

182239
193179

N040-FAL-E

Contrat IFREMER-UBO
n° 98.2.431.403 DEL
du 16 mars 1998

RAPPORT FINAL 1998
SYNTHESE

Programme Bassin Versant et Transmission des
Pollutions au Littoral

Etude hydrogéologique et
hydrogéochimique du
périmètre expérimental de
Kerveldréac'h

DECEMBRE 1998

Par
J.P. FAILLAT,
avec la collaboration de
L. SOMLETTE et T. SICARD


N040
FAL-E

IFREMER-DERO/EL



0EL02589

1) Introduction

Faisant suite à quatre rapports* traitant plus particulièrement d'aspects hydrogéologiques à l'échelle du bassin versant du Kerharo (1995), puis hydrodynamiques et géophysiques à l'échelle du périmètre expérimental de Kerveldréac'h (1996 et 1997), le rapport de 1998 est orienté vers les problèmes d'ordre hydrogéochimiques, orientation permise par l'importance du volume de données de cette nature accumulées (plus de 10000).

On rappellera succinctement le contexte, la problématique et les objectifs de l'étude entreprise par le laboratoire d'hydrogéologie :

L'importance de la pollution des eaux souterraines de Bretagne par des nitrates, d'origine essentiellement agricole, est reconnue depuis une vingtaine d'années. Outre les habituels problèmes de potabilité qui en découlent, il faut également leur attribuer un rôle dans la prolifération estivale d'algues vertes en certains points du littoral. C'est dans le but de trouver des parades au préjudice économique qui en résulte, qu'un programme intitulé "Bassins versants et transmission des pollutions au littoral", a été lancé dans le cadre du plan Etat-Région Bretagne pour la période 1994-1998. En temps que point d'application de ce programme, le bassin versant côtier du Kerharo est le siège, depuis fin 1994, d'une étude pluridisciplinaire visant à établir les modalités de transfert de cet ion, et à proposer des mesures afin de remédier à ses teneurs excessives. Cette étude a pour objet principal de contribuer à mieux cerner le rôle des eaux souterraines dans ce phénomène, et de présenter les résultats obtenus avant tout changement dans les pratiques culturales. Elle a donné lieu à la préparations d'un DEA* soutenu le 3 juillet 1998 et d'une thèse*, soutenue le 22 octobre 1998.

2) Contexte, dispositif d'observation

Un tel objectif ne pouvait être atteint qu'à l'aide d'un dispositif d'observation permettant une approche aussi détaillée que possible, compte tenu de la nature du milieu étudié, de son extrême complexité et des techniques disponibles. C'est la raison pour laquelle un périmètre expérimental de 0,35 km² a été installé dans le bassin versant du Kerharo (50 km²), après une étude¹ et ² des grands traits de l'hydrogéologie de celui-ci (lithologie, fracturation, hydrodynamique souterraine, hydrochimie, vulnérabilité), qui a permis de choisir la meilleure implantation possible.

* 1998 - T. SICARD - Mise en évidence par obturation d'écoulements internes à un forage et de la stratification hydrochimique d'une nappe de fissures (Périmètre expérimental de Kerveldréac'h). DEA, U. de Montpellier II, 89 p.

* 1998 - L. SOMLETTE - Contribution à l'étude hydrogéologique de la distribution et du devenir des nitrates dans les nappes de fissures, de l'échelle du périmètre expérimental à celle du bassin versant côtier. Thèse, UBO, 22 octobre 1998, 308 p.

1 - 1995 - J.P. FAILLAT et L. SOMLETTE - Rapport intermédiaire sur l'hydrogéologie du bassin versant du Kerharo. Proposition d'un choix élargi de sites expérimentaux. Rapport intermédiaire, contrat IFREMER-UBO, Mai 1995, 17 p., + annexes.

2 - 1995 - J.P. FAILLAT et L. SOMLETTE - Réalisation et équipement d'un périmètre expérimental hydrogéologique. Bassin versant du Kerharo. Rapport final, contrat IFREMER-UBO, Octobre 1995, 20 p., + annexes 41 p., carte h.t. à 1/25000.

Ce périmètre expérimental (PEK) correspond à l'exploitation agricole polyvalente de Kerveldréac'h. On y pratique l'élevage de bovins et de porcs, la culture de maïs, de céréales et de prairies. Il est entièrement situé sur un versant de morphologie simple, de 4 à 5% de pente moyenne vers le nord. L'aquifère est constitué de schistes plus ou moins gréseux d'âge Briovérien, surmontés de formations superficielles dont l'épaisseur cumulée est de 10 à 15 m. Il permet d'aborder des échelles d'observation métriques à hectométriques. Ses caractéristiques agricoles, morphologiques et géologiques sont communes à l'échelle du bassin versant du Kerharo, et même du Porzay, ce qui le rend représentatif de ces zones géographiques, pour les aspects étudiés.

Son équipement en trois campagnes de foration (août 1995, juin 1996 et octobre 1998), a permis d'adapter au mieux le dispositif d'observation aux phénomènes rencontrés. Dix huit forages ont été exécutés, dont 8 ont été laissés à parois nues, afin de permettre l'utilisation de certaines techniques de prospection et leur équipement multiniveaux, ultérieurement. Leurs profondeurs sont comprises entre 10 et 55 m et leurs débits instantanés entre 4 et 24 m³.h⁻¹ pour les 8 plus profonds, réalisés en grand diamètre. Ils ont été répartis sur trois sites distants de 300 à 400 m l'un de l'autre (haut, milieu et bas de versant), compromis permettant à la fois l'étude de la distribution spatiale des nitrates et une connaissance suffisante des caractéristiques de l'aquifère. Au total, plus d'une cinquantaine d'ouvrages de natures diverses sont disponibles : source (1) drains (25), trous à la tarière (10), puits (1), forages de profondeurs et diamètres variées (18). Le suivi en continu ou bi-hebdomadaire des paramètres piézométriques, physico-chimiques et chimiques est en cours depuis avril 1995 pour l'ensemble du bassin versant (forages privés et sources) et depuis août 1995 pour le périmètre. Dix à trente neuf mois d'observation sur une quarantaine de points d'eau, dont près de la moitié à l'extérieure du PEK, sont actuellement disponibles. Ils s'ajoutent aux données recueillies lors d'une vingtaine d'opérations ponctuelles (pompages d'essai globaux ou sélectifs, campagnes d'échantillonnage ou géophysiques).

Afin de replacer les observations d'ordre hydrochimique dans leur contexte hydrogéologique, ce qui est indispensable pour toute interprétation, un éventail important de techniques et de méthodes a été employé : géologie structurale (fracturation à diverses échelles), géophysique³ (résistivité électrique, VLF et polarisation spontanée), foration, hydrodynamique⁴ (piézométrie, pompages d'essai), hydrogéochimie (paramètres physico-chimiques, ions majeurs et traces), conception et construction de matériels appropriés. Hormis la première citée, ces méthodes et techniques ont été surtout appliquées au périmètre expérimental.

3 - 1997 - J.P. FAILLAT, L. SOMLETTE et T. SICARD - Etude du Bassin de Douarnenez. Périmètre expérimental de Kerveldréac'h. Etude de l'organisation des aquifères par prospection électrique. Rapport final, contrat IFREMER-UBO, Décembre 1997, 100 p.

4 - 1998 - J.P. FAILLAT, L. SOMLETTE, S. JEGAT, C. LE JEUNE et M. VASQUEZ - Détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère fissuré schisto-gréseux du périmètre expérimental de Kerveldréac'h. Rapport final, contrat IFREMER-UBO, Janvier 1998, 133 p.

3) Rappels sur la géométrie et l'hydrodynamique de l'aquifère et de la nappe

Les observations et les mesures faites en divers points du PEK et du bassin versant à des profondeurs variables, lors des suivis ou d'opérations ponctuelles, donnent les principaux résultats suivants concernant la géométrie et l'hydrodynamique :

Les 17 premiers forages réalisés ont fourni une idée du nombre de fissures hydrauliquement actives recoupées, mais ne permettent pas de calculer leur densité uniquement à partir des renseignements obtenus à l'avancement, en l'absence de la détermination des directions et des pendages. Les arrivées d'eau identifiées (au moins $1/3$ de $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), qui correspondent aux fissures, sont au nombre de 38 pour 7 forages profonds. Leurs débits unitaires peuvent atteindre $8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et leurs espacements les plus fréquents sont de l'ordre de 3 à 9 m. L'étude de l'anisotropie électrique de l'aquifère a été réalisée à partir de 22 sondages carrés (côtés de 15, 30, 70 m) et de cartes des résistivités électriques apparentes établies à l'aide de 13 profils (407 mesures au pas de 10 m), complétés par 19 sondages électriques. Trois directions d'anisotropie électrique ont été repérées : N 110, N 135 et N 170. La première est liée à l'orientation de plages de résistivités apparentes comprises entre 120 et $350 \Omega \cdot \text{m}$, dont les plus fortes valeurs correspondent aux niveaux les plus gréseux. Les deux autres sont attribuées à des fissures hydrauliquement actives. Ces résultats sont en accord avec ceux de l'étude de la fracturation sur affleurements et sur photos aériennes, laquelle fait ressortir trois modes principaux à N 15, N 145, N 165. La direction N 140 en particulier, correspond régionalement à des failles tardi-hercyniennes bien exprimées.

La prospection électro-magnétique a été réalisée par la méthode VLF. L'anomalie électro-magnétique la plus marquée, repérée suivant un profil E-W dans le site 1 (bas de versant), correspond bien à une zone fortement fissurée à filons de quartz, où un débit instantané de $24 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a été obtenu d'un forage de 34,5 m.

Des pompages d'essai dans tous les forages ont permis de calculer les paramètres hydrauliques de l'aquifère de fissures, qui présente des transmissivités de l'ordre de $1 \cdot 10^{-5}$ à $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et des coefficients d'emmagasinement de $1 \cdot 10^{-4}$ à $1 \cdot 10^{-3}$. La transmissivité est $1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'aquifère d'altérites. L'importance de ces intervalles indique clairement celle de l'hétérogénéité. L'allure des courbes de rabattements met en évidence un effet de drainance, vérifié par la réaction des trous à la tarière, qui s'assèchent en quelques heures. Les débits spécifiques globaux sont de l'ordre de $0,1$ à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ dans le milieu fissuré.

Les nappes sont de dimensions réduites. L'infiltration efficace élevée (30 à 50%), déterminée par le bilan hydrique ou par le bilan des chlorures, assure leur recharge. Ces nappes réagissent vite aux pluies (quelques heures au plus), presque en même temps sur tout le versant du PEK, même si l'amplitude et la rapidité des modifications de niveaux se différencient suivant la position du point de mesure sur le versant.

La surface piézométrique, dont la profondeur est comprise entre +1 et -10 m sous le sol a un sens d'écoulement NW à N, sensiblement différent de celui de la pente topographique. Dans le site 2, à mi-versant, elle montre deux compartiments, l'un de gradient 1 à 2 %, artésien en hiver, l'autre de 5 à 10 %. Ils sont séparés par un seuil orienté NW-SE, d'une largeur inférieure à une dizaine de mètres, où la surface piézométrique varie brusquement de 4 m environ, et dont la situation correspond à une anomalie électrique conductrice et à une anomalie négative de polarisation spontanée. La signification hydrogéologique exacte de cette singularité hydraulique,

limite étanche et/ou changement de milieu, n'est pas encore établie avec certitude. Elle illustre la forte hétérogénéité du milieu fissuré et sa compartimentation. Ce dernier phénomène, probablement très répandu, a une implication forte sur l'exploitation des ressources en eaux souterraines

En conclusion, le schéma synthétique suivant de la géométrie et du fonctionnement hydrodynamique de l'hydrogéosystème, s'appliquant aux échelles du périmètre et du bassin versant, peut être proposé : un aquifère fissuré, généralisé, caractérisé par l'alternance de niveaux plus ou moins gréseux ou argileux sub-verticaux, par l'intensité de la schistosité et par des fractures NW-SE à N-S plus ou moins bien connectées, existe dans les schistes briovériens. Les formations superficielles (sols, colluvions, alluvions, altérites) jouent un rôle de capacité vis-à-vis des drains que constituent les fissures dans les schistes sains. L'ensemble est assimilable à un système bicouche drain-capacité. La surface piézométrique épouse sensiblement la forme du relief. Elle est reliée au réseau hydrographique qui constitue l'aire d'émergence. Sa plus grande profondeur est sous les interfluves qui jouent le rôle d'aires d'alimentation ou dans les zones bien drainées par des fissures fréquemment NW-SE ou N-S. Elle présente des irrégularités de détail liées à la distribution non uniforme des perméabilités. Certaines parties des nappes de fissures sont semi-captives à captives et même légèrement artésiennes en hiver, comme cela a été observé dans le PEK, à mi-versant.

4) Fonctionnement hydrogéochimique

Si le chimisme de la nappe est dépendant à la fois des apports superficiels (pluies, engrais), des modes de transferts vers la profondeur (lessivage, fixation, concentration par évaporation, etc...) et de l'hydrolyse (minéraux et CO₂ disponibles, temps de contact, surfaces d'échange), deux phénomènes marquent fortement le fonctionnement hydrochimique du versant : d'une part, l'existence d'écoulements internes aux forages au repos, et d'autre part, le jeu complexe de réactions redox, ce dernier phénomène pouvant être masqué par le premier cité, ce qui peut biaiser les interprétations.

En effet, alors qu'en foration, tous les forages profonds ont montré une décroissance des teneurs en nitrates à partir d'une certaine profondeur, une fois réalisés, la colonne d'eau qu'ils contiennent peut ou ne pas être nitraté. C'est ainsi que les trois forages profonds du site 2 et celui du site 3 ne contiennent que des eaux sans nitrates, alors que le contraire s'observe dans deux forages sur trois du site 1.

En particulier, le suivi de la piézométrie et de la chimie d'un forage du site 1, de 34,5 m de profondeur, cimenté sur 11 m, et d'un piézomètre de 12 m de profondeur (dont 10 dans les altérites), distants de cinq mètres, montre l'effet des différences de charge hydraulique entre les fissures d'un même forage, sur la chimie de la colonne d'eau. Par quatre fois en deux ans et demi, deux fois en hautes eaux durant une à deux semaines et durant les étiages des étés et automnes 1996 et 1997, pendant deux mois et demi environ, les concentrations en nitrates ont décliné alors que celles en sulfates augmentaient. Systématiquement, la charge hydraulique du forage devenait supérieure à celle du piézomètre. Cette inversion piézométrique et hydrochimique traduit l'inversion du sens d'écoulement dans le forage, entre des fissures à charges hydrauliques différentes.

La réalisation de diagraphies de résistivité de la colonne d'eau de ce même forage, à divers moments, permet de confirmer et de compléter ce qui précède. Ainsi, au repos, quand le piézomètre est en charge vis-à-vis du forage, ce dernier est

généralement rempli d'eau nitratée, d'une conductivité de 280 à 320 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C ($\text{NO}_3 = 60$ à 90 mg.l^{-1}), alors qu'en étiage, dans une situation piézométrique inversée, la conductivité de la colonne d'eau décroît de 20 à 40 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, ce qui correspond à des prélèvements d'eau contenant moins de 10 mg.l^{-1} de NO_3 . De plus, on constate qu'en pompage, quelle que soit l'époque de l'année, cette conductivité tombe à 240 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ($\text{NO}_3 = 20$ mg.l^{-1}). Cela signifie qu'au repos, les fissures à eau nitratée proches de la surface provoquent des écoulements descendants, dans le premier cas, alors que ce sont les fissures les plus profondes qui entraînent un mouvement ascendant dans le forage, dans le deuxième cas. En pompage à gros débit de longue durée, il est extrait un mélange d'eau nitratée et d'eau sans nitrates (ce qui se vérifie par bilan chimique).

L'isolement successif des fissures du forage F31 à l'aide d'un obturateur double montre que des pompages à faible débit (inférieurs à 2 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) permettent d'obtenir de l'eau de plus en plus réductrice avec des concentrations de plus en plus faibles en nitrates dans les fissures les plus profondes. Mais l'importance des volumes d'eau prélevés ne permet pas une aussi bonne sélectivité qu'il serait souhaitable, le volume d'aquifère concerné pouvant être assez grand (quelques dizaines de m^3 au plus cependant).

Une autre approche a consisté à placer un obturateur à 23-24 m de profondeur dans le forage F31 au repos et à prélever des échantillons d'eau tous les deux ou trois jours (100 l) pendant un mois, dans chacune des deux sections ainsi isolées. Au départ, la colonne d'eau du forage était entièrement nitratée, tout comme le piézomètre Pz2. La section supérieure présentait une charge hydraulique plus forte de 2 à 10 centimètres que celle de la section inférieure. Si la partie supérieure du forage est restée dans cet état et montrait un chimisme identique à celui du piézomètre Pz2, par contre, les nitrates disparaissaient de la partie inférieure en quelques jours, par suite de l'écoulement de la nappe et/ou par dénitrification à proximité du forage des apports nitrates superficiels, mélangés à l'eau réductrice de la partie profonde de la nappe. Simultanément, les concentrations en sulfates et en fer augmentaient.

Ainsi, il a été possible de prouver qu'il y avait bien un écoulement descendant dans ce forage, à cette époque de l'année, que son débit était de 24 l.h^{-1} (calcul basé sur le suivi du déplacement de l'interface entre deux types d'eau après l'enlèvement de l'obturateur), que cela entraînait un mélange d'eau dans l'aquifère, et qu'il y avait bien deux catégories d'arrivées d'eau, avec ou sans nitrates, indépendamment de ce qui est observé dans la colonne d'eau du forage. Des mouvements d'eau en conditions non influencées ont également été observés ailleurs en milieu fissuré, à l'aide de courantomètres à haute résolution, et aussi, dans des roches meubles hétérogènes, sables et graviers.

Rappelons que les colonnes d'eau des trois forages profonds du site à mi-versant et celui du site en haut de versant ne contiennent que des eaux dénitrifiées (mouvement ascendant dans la colonne d'eau), alors que le contraire s'observe dans deux forages sur trois au niveau du site en bas de versant (mouvement descendant), ce qui ne correspond pas à ce qui a été observé à l'avancement et qui traduit le fonctionnement propre des forages.

La surveillance des forages à l'avancement a permis d'arrêter ceux-ci lorsque des indices de dénitrification se sont manifestés (EC et teneurs en nitrates faibles, teneurs en fer fortes), cela dans la mesure où un débit suffisant pour l'observation était obtenu. Ces indices ont été observés dans tous les forages, quelles que soient leurs positions morphologiques. Il est ainsi possible, dans un premier temps, de repérer les fissures avec nitrates et celles qui n'en ont pas ou peu. La projection dans un plan N-S de

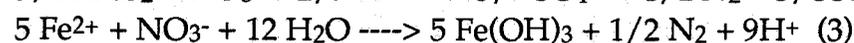
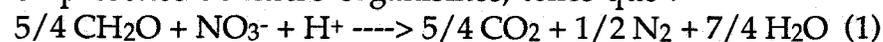
l'ensemble des ouvrages des trois sites permet de constater que les arrivées d'eau sans nitrates se produisent systématiquement dans tous les forages profonds, plus près de la surface à mi-versant qu'en haut ou en bas de versant, et aussi dans quelques uns des moins profonds.

A partir de cette coupe de près d'un kilomètre et de toutes les données disponibles, un essai de schématisation du fonctionnement hydrogéochimique du versant a été tenté. Il montre la superposition d'une zone oxydante superficielle et peu épaisse (moins de 30-40 m) contenant des nitrates, et d'une zone réductrice où la matière organique, les sulfures et le fer ferreux sont oxydés par l'oxygène des nitrates, qui sont alors détruits. Ces deux zones sont séparées par un front d'oxydo-réduction (FOR) de forme très irrégulière. Le FOR est très proche de la surface dans le site 2, là où la nappe de fissures est artésienne. Il en est probablement de même dans le bas-fond hydromorphe parcouru par le ruisseau et la plupart des zones humides. Sa position dépend fortement des conditions hydrodynamiques. Si le biais dû aux écoulements internes aux forages est pris en compte dans ce premier schéma, les écoulements hypodermiques ne le sont pas, pour l'instant.

Un grand nombre d'indices concordants permet de vérifier l'intervention de la dénitrification, principalement : absence des nitrates et d'oxygène dissous, mais abondance de sulfates, de fer et de gaz, Eh faibles, etc... Des conditions suffisamment réductrices et l'absence de nitrates ne suffisent cependant pas, seules, pour prouver qu'il y a eu dénitrification : il peut ne pas y avoir apport de nitrates, ou encore, ceux-ci peuvent n'être pas encore arrivés dans la zone réductrice.

Une campagne de mesure et de dosage systématique sur le terrain des paramètres liés aux conditions d'oxydo-réduction (OD, Eh, pH, EC, Fe, Mn, NH₄, NO₃, H₂S), une reprise (NO₃) et un complément au laboratoire des ions majeurs (tous les autres) ont été faits en étiage sévère, seuls les 17 premiers forages étant échantillonnables. Elle a permis de caractériser globalement, par ACP et hiérarchisation des individus, deux pôles hydrochimiques correspondant, pour l'un, à des conditions oxydantes (NO₃, OD et Eh forts) qui favorisent la nitratisation et pour l'autre, à des conditions réductrices (Fe²⁺, Mn, NH₄, SO₄, pH et H₂S forts), permettant la dénitrification en présence de bactéries, et peut être un début de désulfatation. Le passage d'une zone à l'autre se fait pour des Eh de l'ordre de 400 mV (200 à 400 mV dans la littérature).

La zone réductrice peut être le siège de réactions de dénitrification complexes, en présence de micro-organismes, telles que :



La matière organique et les nitrates sont apportés essentiellement par l'agriculture et par le sol, alors que FeS₂ (pyrite) et Fe²⁺ pour partie (hydrolyse des ferro-magnésiens et oxydation des pyrites) ont une origine minérale.

Ces réactions de dénitrification se produisent rapidement en présence de bactéries, surtout en milieu finement fissuré et par conséquent peu perméable, ce qui expliquerait la faible épaisseur de la zone oxydante. En l'absence de micro-organismes, au moins pour le fer ferreux accompagné de certains éléments en trace, les réactions seraient bien plus lentes et limitées.

Il a été constaté que SO₄²⁻, HCO₃⁻ et le pH ont tendance à augmenter lorsque l'eau est plus réductrice, ce qui peut signifier que les réactions (1) et (2) sont les plus actives et suffisent à conduire rapidement la dénitrification à son terme dans la partie

supérieure de la zone réductrice. Il faut remarquer à ce sujet, que l'énergie libre (ΔG°) libérée par la réaction (1) est très proche de celle de la réaction aérobie ($\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), ce qui fait qu'elle pourrait se produire dans un milieu où existe encore un peu d'oxygène.

Toutes ces réactions aboutissent à la production d'azote gazeux et pour l'équation (1) à du dioxyde de carbone, ce qui peut expliquer le dégazage de l'eau, parfois important, durant les pompages d'essai. Le meilleur rendement est obtenu avec la matière organique, puisque 1 mg de C-CH₂O peut détruire 5 mg de nitrates, alors que 1 mg de pyrite ou de fer ferreux n'en détruira respectivement que 1,4 et 0,2 mg. Il faut remarquer que 4 mg de C-CH₂O suffisent pour éliminer 10,8 mg d'OD (saturation à 12°C). Or, il a été dosé, dans 13 échantillons, entre 0,4 (eaux sans nitrates, profondes) et 5,9 mg.l⁻¹ (eaux avec nitrates, peu profondes) de carbone organique dissous (COD), ce qui semble indiquer que la matière organique disponible, si elle est utilisable, pourrait suffire à abaisser la concentration en oxygène dissous au dessous du seuil qui permet la dénitrification par la réaction (1). Elle pourrait donc débuter avant même que l'eau ne parvienne à la roche saine pyriteuse. Cependant, il semble bien que ce soit la réaction qui fait intervenir la pyrite qui est responsable de l'élimination de l'essentiel des nitrates. Dans le meilleur des cas, en supposant que tout le carbone soit utilisé dans la réaction 1, celle-ci ne contribuerait qu'à l'élimination de 20 à 25% des nitrates.

A l'échelle du PEK, la zonation redox verticale de la nappe de fissures est établie.

A celle du bassin versant du Kerharo, 13 forages de profondeurs comparables à ceux du périmètre ont été suivis pendant une année environ (6 à 25 séries d'analyses). Six d'entre eux ont des concentrations en nitrates comprises entre 0 et 0,1 meq.l⁻¹, et sept entre 0,3 et 1,7, parmi lesquels 3 présentent une variabilité (M/m) de 2 à 3. A première vue, on pourrait conclure à des possibilités de dénitrification localisées, distribuées de façon aléatoire. En réalité, cela montre que les données sont biaisées (fonctionnement propre des forages, positionnement de ceux-ci dans les zones d'alimentation, de circulation ou d'émergence, mélange entre les eaux de fissures à diverses profondeurs lors des pompages, moments où les prélèvements sont effectués, etc...), ce qui masque l'extension à tout le bassin versant du fonctionnement hydrochimique mis en évidence dans le PEK. Ces biais sont le lot commun des milliers de forages d'exploitation en région de socle.

On peut supposer que, souvent masquée et biaisée par le fonctionnement hydrodynamique propre aux forages et à celui de la nappe, cette zonation hydrochimique verticale doit se retrouver dans tout le Briovérien schisto-gréseux du Massif Armoricaïn, où les effets de la dénitrification ont été reconnus ponctuellement en de nombreux endroits. Il en est peut-être de même dans les nappes de fissures de la plupart des autres types de roches du Massif Armoricaïn, qui présentent souvent des indices isolés de dénitrification, sinon d'absence de nitrates, lors de la réalisation de forages d'exploitation dans des micaschistes, des gneiss ou des granites. Il est probable que des différences notables de profondeur du FOR existent dans des situations hydrogéologiques contrastées, à l'échelle régionale.

La zonation des eaux souterraines en fonction de leur potentiel redox a été identifiée ailleurs qu'en milieu fissuré de socle par différents auteurs, ce qui montre que ce phénomène est largement répandu, si les conditions hydrogéologiques et lithologiques s'y prêtent. Deux types de milieux aquifères sont surtout concernés. Ce sont, d'une part, les aquifères à porosité de fissures plus ou moins karstifiés des calcaires et craies du jurassique et du crétacé des grands bassins sédimentaires de Paris

et de Londres, où il a été mis en évidence une zonation horizontale sur des transects de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres, équipés de forages assez profonds, préexistants, avec passage de conditions libres à des conditions confinées. Et d'autre part, dans les aquifères à porosité d'interstices, où c'est la zonalité verticale, sur quelques dizaines de mètres dans des nappes libres, qui a été révélée par des dispositifs adaptés créés pour l'occasion, souvent en relation avec des problèmes de pollution et de protection de captages. Il est possible que le type de zonalité mis en évidence soit lié à la nature des hydrogéosystèmes et aux dispositifs d'observation et d'exploitation qu'il est possible d'y réaliser, et aussi et surtout, à la difficulté d'isoler un grand nombre de fissures dans un forage et d'obtenir des échantillons d'eau représentatifs de volumes suffisamment restreints de nappes, pour réaliser des profils évolutifs mettant en évidence la zonalité verticale.

Les conséquences pratiques de cette étude sont nombreuses et importantes. Elles concernent, par exemple, les bilans de nitrates à l'échelle des bassins versants, en tenant compte de ce qui est détruit dans les nappes, le rôle des eaux souterraines dans l'action dénitrifiante de zones humides, la recherche de ressources en eaux souterraines de bonne qualité, l'abandon des captages peu profonds, l'adaptation des périmètres de protection, etc..

Par exemple, on note que le phénomène de dénitrification va induire la sous-estimation des apports polluants aux nappes et aux cours d'eau. En effet, l'essentiel des nitrates qui parvient au réseau hydrographique correspond aux écoulements hypodermiques en hautes eaux, qui alimentent notamment les drains agricoles (50 à 100 mg.l⁻¹ de nitrates), alors que les nappes de fissures sont exemptes de nitrates (au moins à l'aplomb du PEK). L'émergence de ces nappes en certains lieux (berges, zones humides) doit permettre un abattement des teneurs en nitrates par dilution, phénomène qui sera surtout sensible en étiage.

On peut essayer d'approcher sommairement l'ordre de grandeur de la quantité de nitrates détruits dans les nappes de fissures, par l'application de loi de Darcy : $Q = T.i$ au versant. Le débit Q par unité de longueur est égal au produit de la transmissivité T par le gradient hydraulique i . L'ensemble des mesures de T conduit à retenir une valeur globale de 5.10^{-4} m².s⁻¹ pour la masse de l'aquifère fissuré. La valeur moyenne de i pour l'ensemble du versant est de l'ordre de 3 à 4%. Q serait donc de l'ordre de $4,5$ à 6.10^{-3} m³.s⁻¹ pour le versant au niveau du PEK (300 m de largeur). Sachant que la concentration en nitrates des drains et de la nappe des altérites est d'environ 50 à 100 mg.l⁻¹, ce que l'on suppose correspondre à l'eau qui franchit le front d'oxydo-réduction dans la partie supérieure de la nappe de fissures, l'on arrive à un flux de nitrates détruits dans le PEK de l'ordre de 7 à 19 T.an⁻¹ sur 35 ha. Il faut noter que l'utilisation d'une valeur de T de 1.10^{-4} donnerait des estimations cinq fois inférieures. Ces calculs seront affinés lors de la modélisation du versant. Il serait intéressant de comparer ces chiffres, extrapolés à l'ensemble du bassin versant, à ceux des nitrates exportés à l'embouchure du Kerharo et à ceux qui y sont apportés par les activités humaines.

Si la généralisation du schéma de zonation redox à l'ensemble des schistes briovériens du Massif Armoricaïn semble tout à fait licite du fait de leur caractéristiques : minéralisations diffuses en pyrite pour le moins très fréquentes, formations superficielles argileuse et peu perméables, l'extension à d'autres formations, bien que des indices nombreux y existent, nécessiterait une approche du même genre que celle qui a été faite dans le PEK, mais appliquée à des aquifères situés dans d'autres types très différents de roches, par exemple des granites.

Le niveau de connaissance acquis sur le PEK permet désormais d'aborder la modélisation mathématique des écoulements et des transports à plusieurs échelles, ce qui devrait aboutir à la quantification du rôle des eaux souterraines dans le bilan des nitrates à l'échelle régionale, ainsi qu'à l'évaluation des temps de transfert de cet ion dans les nappes, validée par des datations...

De telles datations ont été faites dans le PEK. Elles donnent des résultats que l'on peut résumer de la façon suivante : dans la nappe des altérites, vers 10 m de profondeur sous la surface piézométrique, les âges apparents sont de 10 à 15 ans, alors que dans la nappe de fissures, vers 20 à 40 m de profondeur, ils sont de 30 à 45 ans. Une telle stratification chronologique s'oppose à l'idée de remplacement de masse d'eau importantes des nappes de fissures (au sens stricte) en écoulement non influencé. On peut en tirer la conviction que des changements notables dans le chimisme de telles nappes demanderont des laps de temps assez importants pour se manifester.

Il faut insister sur le fait que la complexité d'organisation et de fonctionnement des hydrogéosystèmes fissurés, ainsi que celle des processus hydrogéo-chimiques mis en jeu, ne permet de progrès notables dans leur compréhension et leur modélisation, que par l'utilisation de dispositifs et de matériels expérimentaux, de techniques et de méthodes, strictement appropriés au milieu fissuré, où l'obtention d'observations et de mesures représentatives suffisamment rapprochées spatialement, constitue une difficulté majeure.