

Evolution de la pollution par fertilisants dans un grand aquifère détritique du sud de l'Espagne

ANTONIO CASTILLO

CSIC et Instituto del Agua. c/Rector López Argüeta, s/n. 18071 Grenade, Espagne

**ANTONIO PULIDO-BOSCH &
NÉSTOR MARTÍNEZ-CARMONA**

*Groupe de Recherche "Recursos Hídricos y Geología Ambiental", Laboratorio de
Géodynamique, Université de Grenade, Campus Fuentenueva, 18071 Grenade, Espagne*

Résumé Pendant les deux dernières décennies, les apports azotés provenant de fertilisants se sont maintenus à environ $230 \text{ kg N ha year}^{-1}$, dans l'aquifère détritique de la Vega de Grenade (sud de l'Espagne). Ces apports représentent à peu près 70% de l'azote total d'origine anthropique introduit dans le système. Dans la période 1983-1990, l'aquifère a présenté un régime quasi stationnaire quant à la distribution spatiale de teneurs. La baisse du taux de renouvellement du système (par diminution des apports d'eau), ainsi qu'une augmentation dans l'exploitation et le retour des eaux souterraines utilisées en irrigation, dû à la sécheresse aiguë soufferte pendant la période 1990-1995, a modifié l'équilibre atteint, les anomalies détectées s'étant étendues et intensifiées au cours des dernières années. Les principaux facteurs qui ont agi sur l'évolution spatio-temporelle de teneurs ont été les processus de recharge (plus spécialement la provenance superficielle ou souterraine des eaux d'irrigation), les taux de renouvellement et de retour d'eaux souterraines utilisées en irrigation, et la vitesse de l'écoulement souterrain.

INTRODUCTION

L'aquifère étudié (Fig. 1) constitue une plaine alluviale de 200 km^2 de surface, intégrée par des alternances de graviers, de sables et de limons, à prédominance progressive de fraction argileuse vers les bords. La région a une précipitation moyenne annuelle de 450 mm et une température moyenne annuelle de 15°C . Il s'agit d'un aquifère libre dans lequel le niveau piézométrique est à moins de 30 m de profondeur dans la plus grande partie de sa surface. La transmissivité et la porosité moyennes sont d'environ $4.000 \text{ m}^2 \text{ day}^{-1}$ et 6%, respectivement (FAO-IGME, 1972; Castillo, 1986, 1995; ITGE, 1989). Les ressources et les réserves exploitables sont évaluées à $180 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ et 1000 hm^3 ; il s'agit donc d'un aquifère à grande alimentation spécifique ($29 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ year}^{-1}$), provenant d'une grande infiltration d'eaux fluviales, source principale d'approvisionnement des irrigations. L'exploitation nette des eaux souterraines, augmentant continuellement, est, actuellement, de l'ordre de $70 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$.

La pollution par fertilisants

Les fertilisants sont la principale source d'apport en nitrates des eaux, qui constituent un grave problème pour l'approvisionnement humain; ceci affecte spécialement les

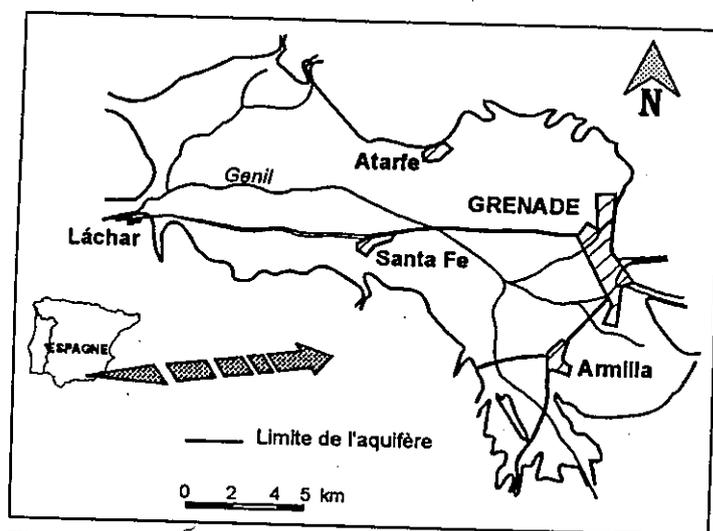


Fig. 1 Carte de situation de l'aquifère détritique de la Vega de Grenade (Espagne).

aquifères détritiques de régions arides et semi-arides. L'Union Européenne a promulgué en 1991 une Directive relative à la protection des eaux contre la pollution produite par des nitrates utilisés en agriculture (DOCE, 1991). L'aquifère étudié n'a pas été épargné par ce problème; les fertilisants sont ainsi responsables de 70% de la teneur en nitrates des eaux de l'aquifère étudié ($230 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ - $4.450 \text{ t N year}^{-1}$; Castillo & Fernández-Rubio, 1985); ces apports azotés représentent une sérieuse menace pour la qualité des eaux potables, dont plus de 50 000 habitants sont approvisionnés normalement; en période d'extrême sécheresse, telle que 1994-1995, plus de 300 000 habitants l'ont été chaque jour.

Dans cet article on va exposer les principaux résultats obtenus concernant les dotations d'azote d'origine agricole, pour les périodes 1980-1983 et 1993-1994, ainsi que les évolutions spatiale et temporelle de la teneur en nitrates des eaux de l'aquifère, depuis 1983.

DONNEES DE BASE ET METHODOLOGIE

Quantification de l'azote apporté par les fertilisants

Au cours des dernières années deux quantifications de l'azote apporté par des fertilisants à l'aquifère de la Vega de Grenade ont été réalisées (Castillo *et al.*, 1995). Le processus suivi a consisté à déterminer la distribution de cultures par saison agricole, pour réaliser ensuite des enquêtes directes sur l'utilisation de fertilisants, auprès des techniciens, agriculteurs et distributeurs. Pour la période 1980-1983 on a obtenu un apport brut en azote de $4.450 \text{ t year}^{-1}$ sur $27\,500 \text{ ha}$ de cultures d'irrigation (y compris les surfaces équivalentes par rotations de cultures), bien que la surface réelle de culture ait été seulement de $19\,000 \text{ ha}$ (indice de rotation de 1.5). La dotation d'azote obtenue pour la surface réelle a été de $234 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

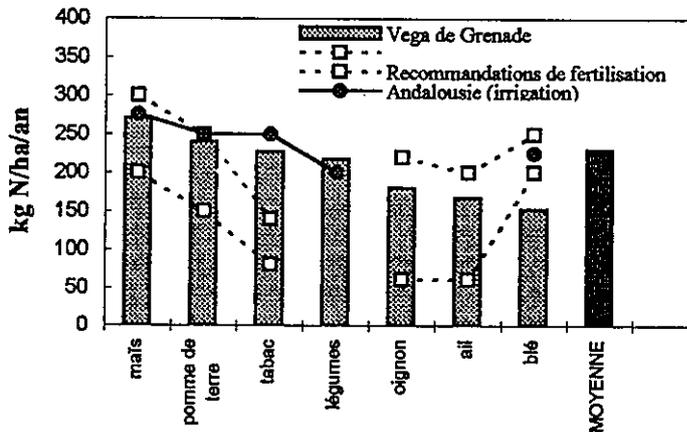


Fig. 2 Doses d'azote appliquées dans la Vega de Grenade aux principaux types de cultures existant, ainsi que recommandations de fertilisation pour l'irrigation au sud de l'Espagne et à la fertilisation appliquée à l'irrigation en Andalousie.

Pour les années 1993 et 1994, et suivant une méthodologie identique, on a obtenu un apport d'azote de $4.316 \text{ t year}^{-1}$ dans une surface d'irrigation équivalente à 22 000 ha (inférieure de 20% à celle de la période 1980-1983), tout cela pour la même surface réelle de culture de 19 000 ha (indice de rotation de 1.2). La dose d'azote obtenue à cette occasion a été de $227 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Dans les deux cas, des distributions saisonnières très semblables ont été obtenues, le printemps, avec 58% des apports annuels d'azote, étant l'époque de plus grande fertilisation; en été ceux-ci sont de 25% et en hiver, 17%.

La Fig. 2 montre la moyenne des dotations obtenues pour les principaux types de cultures de la Vega de Grenade. Les cultures d'herbacés les plus étendues ont été celles de céréales, maïs, tabac et cultures maraîchères, dont on a obtenu de notables récoltes, comme par exemple $80\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ d'oignons, $60\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ de betterave, $36\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ de pommes de terre, ou $12\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ de maïs.

Concentration en nitrates des eaux de l'aquifère

Pour la caractérisation spatiale de la teneur en nitrates des eaux de l'aquifère on a disposé de plusieurs campagnes analytiques (octobre 1983; mars 1984; mars 1989; octobre 1990; mars 1994; avril 1996). La Fig. 3 montre deux cartes d'isoteneurs en nitrates (mars 1984 et 1989), que l'on considère représentatives de la situation qui existait jusqu'en 1990. En général, les eaux ont été prélevées de forages et de puits en exploitation, qui captaient la partie supérieure de la zone saturée. Dans quelques-unes de ces campagnes, on a analysé des échantillons d'eaux correspondant à l'alimentation au système (rivières, pluie), afin d'estimer la concentration moyenne en nitrates des eaux alimentant le système dont 75% proviennent de l'infiltration d'eaux fluviales. On a prélevé également des échantillons à différentes profondeurs dans les forages représentatifs, ainsi que pendant des pompages d'essai à longue durée, dans le but d'établir les possibles variations de la teneur en nitrates avec la profondeur. On a disposé également d'analyses périodiques trimestrielles de quelques forages. Les eaux de la rivière Genil à la station de jaugeage de Loja ont été

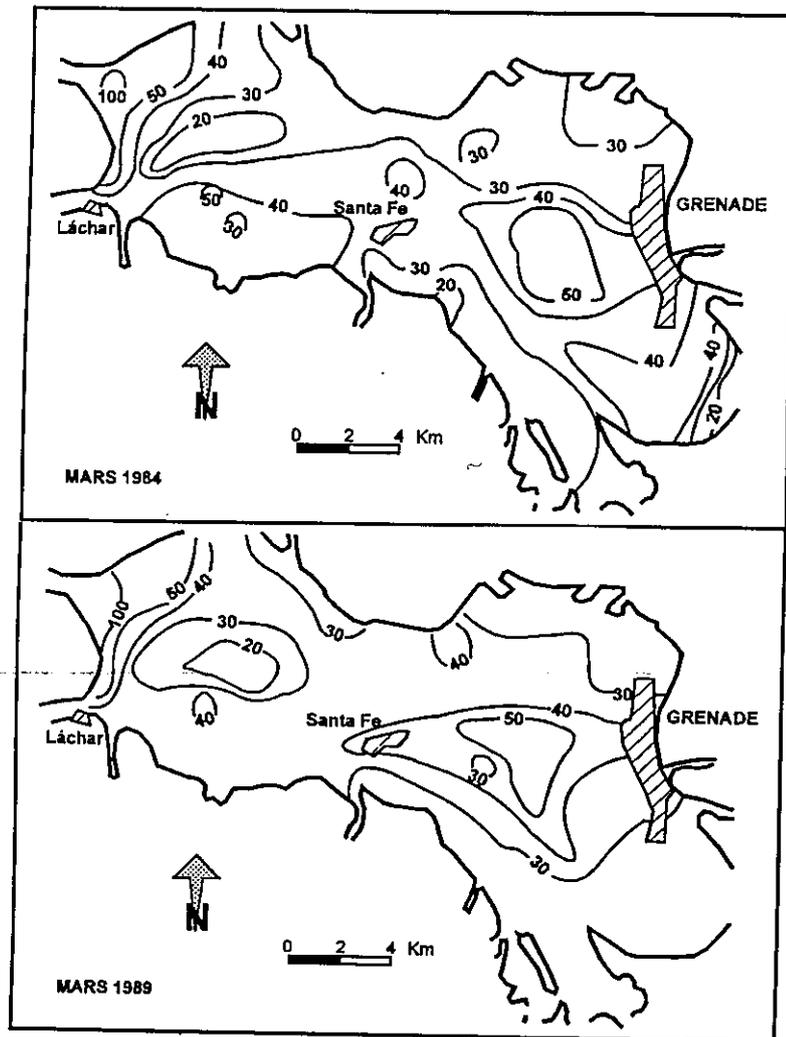


Fig. 3 Cartes d'isoteneurs en nitrates de l'aquifère de la Vega de Grenade pour mars 1984 et mars 1989.

contrôlées chaque mois à partir de 1974; cette station est située en aval du secteur de décharge du système aquifère de la Vega de Grenade (Castillo & López-Chicano, 1992). La Fig. 4 montre trois graphiques d'évolution temporelle (1974-1989) des nitrates dans cette station, dont deux correspondent aux teneurs mensuelles et moyennes annuelles et le troisième à l'apport annuel moyen.

RESULTATS

Doses d'azote apportées par les fertilisants

Comme il a été commenté auparavant, la dotation d'azote provenant de fertilisants s'est pratiquement maintenue constante pendant les 25 dernières années, à environ de

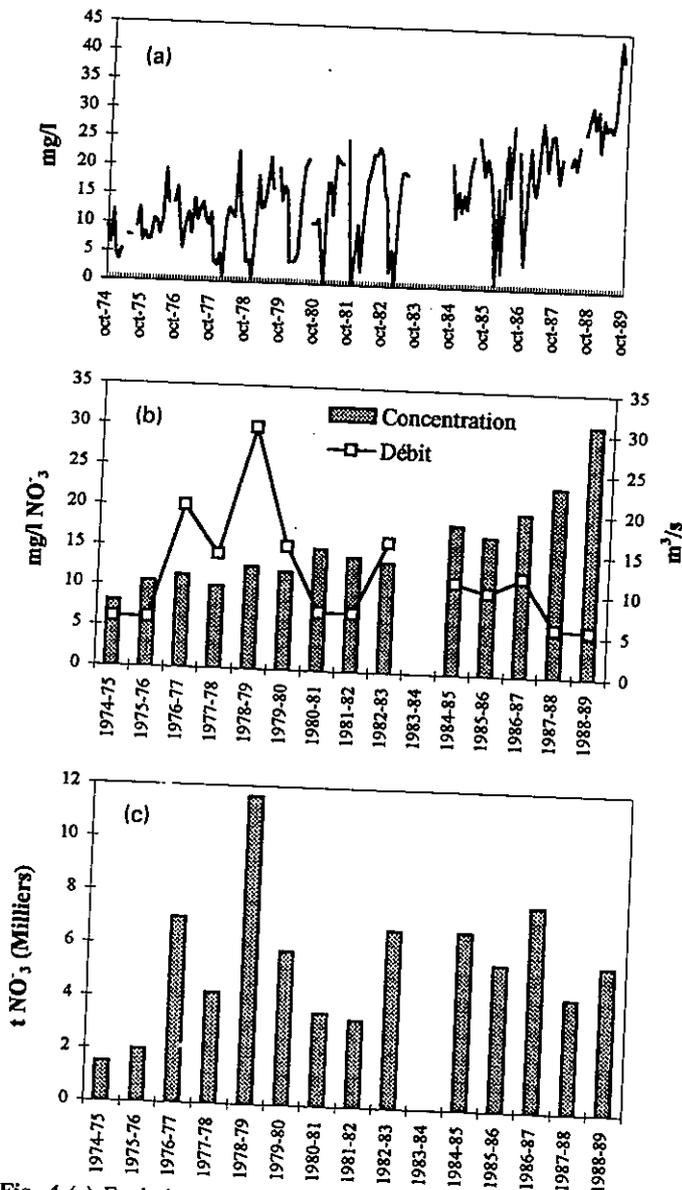


Fig. 4 (a) Evolution mensuelle de la teneur en nitrates de la rivière Genil (à Loja), pour la période 1974-1989 (b) Idem pour l'évolution annuelle de la teneur en nitrates (c) Idem pour l'apport de nitrates (à partir de données fournies par la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir).

230 kg N ha⁻¹ year⁻¹. Ce fait contraste avec la tendance croissante dans beaucoup d'autres régions; la diminution de la rentabilité agricole a été, très probablement, la raison qui a stabilisé les dotations appliquées, elles-mêmes déjà élevées. L'azote apporté par les fertilisants aux principaux types de cultures de la Vega de Grenade est comparable à l'apport moyen des cultures d'Andalousie (Fig. 2; Gros & Domínguez, 1992). Il se trouve également dans la bande de dotations recommandées

comme besoins moyens de fertilisation pour l'irrigation au sud de l'Espagne (Fig. 2; Domínguez, 1978).

Cependant, les apports venant d'eaux résiduares urbaines employées en irrigation n'ont pas été comptabilisés dans les dotations d'azote (environ $35 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ dans la Vega de Grenade; Castillo, 1986). Ainsi, dans les secteurs irrigués avec ce type d'eaux, des apports azotés supérieurs en moyenne à $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ se produisent.

Evolution spatiale et temporelle des concentrations en nitrates

Les sources anthropiques d'azote, et plus spécialement les fertilisants, ont provoqué une augmentation généralisée de la concentration en nitrates de l'aquifère, depuis 8 mg l^{-1} (estimation du fond régional naturel) jusqu'à une moyenne de 40 mg l^{-1} obtenus pour la totalité de l'aquifère et la période 1983-1990. L'analyse des différentes cartes d'isoteneurs en nitrates disponibles montre des variations peu significatives (Fig. 3), indicatives d'un régime presque stationnaire, dans un système caractérisé par un grand pouvoir d'autorégulation.

Le principal facteur qui influence la distribution spatiale d'isoteneurs a été la provenance des eaux d'irrigation (superficielles ou souterraines), les taux de renouvellement et de retour des eaux souterraines d'irrigation et la vitesse de l'écoulement souterrain. Les plus grandes concentrations en nitrates (environ 300 mg l^{-1}), qui coïncident également avec les teneurs maximales en plaguicides (de la Colina, 1996), se trouvent dans un secteur très concret, caractérisé par une faible recharge et une faible vitesse de l'écoulement souterrain, irriguée exclusivement par des eaux souterraines.

On n'a pas observé de différences significatives de la concentration en nitrates dans les 50 premiers mètres de zone saturée étudiés. On n'a pas détecté non plus de différences significatives de concentration dans les pompages d'essai à longue durée. Tout cela est probablement dû aux processus de mélanges d'eaux existant dans la zone saturée; il faut souligner qu'il existe de nombreux forages exploitant la nappe ($> 7 \text{ par km}^2$).

Les graphiques d'évolution temporelle de la concentration (Fig. 4(a) et (b)) montrent l'existence d'une légère augmentation, plus intense pour les dernières années de la série étudiée. Cependant, l'évolution détectée a été directement influencée par les niveaux piézométriques en baisse au cours des dernières années dû à la diminution des apports de la pluie (Fig. 4(b)), et les débits d'exploitation de l'aquifère qui ont augmenté notablement. La diminution des apports de surface, ainsi qu'une plus grande exploitation de l'aquifère pour l'irrigation, provoquent, depuis 1990 environ — période de grande sécheresse — l'augmentation en extension et en intensité des anomalies positives détectées.

Cependant, si l'on observe l'évolution temporelle de l'apport de nitrates (Fig. 4(c)), on vérifie que la source de pollution se trouve pratiquement stabilisée depuis 1976-1977, en accord avec la stabilisation des apports azotés de fertilisants, depuis plusieurs années.

Ainsi donc, vue l'expérience observée dans l'aquifère de la Vega de Grenade et de l'évolution des dotations en fertilisants en Espagne dans la dernière décennie, on peut prévoir qu'il ne se produira pas, à l'avenir, d'augmentations significatives de

concentration en nitrates par de plus grands apports de fertilisants. D'autres processus vont être plus décisifs à ce sujet; parmi eux, il faut considérer plus spécialement l'augmentation de retours d'irrigation des eaux souterraines, ainsi que l'augmentation du temps de renouvellement des ressources hydriques souterraines.

REFERENCES

- Castillo, A. (1986) Estudio Hidroquímico del Acuífero de la Vega de Granada (Etude hydrochimique de l'aquifère de la Vega de Grenade) (en espagnol). Serv. Publ. Univ. Grenade.
- Castillo, A. (1995) El acuífero de la Vega de Granada, uno de los más importantes de Andalucía (L'aquifère de la Vega de Grenade, un des plus importants d'Andalousie) (en espagnol avec un résumé en anglais). Tierra y Tecnología 9, 37-42.
- Castillo, A. & Fernández-Rubio, R. (1985) Aplicación de fertilizantes químicos en la Vega de Granada. Repercusión en la calidad de las aguas subterráneas (Application de fertilisants chimiques à la Vega de Grenade. Répercussion sur la qualité des eaux souterraines) (en espagnol). I Cong. Geoquímica, 61-62.
- Castillo, A. & López-Chicano, M. (1992) Evolución temporal (1974-1989) de los nitratos en el río Genil (estación de Loja; Granada) (Evolution temporelle (1974-1989) des nitrates dans la rivière Genil (station de Loja; Grenade)) (en espagnol). Hidrog. y Rec. Hidrául. XVI, 159-167.
- Castillo, A., Martínez-Carmona, N. & Pulido-Bosch, A. (1995) Cuantificación del nitrógeno aportado por fertilizantes al acuífero de la Vega de Granada (Quantification de l'azote apporté par les fertilisants à l'aquifère de la Vega de Grenade) (en espagnol). Hidrog. y Rec. Hidrául. XX, 467-479.
- de la Colina, C. (1996) Metodología para la determinación de residuos de plaguicidas en aguas. Aplicación al acuífero de la Vega de Granada (Méthodologie pour la détermination de résidus de plaguicides dans les eaux). Application à l'aquifère de la Vega de Grenade) (en espagnol). Tesis Doct. Univ. Granada.
- DOCE (1991) Directiva del Consejo de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura (Directive du Conseil du 12 décembre 1991, relative à la protection des eaux contre la pollution produite par les nitrates utilisés en agriculture) (dans toutes les langues de l'Union Européenne). Diario Oficial de las Comunidades Europeas, no. 375/1.
- Domínguez, A. (1978) Abonos minerales (Engrais minéraux) (en espagnol). Ministerio de Agricultura. Col. Agricultura Práctica, 5.
- FAO-IGME (1972) Utilización de las aguas subterráneas para la mejora de los regadíos de la Vega de Granada (Utilisation des eaux souterraines pour l'amélioration des irrigations de la Vega de Grenade) (en espagnol). Inf. Técnico 2. AGL/SF/SPA 16.
- Gros, A. & Domínguez, A. (1992) Abonos: guía práctica de fertilización (Engrais: guide pratique de fertilisation) (en espagnol). Ed. Mundi-Prensa (8ª ed.).
- ITGE (1989) Vega de Granada (Vega de Grenade) (en espagnol). Serv. Publ. ITGE.