

# Influences climatiques et pression anthropique sur l'hydrologie des bassins karstiques des vallées de la Dordogne et du Lot : aide à l'aménagement et à la gestion de la qualité des ressources en eau

Frédéric Hoffmann, André Tarrisse

## Résumé

La gestion de l'eau potable dépend de l'exploitation de différents hydrosystèmes (superficiels et souterrains). Ces derniers subissent une pression anthropique accrue, se traduisant par une pollution de plus en plus forte et de plus en plus diversifiée. La principale difficulté consiste en une détermination des seuils d'apparition des pollutions, différents de ceux concernant la toxicité. Notamment, les normes des hydrosystèmes superficiels ne peuvent s'appliquer aux hydrosystèmes souterrains, de par leurs caractéristiques et leurs dynamiques. La gestion qualitative des eaux peut être considérée sous deux angles : d'une part, elle doit être envisagée à l'aide d'une approche temporelle, afin de mettre en évidence certains mécanismes de restitution des polluants par les hydrosystèmes, et notamment l'impact du climat dans ses mécanismes. D'autre part, cette approche doit être complétée par une vision spatiale, géographique, afin de mettre en relief la pression anthropique différentielle exercée sur certains bassins.

---

## Citer ce document / Cite this document :

Hoffmann Frédéric, Tarrisse André. Influences climatiques et pression anthropique sur l'hydrologie des bassins karstiques des vallées de la Dordogne et du Lot : aide à l'aménagement et à la gestion de la qualité des ressources en eau . In: Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, n°18, Février 2000 1999. pp. 63-97;

doi : <https://doi.org/10.3406/tlgpa.1999.967>

[https://www.persee.fr/doc/tlgpa\\_0249-647x\\_1999\\_num\\_18\\_1\\_967](https://www.persee.fr/doc/tlgpa_0249-647x_1999_num_18_1_967)

---

Fichier pdf généré le 18/03/2019

# **INFLUENCES CLIMATIQUES ET PRESSION ANTHROPIQUE SUR L'HYDROLOGIE DES BASSINS KARSTIQUES DES VALLEES DE LA DORDOGNE ET DU LOT :**

## **aide à l'aménagement et à la gestion de la qualité des ressources en eau**

**Frédéric HOFFMANN**  
**André TARRISSE**

*Une grande partie des résultats présentés dans cet article provient d'un programme d'étude réalisée par F. HOFFMANN pour le compte du Conseil Général du Lot et de la cellule hydrologie de la DDAF - 46 (responsable : A. TARRISSE). Ce programme vise à déterminer la qualité des eaux du bassin du Lot, et notamment la qualité des ressources souterraines et bénéficie d'un appui technique de la DIREN Midi-Pyrénées (responsable : M. BARTHELEMY, et J.M. BARADAT pour les analyses hydrochimiques). Ce programme représente un suivi hebdomadaire de la qualité de 40 points d'eau répartis dans l'ensemble du département du Lot, et s'inscrit dans le cadre de la MISE 46 (mission interservices de l'eau du département du Lot). Il se poursuit actuellement et ne sont livrés ici que des résultats partiels. L'autre partie des résultats provient de recherches effectuées sur les hydrosystèmes de surface et souterrains du bassin de la Dordogne, campagnes hydrologiques menées de 1994 à 1996 (HOFFMANN, 1998).*

**Résumé :** La gestion de l'eau potable dépend de l'exploitation de différents hydrosystèmes (superficiels et souterrains). Ces derniers subissent une pression anthropique accrue, se traduisant par une pollution de plus en plus forte et de plus en plus diversifiée. La principale difficulté consiste en une détermination des seuils d'apparition des pollutions, différents de ceux concernant la toxicité. Notamment, les normes des hydrosystèmes superficiels ne peuvent s'appliquer aux hydrosystèmes souterrains, de par leurs caractéristiques et leurs dynamiques. La gestion qualitative des eaux peut être considérée sous deux angles : d'une part, elle doit être envisagée à l'aide d'une approche temporelle, afin de mettre en évidence certains mécanismes de restitution des polluants par les hydrosystèmes, et notamment l'impact du climat dans ses mécanismes. D'autre part, cette approche doit être complétée par une vision spatiale, géographique, afin de mettre en relief la pression anthropique différentielle exercée sur certains bassins.

**Mots-clés :** Climat, hydrologie, qualité des eaux, pression anthropique, pollution chimique, hydrosystèmes karstiques, Lot, Dordogne.

Dans une optique de développement durable, la gestion des ressources en eau peut être envisagée de deux façons différentes et complémentaires : de façon quantitative et qualitative. Le premier aspect a fait l'objet d'intenses recherches en vue de doter chaque commune ou chaque syndicat d'une ressource en eau exploitable d'un point de vue de l'AEP, c'est-à-dire de l'adduction d'eau potable. En zone karstifiée, les ressources exploitables présentent de

meilleures aptitudes dans l'ensemble par rapport à d'autres types de régions (socle cristallin), mais leur gestion pose de délicats problèmes : connaissance du fonctionnement du milieu noyé, délimitation des périmètres d'alimentation des sources, précision des périmètres de protection des ressources, etc. Cette gestion a demandé d'importantes recherches pour mieux connaître cet aspect quantitatif, lequel pose encore de gros problèmes dans le département du Lot et dans les autres départements limitrophes.

Cependant, cette gestion quantitative est directement en relation avec la nature de l'hydrosystème considéré, mais aussi avec le climat et notamment la répartition dans le temps des pluies et leur intensité. Ces deux aspects déterminent le renouvellement des ressources, quelque soit leur nature : niveau perché de sources, nappe phréatique calcaire, nappe alluviale, nappe profonde, etc.

L'aspect qualitatif de l'eau est en revanche moins bien connu, et n'a pas fait l'objet d'investigations profondes, tout du moins dans le département du Lot. La nécessité de faire un état des ressources en eau et l'inventaire des pollutions (directive européenne sur les nitrates, notamment) a inversé récemment la tendance. Cette approche nécessite de poser un certain nombre de questions de méthodologie liées à la fois à l'étude de l'eau en elle-même, mais également en terme d'aménagement. En effet, si l'homme modifie peu les ressources en terme de quantité, il n'en est pas de même sur un plan qualitatif. Par son action, il modifie très souvent la qualité de l'eau. Il en découle une interrelation profonde entre mécanisme climatique affectant un bassin hydrologique donné et pression anthropique sur ce même milieu notamment en termes de pollution (cf. *infra*).

Cette interrelation entre pression anthropique et rôle du climat peut être envisagé sous deux dimensions qui se combinent entre elles. La première est sans conteste celle du temps : en effet, cette relation va varier dans le temps selon l'échelle de perception (temps court, temps moyen, temps long), qu'il nous faudra préciser. L'autre dimension est celle de l'espace, lié plus directement aux implantations humaines et à la pression qu'elles exercent sur un bassin.

L'objectif de cet article est donc double : **apporter une aide directe à la gestion des eaux** en fournissant des données relatives à la qualité des eaux, mais également **fournir des éléments méthodologiques** transposables à d'autres bassins.

## **I - MÉTHODOLOGIE D'APPROCHE DE LA QUALITÉ DE L'EAU ET DÉFINITIONS**

Il est nécessaire avant tout de faire le point sur quelques paramètres qui définissent la notion de qualité de l'eau.

## **A - Les différents milieux exploitables d'un point de vue de l'eau potable**

De façon schématique, on peut déterminer deux grands types de milieux exploitables pour l'AEP : les eaux souterraines et les eaux de surface.

### **1 - les eaux souterraines**

Pour la clarté de l'exposé, on peut séparer dans le Lot ce milieu souterrain en deux grands domaines : les aquifères calcaires et les nappes alluviales.

#### **a - les nappes souterraines en zone calcaire**

L'essentiel des ressources exploitées provient des nappes souterraines et/ou de leurs exutoires (sources, résurgences, etc.). Très souvent, les captages se font pour des raisons pratiques sur les sources quand les nappes sont trop profondes ou directement sur la nappe quand celle-ci affleure, ou demeure à faible profondeur. Elle peut être exploitée à plus grande profondeur quand elle présente des caractéristiques de rentabilité d'exploitation, quand elle répond à l'essentiel des critères de potabilité ou en l'absence, en surface, de ressources suffisamment importantes. On comprend alors que l'un des paramètres importants dans l'exploitation de l'eau est la rentabilité en terme de débit : il faut qu'un organisme puisse débiter suffisamment pour qu'il soit capté. Ceci justifie très souvent les captages en nappe superficielle. En zone calcaire, ces captages peuvent se faire directement sur les exutoires de certaines nappes. Dans un département comme le Lot, l'essentiel des ressources provient des nappes phréatiques en zone calcaire. En effet, les causses offrent de puissants réservoirs aux multiples exutoires. Initialement, ils permettaient alors à chaque syndicat d'exploitation de disposer de sa propre ressource. La situation actuelle est en train de changer sous la pression de l'homme, car les normes de potabilité deviennent de plus en plus contraignantes.

#### **b - les nappes souterraines en domaine alluvial**

Pour toutes les communes situées sur les deux grandes vallées du Lot et de la Dordogne, il est possible de capter à faible profondeur les nappes drainant les alluvions de ces vallées. Ces nappes se situent en général au contact du substratum calcaire et des grandes terrasses alluviales. Elles ne sont qu'une variante des nappes souterraines. Elles posent de plus en plus de problèmes d'exploitation d'un point de vue qualitatif, car la dégradation des ressources en eau est ici très sensible. Il est rare de trouver actuellement des captages de bonne qualité provenant de ce type de milieu, car ils sont très souvent intensivement cultivés. L'agriculture intensive induit alors l'utilisation en quantités, parfois irraisonnées, d'engrais et de produits phytosanitaires, dans un milieu dont les caractéristiques permettent à la fois un drainage rapide vers les nappes et à la fois une accumulation temporaire en quantité importante de ces produits. Se pose alors le problème de la gestion des produits dits "rémanents" : ce sont des substances dont la présence se prolonge même plusieurs années après leurs mises en circulation.

C'est ainsi que dans la plupart des secteurs de grandes vallées des départements agricoles du Sud-Ouest, on frôle des records notamment dans les teneurs en nitrates : jusqu'à 200 mg/l dans certaines vallées tarnaises et du Lot-et-Garonne, jusqu'à 100 mg/l dans la vallée de la Dordogne. Ces teneurs sont le résultat d'intenses fertilisations et de phénomènes de concentrations multiples affectant les eaux. En effet, l'eau enrichie en nitrates par simple lessivage des sols est ensuite pompée pour l'irrigation agricole et rejoint ensuite la nappe légèrement enrichie des excédents azotés présents dans les sols, et ainsi de suite. En l'absence de programme de fertilisation raisonnée, ces ressources sont irrémédiablement détruites sur un plan qualitatif et ne devraient être réservées qu'à un usage proprement agricole. **En effet, cet aspect irrémédiable ou irréversible à l'échelle de l'homme, tient au fait que l'on ne dispose à l'heure actuelle ni des moyens techniques, ni des moyens financiers pour restaurer la qualité de ces ressources.** De plus, ces secteurs d'alluvions connaissent toujours une intense polyculture, qui aggrave chaque jour davantage cette pollution. Dans ce sens, on peut alors parler de processus irréversible. C'est pour cette raison que l'étude de ces eaux n'est pas reprise dans ce travail.

## **2 - Les eaux superficielles**

La deuxième grande ressource en eau réside dans les rivières et les ruisseaux, c'est-à-dire, dans les hydrosystèmes superficiels. Ils ne sont que très rarement captés en zone calcaire, mais fournissent parfois d'importantes quantités d'eau. Dans le cas des bassins du Lot et de la Dordogne, certains pompages sont effectués dans des petites rivières, notamment dans la partie cristalline de ces bassins. Ils répondent à l'absence ou à la difficulté de trouver d'autres ressources exploitables. Il est parfois nécessaire de constituer des lacs de retenue pour assurer la distribution de l'eau en période d'étiage (Lac du Tolermé dans le département du Lot).

De façon générale, les cours d'eau superficiels ne présentent que de faibles aptitudes à l'exploitation en AEP du fait de leurs caractéristiques hydrologiques (irrégularités des débits, turbidité, charges organiques, etc.). Ils sont cependant très sensibles aux déstabilisations anthropiques et c'est à ce titre que nous les avons intégrés dans cette étude. Signalons enfin, que très souvent, les grosses sources karstiques peuvent recevoir un apport non négligeable en eaux de surface dans leur alimentation par le biais d'infiltration en profondeur d'eaux superficielles (source de Touzac-Soturac - Lot, module moyen : 4 m<sup>3</sup>/s).

## **B - La notion de pollution et pression anthropique**

### **1 - La notion de pollution**

La notion de pollution doit être précisée car très souvent, l'amalgame entre toxicité et pollution est fait. De ce fait, il existe différentes définitions de cette notion, que l'on peut classer de la façon suivante :

- le premier apport d'azote va provenir de la pluie. On sait que l'azote est l'un des principaux constituants de l'air et que certains mécanismes liés à l'orage favorisent la production d'azote oxydé dans l'eau de pluie. Ces teneurs sont faibles (cf. *infra*) et

peuvent servir comme référent naturel ; on est ici dans un système naturel, en dehors de toute pression anthropique.

On sait également que certains brouillards peuvent condenser des rejets toxiques contenant de l'azote. Ainsi, le Laboratoire d'Hydrologie karstique de l'université de Sosnowiec (Pologne) indique-t-il que ces brouillards peuvent contenir de grandes concentrations en nitrates d'origine industrielle, pouvant atteindre jusqu'à 120 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  (Pulina, comm. orale). En dehors de cette situation, les teneurs sont très basses ;

- à un deuxième niveau, après infiltration des eaux de pluies, on peut retrouver sur certaines sources des teneurs plus basses que dans la pluie, dues à un début de consommation par les organismes végétaux et ceux du sol. Ces systèmes de référence "anitriifiés" sont rares mais existent dans le département du Lot (cf. *infra*) ;

- à partir de 10 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , on considère que l'on se place dans un fonctionnement qui dépasse largement le seuil naturel, et à partir duquel la plupart des hydrosystèmes ont du mal à assimiler cette pollution nitratée. Cette valeur est assez basse, mais elle correspond au faible pouvoir de recyclage naturel des hydrosystèmes souterrains notamment.

Dans le cas des vallées du Lot et de la Dordogne, on constate que très souvent les hydrosystèmes dépassant ce seuil présentent un niveau de désordre biologique important. Celui-ci peut être constaté de façon visuelle (prolifération d'espèces), mais peut-être également quantifié par des indices de mesure de la biodiversité (IBGN : Indice biologique global normalisé), par exemple. Ici, l'état de santé de l'hydrosystème peut redevenir bon à condition d'arrêter les processus de rejet sur le bassin de l'hydrosystème.

Il n'est pas facile de déterminer un seuil équivalent pour les phosphates par manque de données. On considère qu'au delà de 0,1 mg/l de  $\text{PO}_4^{3-}$ , on est en présence d'un hydrosystème qui subit une pression anthropique réelle ;

De toute façon, si l'on constate un désordre biologique même mineur, on est alors en présence d'une pollution, c'est-à-dire, en présence d'une modification du fonctionnement d'un système naturel par l'introduction d'un agent extérieur ;

- à partir de 25 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , on est alors en présence d'une pollution avérée ou forte, atteignant la norme de potabilité de certains pays de la Communauté Européenne. Dans une telle situation, très souvent, l'hydrosystème présente des caractéristiques d'un mauvais état de santé. Il est très souvent incapable d'assimiler cette pollution, que ce soit de façon saisonnière ou chronique ; nous considérons qu'au delà de 0,5 mg/l de  $\text{PO}_4^{3-}$ , on obtient une situation équivalente du point de vue des phosphates. On est alors dans une situation de forte pression anthropique ;

- enfin, dès que l'on atteint le seuil de 50 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  (norme française) et au delà, on se place dans le cadre d'une pollution très forte et d'une toxicité importante sur un plan humain. On rentre alors dans une logique sanitaire où l'eau doit être traitée pour être consommée. A cette teneur, le seuil de toxicité immédiate est franchi. Mais rien n'exclut que l'on puisse considérer qu'il existe un seuil de toxicité à long terme reposant

sur des valeurs plus basses. Nous ne disposons pas malheureusement du seuil de toxicité des phosphates.

Il est important de noter que si l'on se place dans une logique de conservation de la qualité des eaux il ne faut pas atteindre le seuil de toxicité, car la qualité des eaux est alors nulle. Il faut se placer en dessous du seuil de 10 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , qu'il faut considérer comme un seuil d'alerte.

En outre, quand on aborde les problèmes de pollution, on raisonne très souvent en terme concentration, qui est fonction du poids de l'élément exprimé en unité de volume (très souvent le litre). Il faut lui associer la notion de flux, c'est-à-dire, le produit de la concentration par le débit. Cette dernière permet alors d'avoir une idée des quantités de polluants exportées par un hydrosystème.

Par exemple, un système ayant un débit de 2 l/s et une concentration en nitrates de 25 mg/l, exporte chaque seconde 50 mg/l de nitrates. Un système ayant un débit de 1000 l/s, mais une concentration de seulement 10 mg/l de nitrates, exporte chaque seconde près de 10 g de nitrates, soit 200 fois plus que le système précédent pour une concentration deux fois plus faible ! Il faut tenir compte de ces aspects dans la recherche des origines de l'eutrophisation qui est aussi liée aux quantités de substances polluantes qui absorbent de l'oxygène. De plus, il faut faire attention dans certains épisodes de crue d'un système : le pic de concentration peut être décalé par rapport à celui du flux. Une telle situation induit alors deux états de pollution successifs.

De même, la pollution correspond à diverses situations sur un plan fonctionnel. En effet, en dehors de la modification du fonctionnement d'un hydrosystème par l'introduction d'une substance toxique, il existe deux situations supplémentaires.

D'une part, il s'agit de l'introduction d'éléments qui n'existaient pas à l'état naturel, sans qu'il entraîne dans un premier temps, de pollution directe. Il s'agit la plupart du temps de déchets dont les produits de décomposition deviennent polluants (matières plastiques, par exemple).

D'autre part, l'action humaine constitue très souvent un facteur de pollution très important des hydrosystèmes. En effet, les actions de modification du fonctionnement des bassins versants sont très fréquentes. L'un des plus beaux exemples est celui du déboisement qui de façon directe peut entraîner une déstabilisation des sols et une augmentation de la turbidité des eaux. Là, on ne se place plus dans une situation de toxicité, même si les eaux deviennent impropres à la consommation par une turbidité excessive.

Enfin précisons que si l'on se place dans une logique de conservation de la qualité des ressources en eau, il ne faut pas attendre d'atteindre le seuil de toxicité pour agir. Tout le problème réside alors dans la détermination du seuil au delà duquel on estime mettre en danger cette qualité. Il est clair qu'en France, c'est le choix de la toxicité qui dicte l'établissement des normes quand elles existent (absence de norme claire concernant les phosphates). Cette situation explique pourquoi la dégradation des ressources est si importante dans notre pays.

## **2 - La notion de pression anthropique**

En première approche, on peut définir la pression anthropique sur un bassin hydrologique comme la somme des effets des activités humaines perturbant le fonctionnement naturel de ce bassin. Ces activités humaines entraînent alors une pollution du milieu naturel. Elles correspondent très souvent à l'introduction, parfois en quantité massive, de substances nocives ou toxiques pour l'environnement et la santé (polluants azotés, phosphorés, phytosanitaires, épandages d'effluents issus des élevages ou des stations d'épuration, etc.). Ces rejets sont en relation directe avec les activités humaines : en milieu rural ou faiblement urbanisé, la plupart des rejets concerne les activités agricoles (cultures et élevage) et l'assainissement peu ou mal maîtrisé.

Dans le département du Lot, l'essentiel des ressources exploitées dans le Lot est d'origine karstique et/ou profonde, alors que l'essentiel des investigations en terme de qualité concerne les eaux de surface, répondant à d'autres problématiques environnementales. Le déficit en analyse est sensible, et ne permet pour l'instant que de disposer d'une image partielle de ces ressources. En d'autres termes, on gère aujourd'hui une ressource que l'on connaît peu ou bien mal !

### **C - Le choix des paramètres d'appréciation de la pression anthropique**

Les actions exercées par l'homme sur son milieu sont diverses et peuvent engendrer différentes conséquences. Elles varient dans le temps et nécessitent la mise en place d'un suivi des systèmes pour leur mise en évidence. Mais le choix de paramètres d'appréciation n'est pas évident. La mesure des nitrates et surtout des phosphates s'est rapidement justifiée, car ces deux paramètres répondent à différents aspects : l'adaptation au suivi implique un coût de revient non négligeable et exclut d'entrée la mesure de paramètres chimiques plus fins (isotopes), c'est-à-dire dont la sensibilité de réaction est importante, mais dont l'interprétation reste délicate. A contrario, on connaît l'affinité qui relie un paramètre à un polluant déterminé : le bore avec les lessives par exemple. Malheureusement, cet élément est très difficile à déterminer, et ne peut s'appliquer à un suivi régulier dans le temps (problème de coût financier et de moyens techniques de mesure).

L'intérêt des nitrates et des phosphates est d'être présents à l'état naturel, à des teneurs très faibles et mesurables par des moyens simples. Il est possible alors de mesurer l'écart par rapport à ces teneurs naturelles et de déterminer des niveaux de pression anthropique faibles, moyens, et forts. Surtout, il est important de mesurer les phosphates, trop souvent oubliés dans les analyses d'eau, et qui s'avèrent être de très bons marqueurs anthropiques.

D'autres paramètres complémentaires peuvent être envisagés, car certains révèlent assez bien l'impact climatique ou au contraire la pression anthropique :

- la turbidité fait partie des paramètres contraignant la potabilité des eaux et ne doit pas dépasser un seuil très bas. Elle pose un problème d'interprétation car il existe une turbidité

naturelle très variable d'un système hydrologique à un autre. Au sein de celle-ci, il n'est pas facile de distinguer la part des turbides d'origine naturelle de ce qui est proprement anthropique (rejet d'épuration, par exemple). Seule une identification au MEB (microscope électronique à balayage) permet d'identifier correctement les particules. Ce type d'analyse peut s'appliquer de façon complémentaire dans un programme (travail en cours), mais ne peut pas être envisagé sérieusement dans le cadre d'un suivi ;

- l'oxygène dissous est un paramètre fréquemment employé dans la recherche du niveau de déstabilisation d'un hydrosystème naturel. Notamment, on le mesure très fréquemment sur les eaux de surface dans l'appréciation des phénomènes d'eutrophisation des cours d'eau, en complément des mesures de taux chlorophylliens. Plus ce taux d'oxygène dissous est bas, et plus il sous-tend la présence de matières oxydées dans l'eau. On peut lui reprocher son manque de discrimination, car il révèle en fait la somme de tous les polluants oxydés (nitrates - nitrites - phosphates - sulfates le cas échéant). Il peut être complémentaire d'un suivi des paramètres polluants proprement dits ;

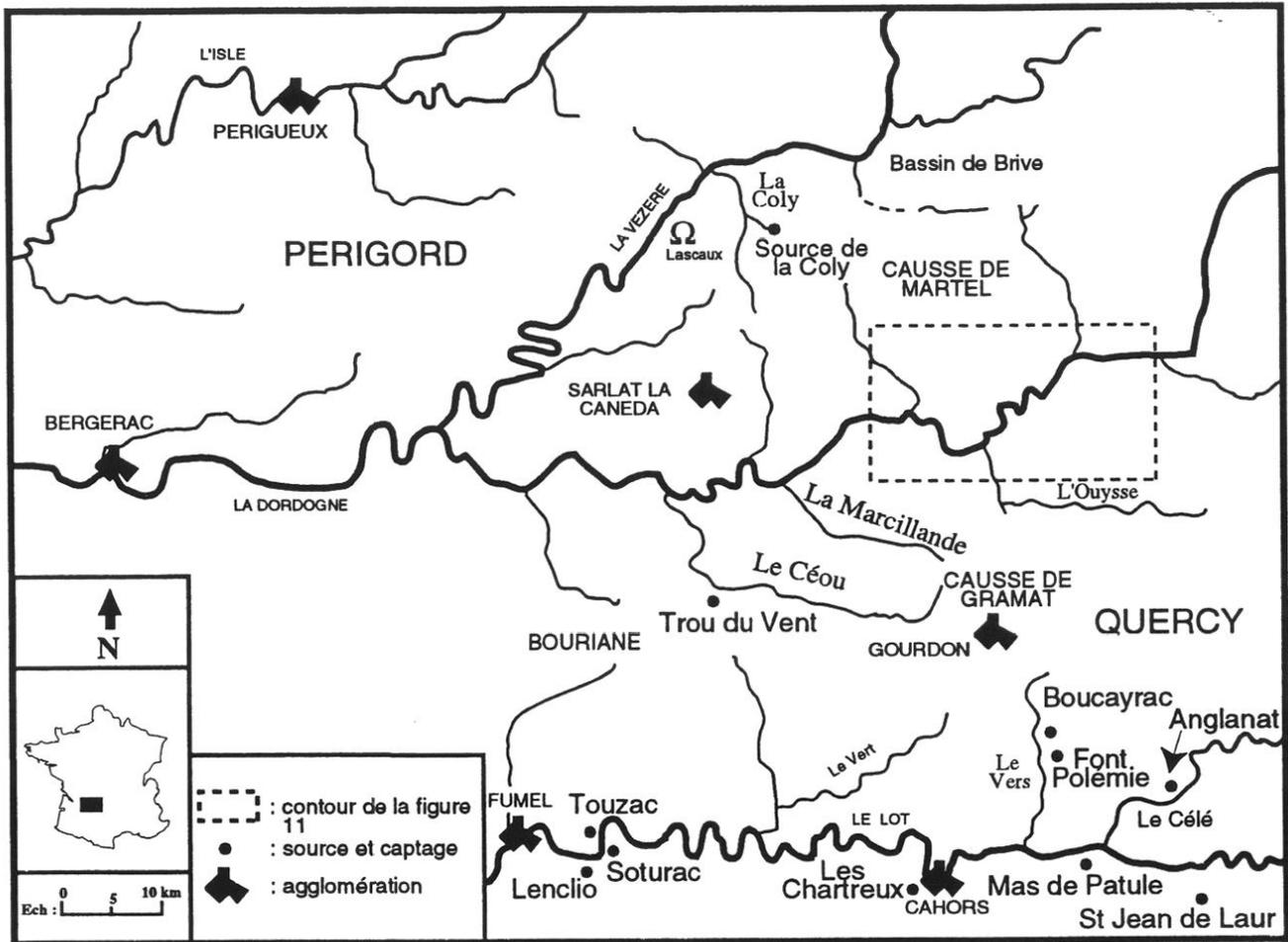
- les mesures de bactériologie permettent une identification encore plus fine de l'origine des polluants. En effet, la présence de bactéries thermotolérantes, de coliformes fécaux et de streptocoques sont des indicateurs de la mauvaise qualité des eaux. Elles ne sous-tendent qu'une partie des activités agricoles (à l'exclusion des cultures sauf dans le cas d'épandages), à la différence des polluants chimiques que l'on retrouve à la fois en domaine d'élevage mais également en contexte cultural. En outre, les techniques de prélèvement sont particulières et sont relativement contraignantes pour un suivi à échelle de temps rapprochés (séquentiel rapproché) ;

- les phytosanitaires représentent un important foyer de pollution en zone rurale car leur ecotoxicité est en général importante. Parmi les plus connus, signalons le Lindane, objet d'interdiction, l'Atrazine, le Simazine et le Diuron, qui font l'objet d'un suivi par l'Agence de l'Eau ;

- les micropolluants organiques : les AOX (organohalogènes adsorbables) sont des éléments liés le plus souvent aux activités industrielles. Ils possèdent un effet écotoxique élevé, même à de faibles doses. Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont liés aux carburants et semblent être des marqueurs liés aux axes routiers et aux industries du pétrole. Ils peuvent être mesurés en cas de déversement accidentel dans les hydrosystèmes proches des grands axes routiers. Enfin, les PCB (polychlorobiphényles) sont des produits interdits par la loi, mais dont on peut encore mesurer certains effets écotoxiques du fait de leur importante rémanence (action à long terme).

## **D - L'identification des générateurs de pollutions chimiques et les seuils d'apparition**

Rappelons que l'on se place ici dans un contexte essentiellement agricole et faiblement urbanisé qui limite les rejets en métaux lourds et autres types de rejets liés plus spécifiquement aux milieux urbains et industriels.

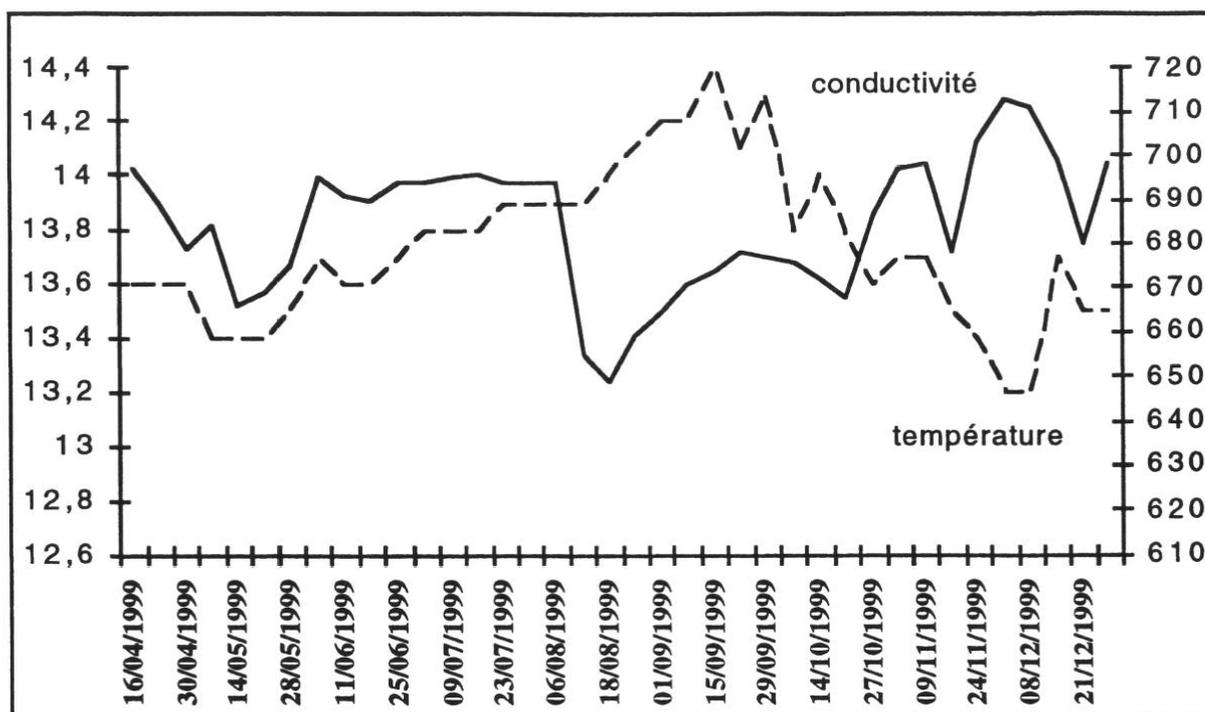


**Figure 1 : carte de localisation des sites de prélèvement ou d'étude**

Deux problèmes se posent alors : celui d'identifier correctement les générateurs de pollution et à partir de quelle teneur il convient de considérer qu'ils sont significatifs d'une intervention humaine.

### 1 - Les générateurs de pollution

L'eau est un formidable vecteur de polluants chimiques et très souvent, on mesure à l'exutoire la somme des diverses sources de pollutions. Mais également, on mesure les potentialités du milieu à diluer ces pollutions. Cependant, il faut recourir à d'autres méthodes pour pouvoir identifier très précisément les sources de polluants. L'intérêt du suivi est donc de mesurer toutes les réponses aux impulsions climatiques, réponses différentes en fonction de la répartition des pluies, de la nature du système hydrologique et de la localisation des générateurs de pollution sur un bassin.

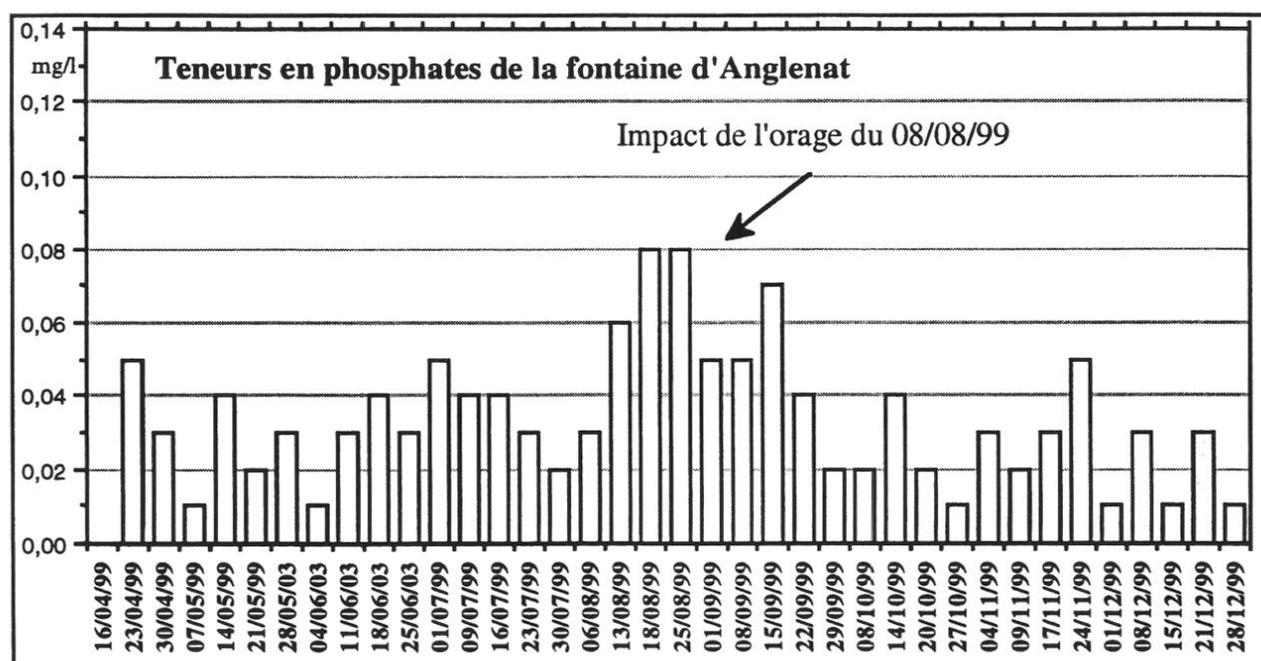
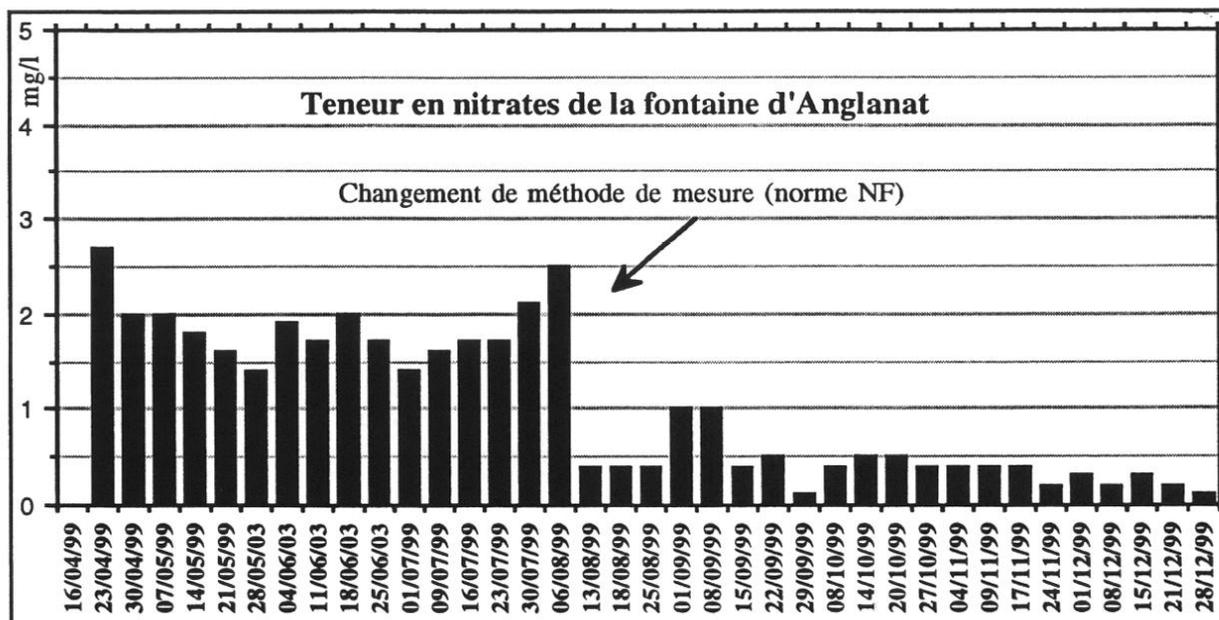


**Figure 2a : caractéristiques physico-chimiques du système de référence d'Anglanat :** On remarque très bien l'importante minéralisation globale des eaux et la dilution qu'elle subit, en liaison avec les orages d'été. Cette période (août) correspond également à un réchauffement des eaux, important sur ce petit hydrosystème.

Cependant, il est possible de préciser le rôle de chaque polluant et d'identifier son origine. En effet, on peut estimer que l'essentiel des nitrates non naturels provient des activités agricoles et d'élevage. En effet, des travaux récents (Hoffmann - Tarrisse, inédit) ont montré que l'essentiel des rejets de l'assainissement se fait sous la forme de phosphates principalement et de nitrates en faible proportion, ainsi que d'autres éléments chimiques liés à l'azote (l'ammoniaque, les nitrites). Le problème est que l'ammonium ou les nitrites ne sont pas stables dans le temps et ont tendance à s'oxyder en nitrates. En cas de stockage, ils ont tendance à disparaître au profit des nitrates. On aura donc tendance à interpréter les résultats en terme de profil de la façon suivante :

- **phosphates + nitrates + ammonium-nitrites, éventuellement :**  
**assainissement essentiellement ;**
- **nitrates seuls : activités agricoles essentiellement ;**

Il semble que certaines activités spécifiques d'élevage comme la pisciculture favorisent la production de phosphates, mais ceci reste à confirmer. De façon globale, on obtient très souvent des marquages très nets concernant les assainissements défectueux ou absents. Concernant les marquages d'origine agricole, il faut recourir à l'analyse des modalités d'occupation du sol pour mieux préciser l'origine de la pollution.



**Figure 2b : caractéristiques hydrochimiques du système de référence d'Anglanat : le faible impact de l'orage du 8/08/99 au niveau des polluants s'explique par l'absence de générateurs de pollution sur ce petit bassin.**

## 2 - Les seuils d'apparition et les normes AEP

Se pose alors le problème de déterminer correctement le seuil d'intervention d'un polluant, seuil au delà duquel il est susceptible de modifier le fonctionnement naturel d'un hydrosystème.

Dans une optique environnementale, ce seuil doit correspondre au point d'apparition du "désordre biologique" (et non au seuil de santé), c'est-à-dire, à partir du moment où l'on estime qu'un polluant par sa présence peut favoriser le développement d'une espèce au détriment des

autres. Ces états de désordre biologique se rencontrent de plus en plus fréquemment dans la nature. La manifestation la plus évidente à l'oeil est la croissance d'algues vertes filamenteuses, par exemple, mais elle peut prendre d'autres formes qu'il ne nous appartient pas de présenter ici. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de réfléchir sur l'écart éventuel de ce seuil et des normes appliquées en France.

#### a - les seuils d'apparition des polluants

L'un des principaux apports de ce travail est d'entamer une réflexion partielle sur cette notion d'apparition des polluants. Notre but n'est pas d'ériger une série de normes inflexibles, mais plutôt de proposer quelques éléments de réflexion sur ces seuils.

\* La base préalable à ce travail représente la calibration des hydrosystèmes. Elle peut s'appuyer sur une double approche :

- d'une part, sur une étude de la composition des eaux de pluie qui représente le premier élément influant le fonctionnement d'un système hydrologique, élément que l'on peut nommer alors "intransit" ;
- d'autre part, sur la recherche de systèmes hydrologiques où les nitrates sont totalement absents ou au seuil de détection, ou pouvant être considérés comme reflétant le régime naturel. On peut alors considérer ces hydrosystèmes comme des systèmes de référence "anitrités" ;

\* Les premiers résultats menés sur l'eau de pluie précisent les très faibles teneurs d'azote oxydée en nitrates, comprises entre 0,5 et 2 mg/l sur une dizaine d'échantillons, très souvent inférieures à 1,6 mg/l. De même, concernant les phosphates, il semble que tous les échantillons mesurés laissent entrevoir des résultats positifs, compris entre 0,05 et 0,15 mg/l. Compte tenu de l'irrégularité des résultats, nous nous contenterons de préciser que les résultats sur eaux de pluies sont positifs sans proposer de concentration minimale.

\* Ces résultats semblent se confirmer au niveau de l'étude de la petite source de la Fontaine d'Anglanat (**fig. 1**). En effet, son suivi sur plus de 30 semaines indique une restitution en nitrates et phosphates très faible (**fig. 2**) :

- les nitrates montrent des teneurs comprises entre 0,4 et 2,5 mg/l. L'utilisation de méthodes plus précises de détermination indique que cette teneur est plus proche de 0,5 mg/l que de 2 mg/l ;
- de même, les valeurs de phosphates sont toutes inférieures à 0,1 mg/l, oscillant autour de la valeur moyenne de 0,04 mg/l. Deux valeurs proches de 0,08 mg/l indiquent un lessivage plus important des sols peu épais présents sur le périmètre d'alimentation de la source, à la suite d'un orage assez violent.

\* On peut alors considérer, en première approche qu'en l'absence de toute présence humaine et de toute activité, sur un bassin avec des sols très peu épais, on obtient un régime naturel proche de 0,5 mg/l en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et de 0,03-0,05 mg/l de phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Les valeurs plus basses par rapport à la pluie peuvent s'expliquer par un début de consommation de

ces deux éléments au niveau des sols et de la végétation présents sur la zone d'alimentation de la source, ou par une teneur plus basse des eaux de pluies.

Compte tenu des variations dans l'épaisseur des litières, des sols et des couvertures pouvant recouvrir les bassins hydrologiques, nous proposons pour le Lot les seuils d'apparition suivants :

- 2 mg/l pour les nitrates ;
- 0,1 mg/l pour les phosphates.

### b - les normes AEP et le système SEQ-eau

Rappelons en préambule que les normes applicables à l'eau répondent à une logique. En effet, dans une optique conservatoire, il faut alors considérer la norme zéro comme seule norme acceptable afin de pouvoir préserver le potentiel maximal de qualité. Avec 50 mg/l de nitrates tolérés, on se place dans une optique de tolérance de rejets en grande quantité compatibles avec certaines activités économiques polluantes (agriculture, industrie, etc.). L'effet induit par cette norme très élevée ne peut être que celui d'un laisser-faire favorable au développement de ces activités polluantes. De même, le flou entourant l'absence de normes de rejet des phosphates permet de tolérer sur un plan légal leur présence dans l'eau.

Les différentes Agences de l'eau ont proposé un système d'évaluation de la qualité des eaux (SEQ-eau) pour évaluer le niveau des pollutions dans les différentes régions françaises. Ce système est en fait une grille d'évaluation de la qualité en fonction des normes. Elle concerne les éléments que l'on retrouve naturellement dans l'eau et fait le point sur des dizaines de produits toxiques générés par l'agriculture. Ces normes intègrent les objectifs d'AEP, mais également des préoccupations environnementales plus larges, afin que les hydrosystèmes naturels puissent conserver leurs "potentialités biologiques". Ce système d'évaluation est employé de façon complémentaire avec les indices biotiques. Ces derniers sont calculés à partir de séries de mesures et permettent d'apprécier la biodiversité des hydrosystèmes naturels. Schématiquement, un hydrosystème sain doit avoir une biodiversité importante ou équilibrée, en l'absence de tout facteur déséquilibrant.

Paradoxalement, les grilles destinées aux "potentialités biologiques" sont beaucoup plus strictes que celles de l'AEP, car la déstabilisation des milieux naturels intervient rapidement, même avec de faibles doses de polluants.

Ces grilles déterminent toujours cinq classes de qualité d'eau et ont été mises au point pour les hydrosystèmes de surface (Tab. 1). Un SEQ-eau spécialisé dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines est en cours de mise au point par les Agences de l'eau. Elles se heurtent notamment aux difficultés d'ériger des normes par rapport à un milieu que l'on ne connaît que partiellement et qui ne présentent que de très faibles possibilités de recyclage des polluants. L'absence d'organismes capables de consommer ces polluants en est la principale explication. C'est ici une grande différence par rapport aux hydrosystèmes de surface dont les potentialités de recyclage sont plus importantes (ripisylve).

Avec une teneur autorisée à 50 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , il est clair que la norme AEP concernant les nitrates est beaucoup trop haute. La France dans ce domaine accuse un retard certain par rapport à d'autres pays européens. La mise en place d'une norme indicatrice à 25 mg/l n'a que peu d'effets au sens où elle n'a pas valeur de loi. Elle ne peut qu'inciter les gestionnaires de

**l'eau à faire des efforts pour améliorer la qualité de l'eau, mais ne peut les contraindre.** Malheureusement, il existe encore un trop grand nombre de captages qui dépassent cette norme ce qui souligne également **le retard que prend la France dans l'amélioration globale de la qualité des eaux d'adduction.** Les efforts importants engagés pour améliorer la qualité des cours d'eau, notamment en multipliant les opérations d'assainissement sont bien supérieurs à ceux engagés dans l'amélioration de la qualité des eaux souterraines.

\* Rappel : teneurs "naturelles" en  $\text{NO}_3^-$  : de 0,5 à 1,5 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  dans la pluie ;  
de 0,5 à 2 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  dans des hydrosystèmes sous faible couverture bio-pédologique ;  
de 2 à 4 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  dans des hydrosystèmes sous forte couverture d'altération et bio-pédologique.

Il nous semble nécessaire de faire évoluer ce seuil minimal en fonction du système considéré. Cette approche s'appuie sur les résultats de différents travaux effectués dans le Sud-Ouest, et notamment par Pellegrin (1997) et Hoffmann (1998). De plus, des mesures effectuées sur l'infiltration de versants en l'absence de toute activité humaine, sous très faible couvert bio-pédologique, et après l'arrêt de l'activité végétative laissent apparaître de très faibles teneurs naturelles, proches de 0,2 mg/l de  $\text{NO}_3^-$  (Hoffmann - Tarrisse, inédit).

\* Rappel : teneurs "naturelles" en  $\text{PO}_4^{3-}$  : < 0,1 mg/l, proche de 0,03-0,05 mg/l de  $\text{PO}_4^{3-}$

Paramètre polluant	Très bonne qualité	Bonne qualité	Qualité passable	Mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
$\text{NO}_3^-$ en mg/l	0 - 2 < 5	2 - 10 5 - 25	10 - 25 25 - 50	25 - 50 50 - 100	> 50 > 100
$\text{PO}_4^{3-}$ en mg/l	0 - 0,1 0 - 0,2	0,1 - 0,5 0,2 - 0,5	0,5 - 1 0,5 - 1	1 - 2 1 - 5	> 2 > 5

**Tableau 1 : Classes de qualité des eaux pour les hydrosystèmes de surface en fonction de deux paramètres polluants** (source : système SEQ-eau ; Agences de l'eau 1999; 1ere ligne : système de 1996 ; 2eme ligne : système de 1998 ; on assiste à une tolérance plus importante des normes de rejets, par glissement des classes de qualité d'eau)

En l'absence de grille de référence officielle, on peut proposer pour les hydrosystèmes souterrains une série de valeurs seuils, issues de l'étude des premiers résultats de nos recherches (Tab. 2). Elles ne sont bien sûr qu'indicatives. Compte tenu de la fragilité de ces ressources et notamment leur impossibilité de recycler les polluants, il est nécessaire de proposer des normes plus basses que pour les hydrosystèmes de surface :

Paramètre polluant	Très bonne qualité	Bonne qualité	Qualité passable	Mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en mg/l	0 - 2	2 - 10	10 - 20	20 - 25	> 25
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> en mg/l	0 - 0,05	0,05 - 0,1	0,1 - 0,25	0,25 - 0,5	> 0,5

**Tableau 2 : Classes de qualité des eaux pour les hydrosystèmes souterrains en fonction de deux paramètres polluants (propositions : Hoffmann - Tarrisse)**

Ces propositions peuvent paraître contraignantes, mais elles répondent à une double logique : une logique de conservation de la qualité des ressources en eau et une logique d'appréciation de la pression de l'homme sur son milieu. Celles-ci nécessitent donc des seuils nécessairement bas.

## **E - Les différents mécanismes naturels en relation avec l'impact climatique**

On peut considérer que le climat, par ses précipitations, représente le signal d'entrée dans l'ensemble des mécanismes qui concourent à la mobilisation des polluants et leur restitution par les hydrosystèmes. Cette action de lessivage des produits polluants varie selon leur nature superficielle ou souterraine. De cette manière, divers mécanismes interviennent dans l'enrichissement en polluants des hydrosystèmes.

### **1 - Les différents mécanismes d'enrichissement en polluants**

En accord avec Pellegrin (1997), et complété par Hoffmann (1998), on peut déterminer deux grands types de mécanismes qui peuvent intervenir de façon complémentaire ou successive à trois échelles de temps :

- un mécanisme de **ruissellement** : impliquant une composante essentiellement horizontale, c'est le plus compréhensible. Lorsqu'intervient un épisode pluvieux, l'eau après une phase plus ou moins longue de pénétration et d'imbibition du sol, commence à ruisseler. Son passage sur des surfaces polluées (unités urbaines, zones d'épandage et d'élevage, bâtiments agricoles, etc.) provoque l'hydratation et le transport de polluants oxydés (nitrates, phosphates). Leur arrivée dans les hydrosystèmes est rapide et les polluants sont alors rapidement restitués. Ce type de pollution par ruissellement concerne surtout les hydrosystèmes superficiels, et s'appliquent particulièrement aux zones cristallines. Par ce mécanisme, on peut

alors trouver d'autres formes de pollutions azotées, notamment de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), et des nitrites, deux polluants instables dans le temps et qui se transforment rapidement en nitrates. Il intéresse particulièrement les vallées où l'on trouve des générateurs de pollution à proximité des drains superficiels. Il peut concerner également les rejets des stations d'épuration, qui arrivent plus concentrés et plus rapidement dans les cours d'eau. Ce mécanisme intervient sur un temps très court, fonction de la durée de l'épisode pluvieux et de l'état initial du système sur lequel ruisselle l'eau (niveau de saturation en eau, par exemple).

Ce ruissellement peut entraîner des eaux plus en profondeur. Cette action concerne surtout les zones calcaires, car il nécessite un hydrosystème ayant une organisation verticale de drainage. S'ils ne sont pas amortis au niveau de la nappe ou du conduit souterrain, on peut retrouver le passage du polluant sous la forme d'un pic de pollution lorsque l'on fait des mesures en continu, voire en séquentiel rapproché.

- un mécanisme d'**infiltration** : il se caractérise par la pénétration en profondeur de polluants qui rejoignent alors la nappe. On obtient alors un décalage de temps plus ou moins important entre l'épisode pluvieux et les restitutions des polluants à l'exutoire. **Ce mécanisme est responsable de l'alimentation chronique en polluants de certains hydrosystèmes** et se rencontre fréquemment en zone calcaire. On comprend alors que le rejet régulier d'eaux usées ou la pratique régulière d'activités agricoles ou d'élevages entretiennent un tel mécanisme. Sur certains hydrosystèmes (type Font Polémie, cf. *infra*), on peut rencontrer les deux mécanismes réunis de façon épisodique, puisque malheureusement cet hydrosystème présente une alimentation chronique en polluants.

Quand on dispose de suivis de qualité fiables, ces deux mécanismes sont toujours mesurés à un moment donné de l'état de l'hydrosystème. Ils sont alors à mettre en relation avec la typologie des pluies effectuée par Lambert (1996) : pluie de ruissellement, de lessivage, d'interception, etc.

## **2 - La perte d'information selon l'échelle de perception dans le temps**

Quand un système présente un haut niveau de réactivité fonctionnelle, il est nécessaire le plus souvent de pratiquer un suivi de type séquentiel rapproché pour bien apprécier son fonctionnement. Or, les hydrosystèmes sont des systèmes très réactifs. **On ne peut obtenir aucune information de qualité en n'effectuant seulement quelques mesures par an**, au moment de la saison chaude par exemple. Cette information aura alors tendance à se dégrader. Il faut rappeler à ce titre quelques notions :

- des constations de terrain nous permettent de dire que certains hydrosystèmes très réactifs ne peuvent être correctement appréhendés que par la mesure **en continu** de certains paramètres. Ceci est encore plus vrai pour les polluants. La mesure en continu permet de mettre en évidence les mécanismes de ruissellement et de lessivage. Par exemple, la Font Polémie est capable de changer d'état en quelques

heures seulement compte tenu de ses caractéristiques hydrologiques. De même, la plupart des hydrosystèmes superficiels sont très réactifs, car ils répercutent en premier les épisodes pluvieux. L'état des éléments pouvant intercepter l'eau est fondamental, et notamment celui de la végétation et des sols. On comprendra alors aisément que le niveau de réactivité d'un hydrosystème superficiel varie dans le temps, en fonction de la saison ;

- le pas de temps maximum au-delà duquel l'information perd toute crédibilité est celui du mois. Il est très limite pour les hydrosystèmes réactifs, mais s'adapte bien à certains paramètres qui conservent l'essentiel de leur signification dans le temps (chlorures, sodium, par exemple). Concernant les polluants, on ne peut pas envisager de suivi sérieux avec un pas de temps supérieur à 15 jours, à l'exception de certains hydrosystèmes très régulés (alimentation chronique par infiltration régulière de polluants, soulevant le rôle joué par certaines couvertures sédimentaires). Un pas hebdomadaire permet un bon niveau d'information, mais pas sur tous les hydrosystèmes. Il faut l'appliquer si l'on ne connaît pas le niveau de réactivité d'un hydrosystème. Il faut alors se méfier des débuts de campagnes de mesure lorsque l'on ne connaît pas l'état antérieur du système.

### **3 - La réactivité des hydrosystèmes par rapport aux polluants**

Il ne s'agit pas ici de faire l'inventaire de tous les paramètres gérant la restitution des eaux par un exutoire ou un hydrosystème superficiel, mais de rappeler quelques notions.

Globalement, avec un système de pluies réparties essentiellement en hiver, on doit déboucher sur la situation suivante : les hydrosystèmes doivent présenter un maximum de pollution en hiver en raison de la multiplication des ruissellements et des lessivages, et un minimum en été, à cause de la consommation naturelle par la végétation. Si certains hydrosystèmes correspondent à cette situation, celle-ci ne s'applique guère aux hydrosystèmes souterrains. Dès lors, on peut en fait envisager trois types de situations :

- la plupart des hydrosystèmes superficiels ont tendance à présenter un maximum de pollution en hiver et un minimum en été, si l'on se place uniquement dans une situation de pollution par épisodes de ruissellement, voire de lessivage. L'été, en période d'intense activité de la végétation hygrophile, une grande partie des polluants est consommée par les végétaux, ce qui souligne le fort pouvoir de régénération de l'eau par la ripisylve.

Cependant, en cas de séries de pluies continues ou soutenues, une intense dilution intervient qui abaisse les teneurs en polluants. Selon que l'on prélève après le ruissellement ou en période de dilution, on obtient des résultats différents. De plus, si le générateur de pollution est important par rapport au pouvoir de dilution de l'hydrosystème, on peut alors se placer dans la situation inverse : les eaux d'été auront tendance à avoir des teneurs en polluants plus fortes qu'en hiver où la dilution par l'eau de pluie peut jouer son rôle (travail en cours : bassin de la Marcillande, près de Gourdon). Enfin, il faut tenir compte du fait que l'été, on peut

enregistrer une importante augmentation de la population (tourisme). Les rejets accrus peuvent alors modifier l'état d'un hydrosystème ;

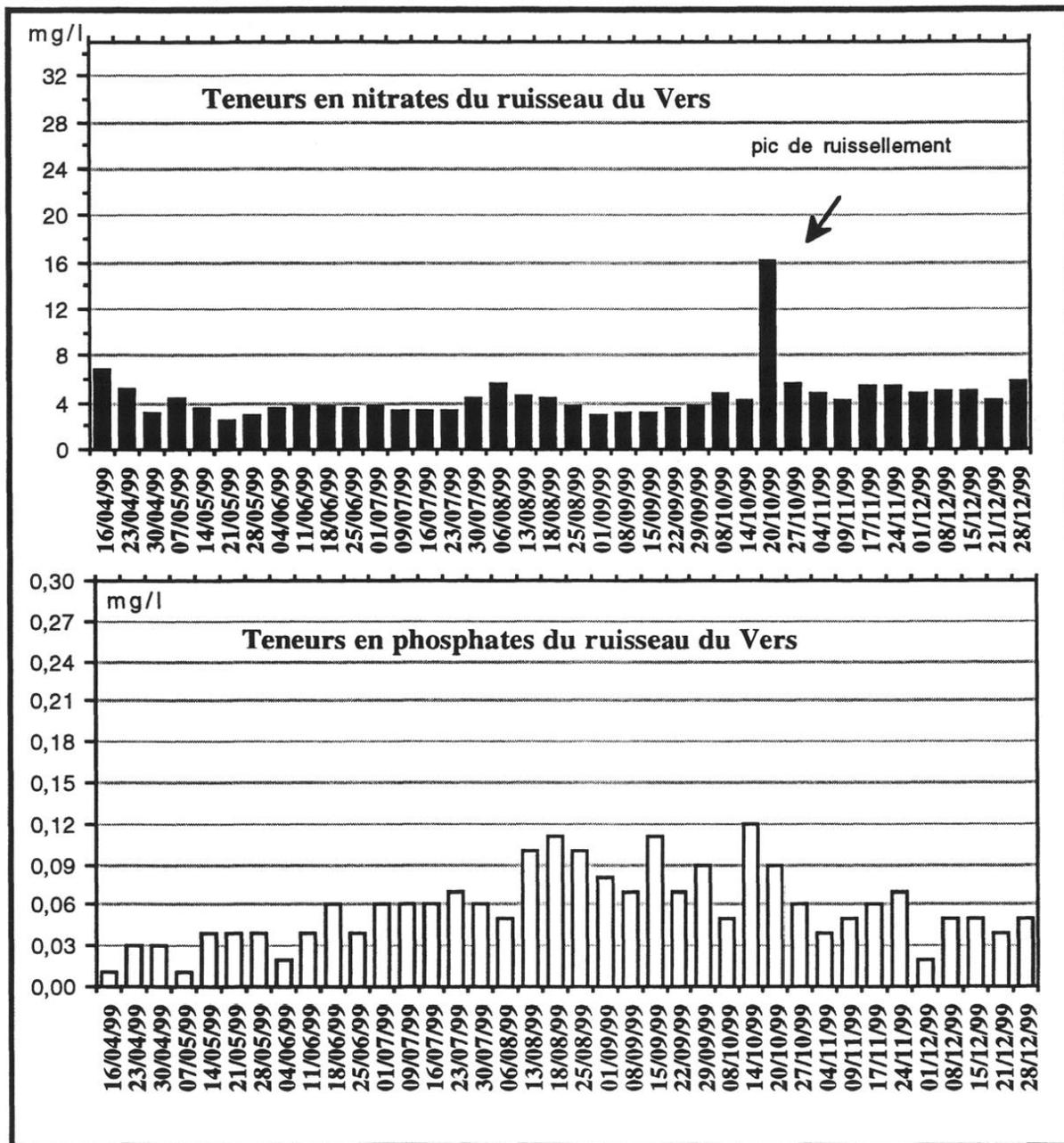
- pour les hydrosystèmes souterrains, tout est fonction de l'organisation du système de drainage, de l'intensité du générateur de pollution, et des surfaces de réception susceptibles de jouer un rôle de dilution. La consommation en surface par la végétation est moins sensible que pour les hydrosystèmes superficiels, mais globalement on constate pour les hydrosystèmes sans couverture bio-pédologique importante, une dégradation de la qualité des ressources en été, puis une plus forte dilution en hiver des pollutions. Si des effets de dilution interviennent, leur action sera plus sensible en hiver. La présence d'une couverture peut modifier ce schéma et introduire une certaine régulation, au sens où elle risque en plus d'accueillir en région calcaire une activité agricole plus intense. Dans ce cas, on se retrouve avec une situation plus mauvaise en hiver, par simple lessivage des engrais ou des épandages après la croissance des plantes cultivées. Dans un premier temps, la pluie entraîne les polluants présents en surface, (d'autant plus nettement que le système est proche de cette dernière), puis intervient un épisode de dilution, si les volumes de pluies sont importants. Très souvent, il est nécessaire d'avoir plusieurs épisodes pluvieux pour obtenir une dilution suffisamment sensible à l'exutoire. Ceci est particulièrement vrai pour les karsts nus ;

- la troisième situation possible intervient quand l'hydrosystème n'est pas assez important pour diluer la pollution quelque soit le moment de la saison. Dans ce cas, on débouche très souvent sur une pollution chronique avec de légères oscillations montrant l'efficacité des phénomènes de lessivage. Ceci concerne à la fois les hydrosystèmes souterrains avec ou sans couverture (exemple poljé de Martel et Fontaine de Briance, sur la vallée de la Dordogne, cf. *infra*), mais également certains hydrosystèmes superficiels comme le ruisseau de Peyrilles, affluent du Céou et provenant du bourg de Peyrilles (assainissement déficient s'ajoutant aux pollutions d'origine agricole). La pression anthropique est alors trop forte et on obtient une pollution chronique.

Il convient d'introduire une nuance en fonction du polluant sélectionné, même si les nitrates et les phosphates présentent un fort niveau de réactivité. Les phosphates représentent un formidable traceur et indiquent qu'ils sont rejetés en grande quantité.

Il est clair qu'une pluie a une efficacité variable en fonction du degré de saturation en eau de l'hydrosystème considéré. De même, l'efficacité du lessivage peut différer selon la saison. Par exemple, les orages violents d'été, en pleine saison agricole, peuvent avoir une efficacité plus grande dans la mobilisation des polluants que celle de l'ensemble des pluies d'hiver. Il convient donc de rester prudent dans l'interprétation des suivis. De façon générale, les pluies, peu importe la saison, mettent toujours en circulation l'excédent en azote ou en phosphore rejeté dans la nature, ou les rejets d'assainissement quand celui est déficient ou absent. Ici, il faut signaler que l'absence d'assainissement efficace se remarque très vite au niveau des exutoires !

De plus, quand l'on constate une dilution de certains polluants dans les captages, notamment lors de la dilution qui s'opère en hiver, ces derniers peuvent subir d'autres pollutions et s'avérer non potables pour d'autres raisons (turbidité, par exemple). Le non respect des normes de turbidité a été souvent constaté sur les captages !



**Figure 3 : Exemple de mécanismes par ruissellement : l'exemple du ruisseau du Vers, affluent du Lot (débit moyen : 1000 l/s)**

Enfin, l'organisation et l'efficacité du drainage (fracturation et maturation des réseaux souterrains) constituent un des paramètres les plus importants dans la restitution des polluants et la répercussion des pics de pollution (lessivage ou ruissellement). Soit le drainage est efficace et répercute toutes les ondes de pluies, soit la mauvaise connexion des pores et des drains entre eux nivelle le signal d'entrée et en modère l'effet. On parle pour le premier type de drainage, de **système transmissif**, par ses aptitudes à transmettre rapidement les volumes d'eau, ce qui affecte sa minéralisation globale. Dans le deuxième cas, on parle alors de **système capacitif**, c'est-à-dire, présentant une capacité très forte à retenir les eaux avant de les restituer. Cette capacité ne peut bien sûr s'appliquer qu'aux hydrosystèmes souterrains. Bien sûr, entre ces deux modalités de drainage, il existe une infinité de formes de transition.

## **II - APPRÉCIATION DU PARAMÈTRE CLIMATIQUE DANS LES MÉCANISMES DE POLLUTION DES HYDRO-SYSTÈMES : APPROCHE TEMPORELLE**

Avec l'espace, le temps est une des dimensions qui modifie la perception que l'on peut avoir d'un hydrosystème pollué. En effet, celui-ci peut l'être temporairement (le temps d'une pluie), de façon saisonnière sur une chronique annuelle, ou montrer une tendance à une pollution de plus en plus importante s'étalant dans le temps. Il peut cumuler les trois mécanismes à la fois.

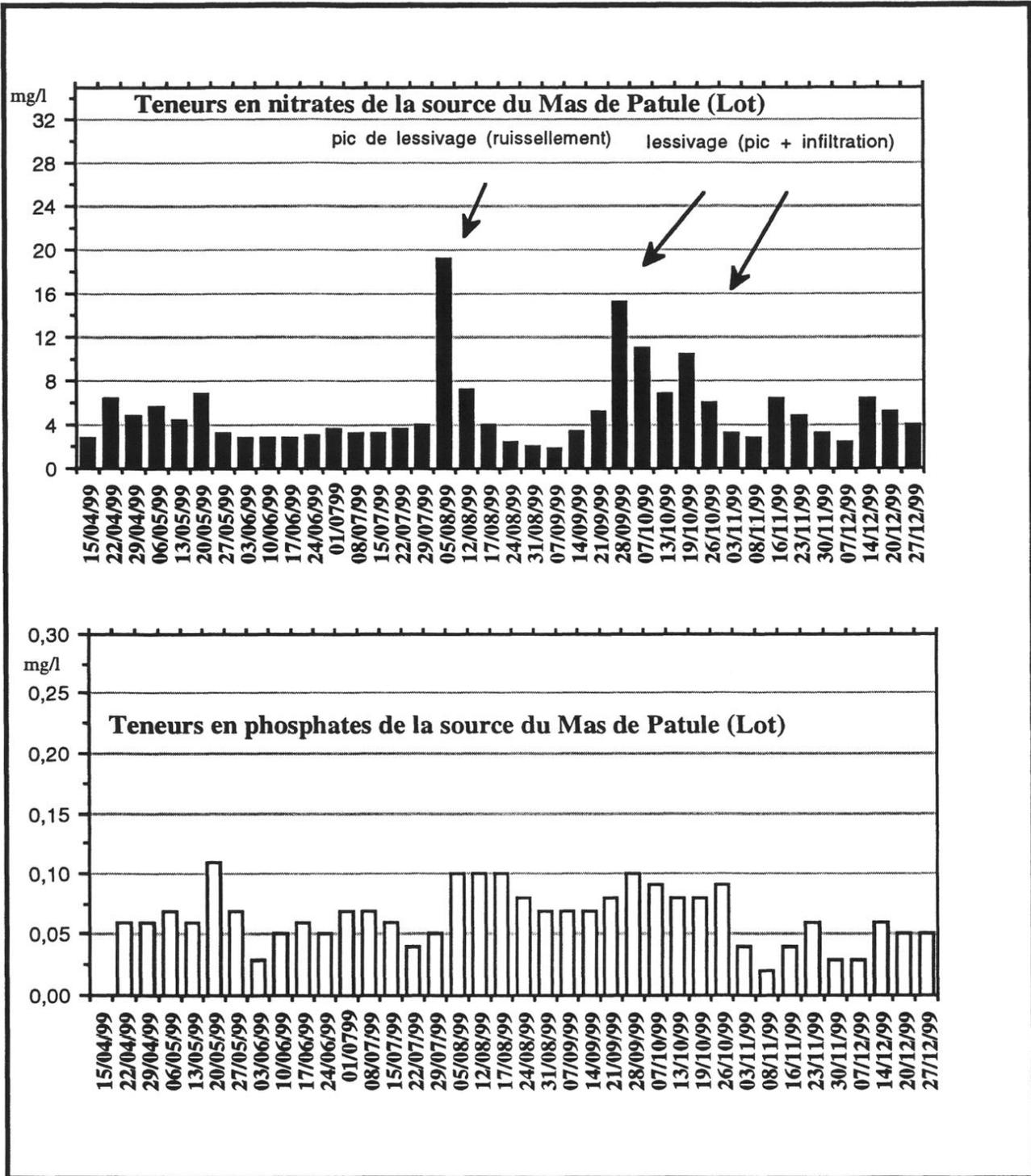
### **A - Pollution à l'échelle du temps court : l'effet des pluies**

L'appréciation des différents mécanismes de pollution sur une échelle de temps court ressort assez bien sur un suivi hebdomadaire de différents systèmes. La série d'exemples qui suit, illustre les grands mécanismes précédemment présentés.

#### **1 - Mesure de l'impact du ruissellement**

Ce type d'impact n'est pas facile à mettre en évidence du fait de sa soudaineté dans le temps car il intervient très rapidement après la pluie.

Les eaux du Vers constituent un hydrosystème superficiel situé dans la vallée du Lot (**fig. 3**). Ce ruisseau, de module moyen (1 à 2 m<sup>3</sup>/s), présente un important remblaiement travertineux, ainsi qu'une travertinisation toujours active. Cet indice est en général le signe d'un bon niveau de "santé" biologique. Le diagramme des nitrates est assez clair et l'on voit bien comment s'isole un pic de ruissellement consécutif aux premières pluies d'automne. L'origine est délicate à déterminer mais nous pensons à un ruissellement sur des fumures d'ovins. On peut ajouter que les phosphates montrent une légère tendance à l'augmentation en saison de



**Figure 4 : Exemple de mécanismes par ruissellement : la source du Mas de Patule, vallée du Lot (débit moyen : 5 l/s)**

basses eaux, en relation avec le moindre pouvoir de dilution du cours d'eau. Cette présence des phosphates est sans doute en relation avec le bourg de Saint Martin de Vers, proche du point de prélèvement. Dans l'ensemble, la situation est normale et les eaux de bonne qualité. Les orages d'été sont tout juste mis en valeur avec 5,6 mg/l de nitrates, au début du mois d'août.

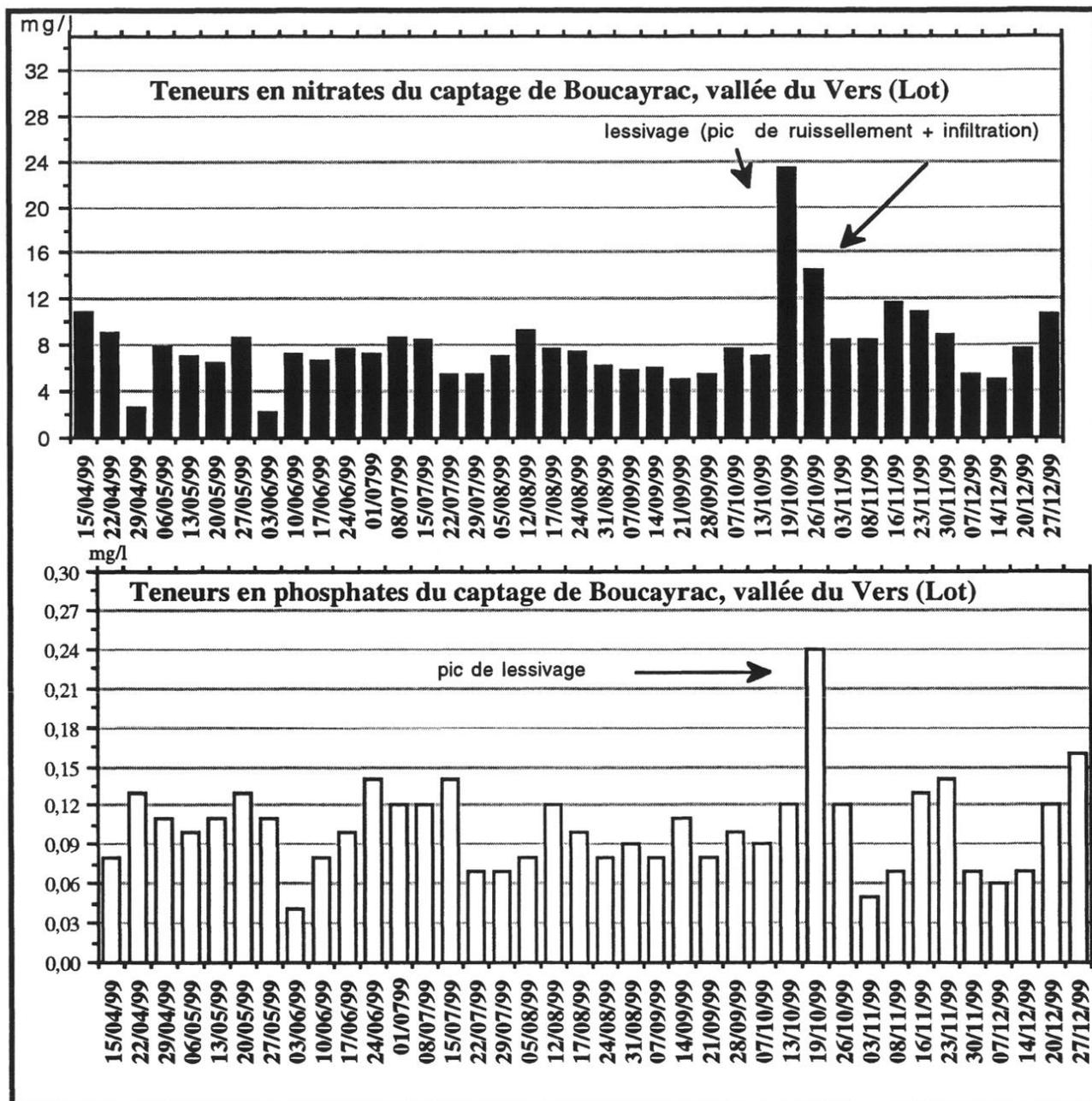
Sur les hydrosystèmes souterrains, ce mécanisme de ruissellement a pu être évoqué comme hypothèse de travail lors de campagnes hydrologiques précédentes (Hoffmann, 1998 ; 1999). Prenons deux exemples d'hydrosystèmes souterrains :

- celui de la petite source du Mas de Patule est significatif. Cette petite source, dont le module moyen est inférieur à 5 l/s se situe dans l'Aveyron, dans un secteur très peu peuplé. Ce faible impact anthropique ressort bien au niveau de la tendance générale du diagramme des nitrates (**fig. 4**). Deux événements cependant diffèrent de cette tendance, et montrent à quel point une ressource peut être vulnérable. En premier lieu, il s'agit de la répercussion de l'orage du 4/08/99. Elle s'individualise par un pic de lessivage par ruissellement (19,1 mg/l de nitrates). L'origine est vraisemblablement d'origine agricole (lessivage de fumures ?). Il faut signaler que l'impact de cet orage a été suffisamment violent pour que la source soit en crue lors de notre passage, et montre les rapides transformations que peuvent subir les hydrosystèmes en saison chaude. Dans un deuxième temps, il s'agit d'un phénomène plus complexe lié aux pluies d'automne. Son interprétation est plus délicate car cet épisode de lessivage est sans doute composé de petits pics de lessivage successifs.

Parmi eux, un pic est plus important, mais l'on ne constate pas de pollution par les phosphates. Il s'agit sans doute du lessivage successif de fumures ou de parcelles d'élevage, répercutant chacun des épisodes pluvieux. Le générateur est sûrement proche pour que l'on obtienne une telle répercussion ;

- le captage de la source de Boucayrac montre un profil assez régulier concernant les valeurs de nitrates (**fig. 5**). Les orages d'été n'ont été que faiblement répercutés, aux différents moments où nous avons prélevé l'eau. Ceci n'interdit pas qu'entre deux prélèvements, certains phénomènes nous aient échappé. Les violents orages du 4/08/99 n'ont pas affecté cette vallée. Seul celui du 8/08/99 se marque par un léger pic de nitrates, à 9,2 mg/l. De plus, le niveau moyen des teneurs est proche de 6 à 7 mg/l, bien au-dessus des teneurs naturelles. La présence d'élevage ovin, parfois dans le périmètre de protection de la source, peut être responsable de cette situation. La fréquence importante des valeurs de phosphates au-dessus de 0,1 mg/l indique un générateur de pollution assez faible mais régulier sur le bassin, en liaison avec un assainissement déficient. Enfin, l'impact des pluies d'automne est important avec un lessivage très efficace, dégradant fortement la qualité des eaux, avec 23,3

mg/l de nitrates le 19/10/99, doublé d'un pic de phosphates. De façon globale, les pluies d'automne ont modifié sensiblement la qualité de l'eau de ce captage, montrant à quel point cette ressource est fragile.



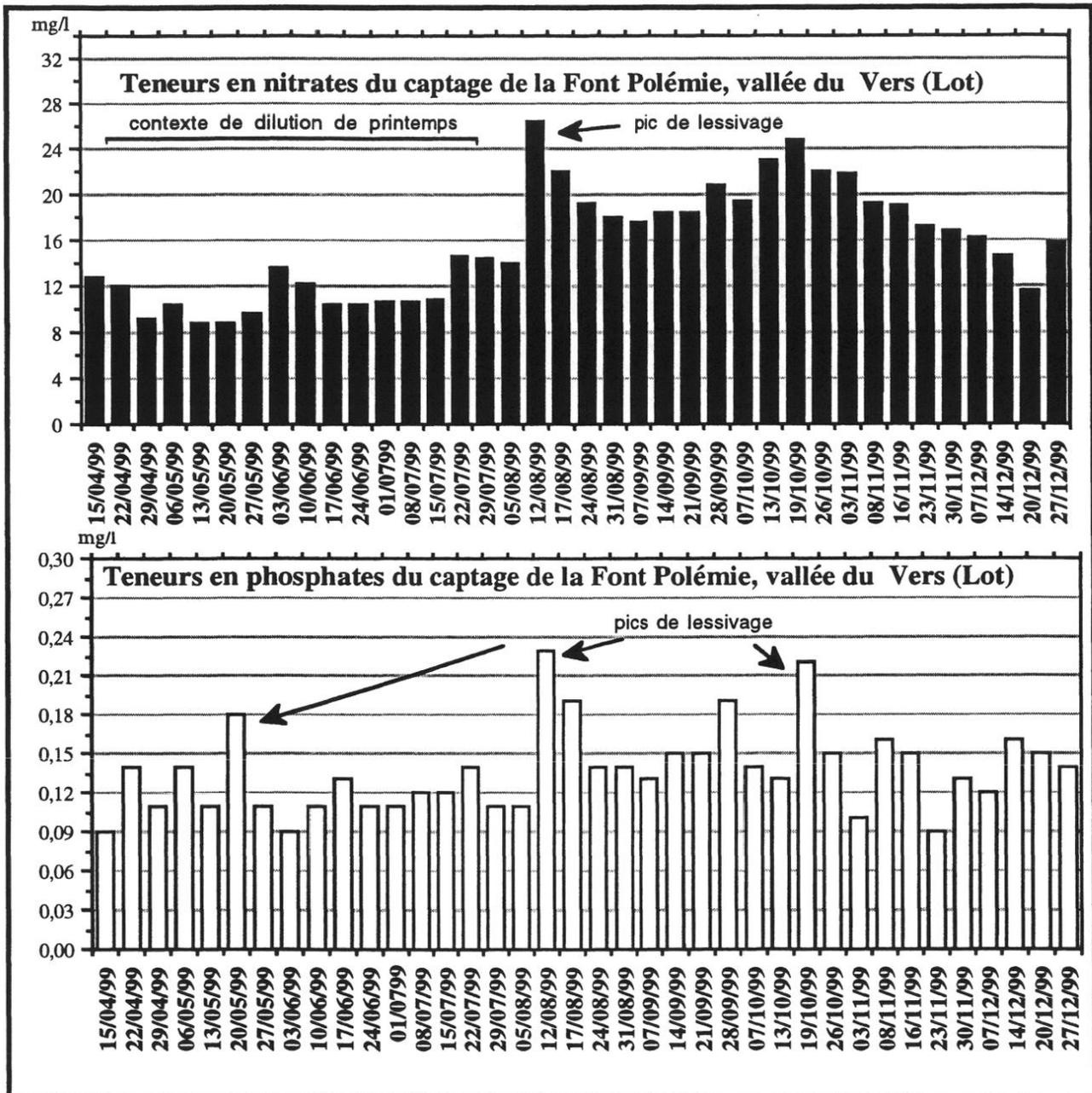
**Figure 5 : Exemple de contamination chronique par lessivage : l'exemple du captage de Boucayrac, vallée du Vers, Lot (débit moyen : 50 l/s)**

## 2 - Mesure de l'impact de l'infiltration

L'infiltration est de loin le mécanisme le plus efficace dans la dégradation des eaux. Elle provoque au mieux une dégradation saisonnière, et très souvent une contamination durable :

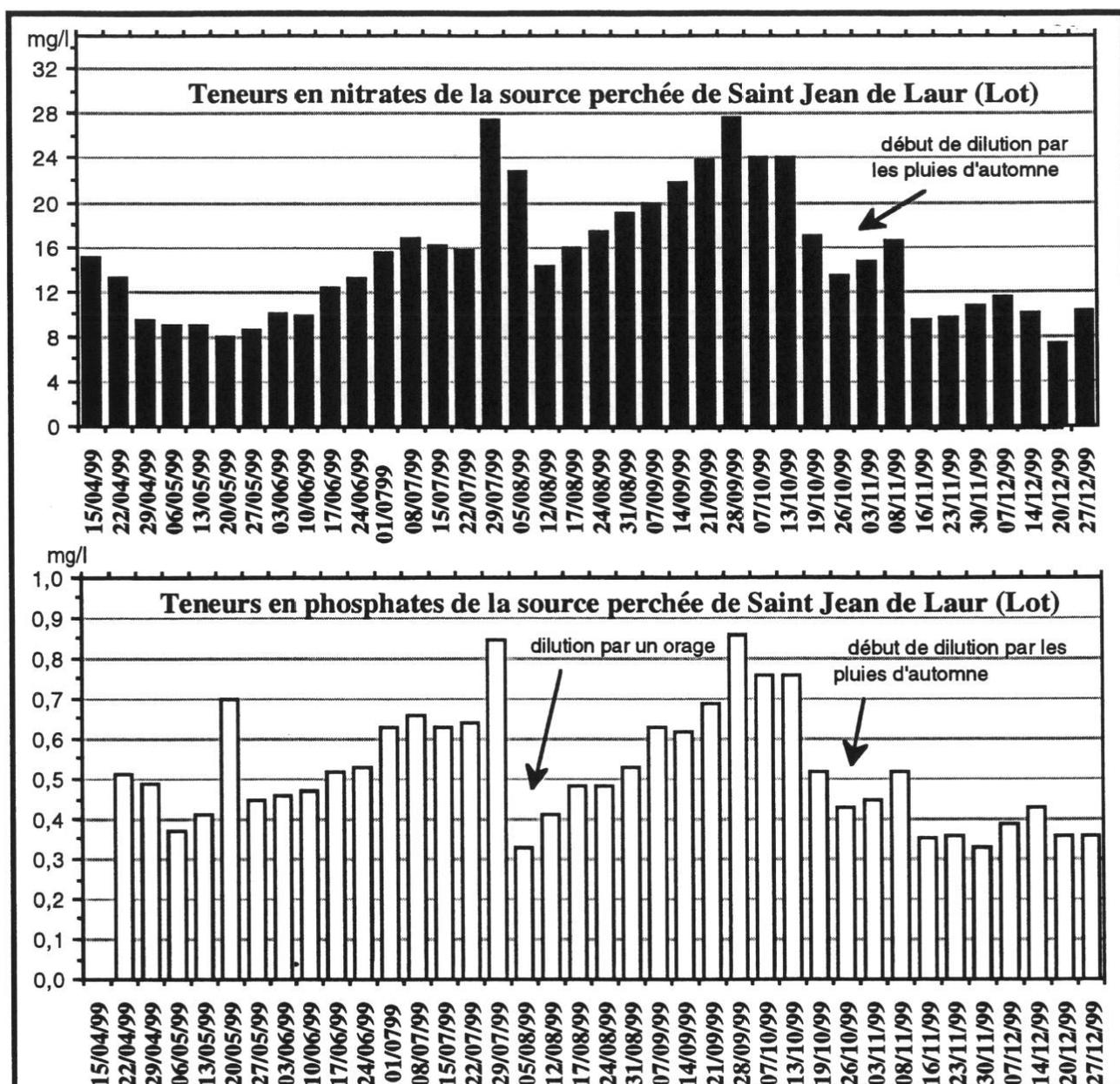
- le captage de la Font Polémie, qui se situe dans la vallée du Vers, est révélateur de cette contamination chronique (fig. 6). En effet, dans l'ensemble, et bien qu'elles soient captées, les eaux sont de très mauvaise qualité. De plus, il faut rajouter de fréquents épisodes turbides. Cette contamination chronique par les nitrates, en relation fortement présumée avec un élevage porcin situé sur le bassin d'alimentation, subit un contexte de dilution au printemps, que l'on doit retrouver également en hiver (travail en cours). La dégradation est encore plus forte au coeur de la saison chaude et montre à quel point la pression anthropique sur ce bassin est forte. Dès qu'un épisode pluvieux intervient, on obtient un pic. Les valeurs présentées dans la figure 5 sont indicatives du moment où nous avons prélevé, car cette source peut changer de régime et de niveau de pollution en quelques heures. A titre d'exemple, la teneur du 5/08/99 (après l'orage du 4/08/99) était de 13,9 mg/l le matin vers 8H15. Des échantillons prélevés vers 17 H, la même journée ont révélé des teneurs proches de 28,8 mg/l, soit un doublement en 9 heures ! On a ici un exemple type de la forte réactivité de certains hydrosystèmes souterrains, ce qui pose de gros problèmes d'aménagement et de gestion de captages (ou devraient en poser !). La très mauvaise qualité des eaux se retrouve au niveau des valeurs de phosphates qui indiquent qu'une partie des eaux d'assainissement est collectée par l'aquifère, ces teneurs augmentant régulièrement sous forme de pics après chaque épisode pluvieux. Inutile de préciser que nous n'avons dans ce diagramme qu'une partie de la complexe restitution des polluants par cette source captée !

- la source de Saint Jean de Laur ne montre guère une meilleure situation ! Cette petite source perchée est intéressante car elle représente un hydrosystème souterrain perché à 290 m au dessus du niveau du Lot, très proche de la surface (fig. 7). Cette source capte une partie de l'assainissement du bourg ou des maisons isolées près de Saint Jean de Laur, dans le Lot. Les teneurs en nitrates indiquent en plus le drainage d'installations agricoles ou de zones d'élevage, bovin dans ce secteur. La dégradation de la qualité de l'eau en été est très nette, amplifiée par la petite taille de cet hydrosystème. La très grande variabilité des résultats provient de la proximité du générateur de pollution et de la facilité à répercuter les épisodes pluvieux par cette source proche de la surface. Dans l'ensemble, même si cette tendance reste à confirmer pour l'hiver, il semble qu'un contexte de dilution se met en place avec les pluies d'automne jusqu'au printemps. Ce contexte affecte également les valeurs de phosphates, même si ces dernières restent très fortes. Elles semblent indiquer un rejet d'eaux domestiques dans le périmètre d'alimentation de la source (manque d'assainissement). Cette dernière sert alors de collecteur des eaux usées toute l'année ! Le profil de restitution des phosphates montre dans un premier temps une tendance à la dégradation croissante de la qualité par l'augmentation progressive des valeurs. Ceci tient à un phénomène : l'accroissement de la pression anthropique se fait ressentir par l'abaissement progressif du débit de cette source perchée. Ensuite intervient un épisode pluvieux qui dilue le niveau des polluants. Puis dans un deuxième temps, on assiste de nouveau à une concentration progressive du niveau des polluants dans les eaux, avant qu'intervienne l'épisode de dilution suivant.



**Figure 6 : Exemple de contamination chronique par lessivage : le captage de la Font Polémie, vallée du Vers, Lot (débit moyen : 100 l/s).**

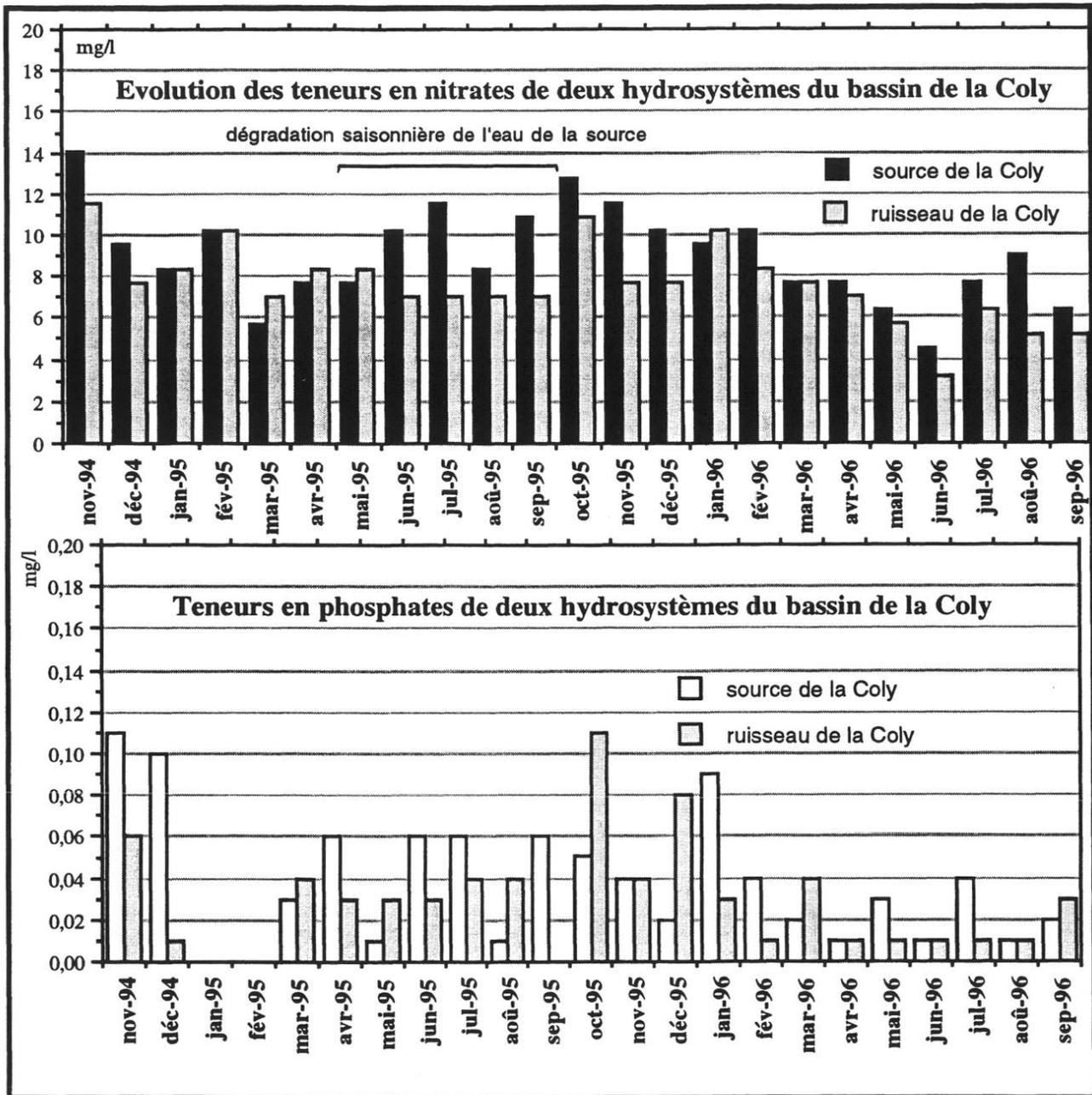
Précisons pour conclure, que cette tendance à la dégradation saisonnière des eaux concerne la plupart des captages que nous avons analysés lors de la campagne 1999-2000 et montre qu'un effort important est à mettre en oeuvre pour préserver les ressources en eau des départements à vocation agricole. Cette appréciation de la dégradation saisonnière de la qualité des eaux apparaît de façon plus claire encore dans l'étude des chroniques annuelles de certains systèmes.



**Figure 7 : Exemple de contamination chronique par lessivage : l'exemple de Saint Jean de Laur (débit : 5 l/s). On remarque bien l'impact de la dilution par les orages.**

### **B - Pollution à moyenne échelle de temps : étude des chroniques annuelles**

Dans les divers exemples qui suivent, nous ne disposons que d'un pas de temps mensuel, dont on sait qu'il ne représente pas l'idéal dans l'appréciation des phénomènes de pollution sur des hydrosystèmes très réactifs. Nous parlerons alors de tendances qu'une étude plus fine devrait préciser. Les deux exemples sélectionnés se situent sur le bassin de la Dordogne.



**Figure 8 : Suivis diachroniques sur deux années de deux hydrosystèmes du bassin du Coly : le ruisseau de la Coly et la Doux de Coly**

**1 - L'exemple du bassin de la Coly**

Ce petit bassin se situe en confluence avec la Vézère, affluent de rive droite de la Dordogne. Il délimite le rebord occidental du Causse de Martel. Le ruisseau du Coly provient de la réunion du ruisseau de la Chironde et de la source de la Coly. Le bassin hydrologique est

de taille moyenne, proche de 167 km<sup>2</sup>. Nous avons suivi ces deux hydrosystèmes pendant une période de 24 mois (**fig. 8** : Hoffmann, 1998, 1999).

Dans l'ensemble, les valeurs des deux hydrosystèmes présentent des teneurs très proches en nitrates et en phosphates. Ces dernières ne révèlent aucune tendance significative, si ce n'est un niveau très bas, dépassant très rarement la barre des 0,1 mg/l.

Les nitrates révèlent en revanche plus d'informations. On remarque aisément la dégradation estivale de la qualité des eaux de la source du Coly, révélant une pression anthropique d'origine agricole plus marquée en été. On observe également une dilution qui intervient en hiver et au printemps, et qui révèle une tendance à l'inversion du niveau de pollution des deux systèmes. En effet, par un plus grand lessivage et une moins grande consommation par la végétation des nitrates en hiver, les teneurs du ruisseau se rapprochent de celle de la source. De nouveau, en été 1996, on remarque une légère tendance à la dégradation des eaux de la source, alors que celles du ruisseau sont au plus bas. Toutes ces tendances ont été observées par la suite sur d'autres hydrosystèmes.

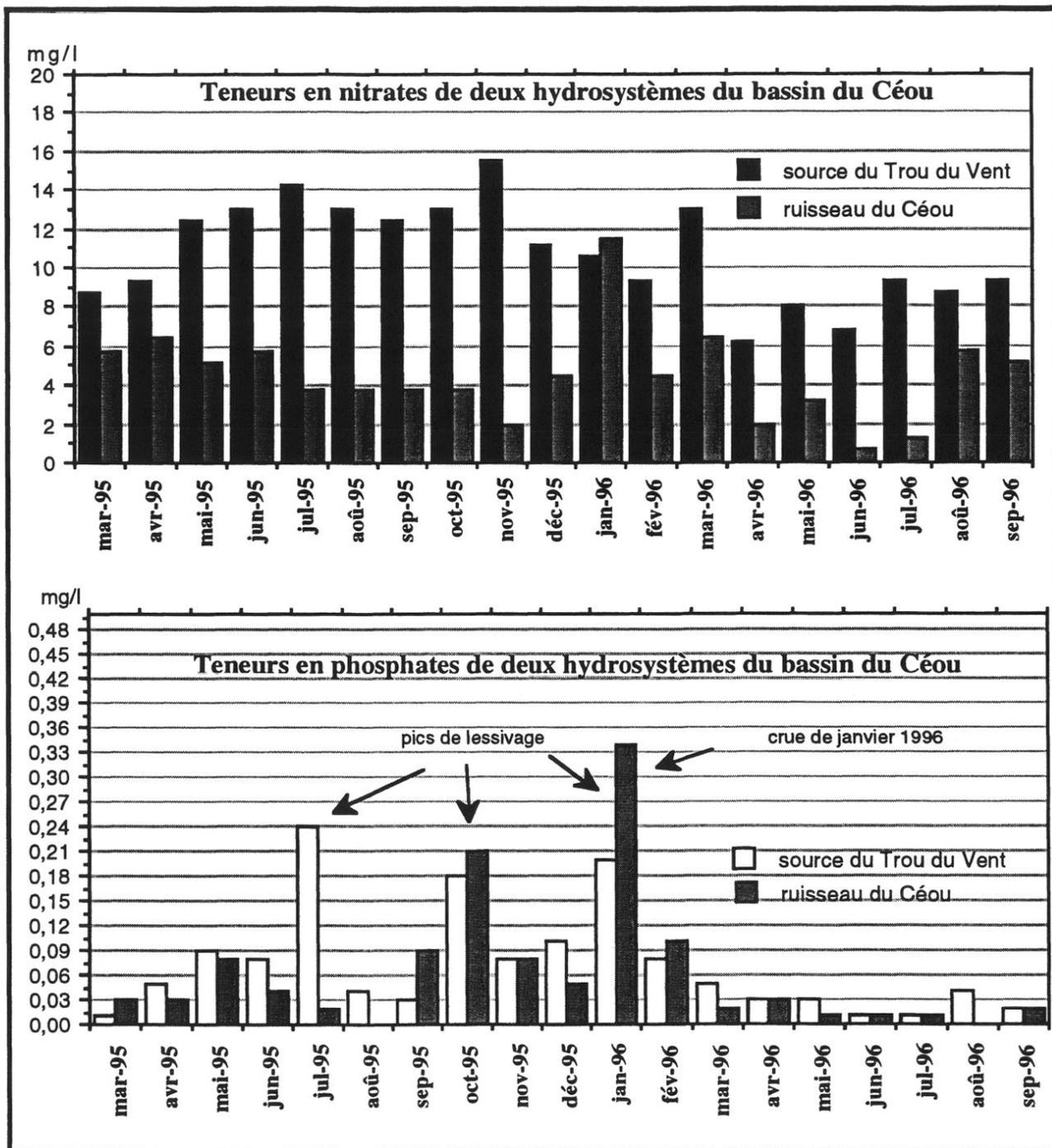
## 2 - L'exemple du bassin du Céou

Le bassin du Céou se situe en rive gauche de la vallée de la Dordogne. Sa surface est importante, avec près de 603 km<sup>2</sup> et présente de nombreux phénomènes karstiques, dont le Trou du Vent de Bouzic. Cette résurgence dont le module moyen est proche de 250 l/s, se situe en rive gauche du Céou, dans la partie aval du bassin. Cinq points de mesure, dont la source, ont été suivis sur une période de 18 mois.

D'emblée, une profonde différence de fonctionnement apparaît entre les eaux de surface du Céou et la source de Bouzic, d'un point de vue qualitatif (**fig. 9**). En effet, la pression anthropique sur la source est beaucoup plus forte. Les teneurs fréquentes au dessus de 10 mg/l de nitrates indiquent une pression d'origine agricole, en relation avec les cultures menées sur le petit causse de Florimont Gaumier, et notamment dans la zone d'infiltration des eaux (zone à dolines). Les eaux du Céou ne présentent qu'un seul pic de ruissellement en relation avec une crue très importante, puisque le module de pointe du Céou a atteint près de 90 m<sup>3</sup>/s en janvier 1996 ! Cette onde de crue représente trois fois le volume habituel d'une crue d'hiver ! On imagine sans peine que dans de telles conditions, les phénomènes de ruissellement entrent en jeu. Ce pic, de près de 12 mg/l de nitrates, indique l'efficacité des processus de ruissellement dans la modification de la qualité des eaux. On remarque également les taux très bas en saison chaude pour un hydrosystème superficiel, provenant de la consommation par la végétation ripicole.

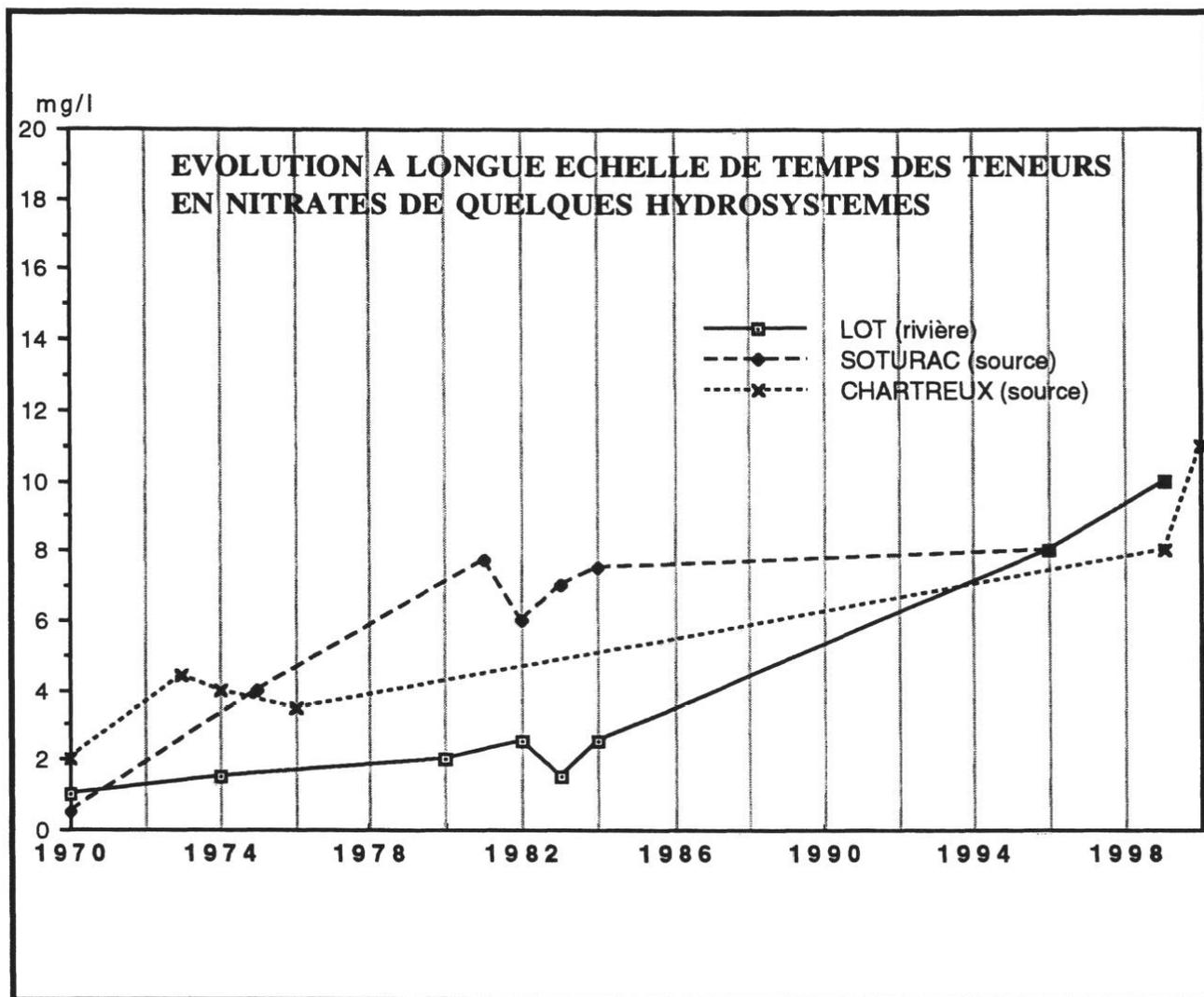
La répartition des teneurs en phosphates est également riche d'enseignements. En effet, elle montre de fréquents pics de lessivage et de ruissellement en relation avec des épisodes pluvieux. On retrouve également la crue de janvier 1996, qui a mobilisé également beaucoup de rejets d'assainissement. De telles crues permettent la redistribution de quantités importantes de phosphates. Le pic de juillet 1995 de la source de Bouzic est à mettre en relation avec un orage, montrant que cette source reste sensible aux rejets d'assainissement en cas de changement des conditions hydrologiques. Les valeurs atteintes dans ces pics sont largement au-dessus du seuil de 0,1 mg/l, montrant l'intensité des phénomènes. Le contraste avec le reste de la chronique est

frappant, avec une année 1996 beaucoup plus "saine" du point de vue de ce paramètre. Il est clair que dans l'étude de ces deux hydrosystèmes, les mécanismes de lessivage et de



**Figure 9 : Suivis diachroniques sur deux ans de deux hydrosystèmes du bassin du Céou : le ruisseau du Céou dans la région de Gourdon et la source du trou du Vent de Bouzic.**

ruissellement apparaissent clairement. L'impact du climat trouve ici l'une de ses plus belles expressions. Il montre également que si en apparence, les conditions semblent relativement bonnes, ces deux hydrosystèmes apparaissent vulnérables. Il est donc nécessaire de protéger les ressources qu'ils représentent.



**Figure 10 : Dégradation à long terme de la qualité des eaux de quelques sources du bassin calcaire du Lot (source DDASS 46, Astruc et Tarrisse, 1985)**

### **C - Pollution à importante échelle de temps : étude des chroniques décennales et pluri-décennales : mise en évidence de la pression anthropique**

La notion de pression anthropique prend tout son sens lorsque l'on change encore d'échelle de temps et que l'on passe à un temps plus long, à échelle humaine c'est-à-dire de l'ordre de quelques années à quelques dizaines d'années. Le problème est qu'il est difficile de

disposer de chroniques longues concernant la mesure des polluants. Il est en outre intéressant de mesurer à quel point certains hydrosystèmes se sont dégradés d'un point de vue qualitatif.

C'est le cas notamment pour les plus gros hydrosystèmes souterrains du département du Lot. En effet, la Fontaine des Chartreux principale source alimentant la ville de Cahors montre une nette tendance à la dégradation des eaux (**Fig. 10**). Son module d'étiage est de l'ordre de 1 m<sup>3</sup>/s. Au départ, les teneurs en nitrates se situaient dans une fourchette comprise entre 2 et 4 mg/l. Ces teneurs se situent actuellement autour d'une valeur moyenne de 12 mg/l, avec un maximum situé en période de hautes eaux ! Le transfert de masse est alors très important. De même, les deux sources de Touzac-Soturac, avec près de 4 m<sup>3</sup>/s de débit, présentaient une teneur proche de zéro au début des années 1970, pour une teneur actuelle proche de 8 mg/l. Avec une telle teneur moyenne, ce double système de source exporte en nitrates chaque année l'équivalent de 30 camions de 40 tonnes ! Enfin, à une autre échelle, la rivière du Lot montre également la même tendance avec un accroissement lent mais progressif des teneurs en nitrates. On peut y voir une réponse au développement de l'agriculture moderne et intensive pratiquée notamment sur les alluvions de cette vallée.

### **III - APPROCHE SPATIALE DE LA POLLUTION DES HYDROSYSTÈMES**

Si les mécanismes de restitution des polluants sont relativement complexes, il ressort des analyses précédentes que chaque hydrosystème compte tenu de ces caractéristiques hydrologiques se comporte de façon différente face à la pression anthropique et aux impacts du climat. On ne peut donc pas se contenter uniquement d'une approche temporelle de ces phénomènes. En effet, il est fondamental de raisonner en termes de bassins versants et d'unités de drainage des polluants. Appréhender spatialement les pollutions, c'est faire comprendre que chaque action humaine faite en amont a des conséquences sur l'aval. C'est aussi montrer que dans un même bassin, cette pression anthropique s'applique de façon différentielle et que chaque hydrosystème n'est pas atteint de la même façon .

Le choix du sud du Causse de Martel est très pédagogique car il montre diverses intensités de pollution. Nous avons choisi une situation hydroclimatique bien particulière, celle de l'étiage d'été. Elle résulte d'un travail partiel effectué sur ce secteur, mais complémentaire des campagnes menées sur les autres causses lotois (analyses et campagnes de prélèvement effectuées par Hélène Griset).

#### **A - Les hydrosystèmes du sud du Causse de Martel**

Le bassin lotois de la Dordogne présente une hydrologie relativement complexe dans le détail et nous n'en donnerons ici que les grands traits (**fig. 11**).

La vallée de la Dordogne coupe en deux la plateforme carbonatée des causses lotois, individualisant au nord le Causse de Martel, et au sud le Causse de Gramat. L'épaisseur importante des calcaires et une karstification intense ont permis la mise en place

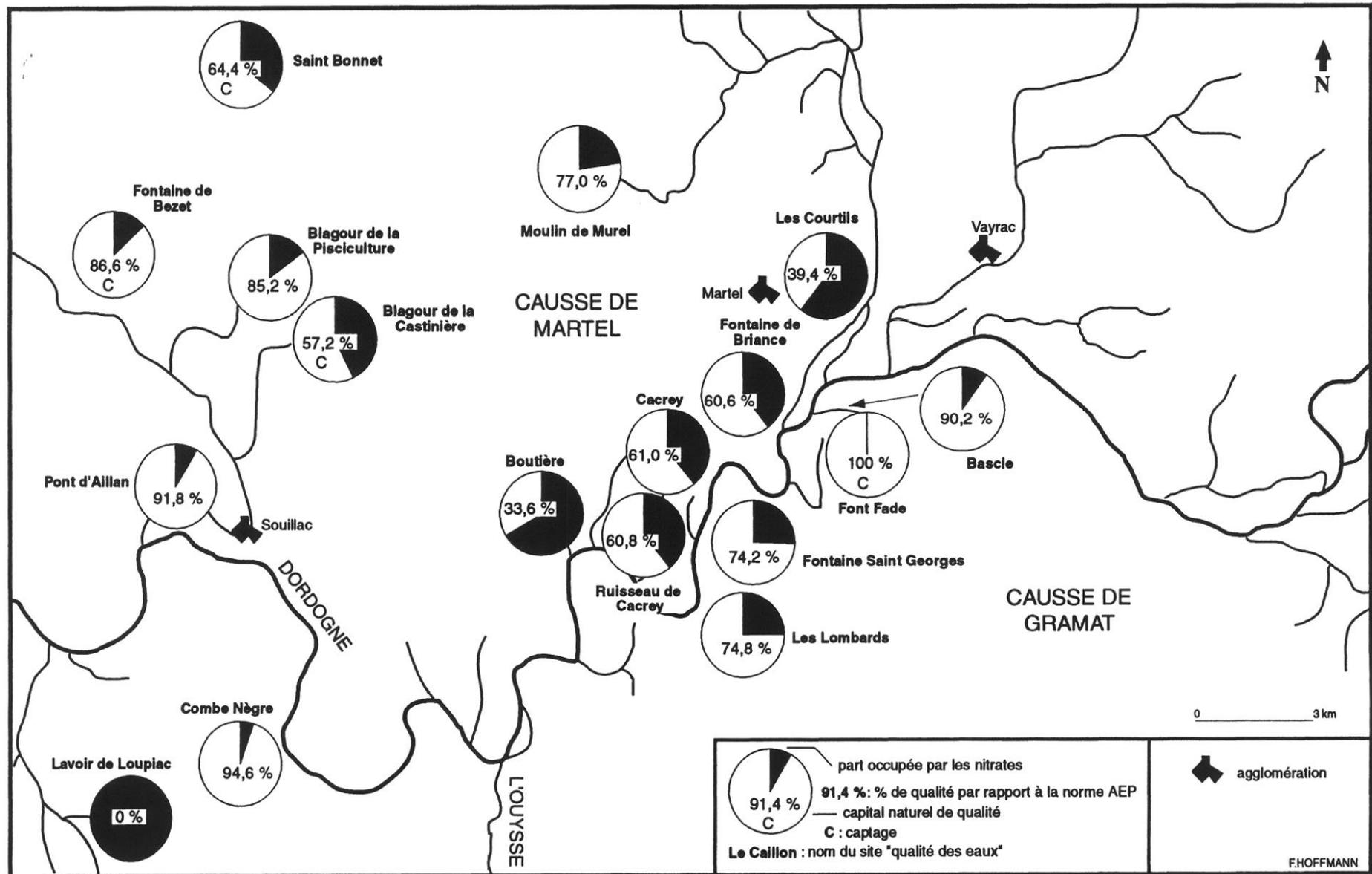
d'hydrosystèmes de grande taille, essentiellement souterrains. La plupart des sources se retrouvent en confluence directe avec la vallée de la Dordogne qui joue ici le rôle de niveau de base. L'essentiel du drainage est donc souterrain et il présente une direction dominante (NW-SE), perpendiculaire à la vallée qui est celle de la fracturation qui a guidé la karstification. Au départ de l'infiltration des eaux, on trouve de grands poljés ou de grands champs de dolines qui concentrent l'essentiel des cultures des plateaux. Ce sont les secteurs préférentiels d'infiltration de polluants. La présence de petites unités urbaines accentue certains phénomènes de pollution. La caractéristique principale de ce secteur est la présence de terrains de couverture, certes en faible épaisseur, mais présents dans les poljés. Ceci accentue les risques de pollution chronique.

## **B - Etat de la qualité des eaux du Causse de Martel**

La figure 9 permet de voir l'état des ressources de ce bassin par rapport à la norme AEP de 50 mg/l de nitrates. Il suffit pour cela de prendre les valeurs moyennes obtenues sur différentes campagnes ou comme dans le cas présent, d'isoler une campagne de mesures significatives, et de les exprimer en pourcentage de norme. Plus la pollution est faible, et plus le capital naturel de qualité d'eau est important.

On remarque d'emblée une différence entre les rives droite et gauche de la Dordogne. En effet, le sud du Causse de Martel est davantage peuplé et abrite une agriculture plus intense. Cet état se traduit par une plus forte pollution, en nitrates notamment. On peut remarquer de saisissants contrastes entre certaines sources, puisqu'il est possible de trouver dans ce secteur des sources non touchées par la pollution (exemple de la Font Fade). Elle contraste avec les grandes sources de la rive droite (Cacrey, Briance). Certaines petites sources montrent déjà un haut niveau de pollution (Les Courtils, Boutière, Fournière), montrant à quel point des petits organismes ( $Q < 5l/s$ ) ont du mal à supporter cette pression anthropique. Quand celle-ci s'avère trop forte, on débouche sur la situation du lavoir de Loupiac, où les teneurs dépassent les 50 mg/l de nitrates. On se place ici dans une situation d'étiage estival, période où les ressources sont particulièrement vulnérables. Ce type de vision permet alors de montrer à quel point un bassin est affecté de façon différentielle par cette pression anthropique. Il est à signaler que l'on obtient une autre vision si l'on change de polluant, avec les phosphates notamment. Ajoutons pour terminer que l'on se situe par rapport à une norme de 50 mg/l de nitrates, soit une norme très forte. Dans le cas, où l'on ramènerait celle-ci à 25 mg/l, l'essentiel des sources présentes sur ce bassin seraient déclarées non potables.

On se rend compte alors que le capital de qualité est fortement entamé dans certains systèmes. L'aspect conservatoire ne peut plus s'appliquer qu'à quelques points. Dans l'ensemble, les contrastes spatiaux sont très forts et ce secteur de vallée montre bien comment la pression anthropique s'applique de façon différentielle d'un point à l'autre. Elle montre que les actions menées en amont ont des conséquences certaines sur les hydrosystèmes situés en aval, en confluence dans les vallées. Elle rend nécessaire la solidarité entre tous les acteurs d'un même bassin et implique des mises en valeur des sols respectueuses de ce milieu fragile.



**Figure 11 : Niveau de pollution en nitrates des eaux : estimation du capital naturel de qualité (bassin de la Dordogne : campagne du 14/09/99) ;** cette carte montre des différences importantes dans la qualité des eaux de ce bassin. Il s'agit d'un instantané en situation hydrologique d'étiage. On remarque notamment une dichotomie entre les deux rives, avec une plus mauvaise qualité des principales sources du sud du Causse de Martel par rapport à celle du Causse de Gramat. Cette situation est due à la fois à un peuplement moins important de la bordure du Causse de Gramat, et à la fois à une mise en valeur de l'espace plus forte de la bordure sud du Causse de Martel liée à l'agriculture et à l'élevage.

## **Conclusion**

Il est important d'insister sur le rôle joué par l'impact du climat dans la restitution des phénomènes de pollution. Aujourd'hui, la pression anthropique sur le milieu s'exprime de façon très forte, selon le paramètre polluant considéré. Il est clair que l'homme modifie profondément son milieu, et cette modification peut prendre dans le cas des nitrates par exemple, des formes insidieuses.

Ce type d'étude est à mener en parallèle avec un programme de définition du bassin d'alimentation des hydrosystèmes souterrains. En effet, ceux-ci peuvent ne pas présenter de bassins apparents nets en surface. Dans les secteurs amont des bassins versants, certaines vallées peuvent présenter une orientation différente du drainage souterrain. Le seul moyen de préciser le bassin réel est alors de procéder à une campagne de traçages hydrologiques.

Une fois ce travail réalisé, il est important de compléter ces suivis de qualité des eaux par des études de bassins, afin de mieux caractériser les générateurs de pollution et leur dynamique. Ce type d'approche doit combiner différentes échelles d'étude, intégrant à la fois les paramètres naturels et les paramètres anthropiques et complétés également par des études visant à mieux préciser les périmètres d'alimentation des hydrosystèmes.

La situation en France, sans être dramatique, est toutefois préoccupante, car l'on ne constate pas d'inversion de tendance et notamment la mise en pratique de normes plus sévères. Au contraire, sous la pression de certains milieux, les normes d'épandage de produits polluants sont devenus de plus en plus lâches et la France détient toujours la norme nitrates la plus élevée d'Europe (50 mg/l), car certains groupes d'intérêt s'opposent à un abaissement des normes. En outre, elle cumule un retard certain dans l'évaluation du degré de pollution des eaux, retard qui lui a valu d'être condamnée par la Cour Européenne de Justice pour non respect de la directive nitrates.

## **Bibliographie**

- AGENCE DE L'EAU (1998)** : "SEQ - Eau : système d'évaluation de la qualité des cours d'eau", rapport de présentation, n°64, 59 p.
- AGENCE DE L'EAU (1999)** : "SEQ - Eau : les outils d'évaluation des cours d'eau - principes généraux", 11 p.
- AGENCE DE L'EAU (1999)** : "La qualité des eaux en 1998 des principales rivières du Bassin Adour - Garonne", 17 p.
- ASTRUC J. G. ET TARRISSE A. (1985)** : "Hydrogéologie des formations kimméridgiennes à l'ouest de Cahors et au sud de la rivière Lot", Quercy-Recherche, Cahors, pp. 17-30.
- HOFFMANN F. (1998)** : "Les tufs et les travertins en Périgord - Quercy", Thèse de l'Université de Bordeaux 3, Talence, 700 p.

**HOFFMANN F. (1999)** : "Les travertins du Coly (Causse de Martel, Dordogne) : contribution de l'endokarst à l'édification d'un système travertineux de vallée". *Karstologia* n°32 - 2/1998, Paris, pp 47-56.

**LAMBERT R. (1996)** : "Géographie du cycle de l'eau", Toulouse, Presses Universitaires du Mirail, 439 p.

**PELLEGRIN J-C. (1997)** : "Un exemple de cryptokarst en région tempérée : le karst de Casteljaloux (Lot-et-Garonne)", Thèse de l'Université de Bordeaux 3, Talence, 247 p.