-0.65
11	Ariège	Lacroix-Falgarde	31/01/93	15:18	6.6	8.24	283	126.88	45.27	4.39	6.37	1.14	8.88	12.89	19.74	0.30	-0.36	0.06	-0.39
12	Lèze	Labarthe/lèze	31/01/93	15:56	6.9	7.95	664	330.62	102.54	19.73	14.00	1.83	27.60	25.78	34.45	0.71	0.75	0.28	0.46
13	Ariège	amont conf. Lèze	31/01/93	15:41	6.5	8.36	266	120.78	43.20	3.94	5.94	1.29	8.11	15.15	18.85	0.38	-0.24	0.04	-1.35
14	Ariège	Cintegabelle	31/01/93	17:50	6.5	8.29	245	112.24	41.02	3.32	4.63	1.02	2.02	11.75	17.48	0.27	-0.52	0.05	2.01
15	Hers vif	amont conf. Ariège	31/01/93	18:07	7.0	7.97	460	225.70	81.98	5.22	9.17	1.35	11.50	18.48	25.88	0.51	-0.13	0.19	0.98
16	Ariège	Saverdun	31/01/93	18:31	5.2	8.39	144	61.00	21.62	2.69	3.09	0.87	2.88	5.69	13.40	-0.16	-1.22	0.02	0.18
17	Ariège	Crampagna	31/01/93	19:01	4.3	7.63	116	48.80	16.52	2.38	2.64	0.70	1.69	2.63	12.59	-1.13	-3.10	0.09	0.04
18	Garonne	Pinsaguel	31/01/93	14:56	7.0	8.15	286	131.76	45.68	4.38	7.01	1.27	7.60	6.40	22.72	0.24	-0.49	0.07	0.47
19	Louge	Muret	31/01/93	16:16	6.2	8.20	299	134.20	47.58	4.20	9.03	1.27	10.50	11.09	21.02	0.30	-0.42	0.07	0.54
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	31/01/93	16:35	6.8	8.30	274	128.10	44.28	4.50	6.53	1.26	6.58	6.57	22.51	0.36	-0.23	0.05	0.65
21	Arize	Carbone	01/02/93	15:47	6.0	7.90	422	213.50	67.73	11.43	6.46	1.69	9.10	12.35	28.34	0.32	-0.10	0.21	1.12
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	31/01/93	17:08	7.1	7.86	259	119.56	41.10	3.76	6.33	1.20	5.80	5.40	22.21	-0.12	-1.24	0.13	-0.12
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	01/02/93	16:00	7.1	7.92	260	120.78	41.24	3.67	6.42	1.14	6.58	5.13	21.46	-0.06	-1.12	0.12	-0.50
24	Volp	Cezères	01/02/93	15:15	4.9	7.91	458	236.68	82.36	9.12	4.90	1.81	8.20	4.46	37.56	0.44	-0.08	0.22	1.60
25	Garonne	Cezères	01/02/93	15:04	5.9	7.73	268	120.78	41.60	3.70	8.44	1.35	8.11	4.40	23.40	-0.26	-1.55	0.18	0.29
26	Salat	Roquefort/Garonne	01/02/93	16:28	5.6	7.94	243	119.56	39.28	4.86	4.46	1.13	3.50	2.78	21.39	-0.08	-1.06	0.11	0.69
27	Salat	Taurignan	01/02/93	16:58	5.7	8.00	218	102.48	36.19	3.82	3.50	0.97	2.72	2.79	22.58	-0.12	-1.20	0.08	0.58
28	Lez	St-Girons	01/02/93	17:26	5.9	8.03	236	109.80	41.49	3.52	2.79	0.89	1.57	2.07	28.34	-0.01	-1.06	0.08	0.77
29	Salat	St-Girons	01/02/93	17:16	5.3	7.93	176	85.40	27.37	3.09	3.70	0.98	4.13	3.23	11.82	-0.37	-1.68	0.08	-0.23
30	Garonne	amont conf. Salat	01/02/93	14:43	5.8	7.98	254	124.44	43.12	3.26	5.45	1.17	5.41	5.17	18.29	0.02	-1.07	0.10	0.59
31	Noue	Mancieux	01/02/93	14:31	5.4	7.92	365	195.20	69.45	3.09	4.13	1.29	9.80	10.69	12.76	0.33	-0.69	0.18	0.24
32	Garonne	eval conf. Ger	01/02/93	14:09	6.0	8.05	235	117.12	40.47	3.17	3.63	0.89	3.49	4.63	17.65	0.04	-1.00	0.08	0.02
33	Ger	Pointes-Inard	01/02/93	13:28	5.5	8.08	343	165.92	57.85	8.67	3.25	0.97	3.89	5.05	37.29	0.33	-0.15	0.11	1.11
34	Garonne	Montréal	01/02/93	12:43	4.8	8.10	204	103.70	36.05	2.69	2.35	0.74	2.20	3.65	14.38	-0.02	-1.17	0.06	0.52
35	Neste	Mezères de Neste	01/02/93	12:29	5.2	8.10	194	102.48	33.51	2.77	2.04	0.61	2.44	4.00	9.66	-0.05	-1.17	0.06	-0.24
36	Neste	Sarrancolin	01/02/93	11:56	3.7	7.79	151	79.30	26.60	1.61	1.70	0.57	1.26	2.94	9.07	-0.57	-2.38	0.10	-0.75
37	Garonne	Labroquère	01/02/93	11:15	4.6	7.78	219	108.58	38.57	2.62	2.54	0.87	2.20	4.09	17.31	-0.30	-1.76	0.14	0.11
38	Ourse	Iraout	01/02/93	11:03	4.4	8.00	235	132.98	42.72	3.75	2.01	0.71	1.88	3.24	12.38	0.04	-0.97	0.10	0.07
39	Garonne	Chaum	01/02/93	10:49	4.3	7.82	186	91.50	32.99	1.87	2.35	0.72	1.75	3.18	15.57	-0.39	-2.04	0.11	-0.10
40	Pique	Marignac	01/02/93	10:40	4.0	7.50	192	96.38	34.41	1.74	2.32	0.77	1.80	4.01	13.82	-0.68	-2.66	0.24	-0.05
41	Garonne	St-Béat	01/02/93	10:29	4.1	7.78	170	85.40	29.80	1.86	2.20	0.68	1.32	2.81	13.78	-0.51	-2.23	0.11	-0.46
42	Garonne	Pont du Roy	01/02/93	10:12	3.8	7.58	182	93.94	32.39	1.75	2.07	0.62	1.26	2.66	12.42	-0.63	-2.55	0.19	-0.28

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne n° 6 du 8 et 9/03/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	08/03/93	09:59	5.8	7.83	360	153.72	54.70	5.96	12.37	1.70	16.70	14.85	23.38	0.04	-0.86	0.18	1.16
2	Gimone	avant confluence Garonne	08/03/93	10:22	5.5	7.89	726	305.00	108.91	20.00	19.75	2.19	49.30	40.36	36.27	0.62	0.52	0.29	1.31
3	Garonne	amont conf. Gimone	08/03/93	10:41	6.2	7.81	367	153.72	54.68	5.73	12.25	1.65	16.70	15.43	23.67	0.02	-0.90	0.19	0.59
4	Garonne	aval conf. Save	08/03/93	11:21	5.7	7.60	382	163.48	57.77	5.80	11.92	1.82	17.10	16.34	24.32	-0.14	-1.27	0.32	-0.09
5	Save	amont conf. Garonne	08/03/93	11:39	5.5	7.94	588	272.06	83.83	17.71	17.00	2.13	34.30	26.14	23.00	0.53	0.40	0.24	0.86
6	Garonne	Grenade	08/03/93	11:58	6.3	7.85	333	142.74	49.47	5.00	11.00	1.55	14.60	22.28	21.58	0.00	-0.97	0.16	-2.38
7	Hers mort	amont conf. Garonne	08/03/93	12:14	6.5	7.87	755	334.28	123.09	15.53	20.92	2.37	40.20	47.18	42.74	0.70	0.54	0.34	0.79
8	Aussonnelle	Seilh	08/03/93	12:48	6.9	7.75	733	248.88	70.58	17.14	57.90	4.59	69.20	38.84	41.70	0.24	-0.10	0.34	0.29
9	Garonne	Lespinasse	08/03/93	12:37	6.9	8.00	341	145.18	50.97	4.82	11.07	1.68	16.30	20.59	22.35	0.17	-0.64	0.11	-2.48
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	08/03/93	13:10	6.8	7.89	336	146.40	51.94	4.72	9.97	1.34	13.00	13.53	21.25	0.08	-0.84	0.15	0.32
11	Ariège	Laoroix-Falgarde	08/03/93	14:47	6.4	8.14	337	170.80	60.35	4.48	6.14	1.08	9.77	12.93	17.64	0.44	-0.21	0.10	0.34
12	Lèze	Lebarthe/Maze	08/03/93	15:17	6.4	7.98	570	296.46	89.47	17.45	11.69	2.15	25.00	15.46	27.93	0.64	0.61	0.23	0.55
13	Ariège	amont conf. Lèze	08/03/93	15:05	6.6	8.19	327	165.92	58.55	4.11	5.63	1.01	9.11	12.89	16.57	0.47	-0.17	0.08	0.02
14	Ariège	Cintegabelle	08/03/93	16:33	6.5	8.18	316	164.70	58.41	3.71	4.48	0.96	7.51	8.22	16.32	0.46	-0.24	0.08	0.84
15	Hers vif	amont conf. Ariège	08/03/93	16:45	6.6	7.95	470	257.42	90.64	5.07	6.42	1.97	9.10	12.56	21.90	0.58	-0.05	0.22	1.34
16	Ariège	Saverdun	08/03/93	17:07	6.0	8.19	143	63.44	21.20	2.70	2.92	0.86	2.68	4.63	11.96	-0.34	-1.54	0.03	-0.35
17	Ariège	Crampagne	08/03/93	17:33	5.3	7.61	121	50.02	16.26	3.02	2.71	0.75	1.82	2.71	13.57	-1.13	-2.98	0.10	-0.02
18	Garonne	Pinsaguel	08/03/93	14:30	6.4	8.05	278	129.81	44.92	4.36	6.54	1.53	7.36	7.98	21.22	0.12	-0.73	0.09	0.32
19	Louge	Muret	08/03/93	15:36	6.9	8.06	452	190.32	67.95	8.38	15.60	2.16	25.60	24.45	24.41	0.45	0.03	0.13	0.75
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	08/03/93	15:51	6.3	8.18	264	125.66	43.18	4.20	6.07	1.50	6.48	5.76	22.25	0.22	-0.54	0.06	0.08
21	Arize	Carbone	09/03/93	16:03	7.8	7.97	433	219.60	67.69	13.40	6.54	1.98	10.00	7.61	32.68	0.43	0.21	0.18	1.43
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	09/03/93	16:19	7.9	8.11	237	114.68	39.25	3.91	4.42	1.14	5.19	5.09	19.75	0.10	-0.74	0.07	-0.36
24	Volp	Cezères	09/03/93	15:26	7.0	7.95	403	211.06	71.80	8.23	4.74	1.76	7.60	4.36	31.69	0.41	-0.08	0.18	1.25
25	Garonne	Cezères	09/03/93	15:14	7.6	7.82	254	128.10	43.26	4.15	3.81	0.90	4.54	3.45	17.96	-0.10	-1.17	0.16	0.61
26	Salat	Roquefort/Garonne	09/03/93	16:50	7.7	7.82	255	125.66	41.54	4.95	4.18	0.93	3.10	3.63	23.00	-0.13	-1.13	0.15	0.03
27	Salat	Taurignan	09/03/93	17:19	7.3	7.86	222	108.68	35.19	4.67	3.74	0.93	3.07	2.48	20.61	-0.22	-1.27	0.12	-0.19
28	Laz	St-Girons	09/03/93	17:45	7.2	7.95	229	107.36	37.67	4.38	2.98	0.82	1.57	3.32	26.94	-0.11	-1.11	0.10	-0.59
29	Salat	St-Girons	09/03/93	17:36	7.2	8.00	179	91.50	28.27	3.03	3.89	0.81	2.86	3.45	13.17	-0.24	-1.39	0.07	-1.63
30	Garonne	amont conf. Salat	09/03/93	14:50	7.4	7.88	247	128.10	42.38	4.44	3.24	0.87	3.69	6.88	16.75	-0.05	-1.03	0.13	-0.39
31	Noue	Mancioux	09/03/93	14:36	7.0	7.77	389	203.74	73.04	3.59	5.56	1.92	13.40	9.73	16.35	0.23	-0.79	0.27	0.20
32	Garonne	aval conf. Ger	09/03/93	14:12	7.6	7.83	235	120.78	40.53	3.86	2.98	0.78	3.33	4.05	17.35	-0.14	-1.25	0.14	-0.21
33	Ger	Pointes-Inard	09/03/93	14:00	8.1	7.95	355	176.90	59.93	8.87	3.15	0.83	4.19	6.17	36.69	0.28	-0.20	0.16	-0.03
34	Garonne	Montréjeau	09/03/93	12:50	6.8	7.70	189	98.82	33.84	2.57	2.10	0.63	2.02	2.27	12.39	-0.43	-1.94	0.16	0.93
35	Neste	Mezères de Neste	09/03/93	12:34	7.2	7.82	197	109.80	35.20	2.96	1.97	0.55	2.30	3.43	10.78	-0.25	-1.52	0.13	-1.06
36	Neste	Sarrancolin	09/03/93	11:59	6.1	7.66	165	85.40	29.15	1.77	2.19	0.72	1.84	4.84	10.75	-0.60	-2.39	0.15	-1.16
37	Garonne	Labroquère	09/03/93	11:17	6.2	7.57	189	96.38	33.86	2.80	2.37	0.80	2.16	3.44	15.21	-0.58	-2.22	0.21	0.78
38	Ourse	Iraout	09/03/93	11:04	6.9	7.90	245	142.74	45.41	4.06	2.03	0.67	2.06	2.57	12.53	0.03	-0.93	0.14	0.11
39	Garonne	Chaum	09/03/93	10:49	6.1	7.64	164	82.96	29.06	1.82	2.28	0.71	1.96	1.54	13.57	-0.64	-2.45	0.15	-0.15
40	Pique	Marignac	09/03/93	10:38	5.4	7.46	167	82.96	28.40	2.22	2.22	0.69	1.76	2.52	13.14	-0.84	-2.76	0.23	-0.28
41	Garonne	St-Béat	09/03/93	10:23	5.3	7.54	149	74.42	25.87	1.57	2.10	0.64	1.34	1.34	11.71	-0.84	-2.87	0.17	0.16
42	Garonne	Pont du Roy	09/03/93	10:05	5.1	7.53	166	85.40	28.17	2.12	2.31	0.78	1.46	2.32	12.35	-0.76	-2.63	0.20	-1.03

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn

Campagne n° 7 du 13 et 14/04/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	13/04/93	09:34	9.4	7.46	273	124.44	43.68	4.14	5.77	1.16	8.70	11.21	14.46	-0.44	-1.82	0.35	0.63
2	Gimone	avant confluence Garonne	13/04/93	09:52	10.9	7.70	708	301.34	101.71	19.75	20.25	2.65	48.60	29.23	32.62	0.48	0.36	0.48	1.29
3	Garonne	amont conf. Gimone	13/04/93	10:06	10.0	7.44	276	128.10	43.71	4.12	5.75	1.05	8.80	8.30	14.35	-0.44	-1.81	0.38	0.31
4	Garonne	aval conf. Save	13/04/93	10:43	10.3	7.42	301	140.30	47.21	4.43	6.81	1.44	10.80	9.48	16.39	-0.39	-1.70	0.44	-0.74
5	Save	amont conf. Garonne	13/04/93	11:02	11.6	7.78	598	283.04	85.88	17.44	16.98	2.57	35.60	19.38	20.54	0.49	0.41	0.38	1.13
6	Garonne	Grenade	13/04/93	11:18	10.1	7.45	265	123.22	42.15	3.85	5.63	1.16	7.50	9.14	14.85	-0.46	-1.86	0.36	0.13
7	Hers mort	amont conf. Garonne	13/04/93	11:32	10.5	7.44	535	222.53	81.29	9.28	16.77	2.73	30.50	29.09	28.10	0.02	-0.80	0.65	0.53
8	Aussonnelle	Seilh	13/04/93	12:05	10.7	7.42	621	214.72	56.21	13.31	50.00	5.05	57.60	30.14	31.07	-0.18	-0.87	0.66	-0.60
9	Garonne	Lespinasse	13/04/93	11:54	9.9	7.51	261	124.93	42.31	3.75	4.71	1.28	6.60	6.92	15.00	-0.40	-1.74	0.32	0.00
10	Garonne	Pont de Bagnac, aval Toulouse	13/04/93	12:30	9.7	7.51	258	123.22	42.83	3.68	4.57	0.97	6.60	4.34	14.85	-0.40	-1.77	0.31	1.53
11	Ariège	Leorix-Falgarde	13/04/93	14:28	9.9	7.77	290	146.40	50.63	3.81	4.40	1.09	6.60	6.61	13.92	0.00	-1.02	0.20	1.31
12	Lèze	Labarthe/lèze	13/04/93	15:00	10.4	7.76	477	254.98	82.84	9.80	6.72	2.02	12.20	8.47	20.51	0.41	-0.01	0.36	1.96
13	Ariège	amont conf. Lèze	13/04/93	14:47	10.0	7.81	286	142.74	50.28	3.54	4.28	1.00	6.72	4.05	13.89	0.03	-0.99	0.18	2.23
14	Ariège	Cintegsbelle	13/04/93	16:44	10.2	7.77	780	136.64	47.17	2.99	3.50	0.94	5.17	2.47	13.42	-0.05	-1.19	0.19	1.33
15	Hers vif	amont conf. Ariège	13/04/93	16:57	10.8	7.79	442	242.78	86.43	4.22	4.60	1.15	8.50	10.73	17.82	0.44	-0.31	0.32	1.35
16	Ariège	Saverdun	13/04/93	17:20	9.2	7.59	175	82.96	28.54	2.38	2.83	0.83	3.52	3.38	11.39	-0.65	-2.29	0.18	0.40
17	Ariège	Crampagna	13/04/93	17:54	7.9	6.92	118	51.24	16.60	2.57	2.40	0.76	1.89	3.02	12.32	-1.76	-4.27	0.51	-1.49
18	Garonne	Pinseguel	13/04/93	14:12	10.6	7.67	246	122.00	41.10	4.00	2.95	0.95	4.01	3.84	14.53	-0.25	-1.39	0.22	1.13
19	Louge	Muret	13/04/93	15:18	11.2	7.85	298	143.96	49.31	4.37	5.61	1.24	8.50	7.44	15.10	0.08	-0.77	0.17	1.04
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	13/04/93	15:33	10.8	7.68	246	124.44	41.69	4.13	2.79	0.98	3.82	4.01	14.60	-0.22	-1.33	0.22	1.02
21	Arize	Carbone	14/04/93	15:56	9.8	7.63	330	169.58	56.94	6.79	4.00	2.57	6.80	8.89	18.25	-0.04	-0.90	0.32	2.09
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	13/04/93	14:04	12.0	7.71	221	111.02	37.48	3.52	2.47	0.91	3.33	3.31	13.64	-0.26	-1.41	0.18	0.89
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	14/04/93	15:45	11.5	7.84	229	118.34	39.34	3.61	2.54	0.87	3.45	3.35	14.00	-0.09	-1.10	0.14	0.22
24	Volp	Cazères	14/04/93	15:15	9.2	7.62	316	159.82	57.78	4.58	3.69	2.14	5.70	4.71	19.71	-0.07	-1.16	0.31	3.18
25	Garonne	Cazères	14/04/93	15:02	9.6	7.51	235	118.34	39.89	3.52	3.49	1.14	3.68	2.75	14.71	-0.44	-1.85	0.30	1.41
26	Salat	Roquefort/Garonne	14/04/93	16:28	9.0	7.61	235	119.56	39.06	4.02	3.07	0.88	3.00	2.22	14.07	-0.36	-1.62	0.24	1.34
27	Salat	Taurignan	14/04/93	17:00	8.2	7.58	188	95.16	31.70	3.14	2.32	0.59	2.09	1.24	12.82	-0.57	-2.08	0.20	1.34
28	Lez	St-Girons	14/04/93	17:32	8.6	7.60	218	106.14	37.94	3.00	2.65	0.81	1.81	2.80	19.71	-0.44	-1.90	0.22	0.88
29	Salat	St-Girons	14/04/93	17:20	7.8	7.55	155	80.52	25.79	2.35	2.02	0.53	2.07	1.53	9.54	-0.76	-2.50	0.19	-0.63
30	Garonne	amont conf. Salat	14/04/93	14:38	10.0	7.67	240	119.56	41.13	3.01	4.02	1.28	3.68	3.25	15.42	-0.26	-1.56	0.21	1.46
31	Noue	Mencioux	14/04/93	14:26	11.7	7.86	472	258.64	93.55	3.06	5.70	1.92	12.80	7.61	17.92	0.58	-0.19	0.29	1.21
32	Garonne	aval conf. Ger	14/04/93	14:01	9.3	7.77	240	120.78	38.21	4.05	5.68	2.36	3.29	2.49	15.89	-0.20	-1.29	0.17	2.13
33	Ger	Pointes-Inard	14/04/93	13:49	9.1	7.78	324	175.68	58.15	6.30	2.42	0.90	3.90	4.34	17.32	0.12	-0.63	0.23	1.89
34	Garonne	Montréjeu	14/04/93	12:52	7.8	7.61	187	96.38	33.45	2.32	1.93	0.62	2.11	1.74	11.78	-0.52	-2.14	0.19	1.26
35	Neste	Mazères de Neste	14/04/93	12:38	8.4	7.68	200	106.14	35.48	2.55	1.89	0.56	2.41	3.28	10.53	-0.38	-1.83	0.18	-0.07
36	Neste	Sarranoilin	14/04/93	11:59	6.8	7.48	166	85.40	29.64	1.47	1.78	0.57	1.71	2.16	10.60	-0.76	-2.78	0.23	-0.34
37	Garonne	Labroquère	14/04/93	11:11	6.8	7.44	179	89.06	32.14	2.14	1.95	0.60	1.81	1.65	13.67	-0.75	-2.64	0.26	1.60
38	Ourse	Iraout	14/04/93	10:54	6.8	7.68	227	129.32	41.94	3.25	1.46	0.54	1.73	1.75	10.21	-0.25	-1.58	0.22	0.60
39	Garonne	Chaum	14/04/93	10:34	6.5	7.43	154	74.42	26.14	1.65	1.94	0.64	1.71	1.59	12.42	-0.93	-3.01	0.22	-0.37
40	Garonne	Pique	14/04/93	10:23	5.9	7.39	178	89.06	31.88	1.57	1.99	0.61	1.75	1.69	12.21	-0.82	-2.92	0.29	0.89
41	Garonne	St-Bét	14/04/93	10:09	5.6	7.30	133	64.66	23.11	1.30	1.61	0.49	1.22	0.73	10.78	-1.18	-3.58	0.26	0.47
42	Garonne	Pont du Roy	14/04/93	09:54	5.0	7.19	124	54.90	19.85	1.09	1.72	0.75	1.26	2.40	10.39	-1.42	-4.10	0.29	-0.69

Campagne n° 8 du 9 et 10/05/1995

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	09/05/93	08:15	13.0	7.88	302	136.64	46.97	4.57	7.36	1.05	10.00	10.11	16.61	0.09	-0.68	0.15	0.61
2	Gimone	avant confluence Garonne	09/05/93	08:30	14.1	8.32	758	346.48	116.61	19.95	19.22	2.12	48.30	39.38	35.28	1.23	1.86	0.13	-0.38
3	Garonne	amont conf. Gimone	09/05/93	08:41	13.2	7.80	299	134.20	47.19	4.44	7.09	0.89	8.80	10.55	16.75	0.01	-0.85	0.18	1.44
4	Garonne	aval conf. Save	09/05/93	09:13	13.3	7.82	305	137.86	48.39	4.44	7.09	0.99	9.10	10.67	17.38	0.05	-0.78	0.18	1.06
5	Save	amont conf. Garonne	09/05/93	09:26	14.3	8.05	632	305.00	93.69	18.29	15.36	1.91	32.00	27.54	22.62	0.85	1.16	0.22	0.61
6	Garonne	Grenade	09/05/93	09:41	13.2	7.85	253	122.00	40.43	3.68	5.68	0.82	6.00	6.15	15.15	-0.04	-0.96	0.15	0.42
7	Hers mort	amont conf. Garonne	09/05/93	09:53	13.7	7.98	768	331.84	128.76	13.55	19.22	1.95	37.10	49.56	43.21	0.92	1.03	0.28	1.52
8	Aussonnelle	Seilh	09/05/93	10:24	14.2	7.82	758	265.96	77.27	17.80	55.80	4.28	62.60	40.24	44.42	0.47	0.48	0.33	1.05
9	Garonne	Lespinasse	09/05/93	10:13	13.1	7.78	255	118.83	40.59	3.58	5.90	0.75	11.30	6.00	15.29	-0.12	-1.14	0.17	-1.66
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	09/05/93	10:44	13.3	7.75	259	118.34	40.34	3.49	6.22	0.69	12.50	7.23	15.39	-0.15	-1.21	0.18	-2.70
11	Ariège	Laorix-Falgarde	09/05/93	13:09	12.6	7.83	230	108.58	38.56	3.11	4.22	0.81	6.49	6.92	13.82	-0.13	-1.21	0.14	0.48
12	Lèze	Labarthe/Mèze	09/05/93	13:41	15.6	8.00	615	318.42	98.13	18.03	9.84	1.54	24.00	20.80	28.14	0.85	1.16	0.26	0.23
13	Ariège	amont conf. Lèze	09/05/93	13:30	12.9	7.86	219	102.48	36.32	2.77	4.02	0.86	6.12	8.38	13.47	-0.15	-1.26	0.12	-0.69
14	Ariège	Cintegabelle	09/05/93	14:13	12.8	7.78	219	102.48	36.52	2.40	3.67	0.77	5.32	6.92	13.19	-0.22	-1.47	0.15	-0.39
15	Hers vif	amont conf. Ariège	09/05/93	14:25	13.8	7.97	483	253.76	97.54	4.53	7.70	1.10	16.00	17.64	21.85	0.72	0.28	0.22	2.40
16	Ariège	Saverdun	09/05/93	14:47	12.6	7.43	93	43.92	15.08	1.55	2.28	0.60	2.20	1.78	10.30	-1.28	-3.41	0.14	-1.53
17	Ariège	Crampagne	09/05/93	15:13	10.8	7.17	85	35.38	12.02	1.46	1.95	0.51	1.67	0.91	10.10	-1.75	-4.30	0.21	-2.07
18	Garonne	Pinsaguel	09/05/93	12:54	14.3	7.74	234	115.90	41.61	3.45	4.38	0.75	5.05	3.36	15.29	-0.14	-1.19	0.18	3.19
19	Louge	Muret	09/05/93	11:13	13.3	7.85	305	140.30	47.68	4.40	7.90	1.15	14.40	10.48	17.48	0.08	-0.72	0.17	-2.02
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	09/05/93	11:26	13.4	7.71	299	113.46	38.16	3.35	4.09	0.65	4.56	2.71	15.11	-0.23	-1.35	0.19	0.60
21	Arize	Carbone	10/05/93	14:36	14.0	8.39	417	228.14	71.42	9.68	5.34	1.23	12.30	8.22	25.66	0.96	1.22	0.08	-1.44
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	10/05/93	14:50	12.6	8.29	206	106.14	34.88	2.91	3.38	0.48	3.71	2.09	12.84	0.27	-0.39	0.05	-0.14
24	Volp	Cazères	10/05/93	14:07	13.4	8.15	463	258.64	85.69	8.07	4.67	1.54	11.50	4.09	27.47	0.85	0.82	0.15	-0.19
25	Garonne	Cazères	10/05/93	13:55	12.5	7.65	199	100.04	33.06	2.80	3.09	0.71	3.13	3.50	14.03	-0.41	-1.74	0.19	-1.09
26	Salat	Roquefort/Garonne	10/05/93	15:21	11.1	7.82	184	90.28	29.89	2.78	3.66	0.39	8.40	1.65	11.94	-0.34	-1.59	0.11	-2.68
27	Salat	Taurignan	10/05/93	15:49	9.6	7.77	152	78.08	25.87	2.30	1.53	0.31	1.89	1.42	10.75	-0.53	-2.01	0.11	-0.81
28	Lez	St-Girons	10/05/93	16:17	9.6	7.82	174	87.84	31.11	2.28	1.50	0.54	1.62	1.95	14.62	-0.36	-1.75	0.11	-0.06
29	Salat	St-Girons	10/05/93	16:07	9.1	7.72	131	69.54	21.45	2.06	1.38	0.38	1.65	1.87	8.56	-0.71	-2.34	0.11	-3.19
30	Garonne	amont conf. Salat	10/05/93	13:30	12.0	7.72	202	98.82	33.74	2.39	3.87	0.57	3.36	2.52	14.45	-0.34	-1.69	0.16	0.18
31	Noue	Mancioux	10/05/93	13:17	14.6	7.93	435	235.46	84.31	3.56	4.66	1.21	15.10	7.23	15.43	0.61	0.03	0.23	0.12
32	Garonne	aval conf. Ger	10/05/93	12:55	11.1	7.69	196	95.16	32.62	2.34	4.02	0.60	3.60	2.54	14.45	-0.41	-1.85	0.16	0.19
33	Ger	Pointes-Inard	10/05/93	12:43	11.4	8.00	332	179.34	58.03	7.10	2.55	0.69	3.73	2.97	21.50	0.38	-0.03	0.15	0.99
34	Garonne	Montréal	10/05/93	11:44	9.6	7.64	155	78.08	27.08	1.81	1.51	0.34	1.84	1.44	11.64	-0.64	-2.35	0.15	-0.72
35	Neste	Mazères de Neste	10/05/93	11:26	10.2	7.78	169	89.06	29.75	2.13	1.48	0.31	1.93	1.72	9.46	-0.39	-1.83	0.12	-0.20
36	Neste	Sarranoilin	10/05/93	10:51	7.9	7.57	135	67.10	24.12	1.17	1.20	0.27	1.41	0.88	9.52	-0.84	-2.93	0.15	0.26
37	Garonne	Labroquère	10/05/93	10:08	8.6	7.50	139	68.32	23.98	1.50	1.47	0.33	1.60	1.00	10.75	-0.89	-2.91	0.18	-0.45
38	Ourse	Iraout	10/05/93	09:55	9.3	7.83	219	123.22	40.58	3.10	1.51	0.39	1.90	1.50	9.89	-0.10	-1.23	0.15	1.15
39	Garonne	Cham	10/05/93	09:39	8.0	7.45	129	63.44	22.07	1.20	1.29	0.30	1.36	0.67	10.20	-1.02	-3.23	0.19	-1.48
40	Pique	Marignac	10/05/93	09:27	7.6	7.42	130	63.44	22.70	1.06	1.29	0.31	1.37	0.93	10.55	-1.04	-3.35	0.20	-1.13
41	Garonne	St-Béat	10/05/93	09:11	7.2	7.39	120	59.78	21.08	1.07	1.11	0.28	1.16	0.31	9.73	-1.13	-3.50	0.20	-1.03
42	Garonne	Pont du Roy	10/05/93	08:54	6.9	7.35	109	52.46	18.11	0.93	1.17	0.35	1.13	0.75	9.04	-1.29	-3.83	0.19	-2.46

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne n° 9 du 6 et 7/06/1993

430

*Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne,
de ses sources à la confluence du Tarn*

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	06/06/93	08:16	17.4	7.86	249	107.85	38.72	3.50	7.57	1.08	12.80	6.30	17.31	-0.04	-0.91	0.13	-0.27
2	Gimone	avant confluence Garonne	06/06/93	08:32	18.0	8.17	690	300.12	104.68	18.92	18.35	2.25	46.40	34.36	33.73	1.04	1.56	0.17	1.05
3	Garonne	amont conf. Gimone	06/06/93	08:44	17.1	7.77	253	104.92	38.42	3.44	7.66	0.89	13.00	7.53	16.96	-0.15	-1.13	0.16	-0.09
4	Garonne	aval conf. Save	06/06/93	09:16	17.3	7.71	258	105.41	38.28	3.28	7.86	1.04	12.70	6.76	16.61	-0.20	-1.26	0.18	0.16
5	Save	amont conf. Garonne	06/06/93	09:29	18.5	8.06	595	272.30	86.20	17.00	16.15	2.49	35.60	23.00	22.86	0.84	1.20	0.20	1.24
6	Garonne	Grenade	06/06/93	09:44	17.4	7.88	225	93.21	33.44	2.81	6.73	0.95	10.50	6.30	15.29	-0.14	-1.14	0.11	-0.62
7	Hers mort	amont conf. Garonne	06/06/93	09:56	18.5	8.03	745	311.34	121.19	13.04	20.39	2.53	42.20	43.77	42.14	0.99	1.23	0.25	1.29
8	Aussonnelle	Seilh	06/06/93	10:33	19.4	7.92	759	262.06	74.66	16.95	61.10	4.52	74.70	31.37	42.82	0.62	0.84	0.27	0.62
9	Garonne	Lespinasse	06/06/93	10:22	17.0	7.85	219	92.72	33.17	2.73	6.22	1.17	11.60	5.61	15.63	-0.18	-1.23	0.12	-1.90
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	06/06/93	10:52	16.4	7.72	217	90.04	32.49	2.66	6.37	1.00	11.60	5.51	15.11	-0.33	-1.56	0.15	-1.49
11	Ariège	Lauroix-Falgarde	06/06/93	12:47	16.9	8.37	196	83.69	30.99	2.84	3.91	0.95	5.96	5.26	13.72	0.26	-0.31	0.03	1.70
12	Lèze	Labarthe/lèze	06/06/93	13:17	18.4	8.12	674	334.28	104.22	19.44	13.60	2.84	30.90	24.45	31.02	1.05	1.59	0.21	0.52
13	Ariège	amont conf. Lèze	06/06/93	13:05	16.9	8.43	186	79.79	28.63	2.57	3.82	1.08	5.59	6.65	13.37	0.27	-0.30	0.03	-0.48
14	Ariège	Cintegabelle	06/06/93	13:43	15.2	8.07	172	71.49	26.57	2.12	3.27	0.77	4.35	6.92	13.05	-0.18	-1.27	0.05	-0.47
15	Hers vif	amont conf. Ariège	06/06/93	13:57	18.8	8.03	500	234.97	89.54	5.01	10.12	1.85	19.20	23.54	26.01	0.78	0.54	0.19	0.53
16	Ariège	Severdun	06/06/93	14:17	14.4	7.84	109	42.94	15.38	1.61	2.28	0.67	2.18	2.48	11.30	-0.85	-2.51	0.06	-1.20
17	Ariège	Crampagne	06/06/93	14:45	14.5	7.60	91	35.38	12.54	1.63	2.09	1.12	1.74	1.42	11.44	-1.25	-3.22	0.08	-0.61
18	Garonne	Pinsaguel	06/06/93	12:31	17.3	7.82	200	91.01	32.05	2.44	4.25	1.18	4.68	3.99	14.97	-0.22	-1.35	0.12	0.39
19	Louge	Muret	06/06/93	11:18	17.5	7.87	241	106.38	40.25	3.06	6.05	1.26	10.20	8.23	16.33	-0.02	-0.94	0.13	1.05
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	06/06/93	11:30	16.3	7.78	193	89.79	30.96	2.37	3.93	0.74	4.06	2.21	14.48	-0.29	-1.50	0.13	0.17
21	Arize	Carbone	07/06/93	14:45	20.0	8.14	446	226.92	71.16	11.54	6.44	2.05	14.40	11.10	27.65	0.80	1.05	0.14	-0.51
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	07/06/93	14:56	18.6	7.95	190	86.38	30.04	2.20	4.00	0.86	3.68	2.77	14.55	-0.12	-1.15	0.09	0.24
24	Volp	Cezères	07/06/93	14:18	18.8	8.07	480	249.12	85.93	8.41	5.18	2.40	11.60	5.59	30.27	0.83	0.88	0.18	1.37
25	Garonne	Cezères	07/06/93	14:07	15.0	7.66	175	81.01	28.73	2.02	3.02	1.04	2.81	2.36	12.70	-0.50	-1.97	0.16	1.42
26	Salat	Roquefort/Garonne	07/06/93	15:28	16.0	7.87	190	85.64	29.41	2.58	4.66	0.96	8.90	2.24	12.60	-0.25	-1.36	0.10	-1.21
27	Salat	Taurignan	07/06/93	15:58	14.9	7.95	156	74.18	25.38	2.11	2.32	0.79	2.33	1.90	11.64	-0.30	-1.50	0.07	0.22
28	Lez	St-Girons	07/06/93	16:27	14.5	7.96	173	80.52	29.60	1.98	1.55	0.65	1.26	1.37	14.45	-0.20	-1.41	0.08	1.38
29	Salat	St-Girons	07/06/93	16:14	13.9	8.00	130	64.90	21.23	1.71	1.70	0.53	1.30	1.71	7.76	-0.39	-1.71	0.06	-0.07
30	Garonne	amont conf. Salat	07/06/93	13:46	14.3	7.68	169	76.86	27.58	1.75	3.00	0.64	2.83	2.15	12.25	-0.53	-2.08	0.14	1.17
31	Noüe	Mancioux	07/06/93	13:31	20.8	8.15	328	213.01	77.11	3.31	4.17	1.60	13.90	8.30	14.24	0.84	0.57	0.13	0.35
32	Garonne	aval conf. Ger	07/06/93	13:08	14.4	7.66	163	73.44	26.04	1.71	3.31	0.91	3.09	2.75	12.50	-0.59	-2.19	0.14	0.38
33	Ger	Pointes-Inard	07/06/93	12:56	17.1	8.26	359	175.68	60.28	8.17	3.14	1.34	4.38	4.76	29.54	0.71	0.76	0.08	2.17
34	Garonne	Montréjeau	07/06/93	11:26	11.9	7.66	135	64.90	22.98	1.38	1.21	0.47	1.41	1.96	9.73	-0.72	-2.54	0.12	-0.48
35	Neste	Mazères de Neste	07/06/93	11:10	12.0	7.70	140	68.08	24.41	1.48	1.17	0.62	1.55	2.03	10.00	-0.64	-2.36	0.12	0.22
36	Neste	Sarrancolin	07/06/93	10:34	9.9	7.61	120	55.88	20.86	0.96	0.92	0.37	1.05	1.29	10.25	-0.90	-3.05	0.12	-0.44
37	Garonne	Labroquère	07/06/93	09:48	11.3	7.61	132	63.20	22.21	1.36	1.28	0.63	1.43	2.36	10.05	-0.81	-2.71	0.13	-1.22
38	Ourse	Iraout	07/06/93	09:34	12.5	7.95	226	125.42	40.77	3.23	1.82	0.71	1.97	1.84	11.30	0.07	-0.82	0.12	0.46
39	Garonne	Chaum	07/06/93	09:18	9.7	7.59	117	57.10	20.73	1.04	1.07	0.39	1.16	0.80	8.45	-0.92	-3.04	0.12	0.83
40	Pique	Marignac	07/06/93	09:02	10.7	7.58	139	66.61	24.26	1.09	1.47	0.45	1.40	0.93	10.89	-0.79	-2.81	0.15	0.10
41	Garonne	St-Béat	07/06/93	08:49	9.0	7.54	107	52.95	18.56	0.90	0.90	0.26	0.84	0.17	7.71	-1.06	-3.34	0.13	-0.42
42	Garonne	Pont du Roy	07/06/93	08:33	8.4	7.54	108	54.41	18.61	0.87	0.88	0.35	0.93	0.74	7.65	-1.05	-3.36	0.13	-1.98

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne n° 10 du 6 et 7/07/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	06/07/93	08:19	18.0	7.62	309	116.63	43.79	4.80	11.32	3.20	21.20	15.11	21.22	-0.20	-1.13	0.25	-0.66
2	Gimone	avant confluence Garonne	06/07/93	08:35	17.8	7.72	387	141.28	55.00	7.24	11.42	5.71	30.40	19.18	23.81	0.06	-0.53	0.24	0.06
3	Garonne	amont conf. Gimone	06/07/93	08:46	18.4	7.61	291	109.31	41.93	4.47	11.10	4.14	18.90	15.36	20.00	-0.24	-1.23	0.24	1.02
4	Garonne	aval conf. Save	06/07/93	09:21	17.6	7.57	295	117.36	44.35	4.22	9.69	3.02	16.70	8.85	19.72	-0.24	-1.28	0.28	1.90
5	Save	amont conf. Garonne	06/07/93	09:34	18.7	8.00	434	193.98	65.51	9.37	12.03	2.64	25.50	13.65	18.32	0.55	0.49	0.17	1.48
6	Garonne	Grenade	06/07/93	09:38	17.8	7.60	248	102.24	31.52	6.41	8.34	6.33	12.30	9.11	17.20	-0.40	-1.28	0.23	1.93
7	Hers mort	amont conf. Garonne	06/07/93	10:12	17.3	7.66	309	126.64	49.52	4.00	7.46	4.02	18.80	17.87	16.79	-0.08	-1.04	0.25	-0.25
8	Aussonnelle	Seilh	06/07/93	10:50	17.9	7.60	353	118.10	42.01	3.45	26.00	1.99	31.90	16.18	22.06	-0.23	-1.33	0.27	0.09
9	Garonne	Lespinasse	06/07/93	10:35	17.8	7.68	246	102.24	37.35	3.36	7.55	1.64	14.00	5.69	18.50	-0.25	-1.33	0.19	-0.75
10	Garonne	Pont de Blegnac, aval Toulouse	06/07/93	11:18	17.7	7.76	254	107.12	38.44	3.67	7.62	1.44	14.40	8.06	17.59	-0.14	-1.08	0.17	-1.36
11	Ariège	Laoroix-Falgarde	06/07/93	14:16	18.5	7.89	274	114.68	42.29	4.01	6.89	2.08	10.07	15.48	18.18	0.06	-0.67	0.13	0.03
12	Lèze	Lebarthe/Lèze	06/07/93	14:48	18.3	7.80	420	173.48	62.57	9.21	14.24	5.35	27.80	26.61	23.77	0.28	-0.04	0.24	0.95
13	Ariège	amont conf. Lèze	06/07/93	14:36	19.1	7.93	253	105.90	39.12	3.74	6.04	1.61	6.82	10.22	17.90	0.05	-0.69	0.11	2.01
14	Ariège	Cintegabelle	06/07/93	15:21	18.6	8.25	220	92.23	34.82	2.95	5.10	1.45	6.64	10.81	17.66	0.25	-0.34	0.05	-0.04
15	Hers vif	amont conf. Ariège	06/07/93	15:42	21.0	8.16	500	223.75	86.00	5.21	13.75	2.17	23.40	22.38	27.88	0.90	0.84	0.14	1.03
16	Ariège	Saverdun	06/07/93	16:09	18.1	8.02	160	64.17	23.68	2.41	3.50	1.08	3.57	5.51	15.84	-0.28	-1.33	0.06	-0.37
17	Ariège	Crampagna	06/07/93	16:39	16.6	7.83	135	52.46	18.86	2.42	3.03	0.90	2.40	2.73	15.77	-0.67	-2.02	0.07	-0.19
18	Garonne	Pinsaguel	06/07/93	13:55	17.8	7.80	211	97.11	34.08	2.91	4.56	1.26	5.00	6.32	15.53	-0.18	-1.22	0.14	0.30
19	Louge	Muret	06/07/93	11:57	17.7	7.86	252	103.46	37.93	3.49	6.79	2.55	10.90	11.03	17.73	-0.06	-0.94	0.13	-0.20
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	06/07/93	12:13	17.1	7.86	199	97.36	33.93	2.76	4.07	1.00	4.42	3.50	14.55	-0.13	-1.15	0.12	1.05
21	Arize	Carbone	07/07/93	16:27	19.8	8.20	426	208.13	67.40	11.63	5.85	2.53	12.60	8.50	31.58	0.79	1.07	0.12	0.89
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	07/07/93	16:43	19.9	8.12	215	99.06	34.71	2.77	5.13	1.42	5.31	4.73	16.44	0.18	-0.50	0.07	0.64
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	07/07/93	15:50	19.9	8.07	454	228.14	80.76	8.39	4.65	2.52	11.30	5.98	35.01	0.78	0.82	0.17	1.11
24	Volp	Cazères	07/07/93	15:35	17.1	7.72	193	90.52	31.49	2.78	3.56	1.02	3.53	3.97	14.20	-0.33	-1.51	0.16	1.00
25	Garonne	Cazères	07/07/93	17:16	16.9	7.94	193	85.89	29.28	2.66	6.00	1.05	10.70	2.73	13.05	-0.17	-1.17	0.09	-1.47
26	Salat	Roquefort/Garonne	07/07/93	17:48	15.9	8.00	159	76.86	26.57	2.36	1.85	0.62	1.88	2.24	11.50	-0.20	-1.27	0.07	0.89
27	Salat	Tauignan	07/07/93	18:17	15.2	8.07	171	79.30	29.95	2.01	1.65	0.62	1.43	1.75	15.98	-0.09	-1.16	0.06	1.39
28	Lez	St-Girons	07/07/93	18:06	15.0	8.04	149	72.71	23.69	2.16	2.58	0.46	3.03	1.72	9.30	-0.25	-1.35	0.06	-0.50
29	Salat	St-Girons	07/07/93	15:07	17.1	7.87	212	89.79	33.10	2.29	5.63	1.10	4.19	3.74	18.60	-0.17	-1.29	0.11	1.87
30	Garonne	amont conf. Salat	07/07/93	14:50	20.9	8.25	372	184.22	69.64	2.98	3.89	2.09	14.10	14.60	15.04	0.84	0.56	0.09	-0.30
31	Noue	Manoloux	07/07/93	14:23	16.1	7.72	203	87.11	32.10	2.41	6.85	1.87	4.74	5.50	21.18	-0.36	-1.65	0.15	1.33
32	Garonne	aval conf. Ger	07/07/93	14:09	17.2	8.44	313	159.58	54.39	7.85	2.76	1.17	3.74	6.09	29.25	0.80	0.98	0.05	1.24
33	Ger	Pointes-Inard	07/07/93	12:44	13.7	7.96	153	73.69	25.40	2.10	1.44	0.55	1.88	3.28	11.69	-0.31	-1.54	0.07	-1.33
34	Garonne	Montréjeu	07/07/93	12:22	14.7	8.06	198	102.48	34.23	2.82	1.57	0.52	2.40	3.45	11.79	0.06	-0.79	0.08	-0.67
35	Neste	Mazères de Neste	07/07/93	11:39	11.5	7.83	144	69.05	25.14	1.28	1.31	0.52	1.52	3.28	12.25	-0.50	-2.17	0.09	-1.83
36	Neste	Sarrancolin	07/07/93	10:54	11.7	7.70	141	66.12	23.73	1.65	1.43	0.43	1.51	2.34	11.94	-0.67	-2.37	0.11	-0.71
37	Garonne	Labroquère	07/07/93	10:34	12.3	8.15	236	128.83	42.97	3.35	1.63	0.53	1.95	2.58	12.44	0.29	-0.38	0.08	0.77
38	Ourse	Iraout	07/07/93	10:18	11.3	7.76	143	68.32	24.43	1.47	1.62	0.46	1.74	1.86	11.44	-0.59	-2.28	0.10	-0.52
39	Garonne	Chaum	07/07/93	10:05	10.7	7.63	145	69.05	25.33	1.17	1.60	0.45	1.74	2.26	10.89	-0.71	-2.64	0.14	-0.09
40	Pique	Marignac	07/07/93	09:48	10.6	7.68	110	51.97	18.96	1.14	1.12	0.35	1.16	1.24	9.68	-0.89	-2.89	0.09	-0.39
41	Garonne	St-Béat	07/07/93	09:27	8.9	7.65	120	57.83	20.88	0.95	1.10	0.39	1.18	1.85	10.10	-0.87	-2.99	0.11	-1.83
42	Garonne	Pont du Roy	07/07/93																

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne n° 11 du 4 et 5/08/1993

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HC03 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	ls	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	04/08/1993	06:32	21.8	7.96	365	139.08	51.00	5.53	15.52	2.76	23.20	14.21	27.03	0.32	-0.06	0.14	0.27
2	Gimone	avant confluence Garonne	04/08/1993	06:50	19.7	7.99	462	202.52	72.39	9.33	10.58	2.07	28.50	20.54	18.78	0.61	0.58	0.18	0.51
3	Garonne	amont conf. Gimone	04/08/1993	07:00	21.2	8.14	363	134.20	50.16	5.31	15.52	2.19	22.20	14.93	26.65	0.47	0.21	0.09	0.71
4	Garonne	aval conf. Save	04/08/1993	07:34	21.8	7.80	359	132.74	48.84	5.14	16.61	2.42	22.80	14.14	27.14	0.13	-0.46	0.20	0.46
5	Save	amont conf. Garonne	04/08/1993	07:46	19.9	7.80	509	211.79	68.81	11.99	19.87	2.77	34.60	16.75	24.52	0.42	0.32	0.30	1.24
6	Garonne	Grenade	04/08/1993	08:02	22.2	7.84	347	126.39	46.43	4.66	17.02	2.20	37.20	13.07	26.98	0.13	-0.47	0.17	-5.52
7	Hers mort	amont conf. Garonne	04/08/1993	08:21	21.3	7.92	671	260.35	95.10	13.55	28.74	4.17	56.50	29.12	45.89	0.75	0.91	0.28	-0.50
8	Aussonnelle	Seilh	04/08/1993	08:55	20.4	7.91	743	263.52	77.47	16.46	63.60	6.22	80.30	28.05	47.33	0.64	0.86	0.28	0.79
9	Garonne	Lespinasse	04/08/1993	08:42	21.1	7.61	334	123.71	44.35	4.46	16.00	2.17	27.90	15.18	26.37	-0.14	-1.02	0.28	-4.10
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	04/08/1993	09:20	21.7	7.82	306	118.10	43.19	4.19	12.08	1.58	25.00	12.47	23.51	0.05	-0.64	0.17	-4.27
11	Ariège	Laorox-Falgerde	04/08/1993	10:21	21.8	8.14	286	117.61	44.25	4.52	7.15	1.62	9.50	12.57	21.08	0.38	0.03	0.08	1.71
12	Lèze	Labarthe/lèze	04/08/1993	10:51	20.8	7.84	579	257.42	84.73	16.68	14.91	2.57	37.20	17.71	38.21	0.62	0.79	0.33	-0.29
13	Ariège	amont conf. Lèze	04/08/1993	10:43	22.0	8.31	289	117.61	44.48	4.38	7.35	1.69	9.84	13.07	19.88	0.55	0.36	0.05	2.03
14	Ariège	Cintegabelle	04/08/1993	12:02	21.4	8.26	247	99.55	38.03	3.43	5.63	1.83	7.71	10.39	18.40	0.37	-0.05	0.05	1.53
15	Hers vif	amont conf. Ariège	04/08/1993	12:15	23.3	8.19	457	197.64	76.86	5.65	11.76	1.87	26.50	24.20	24.92	0.87	0.88	0.12	-0.39
16	Ariège	Saverdun	04/08/1993	13:22	20.7	8.31	196	80.28	29.22	2.94	4.21	1.80	5.23	6.40	17.86	0.21	-0.32	0.04	-0.24
17	Ariège	Crampagne	04/08/1993	13:45	18.6	8.14	157	60.76	22.27	2.78	3.64	1.07	3.46	2.61	18.66	-0.21	-1.09	0.04	0.06
18	Garonne	Pinsaguel	04/08/1993	10:05	22.0	7.88	260	111.02	39.34	3.61	8.28	1.56	9.10	4.01	22.50	0.06	-0.65	0.14	0.99
19	Louge	Muret	04/08/1993	11:06	21.1	8.18	310	127.61	46.27	4.27	11.28	1.85	20.00	8.14	25.05	0.46	0.13	0.08	-1.75
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	04/08/1993	11:18	21.5	7.89	263	112.48	40.09	3.64	7.95	1.49	8.95	4.71	20.94	0.08	-0.63	0.14	1.48
21	Arize	Carbone	05/08/1993	13:28	23.5	7.96	433	202.03	64.94	12.88	7.88	2.39	21.40	6.73	29.59	0.59	0.75	0.21	0.72
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	05/08/1993	13:40	23.3	7.82	250	105.90	38.18	3.34	7.75	1.24	8.04	3.29	21.12	-0.01	-0.80	0.15	1.93
24	Volp	Cazères	05/08/1993	13:02	21.5	7.86	444	212.52	76.60	8.24	5.39	2.79	18.60	7.63	35.65	0.55	0.39	0.27	-0.72
25	Garonne	Cazères	05/08/1993	11:57	21.1	8.03	262	113.46	41.27	3.41	7.92	1.25	7.95	3.53	23.73	0.22	-0.38	0.10	1.58
26	Salat	Roquefort/Garonne	05/08/1993	14:08	21.7	8.03	238	109.80	39.13	3.98	4.26	1.08	13.20	2.36	19.88	0.20	-0.33	0.10	-2.64
27	Salat	Taurignan	05/08/1993	14:36	20.8	8.11	204	95.89	34.52	3.13	2.47	0.87	2.73	1.87	18.32	0.16	-0.46	0.07	1.23
28	Lez	St-Girons	05/08/1993	14:55	19.4	7.99	250	109.31	43.59	3.22	5.07	1.18	2.59	1.33	31.30	0.16	-0.57	0.10	3.05
29	Salat	St-Girons	05/08/1993	14:48	19.3	8.09	173	85.40	29.55	2.74	1.89	0.74	2.40	2.51	11.47	0.02	-0.76	0.06	1.57
30	Garonne	amont conf. Salat	05/08/1993	11:32	18.8	7.77	272	110.78	41.43	3.07	9.47	1.19	7.61	2.08	25.97	-0.07	-1.05	0.17	3.03
31	Noüe	Mancieux	05/08/1993	11:21	21.6	7.83	299	159.33	55.73	2.66	3.09	1.25	13.70	2.65	10.56	0.30	-0.46	0.22	-1.50
32	Garonne	aval conf. Ger	05/08/1993	11:01	17.3	7.57	251	108.34	38.77	2.98	8.50	1.25	6.44	3.43	21.64	-0.33	-1.56	0.26	2.41
33	Ger	Pointes-Inard	05/08/1993	10:52	18.1	8.04	376	172.26	62.42	9.06	3.55	1.09	4.95	4.09	39.13	0.51	0.41	0.14	2.65
34	Garonne	Montréjeau	05/08/1993	10:22	15.0	7.75	172	81.98	29.52	2.27	1.97	0.80	2.73	3.38	11.58	-0.39	-1.72	0.13	1.46
35	Neste	Mazères de Neste	05/08/1993	10:12	16.2	7.83	170	83.69	28.97	2.12	1.73	0.59	2.76	3.26	11.28	-0.30	-1.53	0.11	-0.78
36	Neste	Sarreoolin	05/08/1993	09:35	12.0	7.56	110	51.73	18.87	0.95	1.16	0.48	1.76	1.72	10.64	-1.00	-3.16	0.12	-2.92
37	Garonne	Labroquère	05/08/1993	08:52	13.8	7.60	162	74.66	27.49	1.80	1.91	0.72	2.61	2.21	14.90	-0.63	-2.28	0.16	-0.68
38	Ourse	Iraout	05/08/1993	08:39	14.6	8.05	274	146.89	49.65	3.92	2.11	0.78	2.89	3.03	16.50	0.34	-0.25	0.11	0.54
39	Garonne	Chaum	05/08/1993	08:25	12.8	7.62	143	65.39	23.96	1.51	1.86	0.68	2.50	2.50	12.90	-0.73	-2.52	0.14	-1.17
40	Pique	Maignac	05/08/1993	08:16	12.0	7.48	124	55.63	21.25	0.97	1.51	0.50	2.18	1.87	12.43	-1.00	-3.21	0.16	-1.78
41	Garonne	St-Béat	05/08/1993	08:05	13.0	7.47	133	62.46	22.87	1.20	1.63	0.49	1.93	1.67	12.50	-0.92	-2.96	0.18	-1.59
42	Garonne	Pont du Roy	05/08/1993	07:51	11.3	7.65	133	64.17	23.55	1.03	1.32	0.49	1.90	1.96	10.89	-0.74	-2.71	0.12	-1.27

Campagne n° 12 du 7 et 8/09/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
1	Garonne	aval conf. Gimone (st-Aignan)	07/09/93	09:09	17.0	7.82	363	136.15	49.50	5.47	16.00	2.12	20.10	14.88	29.01	0.09	-0.56	0.18	0.39
2	Gimone	avant confluence Garonne	07/09/93	09:27	15.4	7.94	576	245.46	85.22	13.95	14.35	2.35	35.10	25.12	28.85	0.63	0.67	0.24	0.56
3	Garonne	amont conf. Gimone	07/09/93	09:38	17.3	7.74	361	129.08	47.85	5.01	16.74	2.21	22.20	13.27	28.24	-0.02	-0.80	0.21	0.59
4	Garonne	aval conf. Save	07/09/93	10:13	17.6	7.69	364	130.54	48.05	4.89	17.24	2.23	22.40	14.57	28.13	-0.05	-0.88	0.24	0.21
5	Save	amont conf. Garonne	07/09/93	10:25	16.4	7.49	449	186.90	60.34	7.89	18.92	3.14	27.50	16.54	23.80	-0.03	-0.75	0.53	-0.42
6	Garonne	Grenade	07/09/93	10:53	18.3	7.61	350	124.93	44.60	4.55	17.84	2.20	20.80	13.09	28.61	-0.17	-1.11	0.28	-0.13
7	Hers mort	amont conf. Garonne	07/09/93	11:06	16.6	7.93	672	280.60	99.07	13.33	25.86	3.94	41.50	30.09	44.10	0.74	0.82	0.28	0.67
8	Aussonnelle	Seilh	07/09/93	11:40	16.8	7.82	753	267.91	73.15	15.92	62.30	6.64	67.60	26.76	50.20	0.49	0.52	0.34	0.43
9	Garonne	Lespinasse	07/09/93	11:30	18.5	7.55	338	119.07	42.11	4.36	17.51	2.09	21.60	15.05	27.89	-0.27	-1.30	0.30	-1.68
10	Garonne	Pont de Blagnac, aval Toulouse	07/09/93	12:07	18.4	7.79	301	113.22	40.78	3.95	13.27	1.59	16.50	14.03	25.48	-0.06	-0.92	0.17	-1.70
11	Ariège	Laorix-Falgarde	07/09/93	14:12	17.4	8.39	325	113.22	40.00	3.94	5.99	1.22	7.41	9.86	20.00	0.51	0.22	0.04	-0.55
12	Lèze	Lebarthe/Itze	07/09/93	15:00	16.6	8.04	600	275.23	86.85	17.58	17.96	3.18	32.10	19.59	40.84	0.79	1.10	0.21	0.48
13	Ariège	amont conf. Lèze	07/09/93	15:13	18.3	8.62	257	110.53	39.41	3.81	5.90	1.30	7.15	8.40	19.27	0.72	0.65	0.02	0.41
14	Ariège	Cintegabelle	07/09/93	16:52	17.7	8.47	237	107.12	37.33	3.37	5.06	1.20	5.87	12.19	18.36	0.54	0.25	0.03	-2.31
15	Hers vif	amont conf. Ariège	07/09/93	16:07	17.4	8.03	380	188.61	64.07	5.14	8.03	1.32	11.60	15.51	20.73	0.55	0.22	0.15	-1.24
16	Ariège	Saverdun	07/09/93	16:36	17.1	8.71	165	70.27	24.62	2.57	3.61	1.22	3.39	5.46	18.68	0.42	0.06	0.01	-2.97
17	Ariège	Crampagna	07/09/93	17:16	15.6	8.39	138	55.14	19.31	2.39	3.09	0.77	2.36	2.41	17.66	-0.10	-0.93	0.02	-2.39
18	Garonne	Pinssaguel	07/09/93	13:45	18.5	8.22	304	123.46	42.31	3.75	9.40	1.47	8.65	4.86	25.75	0.41	0.00	0.07	-0.28
19	Louge	Muret	07/09/93	14:33	17.3	8.12	413	130.54	46.19	3.83	12.53	1.77	10.90	7.92	31.21	0.35	-0.17	0.09	-0.23
20	Garonne	Muret, amont conf. Louge	07/09/93	14:45	18.1	8.18	265	122.00	42.05	3.67	8.72	1.47	8.02	5.09	23.26	0.36	-0.11	0.07	0.46
21	Arize	Carbone	08/09/93	17:20	19.0	8.32	400	195.44	57.87	12.79	7.66	2.72	13.40	16.03	29.76	0.81	1.20	0.08	-1.39
22	Garonne	Carbone, amont conf. Arize																	
23	Garonne	Carbone, amont conf. Arize	08/09/93	17:49	18.8	7.90	277	122.98	42.28	3.54	9.38	1.62	7.98	4.90	25.66	0.10	-0.64	0.14	-0.08
24	Volp	Cazères	08/09/93	16:45	18.4	7.90	460	228.38	80.30	7.94	5.22	2.63	10.50	7.73	32.58	0.60	0.41	0.25	1.20
25	Garonne	Cazères	08/09/93	16:39	19.1	7.70	306	128.10	44.97	3.60	11.29	1.76	10.22	4.42	28.02	-0.05	-0.96	0.23	0.57
26	Salat	Roquefort/Garonne	08/09/93	18:41	18.4	8.02	273	126.64	41.39	4.31	7.02	1.42	7.90	2.64	23.10	0.22	-0.32	0.11	-1.11
27	Salat	Taurignan	08/09/93	19:28	18.9	8.07	252	116.14	38.13	3.86	6.21	1.37	4.92	2.10	22.36	0.21	-0.34	0.09	-0.33
28	Lez	St-Girons	08/09/93	19:55	16.3	7.96	243	111.51	41.99	3.22	3.25	0.92	1.57	1.24	29.07	0.09	-0.74	0.11	0.58
29	Salat	St-Girons	08/09/93	19:55	17.2	8.28	200	102.24	31.95	3.23	3.74	1.20	2.85	1.91	16.17	0.27	-0.24	0.05	-1.73
30	Garonne	amont conf. Salat	08/09/93	16:15	17.3	7.82	274	116.63	42.58	2.86	8.41	1.52	5.64	4.17	27.75	-0.02	-1.00	0.16	0.93
31	Noue	Mancioux	08/09/93	15:40	18.4	7.83	315	178.61	60.42	2.98	3.46	1.69	7.20	2.44	13.70	0.33	-0.42	0.24	-0.02
32	Garonne	aval conf. Ger	08/09/93	15:20	16.8	7.53	276	122.00	43.99	3.22	7.79	1.32	6.21	5.05	27.35	-0.28	-1.49	0.32	0.13
33	Ger	Pointes-Inard	08/09/93	15:10	16.8	8.15	373	173.73	62.29	9.14	3.56	1.32	4.36	5.23	44.17	0.60	0.57	0.11	0.98
34	Garonne	Montréal	08/09/93	14:10	14.9	7.94	177	94.92	32.48	2.18	2.18	0.80	2.00	3.61	14.72	-0.11	-1.22	0.10	-1.61
35	Neste	Mazères de Neste	08/09/93	13:45	16.2	8.07	185	96.87	32.08	2.18	1.86	0.63	1.95	2.43	12.17	0.04	-0.89	0.07	-1.56
36	Neste	Sarrancolin	08/09/93	13:02	12.8	7.72	144	69.78	24.59	1.13	1.49	0.43	1.21	1.44	13.15	-0.60	-2.38	0.12	-2.80
37	Garonne	Labroquère	08/09/93	11:53	13.1	7.69	207	101.02	34.82	2.46	2.49	0.84	2.22	2.48	18.07	-0.33	-1.67	0.18	-1.58
38	Orse	Iraout	08/09/93	11:35	14.4	8.02	289	160.06	52.48	4.15	2.19	1.01	2.11	2.75	18.17	0.36	-0.21	0.13	-0.40
39	Garonne	Chaum	08/09/93	11:00	12.0	7.67	173	85.40	29.45	1.83	2.38	0.73	2.05	3.22	15.04	-0.50	-2.08	0.16	-2.30
40	Pique	Marignac	08/09/93	10:50	12.0	7.55	184	88.08	31.60	1.50	2.50	0.80	2.00	4.17	15.66	-0.58	-2.35	0.21	-1.75
41	Garonne	St-Béat	08/09/93	10:35	11.1	7.45	148	73.44	25.20	1.49	1.95	0.59	1.29	2.44	13.26	-0.86	-2.83	0.22	-2.53
42	Garonne	Pont du Roy	08/09/93	10:15	9.8	7.41	160	80.52	27.52	1.30	1.71	0.48	1.17	1.91	12.93	-0.84	-2.91	0.26	-2.71

Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn

Annexe 8 : tableaux des valeurs physico-chimiques des campagnes du cycle 1993 sur le bassin de la Garonne

Campagne dans le Val d'Aran du 10/09/1993

Station numéro	Rivière étudiée nom	Station position	Date jj/mm/aa	heure hh:mm	t degC	pH labo.	C uS/cm	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	dpH	Is	pCO2 %	B.I.
43	Garonne	Pont du roy	10/09/93	13:59	10.8	7.65	143	72.71	24.29	1.31	2.03	0.50	1.17	1.39	11.08	-0.68	-2.52	0.14	-1.99
44	Toran	exutoire	10/09/93	13:42	13.0	7.72	131	51.00	17.94	1.76	3.74	1.86	1.57	2.07	18.03	-0.86	-2.58	0.08	-1.55
45	Joou	Es Bordes	10/09/93	13:08	12.2	7.86	188	100.04	34.78	1.27	1.48	0.49	0.65	0.56	14.64	-0.18	-1.65	0.12	-1.44
46	Barrados	exutoire	10/09/93	11:59	10.2	7.82	192	99.06	36.16	0.92	1.20	0.56	0.58	0.30	16.65	-0.24	-1.96	0.12	-1.16
47	Garonne	Pont d'Arros	10/09/93	12:40	11.6	7.87	231	122.98	41.76	2.14	2.80	0.65	2.25	2.27	14.97	-0.02	-1.20	0.14	-0.61
48	Nere	Viella	10/09/93	11:43	9.3	7.78	169	86.38	29.54	1.53	2.23	0.31	1.40	0.43	14.42	-0.43	-2.05	0.12	-1.69
49	Valarties	exutoire	10/09/93	11:24	9.3	7.76	153	83.20	26.01	1.73	2.19	0.53	0.71	0.00	10.12	-0.51	-2.11	0.12	-1.46
50	Unyola	Salardu	10/09/93	11:13	8.3	7.81	227	117.36	43.23	1.98	0.95	0.52	0.66	0.79	20.63	-0.14	-1.54	0.15	-0.21
51	Garonne	Salardu	10/09/93	11:06	8.9	7.56	177	92.48	30.19	1.62	3.30	0.73	3.68	5.40	9.21	-0.61	-2.41	0.21	-2.64
52	Garonne	Source	10/09/93	10:41	8.5	7.37	277	139.32	49.12	1.81	3.01	0.25	5.80	2.60	13.41	-0.45	-2.25	0.48	-0.57

LISTES DES GRAPHIQUES, FIGURES, TABLEAUX ET CARTES DES ANNEXES

GRAPHIQUES

Graphique 1. Exemples de courbes d'étalonnages utilisées pour le magnésium, le sodium et le potassium (campagne de chimie sur le bassin de la Garonne durant le cycle 1993)	384
Graphique 2. Exemples de courbes d'étalonnages utilisées pour les chlorures, les nitrates, les sulfates et la silice (campagne de chimie sur le bassin de la Garonne durant le cycle 1993)	385
Graphique 3. Exemple de chronique comportant une partie aléatoire et une partie structurée	389
Graphique 4. Chroniques possédant même moyenne et même variance	389
Graphique 5. Corrélogramme simple des débits moyens journaliers à Portet, $k = 1$ à 125, période 1973 à 1987	391
Graphique 6. Exemples de filtres	392
Graphique 7. Spectre simple sur les débits moyens journaliers à Portet, période 1973 à 1987, fenêtre = 10 à 1250	393
Graphique 8. Corrélogramme croisé entre les pluies à Blagnac et les débits moyens journaliers à Portet, période 1973 à 1987, $k = 1$ à 125	395
Graphique 9. Fonction d'amplitude de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987	396
Graphique 10. Fonction de phase de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987	397
Graphique 11. Fonction de cohérence de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987	397
Graphique 12. Fonction de gain de la relation pluie (Blagnac)-débits (Portet), période 1973 à 1987	398
Graphique 13. Nombre d'irrigants par sous-secteurs en 1991 (788 irrigants recensés)	417
Graphique 14. Répartition des débits prélevés pour l'irrigation par sous-secteurs en 1991 (prélèvements totaux = 2.2 m ³ /s)	418

FIGURES

Figure 1. Relations oxygène-18-deutérium dans les eaux naturelles	371
Figure 2. Illustration de la méthode des cerises	378
Figure 3. Matrice des données	401
Figure 4. Illustration du plan de projection	403
Figure 5. Transformation de la matrice des données en une matrice des variances et covariances	404

Figure 6. Histogramme des pourcentages de variances exprimées en fonction des facteurs (méthode de DIDAY).....	406
Figure 7. Représentation des saturations (espace des variables).....	406
Figure 8. Représentation des u.s. dans l'espace des individus.....	407

TABLEAUX

Tableau 1 Abondance naturelle et propriétés des principaux isotopes utilisés en hydrologie.....	368
Tableau 2 Teneur en $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 biogénique suivant le cycle photosynthétique.....	372
Tableau 3. Mesures physico-chimiques.....	383
Tableau 4. Récapitulatif des méthodes d'analyses et erreurs sur les mesures.....	386
Tableau 5. Paramètres fournis dans l'ACP.....	405

CARTES

Carte 1. Sous-secteurs hydrographiques.....	417
---------------------------------------------	-----



Passez un ordre permanent aux Éditions du BRGM - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex.

- N° 1 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Communications. 1 vol., 627 p. complété par le Document n° 3 (1978). - 250 FF.
- N° 2 — J. BODELLE — **Les formations nummulitiques de l'Arc de Castellane.** 2 vol., 581 p., 27 pl., 1 carte h.-t. (1971). - 250 FF.
- N° 3 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Rapports généraux, débats, conclusions. 115 p. (complément du Document n° 1) (1979). - 200 FF.
- N° 5 — D. FAUCONNIER — **Les dinoflagellés de l'Albien et du Cénomanién inférieur du Bassin de Paris.** 1 vol., 146 p., 17 fig., 16 pl., 30 tabl. (1979). - 150 FF.
- N° 8 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national, Lyon, 13-15 mai 1979. 2 tomes, 1 093 p., nb. fig. (1979). - 400 FF.
- N° 10 — P. JEANROT — **De l'exploitation du rayonnement X en microscopie électronique à balayage.** 122 p., 53 fig. (1979). - 104 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 11 — J. PERSON — **Interventions réglementaires du géologue agréé en vue de la protection des eaux destinées à l'alimentation humaine.** 193 p. (1979). - 150 FF.
- N° 12 — **Utilisation de la géochimie majeure pour la cartographie des terrains cristallins. Possibilités de traitement automatique des analyses au BRGM.** 126 p., 61 fig. (1979). - 100 FF.
- N° 13 — M. VILLEY — **Simulation thermique de l'évolution des kérogènes.** 1 vol., 240 p., 86 fig., 19 tabl., 10 pl. (1980). - 100 FF.
- N° 14 — J.-Y. SCANVIC, G. WEECKSTEEN — **Carte des linéaments de la France à 1/1 000 000. Une carte format 110 x 110 cm et une notice de 14 p.** Disponible pliée et à plat (1980). - 115 FF.
- N° 16 — C. GOLOUBINOFF — **Le Permo-houillier du nord du Bassin de Saint-Affrique (Aveyron).** 139 p., 35 fig., 11 pl. photos (1979). - 150 FF.
- N° 18 — P. ROUBICHOU — **Les formations métamorphiques de la région de Leyme près de Saint-Céré (Massif central français).** 160 p., 53 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t., 1 carte h.-t. couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 19 — B. LAMOUILLE — **Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche (Corrèze, Massif central français).** 233 p., 75 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t. dont 1 en couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 20 — P. PICOT, M. FÉVRIER — **Étude minéralogique d'échantillons du golfe de Californie (Campagne CYAMEX),** 114 p., 29 pl. ph. dont 2 en coul. (1980). - 100 FF.
- N° 23 — J.-B. CHAUSSIER — **Préparation matérielle d'une mission de prospection minière en zone intertropicale à l'usage du géologue et du prospecteur minier.** 1 vol., 35 p. (1980). - 50 FF.
- N° 24 — **Géologie comparée des gisements de phosphates et de pétrole.** Colloque international à la mémoire de M. KIEKEN et J.P. RAGOT (Orléans, 6-7 novembre 1979). 268 p., 77 fig., 4 tabl., 2 pl., 1 dpl. (1980). - 200 FF.
- N° 25 — E. OUDIN avec la participation de C. FOUILLAC, L. LEBEL — **Études minéralogiques et géochimiques des dépôts sulfurés sous-marins actuels de la ride est-pacifique (21° N). Campagne rise.** 241 p., 25 fig., 23 pl. noir et blanc, 2 pl. couleur, 16 tabl. (1981). - 150 FF.
- N° 26 — D. BONIJOLY — **Étude structurale et minéralisations d'une plate-forme carbonatée : le Quercy.** 229 p., 9 ann., 4 pl. h.-t. photos (1981). - 150 FF.
- N° 27 — A. GÉRARD, D. WESTERCAMP, P. BOUYASSE, G. DUBREUIL, J. VARET — **Étude géophysique préliminaire à une évaluation du potentiel géothermique des Antilles françaises.** 42 p. (1981). - 50 FF.
- N° 28 — P. BLERY-OUSTRIÈRE, M. BEURRIER, C. ALSAC — **Contribution à l'étude des nodules polymétalliques de la Zone Clarion, Clipperton.** 120 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 29 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national, Lyon, 13-15 mai 1979. Tome 3. Communications. 118 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 30 — **Communication du séminaire national, "La gestion régionale des sédiments", Propriano (Corse), 27-29 mai 1981, organisé par le Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie et le BRGM.** 361 p., nbs fig. (1981). - 200 FF.
- N° 31 — D. MARITON — **Le bassin houiller du Bas-Dauphiné. Essai de synthèse géologique.** 46 p., 11 pl. h.-t., 8 annexes (1980). - 100 FF.
- N° 32 — (non publié).
- N° 33 — J.-P. SAUTY — **Du comportement thermique des réservoirs aquifères exploités pour le stockage d'eau chaude ou la géothermie basse enthalpie.** 221 p., 11 annexes (1982). - 200 FF.
- N° 34 — M. BONNET — **Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie.** 438 p., nbs fig. (1982). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 35 — H. BELAYOUNI, D. FAUCONNIER, M. SLANSKY, J. TRICHET — **Étude du contenu organique des dépôts phosphatés du bassin de Gafsa (Tunisie).** 70 p., 17 fig., 2 pl. photos, 7 tabl. (1982). - 50 FF.
- N° 36 — J.-L. BLES — **Étude structurale des schistes et des filons de fluorine de l'Albigeois.** 58 p., 8 pl. h.-t., 1 fig. (1982). - 150 FF.
- N° 37 — A. PARFENOFF — **Un minéral traceur pour la prospection alluvionnaire : l'ilménite. Relations entre ilménites magnésiennes, basaltes alcalins, kimberlites et diamant.** 215 p., 29 fig., 51 tabl., 7 pl. ph. (1982). - 200 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 38 — C. GOUGOUSSIS — **Assainissement individuel et aptitude des sols à l'élimination et à l'épuration des effluents domestiques.** 354 p., 50 fig., 17 pl., 33 tabl. (1982). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 39 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national. Paris, 15 juin 1982. Communications. 545 p., nbs fig. (1982). - 250 FF.
- N° 40 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national. Paris, 15 juin 1982. Rapports généraux. 124 p. (1982). - 100 FF.
- N° 41 — P. DUTARTRE — **Étude de la fracturation du granite de la Margeride. Région de St-Alban-sur-Limagnole (Lozère).** 344 p., 4 dpl. h.-t., 91 fig., 10 annexes (1982). - 250 FF.

- N° 42 — B. CALINE — Le secteur occidental de la Baie du Mont-St-Michel. Morphologie, sédimentologie et cartographie de l'Estran. 250 p., 124 fig., 9 pl., 3 cartes h.-t. (1982). - 250 FF.
- N° 43 — 4e Conférence internationale sur la planification et la gestion des eaux. Marseille, 10-12 mai 1982. Communications. 836 p. (1982). - 400 FF.
- N° 44 — N. DOERLER — Influence du broyage sur les propriétés massiques et superficielles du quartz et de la biotite. Conséquences sur l'adsorption de tensio-actifs ioniques. 268 p., 6 pl. ph., 58 fig., 34 tabl. (1982). - 200 FF.
- N° 45 — Les milieux discontinus en hydrologie. Colloque national en hommage à G. CASTANY. 448 p., 42 communications (1982). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 46 — D. BONIJOLY, G. DELPONT — Étude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par la télédétection et la géologie structurale. 63 p., 25 fig., 2 tabl., 19 pl. (1982). - 100 FF.
- N° 47 — Valorisation des ressources du sous-sol. Recueil des communications présentées au séminaire. Bilan annuel de l'action concertée. Paris. 12-16 octobre 1981. 284 p., 23 communications (1982). - 100 FF.
- N° 48 — L. DESCOMBES — Les gisements alluvionnaires de la Seine et de ses principaux affluents. Topographie et granulométrie d'après ces données d'exploitation. 153 p., 51 fig., 6 tabl., 31 pl. en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 49 — G. LABLANCHE — Les calcaires lacustres paléogènes de la Champagne berrichonne. Étude cartographique, pétrographique, reconstitution du milieu de sédimentation. 127 p., 28 fig., 10 pl. photo, 4 cartes en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 50 — F. LEBERT — Application des techniques de diagraphie dans le domaine de la prospection minière sur deux sites volcano-sédimentaires bretons : Bodennec et la Porte-aux-Moines. 112 p., 63 fig., 14 tabl., 39 pl. ann. (1982). - 100 FF.
- N° 51 — P. GUENNOG, Y. THISSE — Genèse de l'ouverture de la mer rouge et des minéralisations des fosses axiales. 112 p., 49 fig., 4 pl. annexes (1982). - 100 FF.
- N° 52 — G. POUIT, M. BIGOT, J. DELFOUR, J.-P. MILESI, P. PICOT — Les minéralisations actuelles et anciennes : l'exemple de la mer rouge. 90 p. (1983). - 100 FF.
- N° 53 — R. FLEURY — La formation de Saint-Cosme dans la Bresse du Nord. Ses relations avec les événements du Pléistocène bressan. 150 p., 11 dpl. h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 54 — B. LEMIERE — L'amas sulfuré de Chizeuil (Saône-et-Loire) : Étude géochimique de son environnement volcanosédimentaire dévonien supérieur et de son auréole d'altération hydrothermale. 142 p., 64 fig., 33 tabl. (1982). - 150 FF.
- N° 55 — Y. MOELO — Contribution à l'étude des conditions naturelles de formation des sulfures complexes d'antimoine et plomb (Sulfosels de Pb/Sb). Signification métallogénique. 624 p., 27 pl. ph. (1983). - 400 FF.
- N° 56 — Y. ATLAN, C. FELLER — Applications de la pédologie à la géotechnique routière. Exemple du Sénégal. 88 p., 10 fig., 4 tabl. (1983). - 100 FF.
- N° 57 — D. THIERY, M. VANDENBEUSCH, P. VAUBOURG — Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. 54 p., 8 pl. h.-t., 24 fig., 6 tabl. (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 58 — C.-O. VALETTE — Karsts et filons à fluorine dans le faisceau synclinal du Morvan. Le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire). 299 p., 96 fig., 16 tabl., 4 pl. h.-t., 2 cartes h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 59 — C. DADOU — Évaluation probabiliste de l'aléa sismique régional dans le Sud-Est de la France. 246 p., 47 fig., 29 tabl. (1983). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 60 — C. BERGERON, H. DEHAYS, T. POINTET — Remontées des nappes d'eau souterraine. Causes et effets. 56 p., nombreuses illustrations (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 61 — Valorisation des ressources du sous-sol. Sophia-Antipolis, 3, 4 et 5 novembre 1982. 440 p. - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 62 — A. BOURG — Modélisation du comportement des métaux traces à l'interface solide-liquide dans les systèmes aquatiques. 171 p., 80 fig., 20 tabl. (1983). - 300 FF.
- N° 63 — P. BOUYASSE, S. ROBERT, P. GUENNOG, S. MONTI — Bathymétrie détaillée (Seabeam), anomalies magnétiques dans les Antilles françaises. 80 p., 5 pl. h.-t., 18 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 64 — P. MARTEAU — Le bassin permo-carbonifère d'Autun. Stratigraphie, sédimentologie et aspects structuraux. 198 p., 2 pl. h.-t., 54 fig., 19 tabl., 4 pl. ph. (1983). - 150 FF.
- N° 65 — T. AUGÉ — Étude minéralogique et pétrographique de roches basiques et ultrabasiques du complexe ophiolitique du Nord Oman. 300 p. (1983). - 150 FF.
- N° 66 — D. RABU, J.-J. CHAUVEL, J. CHANTRAINE — Le domaine interne de la chaîne cadomienne dans le Massif armoricain. Étude lithostratigraphique, géochimique et structurale le long d'une transversale en baie de Saint-Brieuc et dans le pays de Lamballe (Côtes-d'Armor). 56 p., 7 fig., 5 pl. h.-t. (1983). - 100 FF.
- N° 67 — J. CHANTRAINE *et al.* — Inventaire lithologique et structural du Briovérien (Protérozoïque) de la Bretagne centrale et du bocage normand pour la recherche de guides métallogéniques. 185 p., 16 ann. h.-t. (1983). - 300 FF.
- N° 68 — R. WYNS, J. LE METOUR — Le Précambrien du massif vendéen. Étude détaillée de deux coupes de référence (coupe de l'Eure et coupe de la Divatte) et synthèse des données récentes. 60 p., 2 pl. h.-t., 10 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 69 — G. SUSTRAC — La bibliothèque du géologue. Bibliographie fondamentale thématique et régionale en Sciences de la Terre. 192 p. (1984). - 200 FF.
- N° 70 — C. VINCHON — Sédimentogenèse et métallogenèse du Permien du dôme du Barrot (Alpes-Maritimes, France). 444 p., 72 fig., 18 tabl., 18 pl. ph. (1984). - 300 FF.
- N° 71 — G. LABARRAQUE — Étude d'un plasma à couplage inductif (i.c.p.), 27 mhz, et application à l'analyse multi-élémentaire par spectrométrie d'émission d'ultra-violet d'échantillons géologiques. 194 p., 36 tabl. (1984). - 150 FF.
- N° 72 — M. LACAZE — Diagraphie par gamma de capture : instrumentation et modélisation. Applications aux minerais de nickel. 115 p. (1984). - 100 FF.

- N° 73 — J. DELFOUR, P. ISNARD, E. LECUYER, B. LEMIERE, F. LHOTE, B. MOINE, M. PIBOULE, P. PICOT, A. PLOQUIN, M. TEGYEY — **Étude du gîte de pyrite de Chizeuil (Saône-et-Loire) et de son environnement volcano-sédimentaire dévonien et dinantien.** 37 p., 20 fig., 2 tabl., 5 ann. (1984). - 250 FF.
- N° 74 — V. MENICETTI avec la collaboration de A. GUILLEN — **Techniques inverses en gravimétrie et magnétisme. Application à la terminaison sud et de l'anomalie magnétique du bassin de Paris.** 120 p., 5 pl. h.-t. (1984). - 150 FF.
- N° 75 — B. PRADIER — **Transport et fixation de l'uranium dans le domaine supergène. Études de cas et applications en prospection géochimique.** 339 p., 102 fig., 46 tabl. (1984). - 300 FF.
- N° 76 — D. BONIJOLY, H. GERMAIN — **Histoire tectonique post-hercynienne du bassin d'Alès (Gard). Chronologie des déformations et contrôle structural des minéralisations barytiques.** 25 p., 13 fig., 7 pl. (1984). - 50 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 77 — H. BELAYOUNI — **Étude de la matière organique dans la série phosphatée du bassin de Gafsa-Metlaoui (Tunisie). Application à la compréhension des mécanismes de la phosphatogenèse.** 248 p. (1984). - 200 FF.
- N° 78 — **Journées d'étude sur le comportement des canalisations pour le transport des eaux géothermales. Exposés et débats. Orléans, 20 et 21 mars 1984.** 485 p. - 250 FF.
- N° 79 — **Valorisation des ressources du sous-sol. Sophia-Antipolis. 8, 9, 10 novembre 1982.** 376 p. (1984). - 100 FF.
- N° 80 — **Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984.** 232 p. - 100 FF.
- N° 81 — **Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984. 11 fascicules.** - 500 FF.
- N° 82 — P. TELEKI, C. WEBER — **Remote sensing for geological mapping. Télédétection appliquée à la cartographie.** 313 p. (1984). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 83 — J.-C. FLAGEOLLET — **Mouvements de terrain. Colloque de Caen, 22-23-24 mars 1984.** 670 p. (1984). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 84 — **Journées sur le granite. Orléans-La Source, 26 juin 1984. Communications.** 280 p. (1984). - 200 FF.
- N° 85 — M. RENARD — **Géochimie des carbonates pélagiques. Mise en évidence des fluctuations de la composition des eaux océaniques depuis 140 MA. Essai de chimostratigraphie.** 650 p., 190 fig. (1985). - 300 FF.
- N° 86 — C. ROQUIN — **Traitement des données en prospection géochimique : facteurs de variation de signal et sélection de la composante anomalie.** 316 p. (1985). - 300 FF.
- N° 87 — J.-M. LULIN — **Un nouveau gîte à Nb, Ta, U, T.R. d'origine magmatique en Afrique orientale : le complexe alcalin tectonisé de Meponda Précambrien de la province de Niassa (République populaire du Mozambique).** 370 p. (1985). - 400 FF.
- N° 88 — A. DEURBERGUE — **Transformations post-sédimentaires sur la bordure nord du Massif central. Le quartz carrié des environs de La Châtre : les altérites siliceuses du bassin de Cosne-d'Allier.** 184 p. (1985). - 200 FF.
- N° 89 — **La microsonde électronique BRGM/CNRS. Journée dédiée à Monsieur le professeur Raimond Castaing. Comptes-rendus des exposés.** 100 p. (1985). - 150 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 90 — A. COCHERIE — **Interaction manteau-croûte, son rôle dans la genèse d'associations plutoniques calco-alcalines, contraintes géochimiques (éléments en traces et isotopes du strontium et de l'oxygène).** 246 p. (1985). - 200 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 91 — G. REVOIL — **Étude d'une méthode de préconcentration des éléments traces dans les eaux.** 162 p. (1985). - 100 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 92 — D. WESTERCAMP. — **Géologie de l'archipel des Grenadines (Petites Antilles méridionales). Étude monographique.** 208 p. (1985). - 200 FF.
- N° 93 — Ph. BOUYSSÉ *et al.* — **Géologie de la ride d'Aves et des pentes sous-marines du Nord des Petites Antilles. Esquisse bathymétrique à 1/1 000 000 de l'Est Caraïbe.** 146 p., 2 dépliants h.-t. (1985). - 200 FF.
- N° 94 — M. BERTRAND — **La Provence géologique. Excursion du centenaire de la découverte des nappes de charriage.** 100 p. (1985). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 95 — **Programme géologie profonde de la France. Deuxième phase d'investigation : 1984-1985. 13 fascicules** (1985). - 700 FF.
- N° 96 — C. KING — **Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. Approche de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles dans le visible et le proche infrarouge.** 200 p. (1985). - (ÉPUISÉ).
- N° 97 — G. FARJANEL — **La flore et le climat du Néogène et du Pléistocène de Bresse (France) d'après l'analyse pollinique. Implications chronostratigraphiques.** 200 p. (1985). - 200 FF.
- N° 98 — J.-L. HONEGGER — **Étude d'un échangeur à contact direct co-courant pour la valorisation thermodynamique de la géothermie moyenne enthalpie.** 186 p. (1985). - 200 FF.
- N° 99 — M. JEBRAK — **Contribution à l'histoire naturelle des filons (F, Ba) du domaine varisque.** 510 p. (1985). - 300 FF.
- N° 100 — **Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigation 1985-1986, GPF 3 - Forage Échassières n° 1. Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 8 : Évolution géochimique et métallogénique d'un apex granitique.** 323 p. (1985). - 200 FF.
- N° 101 — **Géologie de la bordure méridionale du golfe tertiaire de Casamance (Sénégal, Guinée Bissau), par J.-P. PRIAN. Ostracodes tertiaires (Paléogène à Néogène) du bassin sénégal-guinéen, par G. CARBONNEL.** 243 p. (1986). - 350 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 102 — J.-L. BLES avec la collaboration de R. BLANCHIN, D. BONIJOLY, P. DUTARTRE, J.-L. FEYBESSE, Y. GROS, J. LANDRY et P. MARTIN — **Fracturation profonde des massifs rocheux granitiques.** 316 p. (1986). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 103 — J.-F. OUVRY — **Étude physique et rhéologique des argiles congelées. Application à l'argile profonde de Boom (Belgique).** 247 p. (1986). - 200 FF.
- N° 104 — R. GABLE — **Température, gradient et flux de chaleur terrestre. Mesures. Interprétation.** 188 p. (1986). - 250 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 105 — **Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigation 1985-1986, GPF 3 - Forage de Chassole (Cézallier). Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 10 : Géothermalisme actuel.** 486 p. (1986). - 350 FF.
- N° 106 — P. DEVISMES — **La détermination rapide des minéraux lourds des alluvions et des roches : utilisation pour l'inventaire minéralogique et la recherche minière** (1986). - 60 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 107 — P. ROSSI — **Organisation et genèse d'un grand batholite orogénique : le batholite calco-alcalin de la Corse** (1986). - 250 FF.

- N° 108 — J. TOURENQ — Étude sédimentologique des alluvions de la Loire et de l'Allier, des sources au confluent. Les minéraux lourds des roches des bassins versants (1986). - 100 FF.
- N° 109 — J.-F. SAUNIER — Un domaine cristallophyllien dans le Protérozoïque supérieur (Briovérien) de Bretagne centrale : le dôme de Plouguenast (Côtes-d'Armor) (1986). - 200 FF.
- N° 110 — Les couches riches en matière organique et leurs conditions de dépôt : Réunion du GRECO 52, CNRS. Tours, 14-15 novembre 1985. 286 p., 20 pl. photo (1986). - (ÉPUISE).
- N° 111 — R. DEGALLIER — Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Applications aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire). 44 p., nombreuses figures (1986). - (ÉPUISE).
- N° 112 — D. GARCIA — Étude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges méridionales. Application géothermique. 180 p., nombreuses illustrations (1986). - (ÉPUISE).
- N° 113 — A. LALLEMAND-BARRES *et al.* — Teneurs en nitrate des nappes phréatiques de la France. État 1983. Carte à 1/1 500 000. 20 p. (1986). - (ÉPUISE).
- N° 114 — P. HUBERT — Textures et inclusions fluides des quartz aurifères. Application au gîte de Cros-Gallet (Haute-Vienne, France) et au prospect de Sanoukou (district de Keneleba, Mali). 350 p., 82 fig., 11 pl. photo, 2 cartes (1986). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 115 — A. BARRAT — Étude du rôle des eaux souterraines dans le mécanisme des éruptions phréatiques. Application à la Montagne Pelée de Martinique et à la Soufrière de Guadeloupe. 190 p., 26 fig. (1986). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 116 — P. RICHARD — Structure et évolution alpine des massifs paléozoïques du Labourd (Pays Basque français). 384 p., 2 dpl. (1986). - 350 FF.
- N° 117 — E. MARCOUX — Isotopes du plomb et paragenèses métalliques. Traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français. Applications en recherche minière. 388 p., 12 pl. photo (1986). - 350 FF. - (ÉPUISE).
- N° 118 — J.K. KANG et A. KOSAKEVITCH — Étude texturale des encroûtements ferro-manganésifères thalassiques et hydrothermaux de l'Est-Caraïbe. 203 p., 41 pl. photo (1986). - 350 FF.
- N° 119 — E. LALLIER-VERGES — Micronodules de manganèse et sédiments pélagiques dans l'Océan Pacifique. Caractérisation, formation, diagenèse. 425 p., 42 tabl., 181 pl. h.-t. (1986). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 120 — J.-L. LESCUYER et D. GIOT avec la participation de M. DONNOT et P. BEZIAT — Les minéralisations Pb-Zn de Montagne Noire et leurs relations avec leur encaissant Cambrien carbonaté sur quelques exemples du versant nord (La Rabasse, Brusque, Lardenas, Peux, Les Comtes) et du versant sud (Bidaut, Tête Rousse). 270 p., nombreuses figures, 3 dépliants (1987). - 200 FF.
- N° 121 — V. BORNE — Le bassin Paléogène de Challans-Noirmoutier (France). Thèse de doctorat d'Université de Nantes. 272 p., nombreuses photos, 6 planches photo, 9 dépliants (1987). - 300 FF.
- N° 122 — C. BEAUFRERE — Stabilité des carrières souterraines abandonnées de l'Entre-Deux-Mers (Gironde). Influence des facteurs géologiques et mécaniques. 439 p., 149 fig., 5 pl. photo coul., 12 pl. en pochette (1987). - 400 FF.
- N° 123 — Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigation : 1985-1986 - GPF 3. Thème 11. Subsidence et diagenèse (Ardèche). 1 vol., 143 p., 36 fig., 7 tabl., 5 pl. h.-t. (1987). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 124 — Programme géologie profonde de la France. Thème 8. Évolution d'un apex granitique. Forage d'Échassières. Données analytiques : 1985-1987, 1 vol., 437 p. (1988). - 400 FF. - (ÉPUISE).
- N° 125 — Programme géologie profonde de la France. Thème 10. Géothermalisme actuel. Forages de Chassole (Cézallier). Données analytiques : 1985-1987. 1 vol., 178 p. (1988). - 200 FF.
- N° 126 — HILAL AL AZRI — Typologie des gisements de chromite dans la partie sud de l'ophiolite du Nord-Oman. 1 vol., 159 p., 82 fig., 10 tabl., 7 pl. photo (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 127 — F. BECHENNEC — Géologie des nappes Hawasina dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 1 vol., 474 p., 135 fig., 17 annexes, 8 tabl., 36 photos, 2 pl. h.-t. (1988). - 450 FF.
- N° 128 — M. BEURRIER — Géologie de la nappe ophiolitique de Samail dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 412 p., 206 fig., 68 tabl., 8 pl. ph., 7 pl. h.-t. (1988). - 400 FF.
- N° 129 — J. LE METOUR — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Saih Hatat. 1 vol., 425 p., 151 fig., 10 tabl., 3 pl. ph. (1988). - 450 FF.
- N° 130 — D. RABU — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Jabal Akdar. 1 vol., 614 p., 1 carte (1989). - 500 FF.
- N° 131 — J.-C. BARFETY — Le Jurassique dauphinois entre Durance et Rhône. Étude stratigraphique et géodynamique (zone externe des Alpes occidentales françaises). 1 vol., 656 p., 175 fig., 19 tabl., 24 pl. ph. (1988). - 600 FF.
- N° 132 — C. BOUCHET — Hydrogéologie du milieu volcanique. Le bassin de la Veyre (Chaîne des Puys - Massif central). Analyse et modélisation du bassin versant du lac d'Aydat. Étude d'un aquifère fissuré basaltique. 1 vol., 319 p., 137 fig., 26 tabl., 3 annexes (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 133 — J.-G. ASTRUC — Le paléokarst quercynois au Paléogène. Altérations et sédimentations associées. 1 vol., 150 p. 63 fig., 5 tabl., 26 pl. h.-t. - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 134 — S. GENTIER — Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. 1 vol., 597 p. (1987). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 135 — J. GUERANGE-LOZES — Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations. 1 vol., 259 p., 7 annexes, 34 fig., 18 tabl., 16 pl. photo (1987). - 450 FF.
- N° 136 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Terrains sédimentaires : rapport d'exécution et descriptions préliminaires. 1 vol., 185 p. (1987). - 200 FF.
- N° 137 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Socle : résultats préliminaires. 1 vol., 323 p., (1988). - 300 FF.
- N° 138 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Données géophysiques. 1 vol., 259 p. (1988). - 250 FF. - (ÉPUISE).

- N° 139 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 1 : Chevauchements nord-varisques (faille du Midi). *1 vol., 93 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 140 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 3 : Chevauchements synmétamorphes varisques du Limousin. *1 vol., 104 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 141 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 4 : Soubassement précambrien du domaine varisque en Bretagne. *1 vol., 49 p.* (1987). - **50 FF.**
- N° 142 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 5 : Allochtonie des unités alpines. *1 vol., 94 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 143 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 6 : Allochtonie des massifs paléozoïques nord-pyrénéens. *1 vol., 68 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 144 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 7 : Bassins paléozoïques cachés sous l'Aquitaine. *1 vol., 57 p.* (1987). - **50 FF.**
- N° 145 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 9 : Volcanisme récent du Massif central (Mont-Dore). *1 vol., 65 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 146 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 12 : Projet Vosges. Le socle vosgien, segment de la chaîne varisque d'Europe. *1 vol., 136 p.* (1987). - **150 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 147 — M. LYS — **Biostratigraphie du Carbonifère et du Permien en Mésogée** (Espagne, Afrique du Nord, Régions Égées, Proche-Orient). Études micropaléontologiques (foraminifères). Paléobiogéographie. *1 vol., 315 p., 72 fig., 21 planches, 28 tabl. dont 12 h.-t.* (1988). - **300 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 148 — J. AGARD, A. BENNANI, F. PERMINGEAT — **Les unités métallifères à tungstène du Maroc.** Une vue d'ensemble. *1 vol., 50 p., 7 fig., 2 tabl.* (1988). - **100 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 149 — D. BILLAUX, B. FEUGA — **Étude comparée des méthodes de modélisation de la fracturation des roches.** *1 vol., 45 p., 22 fig.* (1988). - **50 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 150 — A. CHEREAU, R. DEGALLIER, A. DURAND *et al.* — **Détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes souterraines à partir de leurs variations de niveau sous l'influence des pompes.** *1 vol., 737 p., 15 fig.* (1988). - **450 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 151 — P. MANDIER — **Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire.** Essai de synthèse paléogéographique. *3 vol., 654 p., 229 fig., 18 tabl., 11 cartes, 5 pl. h.-t.* (1988). - **750 FF.**
- N° 152 — P. CHEVREMENT, C. GAGNY, H. DE LA ROCHE, J.-P. PUPIN, P. ROSSI — **Représentation cartographique du plutonisme acide et du plutonisme intermédiaire à basique associé.** *1 vol., 68 p., 19 fig., 2 tabl.* (1988). - **100 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 153 — J. BODIN — **Le Dévonien inférieur et moyen des Pyrénées ariégeoises et centrales.** Biostratigraphie, séries hétéropiques et mise en évidence de nappes hercyniennes précoces. *1 vol., 270 p., 79 fig., 5 tabl.* (1988). - **250 FF.**
- N° 154 — M. URVOIS — **Apports de l'estimation géostatistique de l'épaisseur des unités métallifères dans la compréhension des mécanismes de mise en place des sédiments de la fosse Atlantis II (Mer Rouge).** *1 vol., 228 p., 81 fig., 5 tabl.* (1988). - **250 FF.**
- N° 155 — H. MASSOUD — **Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique.** *1 vol., 210 p., 42 fig.* (1988). - **200 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 156 — B. CALINE, Y. GRUET, C. LEGENDRE, J. LE RHUN, A. L'HOMER, R. MATHIEU, R. ZBINDEN — **Les récifs à Annélides (hermelles) en baie du Mont-Saint-Michel.** Écologie, géomorphologie, sédimentologie, implications géologiques. *1 vol., 190 p., 52 fig., 10 pl. photo* (1988). - **200 FF.**
- N° 157 — D. THIEBLEMONT — **Le magmatisme paléozoïque en Vendée.** Apport de la géochimie des éléments traces et de la pétrologie du métamorphisme à la compréhension du développement orogénique varisque. *1 vol., 372 p., 128 fig., 27 tabl., 10 pl. photo, 58 ann.* (1988). - **350 FF.**
- N° 158 — **Gisements métallifères dans leur contexte géologique.** Actes du colloque PIRSEM. *Vol. 1, 488 p., nb. fig., vol. 2, 902 p., nb. fig.* (1988). - **650 FF.**
- N° 159 — I. CZERNICHOWSKI-LAURIOL — **Modélisation de l'évolution des fluides géothermaux lors de leur exploitation par forages.** *1 vol., 202 p., 33 fig., 9 tabl.* (1988). - **200 FF.**
- N° 160 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 1 : Communications Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 634 p., 270 fig., 35 tabl.* (1988). - **500 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 161 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 2 : Actes Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 160 p., 11 fig., 2 tabl.* (1988). - **150 FF.**
- N° 162 — P. LOISEAU — **Étude structurale et géostatistique des gneiss de la région du Cézallier (Massif central français).** Modélisation tridimensionnelle de réseaux de fractures. Application à l'écoulement des fluides. *1 vol., 192 p., 83 fig., 15 tabl.* (1988). - **200 FF.**
- N° 163 — D. NURY — **L'Oligocène de Provence méridionale.** Stratigraphie dynamique sédimentaire. Reconstitutions paléogéographiques. *1 vol., 418 p., 120 fig., 37 tabl., 7 pl. photo* (1988). - **400 FF.**
- N° 164 — J.-P. PLATEL — **Le Crétacé supérieur de la plate-forme septentrionale du Bassin d'Aquitaine.** Stratigraphie et évolution géodynamique. *1 vol., 578 p., 100 fig., 21 tabl., 10 cartes coul.* (1989). - **500 FF.**
- N° 165 — **Programme géologie profonde de la France.** Programme national. Cibles de forages profonds suggérés par les profils sismiques ECORS. *1 vol., 46 p., 22 fig.* (1988). - **50 FF.** - (ÉPUISE).
- N° 166 — M. LARDEAU — **Minéralogie et pétrogenèse du minerai sulfuré du gisement volcano-sédimentaire à Zn-Cu-Ba. (Pb-Ag) de Chessy-les-Mines (Rhône).** Application à l'étude des amas sulfurés métamorphisés. *1 vol., 196 p., 74 fig., 32 tabl., 5 ann.* (1989). - **200 FF.**
- N° 167 — Y. MO—LO, E. MAKOVICKY et S. KARUP-MOLLER — **Sulfures complexes plombo-argentifères : minéralogie et cristallographie de la série andorite-fizelyite (Pb, Mn, Fe, Cd, Sn)₃ — 2 x (Ag, Cu)_x (Sb, Bi, As)₂ + x (S, Se)₆.** *1 vol., 114 p., 18 fig., 21 tabl., 58 pl. photo en ann.* (1989). - **100 FF.**
- N° 168 — S. LOUAHALA — **Signatures spectrales de roches en milieu tempéré.** Valeurs réelles et valeurs perçues par le satellite. *1 vol., 212 p., 79 fig., 15 tabl., 5 photos* (1989). - **200 FF.**

- N° 169 — J.-C. ARAGON — **Sédimentologie et stratigraphie séquentielle de l'Albien dans le bassin de Quillan et le Synclinorium d'Ascat (Zone nord-pyrénéenne, Aude).** 1 vol., 192 p., 47 fig., 17 pl. photo (1988). - 200 FF.
- N° 170 — M. BONNEMAISON — **Indices de diagenèse liés aux nannofossiles calcaires dans le Crétacé des Pyrénées. Comparaison avec des sites océaniques dans le Golfe de Gascogne.** 1 vol., 272 p., 47 fig., 47 tabl., 24 pl. photo (1988). - 250 FF.
- N° 171 — P. ANDREIEFF, P. BOUYSSÉ et D. WESTERCAMP — **Géologie de l'arc insulaire des petites Antilles et évolution géodynamique de l'est-Caraïbe.** 1 vol., 392 p., 40 fig., 7 tabl., 9 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 172 — J. DUBREUILH — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviaux tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine. Passage aux formations palustres, lacustres et marines.** 1 vol., 468 p., 79 fig., 9 tabl., 2 ann. (1989). - 450 FF.
- N° 173 — P. BARANGER — **Origine et diagenèse des constituants organiques associés aux niveaux salifères tertiaires de Bresse (France). Étude expérimentale de la réduction d'espèces métalliques par la matière organique sédimentaire.** 1 vol., 424 p., 51 fig., 5 tabl., 4 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 174 — J. TOURENQ — **Les sables et argiles du Bourbonnais (Massif central, France). Une formation fluvio-lacustre d'âge pliocène supérieur. Étude minéralogique, sédimentologique et stratigraphique.** 1 vol., 340 p., 140 fig., 109 tabl., 7 pl. photo (1989). - 350 FF.
- N° 175 — J.-P. CAPDEVILLE — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluvio-lacustres tertiaires du nord du bassin Aquitain entre Lot et Dordogne.** 1 vol., 302 p., 78 fig., 12 tabl. (1989). - 400 FF.
- N° 176 — **Programme géologie de la France. Programme national. Forages scientifiques de l'Ardèche.** 1 vol., 116 p., 38 fig., 8 tabl. (1989). - 100 FF.
- N° 177 — M. POUPON — **Les altérations hydrothermales associées aux amas sulfurés de Chessy et de Sain-Bel (Paléozoïque, série de la Brèvenne, Massif central français) (1989).** - 300 FF.
- N° 178 — D. PRIMEY et G. FARJANEL avec la collaboration de D. FAUCONNIER — **Étude paléobotanique et palynologique des gisements stéphano-autuniens de Lucenay-lès-Aix et Devay (Bassin de Decize, Nièvre).** 1 vol., 210 p., 51 fig., 10 tabl., 8 pl. photo (1989). - 250 FF.
- N° 179 — M. DONSIMONI avec la collaboration de J.-F. BECQ-GIRAUDON, J. BOIS, M. DEGOUY, G. GONZALEZ, D. MARITON, J.-F. PASQUET, D. PRIMEY, C. REMOND — **Le gisement de charbon de Lucenay-lès-Aix (Nièvre). Essai de synthèse géologique d'après les sondages récents (1981-1986).** 1 vol., 84 p., 18 fig., 6 tabl. (1988). - 250 FF.
- N° 180 — J.-M. PUIG — **Le système karstique de la fontaine de Vaucluse.** 1 vol., 214 p., 69 fig., 27 tabl. (1990). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 181 — Colloque : «Valorisation des ressources du sous-sol», recueil des communications. Paris, 27-28 novembre 1984. 1 vol., 76 p., 23 fig., 5 tabl. (1990). - 70 FF.
- N° 182 — Colloque-bilan : «Valorisation des ressources minérales», recueil des communications. Paris, 27-28 septembre 1988. 1 vol., 324 p., 80 fig., 20 tabl. (1990). - 350 FF.
- N° 183 — **Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires. Manifestations, mécanismes, prospection. (Mobility and concentration of base metals in sedimentary cover rocks. Manifestations, mechanisms, prospection).** Coordonné par H. Pélissonnier, J.-F. Sureau. 1 vol., nb. illustrations (1990). - 600 FF.
- N° 184 — J. ROJAS, D. GIOT, Y.-M. LE NINDRE, A. CRIAUD, C. FOUILLAC, M. BRACH, A. MENJOZ, J.-C. MARTIN, M. LAMBERT, avec la collaboration de J.-P. CHILES, A.-M. FOUILLAC, H. PAUWELS — **Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin Parisien, France. Rapport final.** 1 vol., 240 p., 138 fig., 32 tabl. (1990). - 300 FF.
- N° 185 — A. GENTER — **Géothermie roches chaudes sèches, le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France).** 1 vol., 246 p., 82 fig., 16 tabl., 4 ann., 4 pl. photo (1990). - 250 FF.
- N° 186 — D. BILLAUX — **Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité et comportement hydraulique.** 1 vol., 296 p. (1990). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 187 — X. WU — **L'arsénopyrite aurifère, composition, conditions de genèse. L'apport des synthèses minérales et de l'étude de gisements d'or (Le Châtelet, l'Auriéras, France).** 1 vol., 209 p., 52 fig., 20 tabl., 4 pl. (1990). - 350 FF.
- N° 188 — M. GUIOMAR — **Le Carbonifère des chaînes subalpines de Haute-Provence (France) dans son cadre structural.** 1 vol., 246 p., 149 fig., 4 pl. photo (1990). - 400 FF.
- N° 189 — V. BOUCHOT — **Contexte géologique et structural des minéralisations aurifères du district de Saint-Yrieix (Limousin, Massif central français).** 1 vol., 284 p., 86 fig., 19 tabl., 1 pl. photo (1990). - 300 FF.
- N° 190 — M. SCHULER — **Environnements et paléoclimats paléogènes palynologie et biostratigraphie de l'Éocène et de l'Oligocène inférieur dans les fossés rhénan, rhodanien et de Hesse.** 1 vol., 503 p., 144 fig., 87 tabl., 14 pl. h.-t. (1990). - 600 FF.
- N° 191 — D. VASLET — **Le Paléozoïque (anté-permien supérieur) d'Arabie saoudite. Volume 1. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe.** 1 vol., 209 p., nbs. fig. (1990). - 250 FF. - (ÉPUISE).
- N° 192 — Y.-M. LE NINDRE, J. MANIVIT, D. VASLET — **Géodynamique et paléogéographie de la plate-forme arabe du Permien au Jurassique. Volume 2. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe.** 1 vol., 280 p., 54 fig., 4 tabl., 4 annexes (1990). - 500 FF.
- N° 193 — Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET, J. MANIVIT — **Le Permo-Trias d'Arabie centrale. Volume 3. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe.** 290 p., 51 fig., 4 tabl., 11 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 194 — J. MANIVIT, Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET — **Le Jurassique d'Arabie centrale. Volume 4. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe.** 559 p., 74 fig., 1 tabl., 12 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 195 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun, colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 1. Communications.** 443 p. (1990). - 750 FF.
- N° 196 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun. Colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 2. Rapports généraux. Table ronde.** 171 p. (1992). - 170 FF. - (ÉPUISE).
- N° 197 — O. MAQUAIRE — **Les mouvements de terrain de la côte au Calvados. Recherche et prévention.** 1 vol., 431 p., 157 fig., 16 ph. (1990). - 350 FF.
- N° 198 — O. ROUZEAU — **Problématique de la transposition des modèles de distribution de température dans le sol aux interprétations issues de la télédétection thermique spatiale. Application au bassin de Paris.** 1 vol., 193 p., 96 fig., 54 pl. h.-t. (1990). - 400 FF.

- N° 199 — B. CROCHET — Molasses syntectoniques du versant nord des Pyrénées : la série de Palassou. *1 vol., 387 p., 129 fig.* (1990). - 400 FF.
- N° 200 — COLLECTIF — Programme géologie profonde de la France. Phase 1989-1990. Thème 11. Ardèche : diagenèse et relations fluides-roches. Forages scientifiques de l'Ardèche. Les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Forage de Balazuc 1 : Rapport d'exécution et données préliminaires. *1 vol., 126 p., 52 fig., 23 tabl.* (1990). - 150 FF.
- N° 201 — G. BRONNER — Structure et évolution d'un craton archéen. La dorsale Réguibat occidentale (Mauritanie). Tectonique et métallogénie des formations ferrifères. *448 p., 84 fig., 9 cartes h.t.* (1992). - 750 FF.
- N° 202 — H.-T. LIAO — Estimation des réserves récupérables de gisements d'or. Comparaison entre le krigeage disjonctif et le krigeage des indicatrices. *1 vol., 198 p., 100 fig., 44 tabl.* (1990). - 400 FF.
- N° 203 — P. FREYSSINET — Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali. *1 vol., 278 p., 87 fig., 3 tabl., 8 ph.* (1991). - 350 FF.
- N° 204 — M.-M. BLANC-VALLERON — Les formations paléogènes évaporitiques du bassin potassique de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace. *514 p., 162 fig., 47 tabl., 185 ph.* (1991). - 500 FF.
- N° 205 — C. CENSIER — Dynamique sédimentaire d'un système fluvial diamantifère mésozoïque : la formation de Carnot (République centrafricaine). *568 p., 129 fig., 48 tabl., 29 ph.* (1991). - 570 FF.
- N° 206 — P. VALLA — Applications de la modélisation numérique aux méthodes d'électromagnétisme fréquentiel en prospection géophysique. *472 p., 108 fig., 1 tabl.* (1991). - 480 FF.
- N° 207 — M. TERRIER — Néotectonique de la Provence occidentale (France). Vers une analyse multicritère des déformations récentes. Applications à la classification des structures sismogènes. *1 vol., 232 p., 76 fig., 16 tabl.* - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 208 — J.-P. DEROIN — Méthodologie d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale en zone tempérée. Apports à la connaissance géomorphologique, géologique et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc (sud de la France). *1 vol., 386 p., 71 fig., 8 tabl., 7 ph.* (1992). - 350 FF.
- N° 209 — J.-L. SCHNEIDER, J.-P. WOLF — Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1 500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. *2 vol.* - 600 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 210 — N. MOUKOLO — Hydrogéologie du Congo. *130 p.* (1992). - 150 FF.
- N° 211 — Géologie profonde de la France. Forum GPF. Nouvelles cibles, 18 mars 1992, Paris. *1 vol., 130 p., 37 fig.* (1992). - 100 FF.
- N° 212 — J. LORENZ — Le Dogger du Berry. Contribution à la connaissance des plates-formes carbonatées européennes du Jurassique. *1 vol., 400 p., 12 pl.* (1992). - 450 FF.
- N° 213 — Vth international symposium on the observation of the continental crust through drilling Continental scientific drilling programs. Géologie profonde de la France. *1 vol., 288 p., 10 fig., 2 tabl.* (1992). - 100 FF.
- N° 214 — L. MERCIER — Approche thermique de la collision continentale dans le Massif central français : exemple des nappes de l'Artense. *1 vol., 234 p., nb fig., 14 tabl.* (1992). - 250 FF.
- N° 215 — Y.-M. LENINDRE, Ph. DUTARTRE — Découverte du bassin d'Arcachon par la télédétection spatiale. *1 vol., 110 p., 23 fig., 27 pl.* (1993). - 500 FF.
- N° 216 — J.-C. GOUJOU — Analyse pétro-structurale dans un avant-pays métamorphique : influence du plutonisme tardi-orogénique varisque sur l'encaissant épi à mésozonal de Vendée. *1 vol., 347 p.* (1992). - 400 FF.
- N° 217 — F. GIRAULT — Auscultation par imagerie numérique de quelques versants instables. *1 vol., 193 p.* (1992). - 200 FF.
- N° 218 — Forage scientifique Ardèche. Le forage de Balazuc. *1 vol., 122 p.* (1992). - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 219 — Late orogenic extension in Mountain-Belts. *1 vol., 230 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 220 — Y. LEI — La tectonique cassante du gisement aurifère de Salsigne (Aude, France). *1 vol., 174 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 221 — D. RABU (coordinator) — Stratigraphy and structure of the Oman mountains. *1 vol., 262 p., 143 fig., 24 tabl., 4 pl. h.t.* (1993). - 650 FF.
- N° 222 — F. MENILLET — Les meuliers du bassin de Paris (France) et les faciès associés. Rôle des altérations supergènes néogènes à quaternaire ancien dans leur genèse. *1 vol., 425 p., 186 fig., 34 tabl., 5 pl. photo.* (1993). - 450 FF.
- N° 223 — VI^e Symposium international sur l'observation de la croûte continentale par forage (VIth International Symposium of the observation of the continental crust through drilling). Publications. Géologie de la France. Paris 7-10 avril 1992 sous les auspices du Ministre de la recherche et de la technologie et du Programme international sur la lithosphère. *1 vol., 349 p.* (1993). - 400 FF.
- N° 224 — J.-P. MILESI, J.-L. LESCUYER — The Chessy Zn-Cu-Ba massive sulphide deposit and the devonian Brevenne volcanosedimentary belt (eastern Massif central, France). *1 vol., 258 p., 18 fig., 4 tabl., 8 pl.* (1993). - 350 FF.
- N° 225 — M. MOISY — Evolution de la perméabilité et de la circulation des fluides hydrothermaux dans une zone de cisaillement fragile. *1 vol., 214 p., 81 fig.* (1993). - 280 FF.
- N° 226 — G. RECOCHE — Les concentrations aurifères supergènes liées aux minéralisations sulfurées polymétalliques de la ceinture volcano-sédimentaire d'Ariab-Arbaat (Red Sea Hills Soudan) : étude du gisement de Hassaï. *1 vol., 320 p., 64 fig., 18 pl. h.t., 2 pl. annexes h.t.* (1993). - 450 FF.
- N° 227 — B. SETIAWAN — Les lignées granitiques et les skarns minéralisés en Zn de Longlai, Est-Kalimantan (Bornéo, Indonésie), *1 vol., 482 p., nombreuses fig., 9 pl. coul. h.t.* (1993). - 500 FF.
- N° 228 — R. HEBERT — Evolution tectonométamorphique d'un arc insulaire au Protérozoïque supérieur : le domaine de Saint-Brieuc (Massif armoricain), *1 vol.* (1994). - 350 FF.
- N° 229 — Géologie profonde de la France. Programme national soutenu par le ministère de la Recherche et de la Technologie. Forages scientifiques de l'Ardèche. Les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Forage Morte Mérie 1. Rapport d'exécution et données préliminaires. *1 vol., 156 p., 47 fig., 15 tabl.* (1993). - 420 FF.
- N° 230 — P. AMBERT — Symposium international "Géothermie 94 en Europe. De la recherche à l'exploitation". Orléans, France 8-9 février 1994. International symposium "Geothermics 94 in Europe. From research to development". Orléans, France, 8-9 february 1994. *1 vol., 516 p., 63 communications.* (1994). - 400 FF.
- N° 231 — L'évolution géomorphologique du Languedoc central depuis le Néogène (Grands Causses méridionaux - Piémont languedocien), *1 vol., 210 p., 137 fig., 3 cartes h.t.* (1994). - 450 FF.
- N° 232 — M. AZAROUAL — Modélisation des interactions solutions hydrothermales-granite. Application au futur échangeur géothermique de type roches chaudes sèches de Soultz-sous-Forêts, Alsace (France), *1 vol., 233 p., 73 fig., 25 tabl.* (1994). - 400 FF.

- N° 233 — H. VIVIAN, J.C. THOURET, J.C. BOCQUET, J.P. DEDIEU, D. FABRE, A. THOMAS — **Les instabilités d'un bassin-versant montagnard anthropisé. Le torrent de l'Eglise. Les Arcs. Savoie, 192p., 44 fig., 27 tabl., 12 cartes, 6 cartes en annexe (à paraître)**
- N° 234 — J.M. LEISTEL, D. BONIJOLY, C. BRAUX, Ph. FREYSSINET, A. KOSAKEVITCH, X. LECA, J.L. LESCUYER, E. MARCOUX, J.P. MILÉSI, P. PIANTONE, F. SOBOL, M. TEGYEY, D. THIÉBLEMONT, L. VIALLEFOND.— **The massive sulphide deposits of the South Iberian pyrite province : geological setting and exploration criteria, 1 vol., 236 p., 48 fig., 24 tabl. (1994) . - 450 FF.**
- N° 235 — S. CLAUSER — **Etudes stratigraphiques du Campanien et du Maastrichtien de l'Europe occidentale. Côte basque, Charentes (France), Limbourg (Pays-Bas), 1 vol., 266 p., 108 fig., 6 tabl. (1994).- 400 FF.**
- N° 236 — A. DAVID — **Influence des paramètres hydroclimatologiques sur les déplacements verticaux du radon-222 en zone non-saturée. 1 vol., 199 p., 111 fig., 3 annexes (1995). - 500 FF.**
- N° 237 — **Atelier sur les ressources minérales et le développement durable. Elincourt Sainte-Marguerite (France) (5-7 mai 1994). Résumés et documents de base. 167 p. Mineral resources and sustainable development : a workshop. Elincourt Sainte-Marguerite (France) 5-7 may 1994. Abstracts and background documents. 156 p. (1994) - 400 FF.**
- N° 238 — J. JEHLICKA — **Etude structurale de matières organiques soumises à des processus métamorphiques. 1 vol., 240 p., 38 fig., 23 tabl., 10 pl. photo (1994). - 480 FF.**
- N° 239 — Ph. ALVAREZ — **Les facteurs de contrôle de la sédimentation du supergroupe ouest-congolien (Sud-Congo). Rampe carbonatée et activité biologique au Protérozoïque supérieur. 1 vol., 235 p., 56 fig., 18 pl. photo (1995). - 500 FF.**
- N° 240 — D. LAHONDÈRE — **Les schistes bleus et les éclogites à lawsonite des unités continentales et océaniques de la Corse alpine. Nouvelles données pétrologiques et structurales. 1 vol., 285 p., 117 fig., 29 tabl., 6 pl. photo (1996) (à paraître)**
- N° 241 — C. ROTH — **Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie. 1 vol., 195 p., 81 fig. (1995). - 500 FF.**
- N° 242 — F. GUÉRIN — **Production et mécanismes de migration du radon-222 dans les milieux fissurés : application à la recherche des discontinuités perméables du socle cristallin. 1 vol., 282 p., 141 fig., 130 tabl. (1995). - 600 FF.**
- N° 243 — **Colloque international Minéralogie fondamentale et appliquée à la mémoire de Claude GUILLEMIN, 1923-1994. Résumés des communications. Institut de France 4 et 5 septembre 1995. 1 vol., 117 p. (1995). - 80 FF.**
- N° 244 — **Workshop on Albanian ophiolites and related mineralization. IUGS/UNESCO modeling programme, 10-17 October 1995. Papers and abstracts. Field guidebook. 1 vol., 191 p., 41 fig., 25 tabl. (1995). - 400 FF.**
- N° 245 — D. DESSANDIER — **Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre. 1 vol., 279 p., 97 fig., 53 tabl. (1995). - 600 FF.**
- N° 246 — G. OUILLON — **Application de l'analyse multifractale et de la transformée en ondelettes anisotropes à la caractérisation géométrique multi-échelle des réseaux de failles et de fractures. 1 vol., 313 p., 129 fig. (1995). - 650 FF.**
- N° 247 — **Colloque Géofrance 3D. Connaissance des structures et des processus géologiques du sous-sol de la France : vers un observatoire 3D de la croûte continentale. Synthèse des groupes thématiques. 1 vol., 88 p., 23 fig. (1995). - 200 FF.**
- N° 248 — **Colloque Formations superficielles et géomorphologie. Rouen 19-20 mars 1996. 1 vol., 99 p., 14 fig. (1996). - 250 FF.**
- N° 249 — F.G. BOURROUILH-LE JAN — **Plates-formes carbonatées et atolls du Centre et Sud Pacifique. Stratigraphie, sédimentologie, minéralogie et géochimie. Diagenèses et émersion : aragonite, calcite, dolomite, bauxite et phosphate. 1 vol., 365 p., 215 fig. (1996). - 600 FF.**
- N° 250 — F. LÉONE — **Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. 1 vol., 286 p., 65 fig., 34 tabl., 17 annexes (1996). - 600 FF.**
- N° 251 — C. DEZAYES — **Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages. Les forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts. 1 vol., 222 p., 117 fig., 6 fig. (1996). -500 FF.**
- N° 252 — C. CARNEC — **Interférométrie SAR différentielle. Application à la détection et au suivi de mouvements de terrain. 1 vol., 173 p., 77 fig. (1996). -400 FF.**
- N° 253 — A. GUTIEREZ — **Evaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte. 1 vol., 250 p., 174 fig., 65 tabl. (1996).- 600 FF**
- N° 254 — S. EL MAGNOUNI — **Méthodologie d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau souterraine. 1 vol., 178 p., 56 fig. (1996).-400FF**
- N° 255 — M. CALVET— **Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne : les Pyrénées orientales. 3 vol., 1177p., 111 pl. photo n. et bl (1996).-900FF**
- N° 256 — **Colloque contribution des eaux souterraines au fonctionnement des hydrosystèmes, conséquences pour la gestion, 1 vol., 134 p. (1996). -350 FF**
- N° 257 —M. CHABART — **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. (1996).-650 FF**
- N° 258 — F. CHEVRON — **Dénitrification biologique d'une nappe phréatique polluée par des composés azotés d'origine industrielle. 1 vol., 216 p., 46 fig. 17 tabl., 3 pl. photo (1996).-500 FF**

N° 259 – Y MARCHAND – Cartographies sédimentologiques et morphologiques par télédétection de la baie du Mont Saint-Michel (Ouest de la France) 1 vol., 236 p., 70 fig., 21 tabl. (1997).

N° 260 – P. ANDREIEFF – Note d'orientation pour l'établissement de la carte géologique de France à 1/50000. (1997) (sous presse)

N° 261 – A. COMPANY-REMOND – Images SAR : Possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (Modélisation et expérimentation) 1 vol., (1997) (sous presse).

Afin d'améliorer l'accès à l'information, les Éditions BRGM mettent à la disposition du public, certains documents notés comme (ÉPUISE) dans la liste ci-dessus.

Ces reproductions n'étant faites qu'au fur et à mesure des demandes, veuillez nous consulter pour devis.



BON DE COMMANDE

à présenter à votre librairie habituelle ou à défaut

à retourner à : **ÉDITIONS DU BRGM - B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS Cedex 2 - FRANCE**

Nom ou Organisme: _____

Adresse: _____

Veuillez me faire parvenir dès parution les Documents du BRGM
Je réglerai ceux-ci à réception de la facture

Veuillez me faire parvenir le(s) Document(s) suivant(s):

VOTRE MODE DE PAIEMENT AU CHOIX	
<input type="checkbox"/> Chèque postal <input type="checkbox"/> Chèque bancaire Carte bancaire <input type="checkbox"/> Visa <input type="checkbox"/> Eurocard <input type="checkbox"/> Mastercard	Avec votre carte de paiement <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SIGNATURE</div> <p style="text-align: center;">(N'oubliez pas d'inscrire son n° et de signer)</p>  Date d'expiration de votre carte bancaire 

	Nombre exemplaire	Prix unitaire	TOTAL
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
Total			-----
* Frais de port et d'emballage			-----
Montant total			-----

* 50 F pour la France ou 75 F pour l'étranger



Impression et façonnage

BRGM Service reprographie

Dépôt légal : mai 1997

La contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface a rarement été étudiée à une échelle régionale, telle que le bassin d'alimentation de la Garonne, en amont de son confluent avec le Tarn (15 000 km²). Sur ce bassin, il existe trois grands types de réservoirs souterrains : les aquifères karstiques, les nappes alluviales, et les formations colluviales et petits aquifères qui sont encore mal connus. L'apport des aquifères karstiques au réseau de surface varie suivant la saison. Il dépend de la nature du karst, de sa dynamique et de son altitude. Pour les nappes alluviales, les apports au réseau de surface ont lieu principalement en période de crue.

L'étude de la contribution des différents affluents montre que la Garonne, qui a un débit moyen de 199 m³/s, reçoit, indépendamment de la saison, la plus grande part des apports par le biais de la confluence de l'Ariège et du Salat. L'étude du tarissement, basée sur la formule de Maillat, fournit une estimation des réserves souterraines de quelques affluents. Le rôle joué par ces réserves est mis en évidence par les ACS (Analyses Corrélatoires et Spectrales). Ainsi, en 1985, les réserves les plus importantes sont présentes sur les bassins de l'Ariège (142 millions de m³), du Salat (111 millions de m³), et du Ger (21 millions de m³). Ce dernier possède les plus fortes réserves spécifiques (224 l/m²) et présente une régulation importante des apports qui proviennent de nombreuses sources karstiques. Les réserves souterraines du bassin de la Garonne sont, quant à elles, comprises entre 2,1 et 2,9 milliards de m³ en 1993. Elles représentent le principal réservoir d'eau du bassin, précédant le réservoir neigeux, estimé à 371 millions de m³, les réserves à vocation énergétique, et les réserves destinées au soutien d'étiage et à l'irrigation.

La composante souterraine de l'écoulement total de la Garonne à Portet, déterminée à partir de l'extrapolation du tarissement sur l'hydrogramme résiduel (hydrogramme sans l'influence des aménagements et sans l'écoulement neigeux), est comprise entre 46 % et 60 % en 1993. Le ruissellement représente de 34 % à 48 % de l'écoulement total. La composante neigeuse est estimée à 6 % à partir d'une comparaison, sur un cycle hydrologique, d'hydrogrammes centrés et réduits.

En ce qui concerne l'hydrochimie, la minéralisation augmente d'amont en aval. En amont, la hausse est due à deux affluents : le Ger et l'Ourse. Parmi les nombreuses variables chimiques, la pCO₂ est caractéristique de l'importance des eaux souterraines. Enfin, l'évolution du chimisme de l'eau le long de la Garonne est fortement marquée par la pollution, dès l'aval de Montréjeau.

Les teneurs en ¹⁸O et en ³H montrent, qu'au cours de l'étiage, c'est la partie pyrénéenne du bassin qui contribue le plus à l'écoulement total. La contribution des eaux souterraines provenant de la nappe alluviale, en particulier dans la région de Toulouse, est clairement démontrée par l'évolution des teneurs en ¹³C tout le long du fleuve. Les teneurs en ³H indiquent un temps de séjour des eaux relativement court, sauf pour le bassin du Ger dont les eaux possèdent une plus faible teneur en ³H du fait de réserves souterraines importantes.

Very few studies have been made of the contribution of groundwater to the discharge and quality of surface flow at regional scale, such as that of the catchment area of the Garonne river upstream of its confluence with the Tarn river (15,000 km²). Three main types of groundwater reservoir exist in the area: karstic aquifers, alluvial aquifers, and colluvial and local aquifers that are still poorly understood. The contribution from the karstic aquifers to surface flow varies seasonally depending on the nature, hydraulic behaviour and elevation of the karst. Minor exchange occurs between the alluvial aquifers and rivers, mainly during flooding.

The Garonne river, which has an average flow of 199 m³/s, is mainly replenished by the Salat and Ariège tributaries, regardless of the season. Study of the low-water stage using Maillat's formula has given a good estimate of the groundwater storage of certain tributaries, and the role played by the groundwater is demonstrated by correlation and spectrum analysis of discharge time series. For example, during 1985, the main storage was shown to be in the river basins of Ariège (142 million m³), Salat (111 million m³) and Ger (21 million m³). The Ger, which is the smallest tributary, has the highest specific storage (224 l/m²) and presents an important buffer effect related to numerous karstic springs. The total groundwater storage of the entire recharge area is estimated at 2.1-2.9 billion m³ for 1993. It is the largest water storage of the basin, greater than the snow cover (371 million m³) and the artificial storage for electric power plants, discharge buffering and irrigation.

The groundwater contribution to the total flow of the Garonne river at the Portet gauging station has been estimated at 46-60% of total discharge in 1993 by extrapolating the low-water stage from the residual hydrograph (hydrograph without the influence of dam reservoirs and snow cover). Direct runoff is estimated at 34-48% and the snow-melt component at 6% by comparing hydrographs from different gauging stations during the same hydrological year; data are centered with respect to their average and reduced by their variance.

Concerning water chemical contents, total dissolved solids increase downstream, but are affected in the upstream part mainly by two tributaries, the Ger and the Ourse. Of the numerous chemical variables, the partial pressure in CO₂ is characteristic of major groundwater contribution. Finally, the water chemistry evolution along the river is strongly modified by pollution downstream of the city of Montréjeau.

During the low-water stage, oxygen-18 and deuterium contents show that the Pyrenean part of the catchment area provides the main contribution to the total flow. The contribution of groundwater from the alluvial aquifers, particularly in the Toulouse area, is clearly shown by the evolution of carbon-13 contents along the river. Tritium contents indicate a very short residence time, except for the Ger river basin where the water has a lower tritium content due to a major storage effect.

Éditions BRGM

3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009
45060 Orléans Cedex 2, France

ISBN 2-7159-0846-6