



Agence de l'Eau
Adour Garonne



Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales

R E G I O N



AQUITAINE



AQUITAINE



DOCUMENT PUBLIC

Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine Année 5

*Opération sectorielle
Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise*

*Nouvelles connaissances hydrogéologiques
Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions*

Auteurs : Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y. et Baudry D.
avec la collaboration de : Hoarau A., Dufour P. et Benhammouda S.

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 01-EAU-403

Janvier 2002
BRGM/RP-51178-FR



BRGM

Mots clés : Géologie, Hydrogéologie, Hydrochimie, Réservoir, Couverture, Exutoires, Echanges nappe-rivière, Traçages, Vulnérabilité, Cartographie, Gironde, Aquitaine, France

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

SCHNEBELEN N., PLATEL J.P., LE NINDRE Y. ET BAUDRY D. *avec la collaboration de*
HOARAU A., DUFOUR P. ET BENHAMMOUDA S. (2001)
Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine – Année 5
Etude Sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise
Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux
pollutions
Rapport BRGM/RP-51178-FR, 75 p., 32 figures.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Pour assurer la pérennité en quantité et en qualité de l'aquifère oligocène dans la région bordelaise, le BRGM a entrepris la réalisation d'une étude sur la vulnérabilité de la nappe dans la zone affleurante/sub-affleurante de la rive gauche de la Garonne. Dans cette zone, une dégradation progressive de la qualité de la nappe a été observée depuis quelques années, ainsi qu'une baisse importante des niveaux piézométriques, pouvant entraîner un dénoyage au toit du réservoir.

Le programme d'étude, prévu sur deux années dans le cadre du projet "*Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine*", comprenait comme **premier objectif (phase 1 de l'étude) la révision de l'ensemble des données géologiques** depuis Lesparre au Nord jusqu'à l'Est de Langon, sur une largeur variant entre 12 et 30 km. Cette phase réalisée en 2000 a permis de préciser la géométrie du système aquifère et ses rapports avec ses épontes inférieure et supérieure et avec les rivières qui traversent le secteur.

Les calcaires plus ou moins karstifiés de la *Formation du Calcaire à Astéries*, d'âge oligocène inférieur, contiennent un aquifère sur une épaisseur comprise entre 25 et 60 mètres. Il est séparé des aquifères miocènes et quaternaires par des marnes de l'Oligocène supérieur et/ou du Miocène inférieur généralement peu puissantes. Des coupes sériées de corrélations lithostratigraphiques montrent le plongement général du réservoir vers le Sud-Ouest et les érosions miocènes puis quaternaires.

Un modèle géologique numérique a été réalisé avec le logiciel GDM sur l'ensemble du secteur étudié, à partir des données réinterprétées de plus 500 forages. Il restitue les géométries des formations à partir des profondeurs de quatre limites sélectionnées (mur et toit du réservoir oligocène, toit de l'éponte supérieure, sol). Sept cartes ont été dressées pour définir la géométrie du réservoir et de son éponte supérieure. Elles montrent un approfondissement du toit des calcaires de l'Est vers l'Ouest, depuis la surface du sol jusqu'à 90 à 100 m de profondeur dans le secteur de Ste-Hélène, St-Jean-d'Illac, Saucats, et des profondeurs très importantes (plus de 150 m) au Sud de Sauternes et de Langon. La puissance du réservoir augmente de manière plus ou moins corrélative dans les mêmes zones par variation latérale de faciès au sein du membre inférieur de la formation oligocène.

Les assises de l'Oligocène supérieur (Chattien) et de la base du Miocène (Aquitaniens) sont constituées d'argiles ou de marnes. Il a été mis en évidence que la puissance de cette couverture imperméable est en général plus continue et importante dans les plateaux-interfluves que ne le laissait supposer la lecture des cartes géologiques. A l'inverse des zones ne possèdent qu'une faible épaisseur d'argiles chattiennes, notamment à St-Médard-en-Jalles. Ceci peut avoir des conséquences sur la protection des sources oligocènes du Thil et de Gamarde.

Au cours de la **deuxième phase du projet**, la révision des données géologiques s'est poursuivie. Elle a porté plus particulièrement sur la détermination de la nature lithologique et de l'épaisseur du recouvrement de l'aquifère oligocène. **Les données hydrogéologiques et hydrochimiques sur l'aquifère ont été structurées** à partir de campagnes de recensement et de caractérisation des exutoires de la nappe (sources) et d'une étude des relations nappe - ruisseaux.

L'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur la nappe de l'Oligocène en rive gauche de la Garonne a permis la **réalisation d'une carte de vulnérabilité de la nappe à la pollution**. La vulnérabilité est définie ici comme la vulnérabilité intrinsèque, qui est fonction uniquement des caractéristiques physiques de l'aquifère et des dépôts géologiques et du sol sus-jacent. La vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme "immuable" dans le temps. Le type et l'intensité des activités humaines au droit de l'aquifère oligocène, qui sont susceptibles d'évoluer dans le temps, ne sont pas pris en compte.

Quatre critères physiques de vulnérabilité ont été utilisés pour la détermination de la vulnérabilité de la nappe oligocène : la recharge annuelle nette, la topographie (pente de la surface du sol), **la nature de la couverture surmontant l'aquifère oligocène et l'épaisseur de cette couverture**. Une carte de vulnérabilité relative à chacun de ces critères a été réalisée sur le secteur d'étude. La carte de vulnérabilité finale est obtenue par combinaison de ces différentes cartes, selon un modèle additif de notations et de coefficients de pondération accordés aux différents critères.

L'analyse de la carte de vulnérabilité ainsi établie permet de distinguer sur le secteur d'étude **quatre classes à degré de vulnérabilité différent**, allant d'une faible vulnérabilité à une très forte vulnérabilité. Les zones à faible vulnérabilité sont principalement localisées à l'Est de Noaillan et au Sud de Martignas et St-Jean-d'Illac. C'est essentiellement l'épaisseur de la couverture de l'aquifère, supérieure à 90 m, qui réduit le degré de vulnérabilité. Les **zones à très forte vulnérabilité** correspondent :

- aux zones d'affleurements des calcaires oligocènes, à Langon, Barsac, St-Selve, La Brède, Léognan, Gradignan, Talence, Bordeaux, St-Médard-en-Jalles, Blanquefort, St-Laurent, St-Sauveur et Vertheuil ;
- aux zones caractérisées par une faible épaisseur du recouvrement de l'aquifère (notamment de l'imperméable oligo-miocène), un faciès de la couverture dominé par des formations perméables (sable graveleux, sable), et une recharge importante. C'est le cas au Sud de Langon, à l'Ouest de Podensac, Portets et Beautiran, à Gradignan, Le Haillan et St-Médard-en-Jalles, au Nord de Listrac et au Sud de Lesparre.

Une première validation de la carte de vulnérabilité finale a été réalisée à partir des analyses de polluants (nitrates) effectuée sur les eaux de la nappe de l'Oligocène. Les teneurs en nitrates les plus élevées sont bien observées au droit des zones les plus vulnérables. La carte de vulnérabilité définit ainsi les zones à protéger en priorité, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif. Elle constitue un document d'aide à la décision indispensable pour la gestion de la ressource en eau et l'aménagement du territoire.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. Objectifs	9
1.2. Localisation	10
2. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.....	12
2.1. Notion de vulnérabilité des eaux souterraines.....	12
2.1.1. Protection naturelle des eaux souterraines	12
2.1.2. Historique du concept et définitions.....	13
a) Généralités.....	13
b) Notion de vulnérabilité et notion de risque.....	14
c) Vulnérabilité intrinsèque et vulnérabilité spécifique	16
2.2. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	16
2.2.1. Objet des cartes de vulnérabilité	16
2.2.2. Objectifs des cartes de vulnérabilité et échelles de représentation	17
2.3. Détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	19
2.3.1. Détermination de la vulnérabilité intrinsèque	19
a) Critères essentielles.....	19
b) Critères complémentaires.....	23
2.3.2. Détermination de la vulnérabilité spécifique	23
2.3.3. Méthodes et techniques de détermination de la vulnérabilité	24
a) Généralités.....	24
b) Méthodes de cartographie à index	25
c) Description des principales méthodes de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM).....	26
d) Limites des méthodes de pondération et d'indexation	30
3. Application à la nappe de l'Oligocène en région bordelaise.....	32
3.1. Choix d'une méthode et de critères de détermination de la vulnérabilité aux pollutions.....	32
3.2. Amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques en vue de la détermination de la vulnérabilité.....	33
3.2.1. Nouvelles connaissances géologiques.....	33
a) Recouvrement pliocène et quaternaire	33
b) Recouvrement imperméable oligo-miocène	37
c) Ensemble du recouvrement.....	37
3.2.2. Nouvelles connaissances hydrogéologiques	40
a) Sources de la nappe de la nappe de l'Oligocène.....	40
b) Relations nappe de l'Oligocène – ruisseaux et risques de pollution	51
3.3. Caractérisation des critères de vulnérabilité sur le secteur d'étude.....	61
3.3.1. Méthode.....	61

3.3.2. Cartographie du critère recharge annuelle nette.....	61
3.3.3. Cartographie du critère pente	62
3.3.4. Cartographie du critère nature de la couverture	62
3.3.5. Cartographie du critère épaisseur de la couverture	66
3.4. Réalisation de la carte de vulnérabilité finale et interprétation.....	66
3.4.1. Réalisation.....	66
3.4.2. Interprétation	67
a) Zones à très forte vulnérabilité.....	67
b) Zones à forte vulnérabilité	67
c) Zones à moyenne vulnérabilité	67
d) Zones à faible vulnérabilité.....	67
3.4.3. Validation	67
4. Conclusion.....	70
5. Bibliographie	72

Liste des illustrations

FIGURES

Fig. 1 : Localisation du secteur d'étude.....	11
Fig. 2 : Purification naturelle de l'eau contaminée (Zaporozec, 1994).....	12
Fig. 3 : Démarche utilisée dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux de la nappe de Beauce (Braux, 1996).....	15
Fig. 4 : Correspondance entre les échelles de cartographie des cartes de vulnérabilité et les objectifs poursuivis (Landreau, 1996).....	18
Fig. 5 : Critères naturels utilisés pour la détermination de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise.....	32
Fig. 6 : Types de recouvrement du réservoir oligocène.....	34
Fig. 7 : Epaisseur du recouvrement plio-quadernaire des aquifères oligocènes et miocènes.....	35
Fig. 8 : Nature du recouvrement plio-quadernaire des aquifères oligocènes et miocènes (données ponctuelles).....	36
Fig. 9 : Nature du recouvrement plio-quadernaire des aquifères oligocènes et miocènes (données interpolées).....	38
Fig. 10 : Epaisseur du recouvrement imperméable oligo-miocène de l'aquifère oligocène.....	39
Fig. 11 : Epaisseur total du recouvrement de l'aquifère oligocène.....	41
Fig. 12 : Exemples de sources oligocènes du secteur d'étude.....	42
Fig. 13 : Localisation des sources oligocènes du secteur d'étude.....	43
Fig. 14 : Débits des sources oligocène du secteur d'étude (basses eaux 2000).....	45
Fig. 15 : Teneurs en nitrates des sources oligocènes du secteur d'étude (période 2000-2001).....	46
Fig. 16 : Localisation des sources et des forages captant la nappe de l'Oligocène sur le secteur d'étude.....	48
Fig. 17 : Teneurs en nitrates des sources et forages captant la nappe de l'Oligocène sur le secteur d'étude (période 2000-2001).....	49
Fig. 18 : Piézométrie de la nappe des calcaires de l'Oligocène en novembre 2000.....	50
Fig. 19 : Localisation des jaugeages du 20/11/1991 sur le Monastère.....	52
Fig. 20 : Résultats des jaugeages du 20/11/1991 sur le Monastère.....	52
Fig. 21 : Résultats des jaugeages du 08/12/1992 sur le Monastère.....	53
Fig. 22 : Localisation des jaugeages d'avril 1996 sur le Monastère.....	53
Fig. 23 : Localisation des jaugeages du 03/06/1994 au 22/08/1994 sur le Saucats.....	55
Fig. 24 : Résultats des jaugeages du 03/06/1994 au 22/08/1994 sur le Saucats.....	55
Fig. 25 : Traçage du Monastère en 1996.....	56
Fig. 26 : Traçage de la jalle en avril 1995.....	57
Fig. 27 : Traçage du Monastère en avril 1995.....	58
Fig. 28 : Traçage du Saucats en juin 1994.....	59
Fig. 29 : Carte de vulnérabilité des nappes oligocène et miocène relative à la recharge.....	63
Fig. 30 : Carte de vulnérabilité des nappes oligocène et miocène relative à la pente.....	64
Fig. 31 : Carte de vulnérabilité de la nappe oligocène relative à la nature de la couverture.....	65

Fig. 32 : Carte de vulnérabilité finale de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise.68

TABLEAUX

Tabl. 1 : Critères intrinsèques et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines, et leurs paramètres (Vrba et Civita, 1994)	21
Tabl. 2 : Critères intrinsèques et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines, et leurs paramètres (suite)(Vrba et Civita, 1994)	22
Tabl. 3 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (Lallemand-Barrès, 1994)	27
Tabl. 4 : Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC	28
Tabl. 5 : Valeurs des critères indexés de la méthode EPIK	30
Tabl. 6 : Facteurs de pondération de la méthode EPIK.....	30
Tabl. 7 : Débits mesurés sur le Monastère en avril 1996	54
Tabl. 8 : Débits mesurés du 19/12/1994 au 18/04/1995 sur la jalle	54
Tabl. 9 : Débits mesurés le 09/03/1995 sur le Monastère	54
Tabl. 10 : Systèmes de pondération utilisés pour la détermination de la carte de vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène	61

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS

Deux systèmes aquifères sont principalement exploités pour l'alimentation en eau potable de la région bordelaise, ceux de l'Eocène moyen et de l'Oligocène, qui sont captés à des profondeurs très différentes. Les forages à l'Eocène sont profonds de 150 à 300 mètres, alors que la profondeur des forages à l'Oligocène est souvent inférieure à 100 mètres, mais peut dépasser localement 150 m (*partie captive - code SA 230*). Dans l'Entre-deux-Mers et immédiatement en rive gauche de la Garonne, le système aquifère est libre car les formations réservoirs sont affleurantes ou sub-affleurantes (*partie libre - code SA 127 A1*). Il devient progressivement captif vers l'Ouest, par enfoncement progressif du réservoir en direction de l'Atlantique. Localement, dans les zones d'affleurement apparaissent des résurgences de l'aquifère, dont les plus importantes sont les sources du Thil et de Gamarde à St-Médard-en-Jalles au Nord et de Budos au Sud, captées pour l'alimentation en eau potable de la Communauté Urbaine de Bordeaux.

Pour l'aquifère de l'Oligocène, le volume des prélèvements, qui longtemps avait été inférieur à ceux de l'Eocène moyen dans le département de la Gironde, est depuis 1996 légèrement supérieur. **En 2000, les volumes prélevés dans l'aquifère oligocène ont été de 63,5 millions de m³ environ pour 58,1 millions de m³ dans celui de l'Eocène moyen** (Schnebelen *et al.*, 2001).

Des risques de dégradation, tant quantitative que qualitative existent pour ces deux systèmes aquifères. Ils sont bien connus depuis longtemps pour la nappe éocène (forte dépression piézométrique sous l'agglomération bordelaise, risque de venues d'eaux saumâtres en Médoc oriental). Face à la dégradation progressive des qualités de ces aquifères et afin d'assurer la pérennité de la ressource oligocène, qui prend de plus en plus le relais de celle de l'Eocène, il est apparu nécessaire au Comité de Pilotage du projet "*Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine*", au cours de sa réunion du 16 juin 1999, de faire réaliser une étude sur la vulnérabilité de la nappe oligocène, en particulier dans la zone affleurante à sub-affleurante de la rive gauche de la Garonne.

Au cours de la première phase de ce programme (2000), une révision de l'ensemble des données géologiques connues, tant à l'affleurement que par les nombreux sondages archivés dans la Banque des Données du Sous-Sol du BRGM Aquitaine a été réalisée. Elle a permis d'obtenir une vision modernisée de la géométrie des formations aquifères oligocènes et une meilleure connaissance de leurs rapports avec les épontes inférieure et supérieure du système.

L'objectif de la deuxième phase du programme (2001) est de poursuivre l'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur la nappe de l'Oligocène en région bordelaise, notamment sur la couverture de l'aquifère, les émergences et les relations nappes - rivières, **en vue de la réalisation d'une carte de vulnérabilité de la nappe oligocène à la pollution**. Cette carte constituera un

document d'aide à la décision indispensable en matière de gestion des ressources en eau et d'aménagement du territoire.

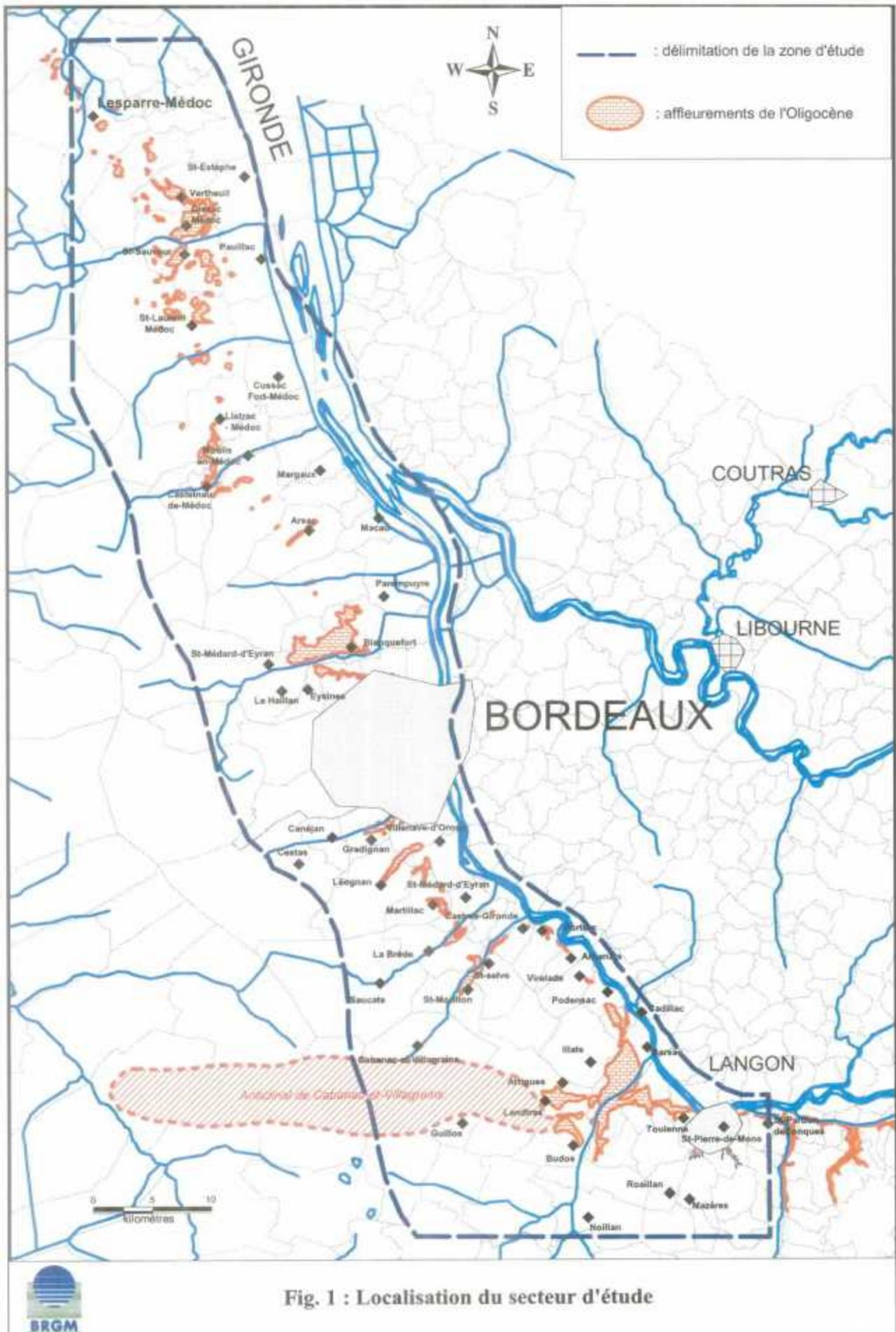
1.2. LOCALISATION

Les calcaires aquifères de l'Oligocène s'étendent largement dans le département de la Gironde. Ils forment notamment l'ossature de tout l'Entre-deux-Mers et des régions du Bourgeais et de St-Emilion. En rive gauche de la Garonne, ils affleurent de façon très localisée dans les thalwegs des principaux affluents et en bordure du fleuve. De ce fait, la nappe est libre dans ces zones. Elle est donc particulièrement vulnérable.

Le secteur étudié est situé en rive gauche de la Garonne et de l'Estuaire centré autour de la région bordelaise (**Fig. 1**). Il s'étend sur 100 km de long, depuis les environs de Lesparre au Nord jusqu'à l'Est de Langon. Vers l'Ouest, il est délimité par les communes de Lesparre, St-Laurent-de-Médoc, Lustrac, Castelnau, Salaunes, Martignas, Pessac, Cestas, Saucats, Cabanac-et-Villagrains et Noaillan, soit sur une largeur variant entre 12 et 30 km. Le choix de ce secteur a été conditionné par les considérations suivantes :

- L'existence de nombreux cours d'eau affluents de la Garonne qui présentent des eaux de plus ou moins bonne qualité, pouvant être localement en communication hydraulique avec les nappes sous-jacentes, notamment celle de l'Oligocène.
- Dans le périmètre compris entre St-Médard-en-Jalles et Blanquefort au Nord, St-Jean-d'Illac et Pessac à l'Ouest et Budos au Sud, les densités les plus fortes de forages et de sources captant la nappe de l'Oligocène sont recensées, en particulier pour l'AEP, mais aussi pour l'industrie et l'irrigation.
- Des pollutions ont été détectées lors des contrôles sanitaires de la DDASS dans certains captages A.E.P.

Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine - Année 5
Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise
Phase 2



2. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Le développement des paragraphes suivants s'appuie sur Zaporozec (1994).

L'élan pour le développement du concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été généré par l'émergence dans le monde entier des problèmes de pollution des eaux souterraines. A la recherche d'outils permettant de résoudre la pollution des eaux souterraines, le concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit à la fin des années 1960. Le concept original a été appelé "vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution" (Margat, 1968). Depuis, la vulnérabilité a été généralement utilisée uniquement en relation avec la pollution. Cependant, le concept de vulnérabilité des eaux souterraines n'est pas seulement relatif aux aspects de contamination ou de qualité des eaux ; il peut également inclure des aspects quantitatifs.

2.1. NOTION DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

2.1.1. Protection naturelle des eaux souterraines

Le concept originel de vulnérabilité des eaux souterraines repose sur la supposition que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis à vis de pollutions entrant par la subsurface. Les matériaux terrestres peuvent agir comme des filtres naturels et limiter ainsi le transfert de polluants vers les eaux souterraines. L'eau qui s'infiltré à la surface de la terre peut être contaminée mais est naturellement purifiée jusqu'à un certain degré en percolant à travers le sol et d'autres matériaux à grains fins de la zone non saturée (Fig. 2).

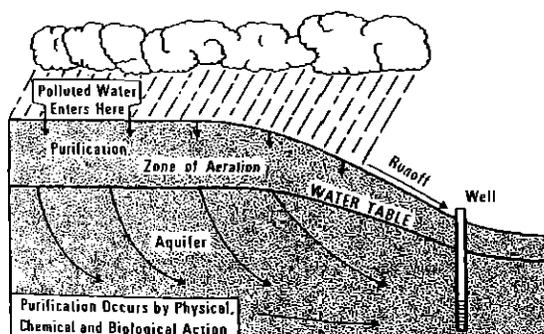


Fig. 2 : Purification naturelle de l'eau contaminée (Zaporozec, 1994)

Le degré d'atténuation se produisant entre la source polluante et l'aquifère détermine le potentiel relatif de pollution des eaux souterraines. La capacité d'atténuation ou "capacité de purification" des matériaux de subsurface résulte de l'interaction de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques dans le système sol-roche-aquifère. Cette capacité d'atténuation est significativement affectée par les mécanismes de transport de solutés et par les conditions hydrogéologiques (Golwer, 1983).

Le potentiel de protection naturelle est limité et extrêmement variable. Différentes parties du milieu physique ont des capacités d'atténuation des polluants variables. La cartographie de la vulnérabilité ou de la sensibilité du milieu physique permet d'identifier les zones qui sont plus (et moins) sensibles à la pollution du fait des caractéristiques des matériaux surmontant les nappes.

2.1.2. Historique du concept et définitions

a) Généralités

Bien que le concept de vulnérabilité des eaux souterraines existe depuis plus de trente ans, une définition reconnue et acceptée par tous n'a pas encore été développée.

Une des premières définitions trouvées dans la littérature est celle d'**Albinet et Margat (1970)** qui proposent que **"la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusion de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles"**.

Olmer et Rezác (1974) suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et indépendantes des sources de pollution actuelles". Leur point de vue est que la vulnérabilité dépend dans la zone non saturée de la perméabilité verticale et, dans l'aquifère, du gradient hydraulique et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

En 1981, Vrána (1984) définit la vulnérabilité des eaux souterraines comme "le complexe des conditions naturelles de la surface et de la subsurface influençant le mouvement d'un polluant vers l'aquifère".

Villumsen *et al.* (1983) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le risque qu'a une substance chimique, utilisée ou entreposée sur ou près de la surface du sol, d'influencer la qualité des eaux souterraines". Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres, aussi bien dynamiques que statiques. Ils insistent sur le fait que la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et ils recommandent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées comme vérification préliminaire des cartes de vulnérabilité.

Sotorníková et Vrba (1987) comprennent la vulnérabilité d'un système hydrogéologique comme "l'aptitude de ce système à faire face à des impacts extérieurs, aussi bien

naturels qu'anthropogéniques, qui affectent son état et ses caractéristiques dans le temps et dans l'espace".

Civita définit le degré de vulnérabilité intrinsèque comme la possibilité d'infiltration et de percolation de contaminants à travers la zone non saturée (Benacchio *et al.*, 1988).

Vrba (1991) introduit l'échelle de temps dans la définition de la vulnérabilité. Il propose que "la vulnérabilité à l'échelle du temps humain soit une propriété intrinsèque naturelle invariante des parties non saturée et saturée du système aquifère et qui dépend de la capacité ou de l'incapacité de ce système à faire face à des processus naturels et des impacts humains.

Le concept de vulnérabilité lié aux caractéristiques du milieu physique, ou vulnérabilité intrinsèque, a progressivement évolué à partir des années 1980 avec la prise en compte (Landreau, 1996) :

- **des sources de pollution** susceptibles de détériorer la qualité de l'eau, **c'est-à-dire du risque de pollution** placé sur l'aquifère par les activités humaines.
- **de la nature des polluants** susceptibles de migrer vers la nappe. Les connaissances scientifiques sur le comportement des polluants dans le milieu naturel ayant évolués ces dernières années, certains auteurs préconisent la prise en compte de leur nature pour mieux apprécier les potentialités de migration de ces polluants dans le sol et le sous-sol au regard des caractéristiques de ces derniers. **Ce type de vulnérabilité est appelé vulnérabilité spécifique.**

b) Notion de vulnérabilité et notion de risque

La notion de "vulnérabilité à la pollution" est souvent proche d'une autre notion, celle de "risque de pollution". **La vulnérabilité est un élément de l'évaluation du risque de pollution.** Une analyse des risques comporte l'étude ou la caractérisation de trois facteurs majeurs : la source de pollution, le vecteur (transfert) de pollution, la cible (Lallemand-Barrès, 1994).

Pour chacun de ces facteurs, les critères déterminants sont recensés. Par exemple, pour le facteur "source", il est tenu compte du type de polluant, de sa toxicité, de sa concentration et de son volume et de la façon dont il est protégé ou stocké. Ce terme n'est en aucun cas lié à la "vulnérabilité" de la nappe.

Le vecteur de la pollution peut être l'air, l'eau de surface, le sol ou l'eau souterraine. Dans la notion de vulnérabilité à la pollution, de nombreux auteurs (Albinet, 1970 ; Margat et Monition, 1970 ; Suais, 1990 ; Pernel, 1992 ; Barrocu et Biallo, 1993) ajoutent à la propagation du polluant dans le sol et la zone non saturée la propagation du polluant dans la zone saturée ou nappe. Or, en toute rigueur, la propagation de la pollution dans la nappe n'est pas à prendre en compte dans l'appréciation de la vulnérabilité de la nappe ; il s'agit déjà d'un élément de l'analyse du risque de pollution de la nappe ou plutôt des captages prélevant l'eau dans cette nappe, en aval de la source de pollution.

La cible peut être par exemple une zone faunistique, un lac, un captage AEP ou la population desservie. Ce peut être aussi la nappe d'eau souterraine, auquel cas le vecteur est le sol et la zone non saturée. Le "risque" est principalement lié à la valeur de la cible : si par exemple la cible est une nappe non exploitable du fait de sa mauvaise productivité ou qualité, ou si la nappe n'est pas exploitée, le risque peut être considéré comme faible par une méthode d'évaluation du risque (sous-entendu risque pour la santé humaine). Par contre, la "vulnérabilité" de cette même nappe est un facteur qui ne varie pas : c'est le degré d'accessibilité à la nappe, qui ne dépend que de paramètres physico-chimiques.

La différenciation entre les études de vulnérabilités et les évaluations de risques, les cartes de vulnérabilité et les cartes de risques de pollution est néanmoins faite par certains auteurs plus familiarisés avec les notions plus récentes d'évaluation des risques, notamment Ricour (1988, 1991) et Blanchard (1993) qui distinguent la **vulnérabilité "immuable"** et le **risque "évolutif"**. La démarche utilisée dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux de la nappe de Beauce (Braux, 1996) constitue un excellent exemple d'application de ces notions (Fig. 3).

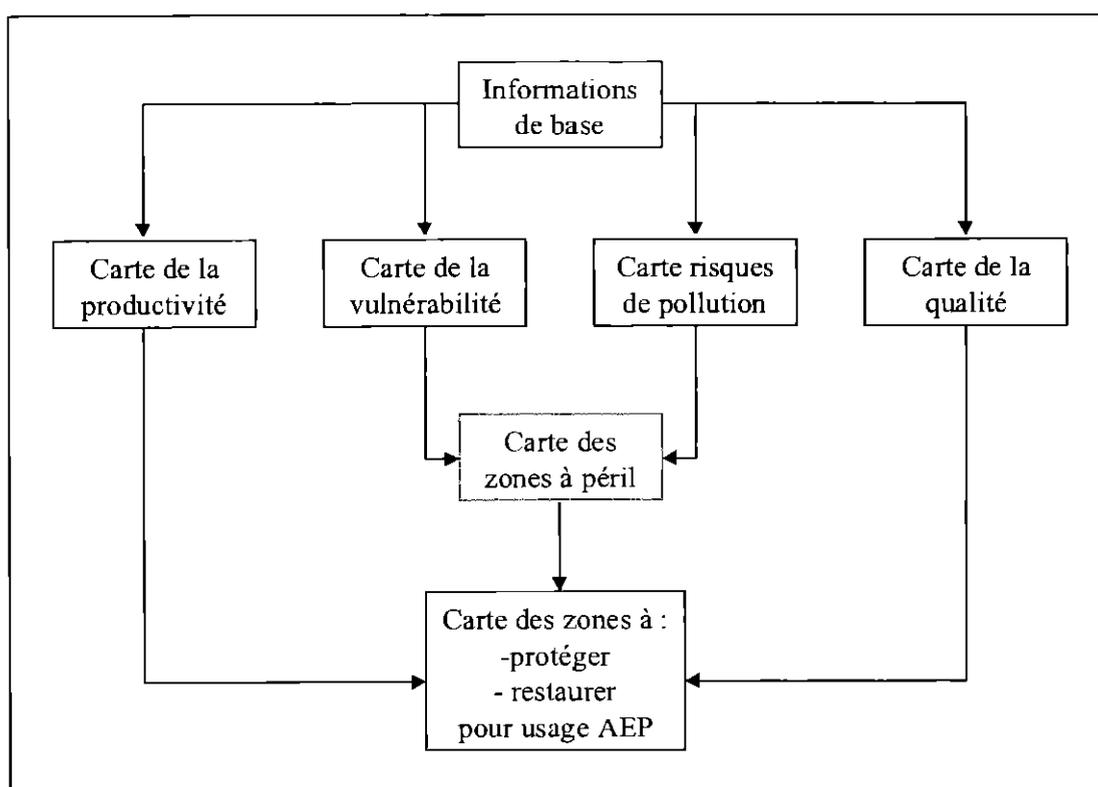


Fig. 3 : Démarche utilisée dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux de la nappe de Beauce (Braux, 1996)

c) Vulnérabilité intrinsèque et vulnérabilité spécifique

En 1993, le Comité des techniques pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines du National Research Council (US) différenciait deux principaux types de vulnérabilité :

- la vulnérabilité spécifique, qui se réfère à un polluant, une classe de polluant ou une activité humaine spécifique ;
- la vulnérabilité intrinsèque, qui ne prend pas en considération les caractéristiques et le comportement de polluants spécifiques.

Zaporozec et Vrba (1994a) distinguent également la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique. La vulnérabilité intrinsèque (ou naturelle) est définie uniquement en fonction des facteurs hydrogéologique - les caractéristiques de l'aquifère, des matériaux géologiques et du sol sus-jacent. En plus des propriétés intrinsèques du système aquifère, certains utilisateurs des cartes de vulnérabilité souhaitent également inclure les impacts potentiels liés à l'activité humaine, qui peut conduire à une dégradation - dans le temps et dans l'espace – des utilisations présentes et futures de la ressource en eau souterraine. Pour ce concept, Zaporozec et Vrba utilisent le terme de vulnérabilité spécifique (ou intégrée).

Dernièrement, dans le cadre d'un projet européen, l'action COST 620 au sein du Working Group 0, a proposé les définitions suivantes :

- **la vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines**
- **la vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.**

2.2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

2.2.1. Objet des cartes de vulnérabilité

Les premiers concepts et la méthodologie des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines ont été développés en Europe dans le milieu des années 1960 (Zaporozec and Vrba, 1994b). **Il s'agissait de montrer que la protection naturelle des nappes est variable suivant la localisation et d'identifier les aires pour lesquelles des mesures de protection devaient être envisagées.**

A la fin des années 1960 et dans les années 1970, des cartes de vulnérabilité ont été initiées dans plusieurs pays européens (premièrement en France, Tchécoslovaquie et

Allemagne) et aux USA. Ces premières cartes étaient souvent réalisées à une petite échelle et couvraient l'ensemble du territoire ou de vastes régions. La carte au 1/1 000 000 de la France réalisée à cette période était basée sur le principe simple que des variables stables ou non caractérisant les conditions hydrogéologiques, telles que la profondeur moyenne du niveau de la nappe, la perméabilité des sols de couverture, la connexion entre aquifère et eaux de surface et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, sont des facteurs importants de la vulnérabilité des nappes à la pollution.

La dernière phase dans le développement des cartes de vulnérabilité a été caractérisée par le passage à des cartes de vulnérabilité à moyenne et grande échelles, couvrant des unités de territoire plus petites. Depuis le début des années 1980, un nombre considérable de cartes de vulnérabilité a été publié, exprimant la plupart du temps la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

2.2.2. Objectifs des cartes de vulnérabilité et échelles de représentation

Les documents cartographiques produits depuis près de trois décennies montrent que les objectifs des cartes de vulnérabilité peuvent être généraux ou, au contraire, beaucoup plus précis et que l'expression cartographique de ces objectifs s'exprime sous des échelles différentes (Landreau, 1996). Il peut s'agir (Fig. 4) :

- **D'une sensibilisation ou d'une "éducation" à la protection des ressources en eau souterraine.** Les documents cartographiques correspondant sont généralement à petite échelle et la communication est privilégiée par rapport au contenu technique de la carte.
- **D'une orientation de politique générale pour la gestion de la qualité des ressources ou pour la police des eaux.** S'agissant d'apporter des éléments d'orientation, le contenu de la carte peut être plus riche que pour l'objectif précédent mais avec une échelle de représentation du même ordre.
- **D'une aide à la décision en matière d'aménagement.** Par aide à la décision, il faut entendre "document permettant d'orienter la décision" lorsqu'on est au stade de l'élaboration de scénarios possibles d'aménagement. Des démarches de planification peuvent être adjointes à l'aide à la décision. Cela peut être, par exemple, le choix de zones à priori favorables ou défavorables à l'implantation de stockage de déchets. Le choix de l'implantation définitive ne se fait bien évidemment pas sur la base de ce document mais suite à des études complémentaires plus détaillées. La carte de vulnérabilité, en association le plus souvent avec d'autres documents, sert à préciser les secteurs dans lesquels doivent porter des études complémentaires pour implanter l'aménagement prévu au mieux et en toute connaissance de cause.
- **D'un outil pour l'aménagement ou pour la protection des ressources en eau et des captages.** Ce document, associé également à d'autres, doit permettre de prendre une décision "définitive". Cela nécessite que le document ait une précision suffisante, adaptée aux enjeux des décisions à prendre.

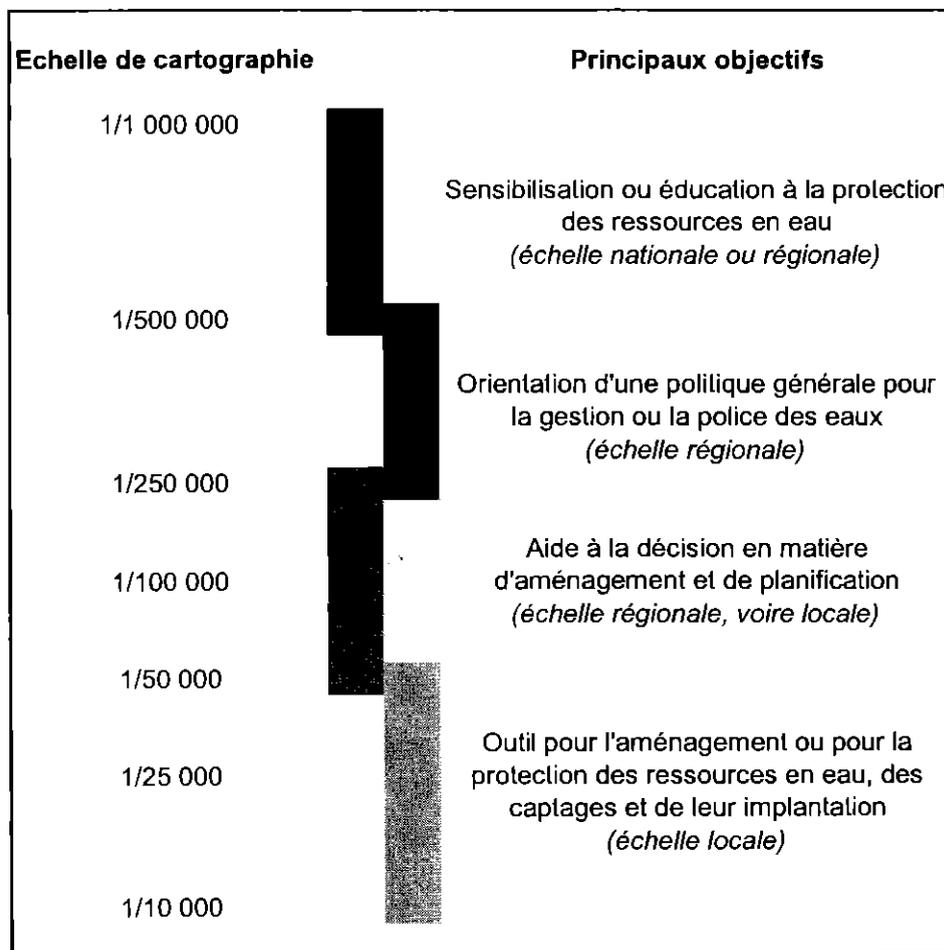


Fig. 4 : Correspondance entre les échelles de cartographie des cartes de vulnérabilité et les objectifs poursuivis (Landreau, 1996)

Au fur et à mesure que les objectifs sont plus précis, les critères pris en compte pour la cartographie deviennent plus détaillés, pour arriver parfois à une cartographie de la vulnérabilité non pas intrinsèque mais spécifiques à quelques polluants, par exemple aux produits phytosanitaires. Cela peut nécessiter, dans certains cas, d'entreprendre des campagnes spécifiques d'acquisition de données complémentaires.

L'échelle des cartes de vulnérabilité contrôle donc le contenu de la carte. Elle peut être choisie en fonction de l'objectif des cartes, des caractéristiques et de la complexité des conditions hydrogéologiques, et de la précision requise pour résoudre le problème posé.

2.3. DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

Les paragraphes suivants sont basés sur Vrba et Civita (1994).

La vulnérabilité des eaux souterraines est une propriété relative, non-mesurable et sans dimension. La précision de sa détermination dépend à la fois de la quantité et de la qualité de données représentatives et fiables. La sélection des méthodes de détermination et des données requises est liée à l'objectif de la détermination et aux critères donnés par l'utilisateur. La vulnérabilité est, la plupart du temps, déterminée en fonction de la qualité de l'eau et la détermination est réalisée sur l'aquifère le plus superficiel. La détermination de la vulnérabilité pour les aquifères profonds est moins fréquente.

2.3.1. Détermination de la vulnérabilité intrinsèque

Les cartes de vulnérabilité ne peuvent pas être produites sans prendre en considération les facteurs individuels qui déterminent l'homogénéité (ou l'hétérogénéité) de la zone d'étude et leur capacité d'atténuation des polluants. La vulnérabilité intrinsèque (naturelle) est basée sur la détermination de critères ou facteurs naturels variés comme les sols, la zone non saturée, les propriétés de l'aquifère, le taux de recharge, qui entrent dans la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les critères les plus répandus et leurs paramètres sont listés dans les Tabl. 1 et Tabl. 2.

a) Critères essentielles

Les principaux critères de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines incluent la recharge, les propriétés du sol, les caractéristiques de la zone non saturée et de la zone saturée (Tabl. 1).

- **La recharge** correspond ici à la quantité d'eau traversant la zone non saturée et arrivant à l'aquifère pendant une période de temps spécifique. La recharge est généralement exprimée en recharge annuelle nette. La quantité et la qualité de la recharge affectent de façon significative les processus physiques et chimiques dans le système sol-roche-eau souterraine.
- **La couche supérieure**, non consolidée, de la croûte géologique est souvent considérée comme l'un des principaux facteurs naturels dans la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les principaux paramètres pédologiques liés à la vulnérabilité incluent la texture, la structure, l'épaisseur et la teneur en matière organique et en argile. D'autres paramètres, tels que la teneur en eau, doivent être évalués lorsqu'ils sont disponibles. Le sol a une importante fonction d'atténuation (Zaporozec, 1985) et est un critère critique dans la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution diffuse (fertilisants, produits phytosanitaires, dépôts acides).

Tabl. 1 : Critères intrinsèques et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines, et leurs paramètres (Vrba et Civita, 1994)

<i>Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)</i>				
<i>Critères essentiels</i>				
<i>Paramètres</i>	<i>Sol</i>	<i>Zone non saturée</i>	<i>Aquifère (zone saturée)</i>	<i>Recharge</i>
<i>Principaux</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Texture - Structure - Epaisseur - Taux de matière organique - Teneur en argile - Perméabilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur (par rapport au niveau piézométrique) - Lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) - Temps de transfert de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) - Epaisseur - Porosité efficace - Perméabilité - Sens d'écoulement des eaux souterraines - Temps de résidence et âge des eaux souterraines 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de recharge annuelle nette - Précipitations annuelles
<i>Complémentaires</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'échange cationique - Capacité de réduction et de sorption - Carbonate - *Densité apparente - *Humidité capacité au champ - *Prélèvement d'eau par les racines - *Réaction de transfert d'azote 	<ul style="list-style-type: none"> - Teneurs en eau - Perméabilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Inaccessibilité hydraulique - Capacité d'emmagasinement - Transmissivité 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaporation - Evapotranspiration - Température de l'air

*Déterminé le plus souvent que dans l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution diffuse d'origine agricole

Tabl. 2 : Critères intrinsèques et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines, et leurs paramètres (suite)(Vrba et Civita, 1994)

	<i>Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)</i>			<i>Vulnérabilité spécifique</i>
	<i>Critères secondaires</i>			
<i>Paramètres</i>	<i>Topographie</i>	<i>Unité géologique recouvrant l'aquifère</i>	<i>Relation avec les eaux de surface et les eaux de mer</i>	
<i>Principaux</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Variabilité de la pente de la surface du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Perméabilité - Structure et tectonique - Potentiel de recharge/décharge 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes/apports par les cours d'eau - Evaluation du potentiel d'infiltration - Interface eau de mer/eau douce dans les régions côtières 	<ul style="list-style-type: none"> - Occupation des terres : naturelle : forêts, terres non-agricoles, humaine : terres agricoles, terres occupées par des activités industrielles, rurales ou des installations urbaines - Densité de la population - Temps de transfert des polluants dans la zone non saturée - Capacité d'atténuation du sol, de la zone non saturée et de l'aquifère en relation avec des polluants spécifiques
<i>Complémentaires</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Couverture végétale 	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le cas d'un aquifère captif, application des mêmes paramètres à l'unité recouvrant l'aquifère 		<ul style="list-style-type: none"> - Temps de résidence des polluants dans l'aquifère - Caractéristiques du transport des contaminants – valeurs du coefficient de distribution (Kd), persistance (demi-vie) - Recharge artificielle - Irrigation - Drainage

Le sol a une position spécifique par rapport aux critères de vulnérabilité des eaux souterraines car il est lui-même vulnérable. La fonction du sol comme filtre protecteur naturel dans le déphasage et l'atténuation des contaminants peut être assez facilement endommagée, avec des conséquences négatives sur la qualité des eaux souterraines.

- **La zone non saturée** joue un rôle très important dans la protection des eaux souterraines, notamment dans les régions hautes et montagneuses et dans les zones où le profil de sol est peu développé. Les caractéristiques de la zone non saturée et sa capacité d'atténuation potentielle déterminent alors de façon décisive le degré de vulnérabilité des eaux souterraines. Si cette zone est constituée de roches peu perméables, ceci crée une couche imperméable pour l'aquifère sous-jacent et réduit significativement sa vulnérabilité.

Les principaux paramètres inclus dans la détermination sont l'épaisseur, la lithologie et la perméabilité verticale. L'épaisseur de la zone non saturée dépend de la position du niveau piézométrique, qui fluctue fréquemment. Les paramètres complémentaires peuvent intégrer la teneur en eau de la partie supérieure de la zone non saturée.

- **La zone saturée** n'est pas une unité homogène mais un système hétérogène. Sa vulnérabilité varie dans l'espace et avec la profondeur. La vulnérabilité de l'aquifère doit être différenciée horizontalement (zone de recharge et de vidange), verticalement (zones d'oxydation, de réduction et intermédiaires) et conformément au système d'écoulement souterrain existant, d'extension géographique (locale ou régionale) ou de profondeurs variées (superficielle ou profond). La définition des conditions de nappe libre, semi-captive et captive est très importante et doit toujours être considérée dans la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines.

Les principaux paramètres pour la détermination de la vulnérabilité des aquifères comprennent la nature de l'aquifère et sa géométrie, la porosité, la perméabilité, les propriétés d'emmagasinement, la transmissivité et le sens d'écoulement des eaux souterraines.

b) Critères complémentaires

Les critères naturels d'importance secondaire incluent (Tabl. 2) : la topographie, l'eau de surface et la nature de l'unité recouvrant l'aquifère. Leur importance dans la détermination de la vulnérabilité varie selon les régions. Un critère important est la topographie, qui influence la recharge, le développement du sol, la vitesse et l'écoulement des eaux souterraines.

2.3.2. Détermination de la vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique des systèmes aquifères est généralement déterminée en terme de risque du système à être exposé à la venue d'un contaminant. En comparaison avec la détermination de la vulnérabilité intrinsèque, qui est le plus souvent basée sur des paramètres intrinsèques statiques du système sol-roche-eau souterraine, des

paramètres dynamiques et variables sont inclus dans la détermination de la vulnérabilité intrinsèque (Tabl. 2). Le temps de transfert du contaminant dans la zone non saturée et son temps de résidence dans l'aquifère sont fréquemment introduits. Le paramètre essentiel dans la détermination de la vulnérabilité spécifique des eaux souterraines est la capacité d'atténuation du sol, de la zone non saturée et de l'aquifère, en fonction des propriétés des contaminants spécifiques.

Les principaux critères impliqués dans la détermination de la vulnérabilité spécifique comprennent : l'utilisation des terres (impact humain) et la densité de population. Il existe une différence fondamentale entre les régions soumises à une activité humaine (agriculture, industrie, urbanisme, dépôts acides) et les régions dominées par des paysages naturels (forêts, terres non cultivées, régions montagneuse non peuplée).

2.3.3. Méthodes et techniques de détermination de la vulnérabilité

a) Généralités

Le développement des paragraphes suivants s'appuie sur Petelet-Giraud *et al.*, 2000.

Un grand nombre de méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées un peu partout dans le monde suivant des approches très diverses. Ces méthodes vont des plus sophistiquées comme les modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques ou encore biologiques qui ont lieu dans la zone non saturée et les eaux souterraines, à des modèles de pondération des différents critères qui affectent la vulnérabilité au moyen de méthodes statistiques ou de systèmes experts (Gogu et Dassargues, 1998 et 2000). Les méthodes de détermination de la vulnérabilité peuvent être classées en trois grandes catégories :

- **Les méthodes de cartographie à index** : elles sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (sol, géologie, profondeur de la nappe, etc...), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. Dans les premières méthodes tous les paramètres avaient le même poids ; leur importance relative vis à vis de la vulnérabilité n'était donc pas prise en compte. Ces méthodes se veulent plus quantitatives.
- **Les modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant les processus couplés qui régissent les transports de contaminants. Cette catégorie comprend les méthodes basées sur les modèles simples de transport ainsi que les solutions analytiques ou numériques pour des modèles en une dimension de transport de contaminants à travers la zone non saturée, ou encore des modèles couplés saturé-insaturé, multiphase, à deux ou trois dimensions.
- **Les méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et

fournissent des caractérisations sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude.

Les deux dernières méthodes (modèles de simulation et méthodes statistiques) conduisent à des cartes de pollution qui sont plutôt utilisées dans le cadre de la vulnérabilité spécifique. Les méthodes de cartographie à index sont le plus couramment utilisées. Dans le paragraphe suivant, nous aborderons les grandes méthodes appartenant à cette catégorie.

b) Méthodes de cartographie à index

Deux types d'approches peuvent être distingués (Vrba et Zaporozec, 1994 ; Gogu et Dassargues, 1998) : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés.

Systèmes hiérarchisés ou Hydrological Complex Methods (HCS)

Cette méthode est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autre systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale à nationale).

Systèmes paramétrés

Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes (Vrba et Zaporozec, 1994) :

- *les systèmes matriciels (MS : Matrix System) ;*
- *les systèmes indexés (RS : Rating System) ;*
- *les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM : Point Count System Models).*

Pour chacune de ces méthodes, la procédure est globalement la même, c'est à dire la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination.

➤ *Systèmes matriciels*

Ces méthodes utilisent au moins deux critères subdivisés en un certain nombre d'intervalles. Les deux critères et leurs intervalles sont les deux composants X_n et Y_m d'une matrice $n \times m$ (n étant le nombre de paramètres de X et m celui de Y). La combinaison de X_n et Y_m donne des degrés de vulnérabilité relatifs (d'extrême à faible en passant par fort et moyen, par exemple). Ces méthodes se basent sur un petit nombre de paramètres soigneusement sélectionnés, et sont principalement utilisées dans des études à petite échelle (Adams et Foster, 1992).

➤ *Systèmes indexés*

Une gamme de variation naturelle est définie pour chaque critère sélectionné. Cette gamme est divisée en intervalles hiérarchisés. A chaque intervalle est affecté un index reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les index de chaque intervalle d'un critère sont additionnés pour aboutir à la valeur numérique finale. Celle-ci est divisée en segments qui expriment chacun un degré de vulnérabilité relatif. Plusieurs méthodes se basent sur ce principe : le système GOD (Foster, 1987), la méthode AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1992) ou encore la méthode ISIS (De Regibus, 1994).

➤ *Méthodes de pondération et d'indexation des paramètres*

Cette méthode diffère de la précédente car elle intègre, en plus des index au sein d'un même critère, un système de pondération (coefficient multiplicateur) entre les différents critères, qui traduit l'importance relative de chacun des critères pris en compte. Les index de chaque intervalle d'un critère sont multipliés par le poids attribué au critère. Les produits ainsi obtenus sont ensuite additionnés pour arriver à la valeur finale. Plus la valeur finale est élevée ou faible (selon le sens du système de pondération et d'indexation) plus la vulnérabilité de la zone est grande. Enfin, la valeur finale est divisée en différentes classes qui expriment un degré de vulnérabilité relatif. Cette dernière étape constitue l'une des difficultés de la méthode.

c) Description des principales méthodes de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM)

L'une des premières méthodes PCSM est la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) développée pour l'US Environmental Protection Agency (EPA). On peut également citer la méthode SINTACS (Civita, 1990) et la méthode EPIK (Doerfliger, 1996). Cette dernière a été développée spécialement pour la protection des milieux karstiques.

La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères.

Critères pris en compte

- **D** : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- **R** : Recharge (recharge) ;
- **A** : Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- **S** : Soil media (nature du sol) ;
- **T** : Topographie (topographie, pente en %) ;
- **I** : Impact of the vadose zone (nature de la zone non-saturée) ;
- **C** : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un **index, appelé aussi note** (n), allant typiquement de 1 à 10. Un **facteur de pondération** (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$\text{Index } D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où **D, R, A, S, T, I, C**, sont les paramètres cités plus haut
 n : notation accordée à chaque paramètre
 p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Système de notation ou d'indexation

Dans le tableau ci-dessous sont présentées les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

Tabl. 3 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (Lallemand-Barrès, 1994)

D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE		R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 – 1,5	10	> 25,5	9
1,5 – 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 – 9	7	10 - 17,5	6
9 – 15	5	5 - 10	3
15 – 22	3	0 - 5	1
22,5 – 30	2		
> 30	1		
A : NATURE DE LA ZONE SATUREE		S : NATURE DU SOL	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégée et non fissurée	1

T : TOPOGRAPHIE, PENTES		I : NATURE DE LA ZONE NON SATUREE	
Valeurs en % de pente	Notation		
0 – 2	10	Calcaire karstique	10
2 – 6	9	Basalte	9
6 – 12	5	Sable et gravier	8
12 – 18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
>18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Sil/Argile	1
C : PERMEABILITE			
		$> 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	10
		$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	8
		$32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-4}$ m/s	6
		$14,7 \cdot 10^{-5} - 32,9 \cdot 10^{-5}$ m/s	4
		$4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	2
		$4,7 \cdot 10^{-7} - 4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	1

Système de pondération

La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol (**Tabl. 4**): occupation "normale" ou avec occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

Tabl. 4 : Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC

CRITERES	FACTEURS DE PONDERATION	
	"NORMAL"	"PRODUITS PHYTO"
D : Profondeur	5	5
R : Recharge	4	4
A : Milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : Nature de la zone non saturée	5	4
C : Perméabilité aquifère	3	2

La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi *et al.*, 1999).

La méthode SINTACS

La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet *et al.*, 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- **S** : Soggiacenza (profondeur à la nappe) ;
- **I** : Infiltrazione (infiltration) ;
- **N** : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ;
- **T** : Tipologia della Copertura (sol) ;
- **A** : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère) ;
- **C** : Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- **S** : Acclività della Superficie Topografica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum P_{(1,7)} W_{(1,n)} \quad \text{avec : } P_{(1,7)} : \text{index des critères 1 à 7}$$
$$W_{(1,n)} : \text{poids de chaque classe (varie de 1 à n)}$$

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentages puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept même paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

La méthode EPIK

La méthode EPIK a été développée spécifiquement pour évaluer la vulnérabilité des aquifères karstiques en Suisse, dans le but de délimiter des périmètres de protection à partir d'une carte de vulnérabilité (Doerfliger, 1997 et 1998). Cette méthode permet de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminants.

Critères pris en compte

La méthode EPIK prend en compte quatre critères qui correspondent à des aspects spécifiques de l'organisation des écoulements en milieu karstique :

- **E** : Epikarst ;
- **P** : Protective Cover (couverture protectrice : sol) ;
- **I** : Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ;
- **K** : Karst network development (développement de la karstification).

Chaque critère est divisé en classes qui traduisent des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un facteur de pondération est appliqué à chaque critère afin de traduire l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres. Sur cette base l'indice final de vulnérabilité (ou facteur de protection) est calculé selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad \text{avec : } \alpha, \beta, \gamma, \delta : \text{ facteurs de pondération de chacun des critères}$$

E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés

Système de notation ou d'indexation

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des critères indexés de la méthode EPIK, la valeur la plus basse correspondant à la situation la plus vulnérable :

Tabl. 5 : Valeurs des critères indexés de la méthode EPIK

Epikarst			Protective cover				Infiltration conditions				Karst development		
E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	K ₁	K ₂	K ₃
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Système de pondération

Le tableau récapitule les facteurs de pondération appliqués aux critères de la méthode EPIK. Le facteur le plus important est appliqué au critère qui contribue le plus à la protection du milieu physique:

Tabl. 6 : Facteurs de pondération de la méthode EPIK

Critère	E	P	I	K
Facteur de pondération	α	β	γ	δ
Poids relatif	3	1	3	2

Le facteur de protection F est calculé en tout point du bassin d'alimentation. Plus la valeur du facteur F est élevée, plus le pouvoir de protection est important. Les valeurs de F sont comprises entre 9 et 34. Elles sont regroupées en quatre classes de vulnérabilité :

- S1 : vulnérabilité très élevée ou faible protection (F entre 9 et 19) ;
- S2 : vulnérabilité élevée (F entre 20 et 25) ;
- S3 : vulnérabilité moyenne (F entre 26 et 34) ;
- S4 : vulnérabilité faible quand $F > 25$, avec des critères tels qu'un sol de faible perméabilité d'une épaisseur supérieure à 8m combiné à des localisations en bas de pente jouant le rôle de collecteur des eaux.

d) Limites des méthodes de pondération et d'indexation

Des critiques sont souvent émises concernant les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Par exemple, une des limites de la méthode DRASTIC serait le trop grand nombre de critères (7) pris en compte, ce qui implique que

l'influence d'un paramètre particulièrement important pour une certaine thématique peut être "masqué" par les autres paramètres pris en compte. De plus, on peut s'étonner du faible poids accordée au sol et à la topographie et de la prise en compte de critères relatifs à la nappe tels que la perméabilité et la nature de la zone saturée.

La difficulté dans l'élaboration de ces méthodes réside essentiellement dans le choix des critères, leur notation, et le poids qu'on leur attribue. Il est difficile d'établir une méthode universelle de cartographie multicritère car chaque cas d'étude est particulier et un paramètre important dans un cas le sera peut-être beaucoup moins dans un autre. **Un critère n'est pas une échelle de mesure universelle, il est propre à chaque décideur.**

En ce qui concerne le choix des critères, une analyse de sensibilité peut être utilisée afin de définir les critères de vulnérabilité les plus représentatifs (Lodwick *et al.*, 1990). Il est également possible de tester l'influence réelle de la pondération par rapport aux poids théoriques affectés à chaque critère (Napolitano et Fabbri, 1996).

D'autres méthodes existent telle que la méthode ELECTRE II. Il s'agit d'une méthode d'analyse multicritère utilisant un surclassement de synthèse par comparaison des sites deux à deux. Cette méthode permet d'aboutir à un "pré-ordre" partiel incluant la notion d'incompatibilité entre les sites (Jamen, 1995). Ainsi, des facteurs de pondération pourront être attribués aux différents paramètres pris en compte.

3. Application à la nappe de l'Oligocène en région bordelaise

3.1. CHOIX D'UNE METHODE ET DE CRITERES DE DETERMINATION DE LA VULNERABILITE AUX POLLUTIONS

Dans le cadre de l'opération sectorielle, il a été décidé de cartographier la vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise en se basant uniquement sur les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles de l'aquifère, qui peuvent être considérés comme "immuables" dans le temps. Il s'agit donc de la **vulnérabilité intrinsèque**. Cette carte pourra être complétée ultérieurement par une carte des risques de pollution engendrés par les activités humaines sur l'aquifère.

La **détermination de la vulnérabilité intrinsèque** de la nappe de l'Oligocène a été réalisée à partir de quatre critères essentiels de vulnérabilité directe (Fig. 5) : la recharge annuelle nette, la topographie (variabilité de la pente de la surface du sol), la nature de la couverture surmontant l'aquifère de l'Oligocène et l'épaisseur de cette couverture.

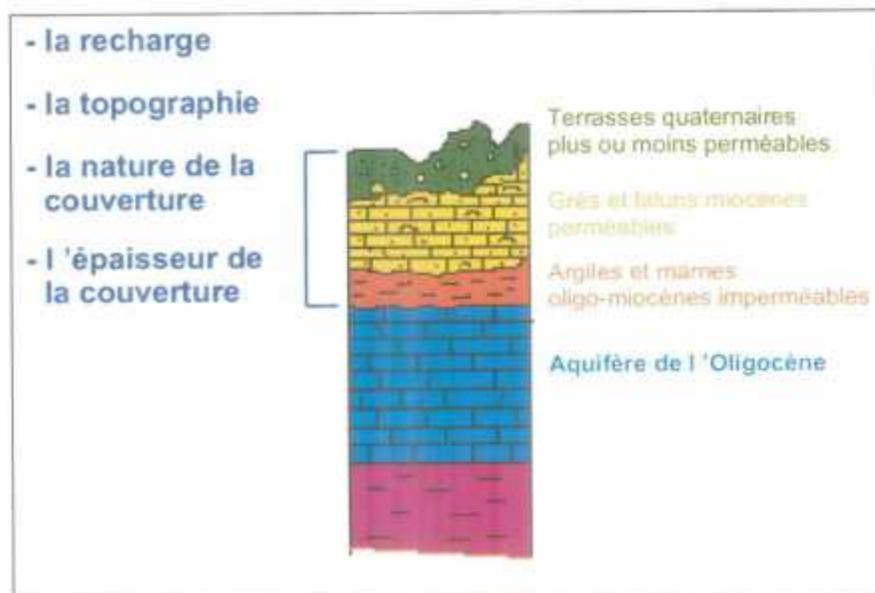


Fig. 5 : Critères naturels utilisés pour la détermination de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise.

Les critères relatifs à la zone saturée (par exemple sa nature, sa perméabilité, le sens d'écoulement des eaux souterraines,...) n'ont pas été pris en compte dans l'appréciation de la vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène car il s'agit déjà d'un élément de l'analyse du risque de pollution de la nappe ou plutôt des captages prélevant l'eau dans cette nappe, en aval de la source de pollution.

La méthode utilisée pour déterminer la vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise est une **méthode de cartographie à index**, qui permet la combinaison des cartes des différents critères retenus sur la zone d'étude. Elle s'inspire des **méthodes de pondération et d'indexation des paramètres** telles que la méthode DRASTIC, en affectant des facteurs de pondération différents selon les critères en fonction de leur importance relative vis à vis de la vulnérabilité.

3.2. AMELIORATION DES CONNAISSANCES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES EN VUE DE LA DETERMINATION DE LA VULNERABILITE

Certains critères retenus, par exemple la nature et l'épaisseur de la couverture de l'aquifère, n'étant auparavant pas connus avec suffisamment de précision sur la zone d'étude, la détermination de la vulnérabilité a nécessité préalablement une étape d'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur l'aquifère oligocène.

3.2.1. Nouvelles connaissances géologiques

En phase 1, un modèle géologique numérique a été réalisé avec le logiciel GDM sur l'ensemble du secteur étudié, à partir de données réinterprétées de plus de 500 forages (Platel *et al.*, 2000). Ce modèle a été complété par l'amélioration des connaissances géologiques en phase 2, qui a porté essentiellement sur la géologie de la couverture. Il permet de restituer, sous formes de cartes (grille maillée de 200 x 200 m), les extensions, profondeurs, épaisseurs et faciès des différentes formations constituant la couverture de l'aquifère oligocène (**Fig. 6**) :

- les formations pliocènes et quaternaires ;
- les formations aquifères du Miocène inférieur ;
- les marnes et argiles oligo-miocènes.

a) Recouvrement pliocène et quaternaire

Epaisseur

La carte tracée par l'interpolation des épaisseurs traversées dans les sondages du secteur d'étude (**Fig. 7**) rend compte des variations de puissance non négligeables du recouvrement Plio-Quaternaire.

Dans la partie Sud du secteur, les puissances des formations pliocènes et quaternaires sont comprises entre 0 et 30 mètres. Des zones à très faible épaisseur s'étendent le long de la Garonne et de ses affluents, notamment le long des vallons au Sud de Langon et de la vallée du Ciron de Budos jusqu'à Podensac.

La partie Central du secteur montre de grandes variations d'épaisseur du recouvrement Plio-Quaternaire avec :

- des zones très peu épaisses (inférieur à 5 m) dans les vallées du Gât-Mort, du Saucats, de l'Eau Blanche, de l'Eau Bourde et les zones de Pessac-Bourg, Bordeaux, Le Haillan, St-Médard-en-Jalles, Le Taillan et Blanquefort ;
- des zones à plus fortes puissances comprises entre 15 et 25 m dans les interfluves, sauf près de Martignas et St-Jean-d'Illac où les épaisseurs peuvent dépasser 35 mètres.

Dans la partie Nord du secteur d'étude, les puissances des dépôts du Pliocène et du Quaternaire sont généralement inférieures à 15 mètres. Des épaisseurs voisines de 25 m ont toutefois été rencontrées entre Salaunes et l'Ouest de Castelnau.

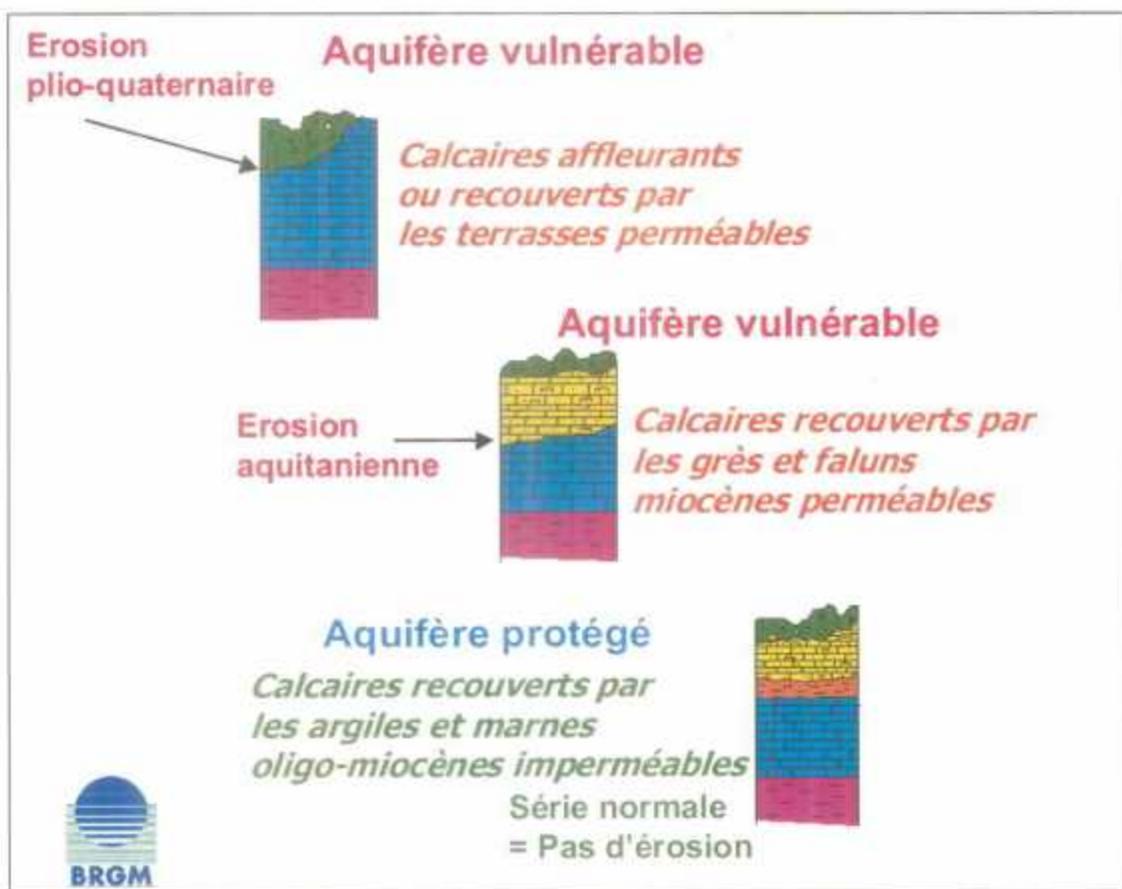


Fig. 6 : Types de recouvrement du réservoir oligocène

Nature

Le faciès prédominant sur toute l'épaisseur des formations pliocènes et quaternaire (y compris le sol) a été cartographié à partir des coupes géologiques des 500 sondages utilisés lors de l'étude. Dans un premier temps, le faciès prédominant a été représenté par forage. La carte ainsi obtenue (Fig. 8) met en évidence la forte hétérogénéité des faciès sur le secteur d'étude, rendant difficile le tracé des grands corps sédimentaires plio-quaternaires.

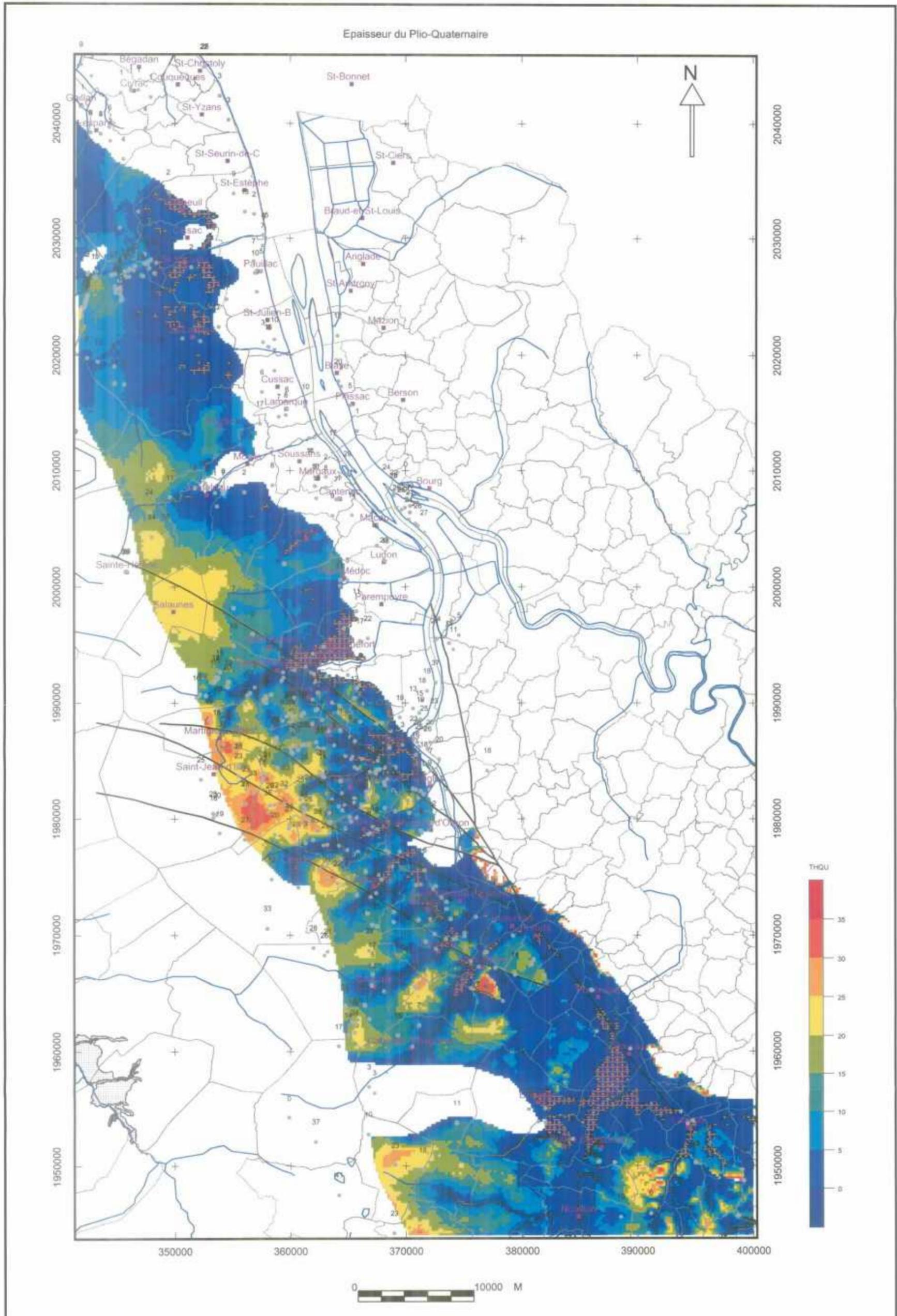


Fig. 7 : Epaisseur du recouvrement plio-quaternaire des aquifères oligocènes et miocènes



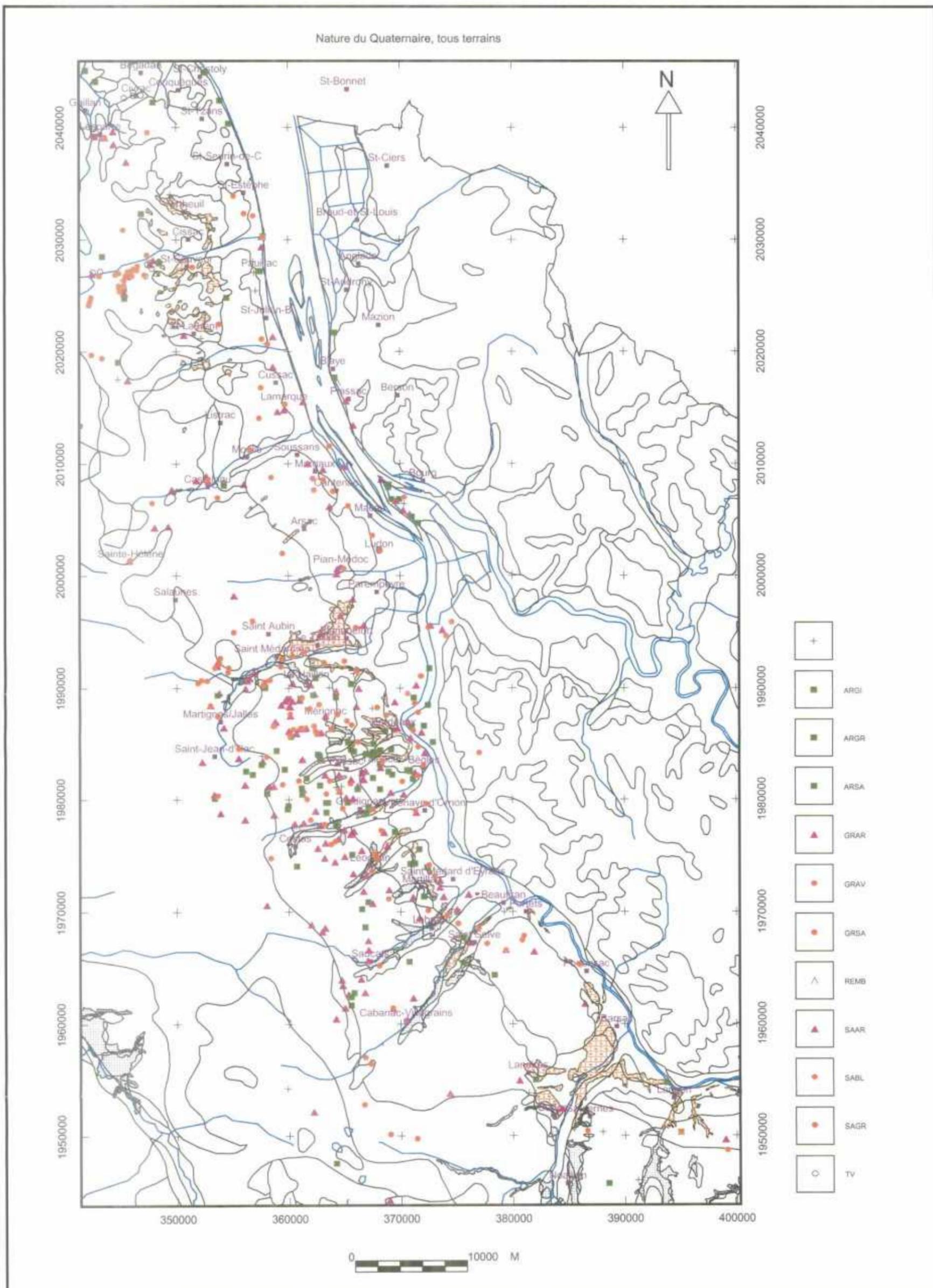


Fig. 8 : Nature du recouvrement plio-quaternaire des aquifères oligocènes et miocènes (données ponctuelles)



Dans un deuxième temps, les différents types de faciès ont été codés de façon numérique et une interpolation de ces données a été réalisée à l'aide du logiciel GDM (Fig. 9).

Dans la partie Sud du secteur d'étude, le faciès prédominant des formations pliocènes et quaternaires est représenté essentiellement par des sables argileux et des graviers argileux. Ceux-ci correspondent, vers l'Ouest, à la formation du sable des Landes et au sables argileux quaternaires sous-jacent, et à l'Est aux anciennes terrasses alluvionnaires de la Garonne, datant du Pléistocène.

La partie Central montre des faciès plus variables, allant des graviers argileux aux sables graveleux. Les graviers argileux et les sables argileux couvrent une vaste surface, large de 12 km environ et parallèle à la Garonne, depuis la vallée du Ciron jusqu'aux communes occidentales de l'agglomération bordelaise et aux Jalles de St-Médard. Ils constituent les terrasses les plus anciennes (Pléistocène inférieur) de la Garonne. Les sables et sables graveleux sont situés plus à l'Est des formations précédentes, entre Podensac et Villenave-d'Ornon. Ils représentent la terrasse moyenne (Pléistocène moyen) de la Garonne.

Dans la partie Nord du secteur d'étude, les faciès dominants du recouvrement plio-quaternaire sont, à l'Ouest, les dépôts du Sable des Landes et les sables argileux des formations quaternaires sous-jacentes, et, à l'Est, les sables graveleux et les sables des anciennes terrasses alluviales de la Garonne.

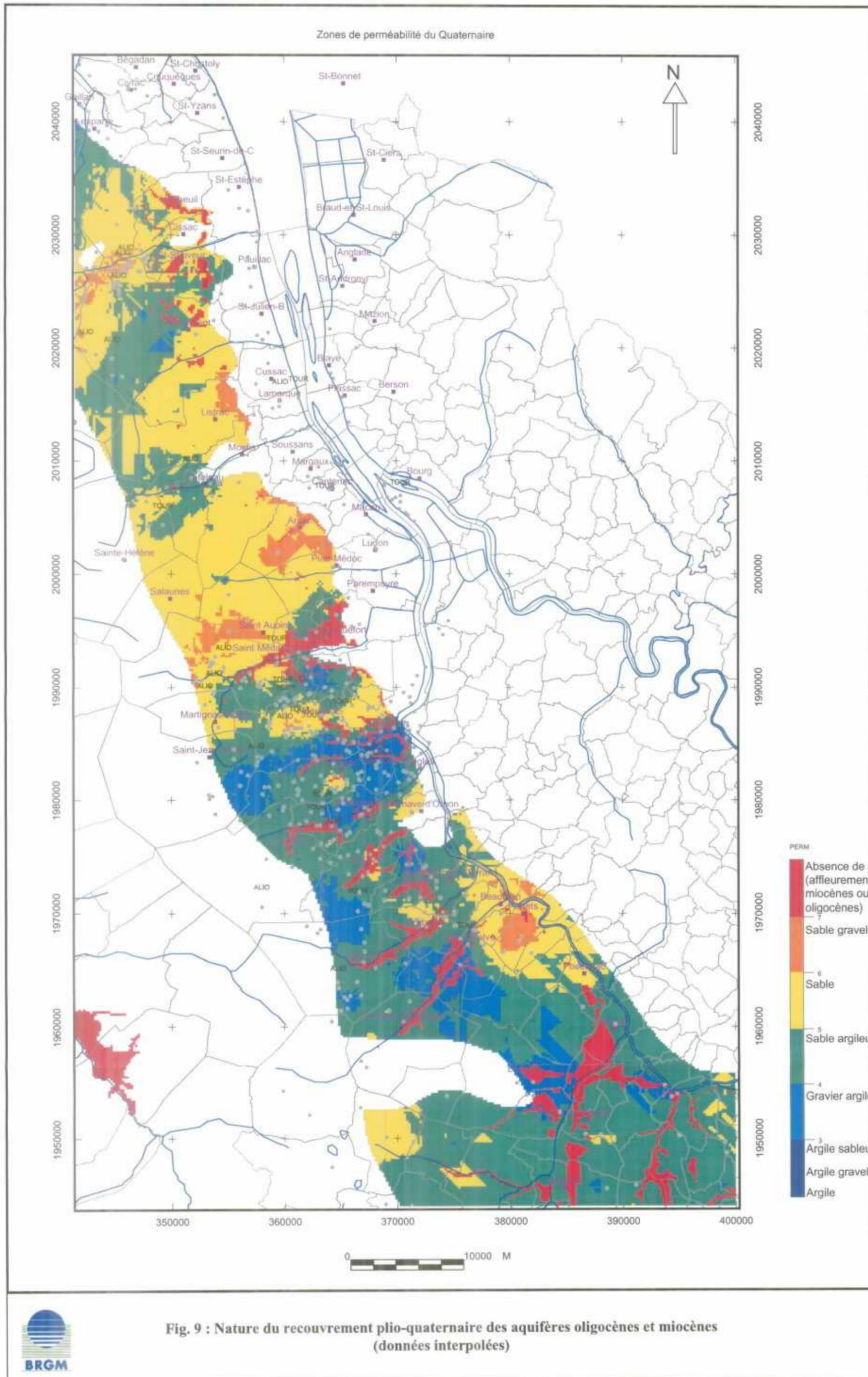
b) Recouvrement imperméable oligo-miocène

Les formations de l'Oligocène supérieur (Chattien) et de la base du Miocène (Aquitaniens) sont rassemblées dans cette couverture, car elles sont toutes les deux constituées d'argiles ou de marnes. Cet ensemble imperméable constitue l'éponte supérieur du réservoir. Il a été mis en évidence en phase 1 de l'étude que la puissance du recouvrement oligo-miocène (Fig. 10) du réservoir oligocène est en général beaucoup plus continue est importante (> 8 m) que ne le laissait supposer la lecture des cartes géologiques, où de trop rares affleurements étaient représentés (carte de Pessac notamment).

Par ailleurs, des zones mentionnées comme éponte imperméable sur la carte de Bordeaux ne possèdent en fait qu'une faible épaisseur d'argiles. C'est le cas notamment à St-Médard-en-Jalles où le plus souvent moins de 3 m de terrains imperméables existeraient au-dessus des calcaires oligocènes. Ceci peut avoir des conséquences directes sur la vulnérabilité des sources du Thil, de Bussac et de Gamarde.

c) Ensemble du recouvrement

L'ensemble des terrains de recouvrement comprend les formations pliocènes et quaternaires, les marnes et argiles oligo-miocènes et les formations aquifères du Miocène inférieur lorsque l'éponte oligo-miocène est présente.



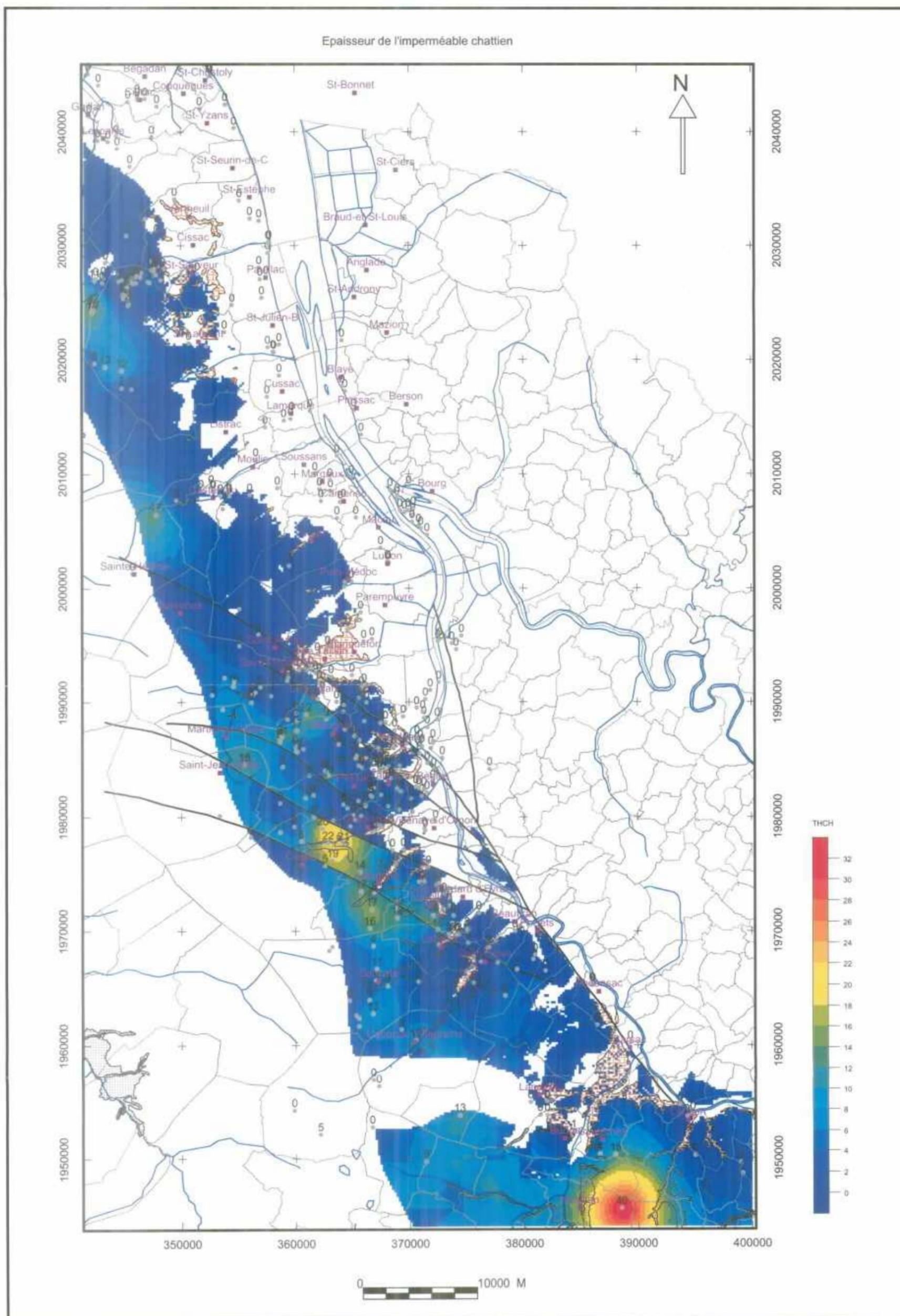


Fig. 10 : Epaisseur du recouvrement imperméable oligo-miocène de l'aquifère oligocène



En l'absence d'éponte entre l'aquifère de l'Oligocène et les formations aquifères du Miocène (**Fig. 6**), un aquifère unique, regroupant les formations aquifères de l'Oligocène et du Miocène inférieur, est pris en compte. Cet aquifère sera appelé dans la suite du rapport l'aquifère oligo-miocène. Dans ce cas, le recouvrement comprend uniquement les formations du Plio-Quaternaire.

La Fig. 11 restitue l'épaisseur totale des terrains de recouvrement. Elle montre une augmentation de la puissance du recouvrement de l'Est vers l'Ouest, depuis des épaisseurs inférieures à 10 m jusqu'à des épaisseurs de 90 à 110 m dans le secteur de St-Hélène, St-Jean-d'Illac, Saucats, et des épaisseurs très importantes (plus de 160 m) au Sud de Sauternes et de Langon (163 m au sondage pétrolier de Noaillan 1).

Les épaisseurs les plus faibles sont observées dans les zones de forte érosion : flanc bordant la vallée de la Garonne, talwegs et autour de l'anticlinal de Villagrains-Landiras et de Listrac.

3.2.2. Nouvelles connaissances hydrogéologiques

L'amélioration des connaissances hydrogéologiques sur la nappe de l'Oligocène en région bordelaise a porté, d'une part, sur les exutoires par les sources et, d'autre part, sur les relations nappe - ruisseaux.

a) Sources de la nappe de la nappe de l'Oligocène

Les sources constituent un moyen d'accès relativement aisé à la partie libre de la nappe qui est, à priori, la plus vulnérable. De plus, elles donnent une image moyennée du bassin versant souterrain qu'elles drainent.

Recensement et caractérisation

Deux campagnes de recensement des sources de la nappe de l'Oligocène ont été réalisées dans le cadre de cette opération sectorielle. La première campagne a eu lieu en septembre et octobre 2000, en période de basses eaux. La deuxième campagne s'est déroulée en mai et juin 2001, en période de hautes eaux. Chaque source visitée a été caractérisée sur le plan géographique (coordonnées, cote du principal griffon), géologique (nature des terrain affleurants) et hydrogéologique. Son débit a été estimé en basses eaux et en hautes eaux à l'aide d'un courantomètre ou d'un décalitre. La température, le pH et la conductivité de l'eau ont été déterminés in-situ et des prélèvements d'eau ont été effectués afin de déterminer en laboratoire les teneurs en nitrates et en fer (**Fig. 12**).

Résultats

116 sources oligocènes ont été recensées sur le secteur d'étude (Fig. 13), dont environ 80 étaient non répertoriées jusqu'à présent. De nombreuses émergences de la nappe ont été découvertes au Sud et à l'Est de Langon, le long de la Garonne entre Barsac et St-Médard-d'Eyrans et de ses principaux affluents, et dans les secteurs d'Arsac et de Lesparre.

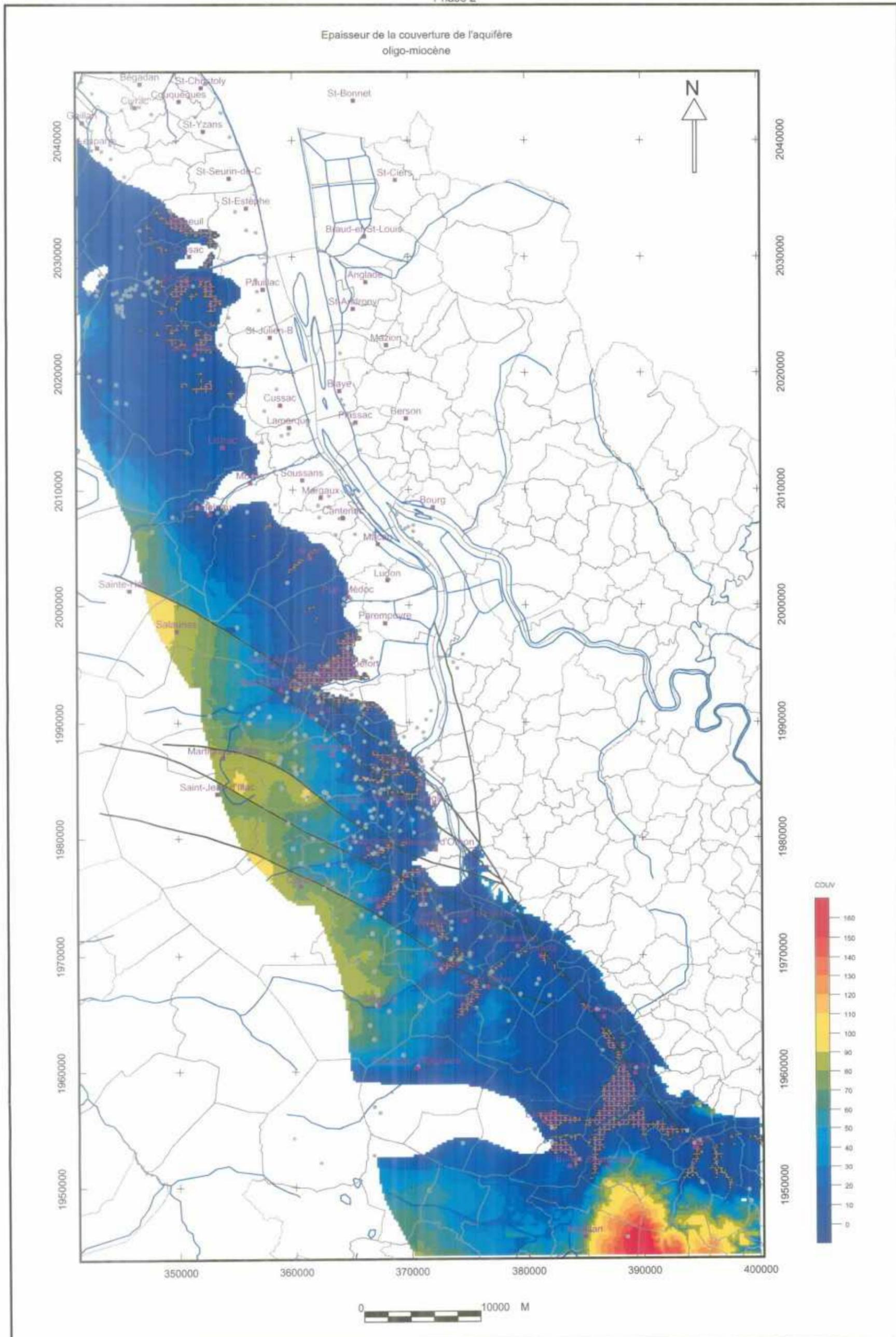


Fig. 11 : Epaisseur total du recouvrement de l'aquifère oligocène





SOURCE DE BELLEFONTAINE

Indice de classement : 0852 6X 0005

Commune : Saint Pierre de Mons

Coordonnées Lambert III Sud (Km) : X : 396.22 ; Y : 252.91 ; Z : 15

Usage : Eau individuelle, non exploitée.

Date mesure	Débit (l/s)	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Nitrates (mg/l)	Fer (mg/l)
25/06/01	5	15	6	470	30.36	0.149

Remarques : nombreux calcaires affleurements calcaires présents dans le secteur, source émergeant du calcaire.



SOURCE DE CANTERANE

Indice de classement : 0754 2X 0059

Commune : Lesparre

Coordonnées Lambert III Sud (Km) : X : 344.9 ; Y : 338.53 ; Z : 13

Usage : eau service publique, non exploitée.

Date mesure	Débit (l/s)	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Nitrates (mg/l)	Fer (mg/l)
18/06/01	2.77	14.5	7.06	690	6.16	0.04

Remarques : Source qui se jette dans le ruisseau de Canterane après être passée dans un ancien lavoir ; présence de trois griffons.



Fig. 12 : Exemples de sources oligocènes du secteur d'étude

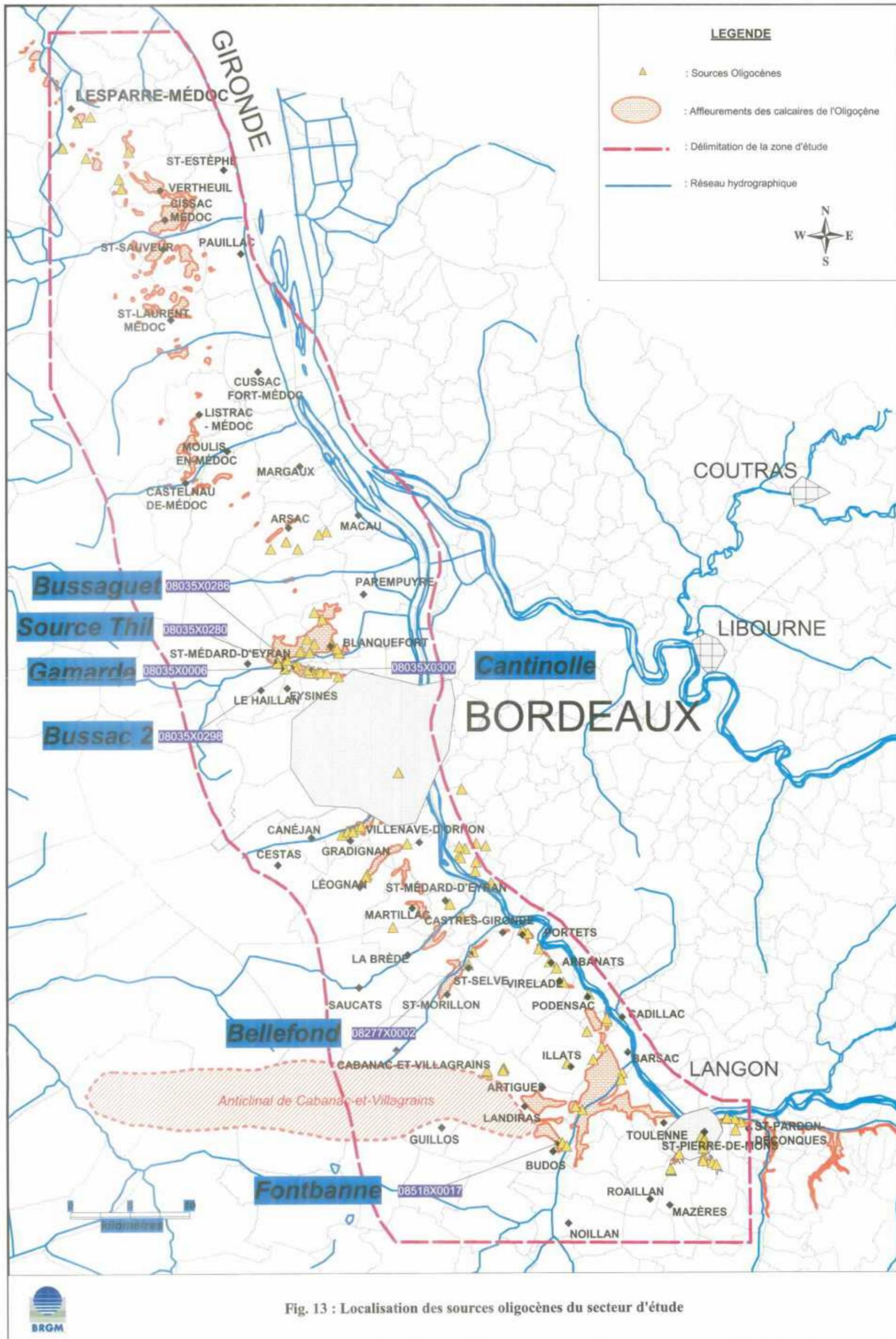


Fig. 13 : Localisation des sources oligocènes du secteur d'étude



Débits des sources

La campagne de jaugeage effectuée en septembre et octobre 2000 montre que les débits naturels (hors pompage) des sources oligocènes du secteur d'étude varient de 0,2 m³/h à plus de 1200 m³/h pour la source de Fontbanne à Budos (**Fig. 14**). De nombreuses sources oligocènes de la région bordelaise sont exploitées pour l'AEP. Il s'agit, du Nord au Sud, de (**Fig. 13**) :

- la source Fonterrade à St-Germain-d'Esteuil (débit naturel de 60 m³/h pendant les basses eaux 2000) ;
- la source Bussac 2 au Haillan (5 à 10 m³/h) ;
- la galerie Gamarde à St-Médard-en-Jalles (425 m³/h) ;
- la source de Bussaguet (barbacanes) à St-Médard-en-Jalles (418 m³/h) ;
- la source du Thil à St-Médard-en-Jalles (en moyenne 200 m³/h) ;
- la source de la Station du Thil à St-Médard-en-Jalles (débit naturel non connu) ;
- la source Cantinolle à Eysines (44 m³/h) ;
- la source Bellefond à Castres (223 m³/h) ;
- la source Fontbanne à Budos (1203 m³/h).

Huit sources issue de la nappe de l'Oligocène présentent des débits notables mais ne sont pas utilisées. Leur captage pourrait permettre d'économiser des prélèvements dans les nappes profondes sous réserve de leur bonne qualité chimique et bactériologique. Il s'agit :

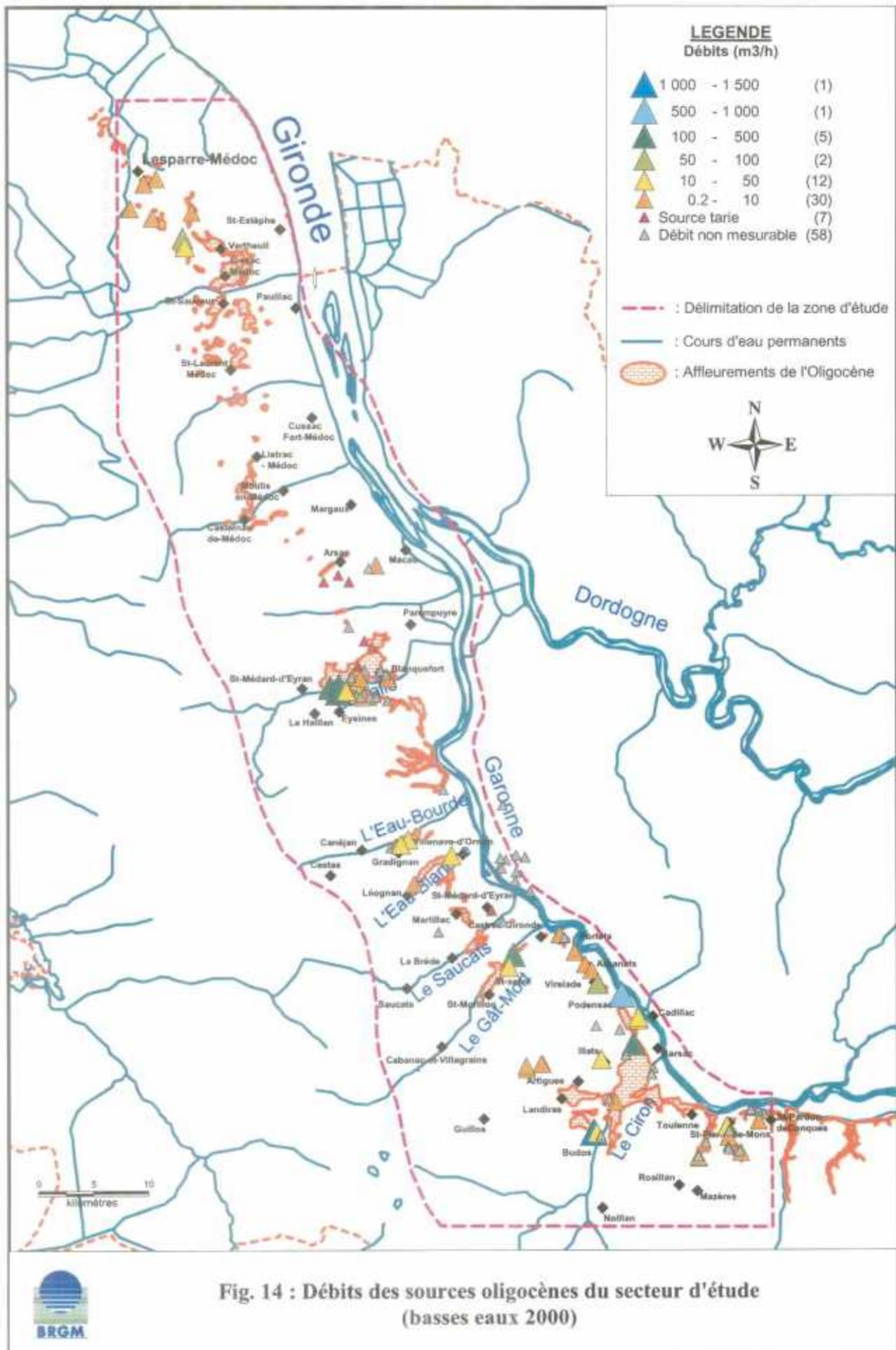
- de la source Dame Houn à St-Selve (30 m³/h) ;
- de la source Nodoy à Virelade (63 m³/h) ;
- de la source du lavoir à Podensac (entre 300 et 600 m³/h) ;
- de la source de Barthe à Cérons (40 m³/h) ;
- de la source du château Barthe à Cérons (environ 20 m³/h) ;
- de la source du château St-Cricq à Cérons (entre 150 et 200 m³/h) ;
- de la source du lavoir à Illats (16 m³/h) ;
- de la source du moulin à Budos (28 m³/h).

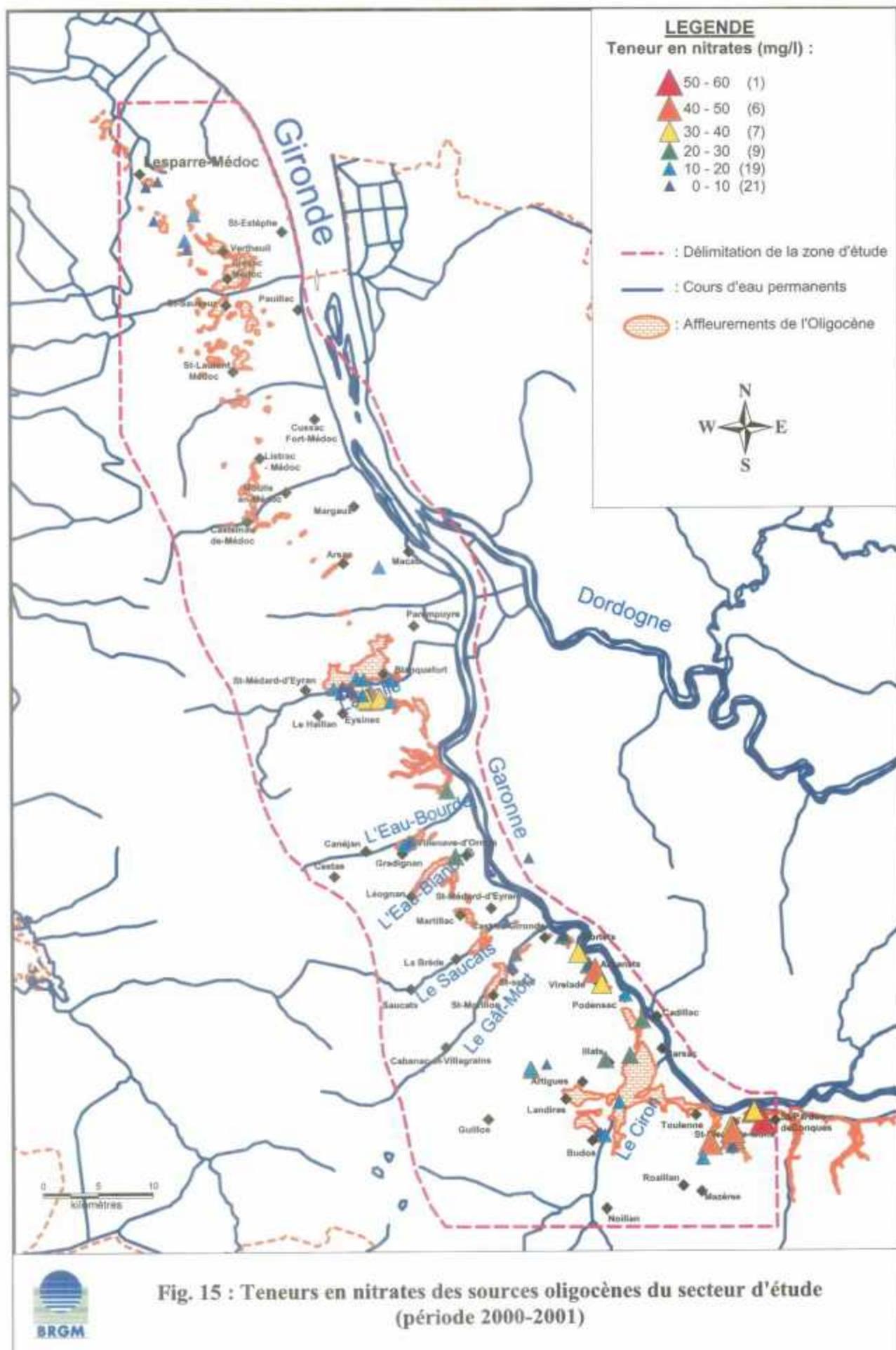
Par ailleurs, plusieurs sources recensées lors des campagnes de 1961 ne débitent plus, ni en basses eaux 2000 ni en hautes eaux 2001. Ces sources sont essentiellement situées dans les secteurs d'Arsac, de Blanquefort, du Taillan-Médoc et de St-Médard-d'Eyrans. L'interruption des écoulements pourrait être lié à la baisse du niveau piézométrique dans ces secteurs ou à l'urbanisation.

Qualité des eaux de la nappe

Les teneurs en nitrates mesurées sur les échantillons d'eau des sources lors des campagnes de 2000 et 2001 sont comprises entre 0,1 et 59 mg/l (**Fig. 15**). Les teneurs les plus élevées sont observées :

- le long de la vallée de la Garonne et de ses affluents (le Ciron, l'Eau-Blanche, l'Eau-Bourde et la Jalle de St-Médard) ;
- dans les zones d'affleurements (zones de Langon, Barsac, Bordeaux, St-Médard-en-Jalles, Blanquefort et St-Germain-d'Esteuil).





Ces résultats confirment les indices de pollution mis en évidence à partir des analyses réglementaires effectuées par les exploitants et par la DDASS Gironde sur les forages et les sources oligocènes (**Fig. 16** et **Fig. 17**) :

- Au droit d'une **bande orientale, qui correspond aux zones d'affleurements**, des teneurs en nitrates comprises **entre 20 et 60 mg/l** accompagnent les ruisseaux : le Ciron, le Saucats, l'Eau-Blanche, l'Eau-Bourde et la Jalle de St-Médard. Ces contaminations de la nappe par les nitrates proviennent soit du lessivage des engrais azotés utilisés par les activités agricoles (dans les zones maraîchères et viticoles notamment), soit du rejet d'effluents domestiques non raccordés au réseau collectif. Dans les interfluves, les teneurs en nitrates sont moindres (voisines généralement de 10 mg/l) mais restent significatives.

Outre les pollutions par les nitrates, d'autres pollutions par les sulfates, les produits phytosanitaires et les métaux sont identifiées dans la bande orientale. De fréquentes pollutions bactériologiques sont également mises en évidence, par exemple à St-Médard-en-Jalles (sources du Thil et de Gamarde), St-Médard-d'Eyrans et Labrède.

- Au droit d'une **bande occidentale, la nappe devient captive** sous les argiles et les marnes des formations sus-jacentes. Les teneurs en nitrates sont **inférieures à 1 mg/l**. Le sens d'écoulement d'Ouest en Est ne permet pas la propagation des pollutions. Toutefois, il importe de ne pas modifier les directions d'écoulements par des pompages intensifs.

En 2001, les risques de pollution d'origine agricole, domestique ou industrielle persistent. De nombreuses pollutions de la nappe de l'Oligocène sont mis en évidence, notamment le long de la vallée de la Garonne et de ses affluents et dans les zones d'affleurement. Ceci justifie d'autant plus la réalisation d'une carte de vulnérabilité.

Piézométrie de la nappe

L'état piézométrique de la nappe des calcaires de l'Oligocène (**Fig. 18**) a été réalisé à partir des cotes piézométriques mesurées dans les forages en novembre 2000 et des cotes piézométriques des griffons des sources recensés lors de la campagne de septembre et octobre 2000. La prise en compte de 80 cotes piézométriques supplémentaires, correspondant aux sources nouvellement inventoriées, a permis d'améliorer de façon notable la restitution de la piézométrie de la nappe de l'Oligocène dans la région bordelaise, notamment dans les vallées et dans les secteurs de Lesparre, Arsac, Langon et de l'anticlinal de Villagrains-Landiras.

La morphologie de la surface piézométrique dans le secteur étudié montre un sens d'écoulement général d'Ouest en Est, en direction de la Garonne. Elle est fortement influencée par le réseau hydrographique dense, surtout dans les zones où la nappe est libre. Plusieurs axes drainants sont ainsi distingués :

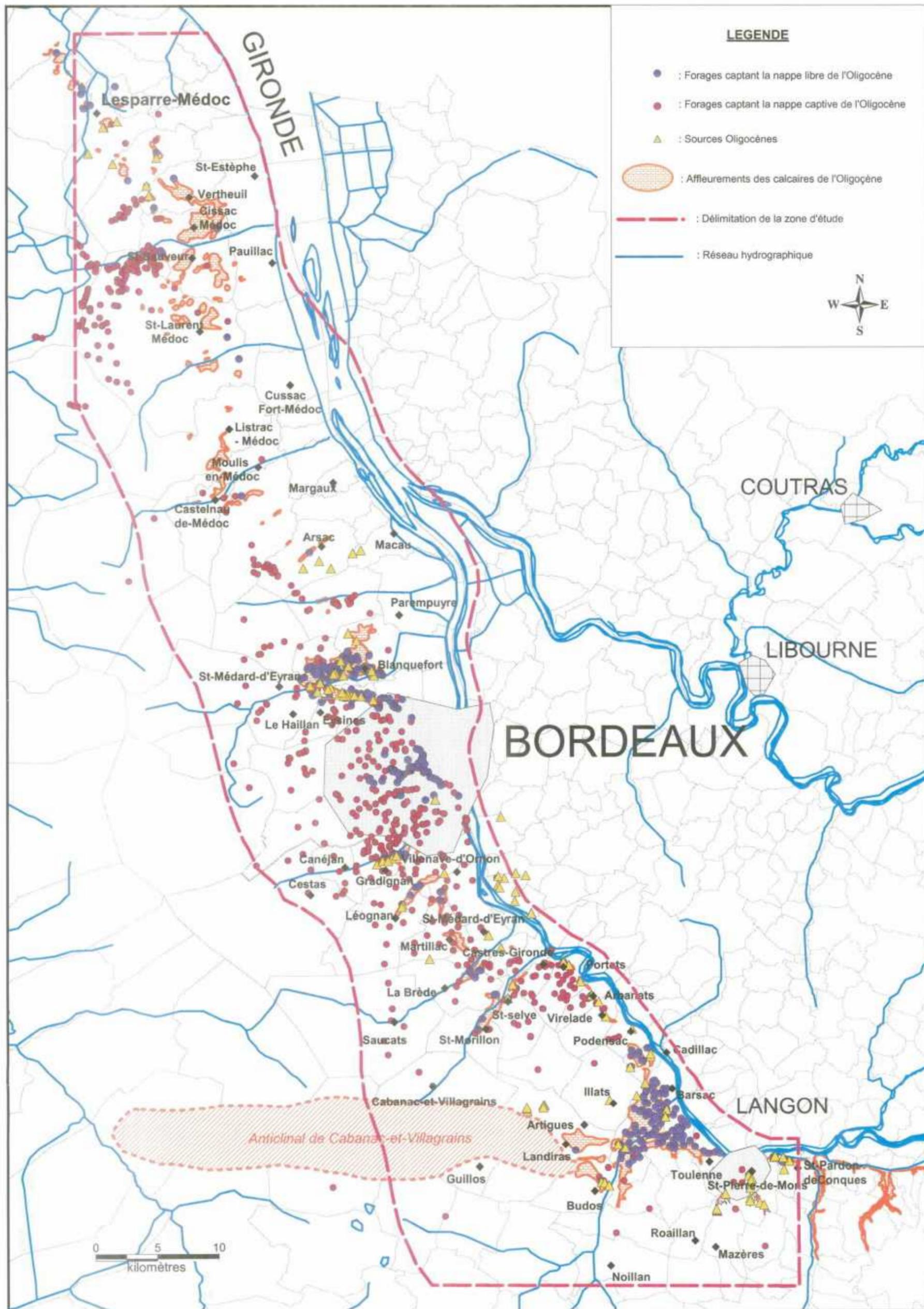
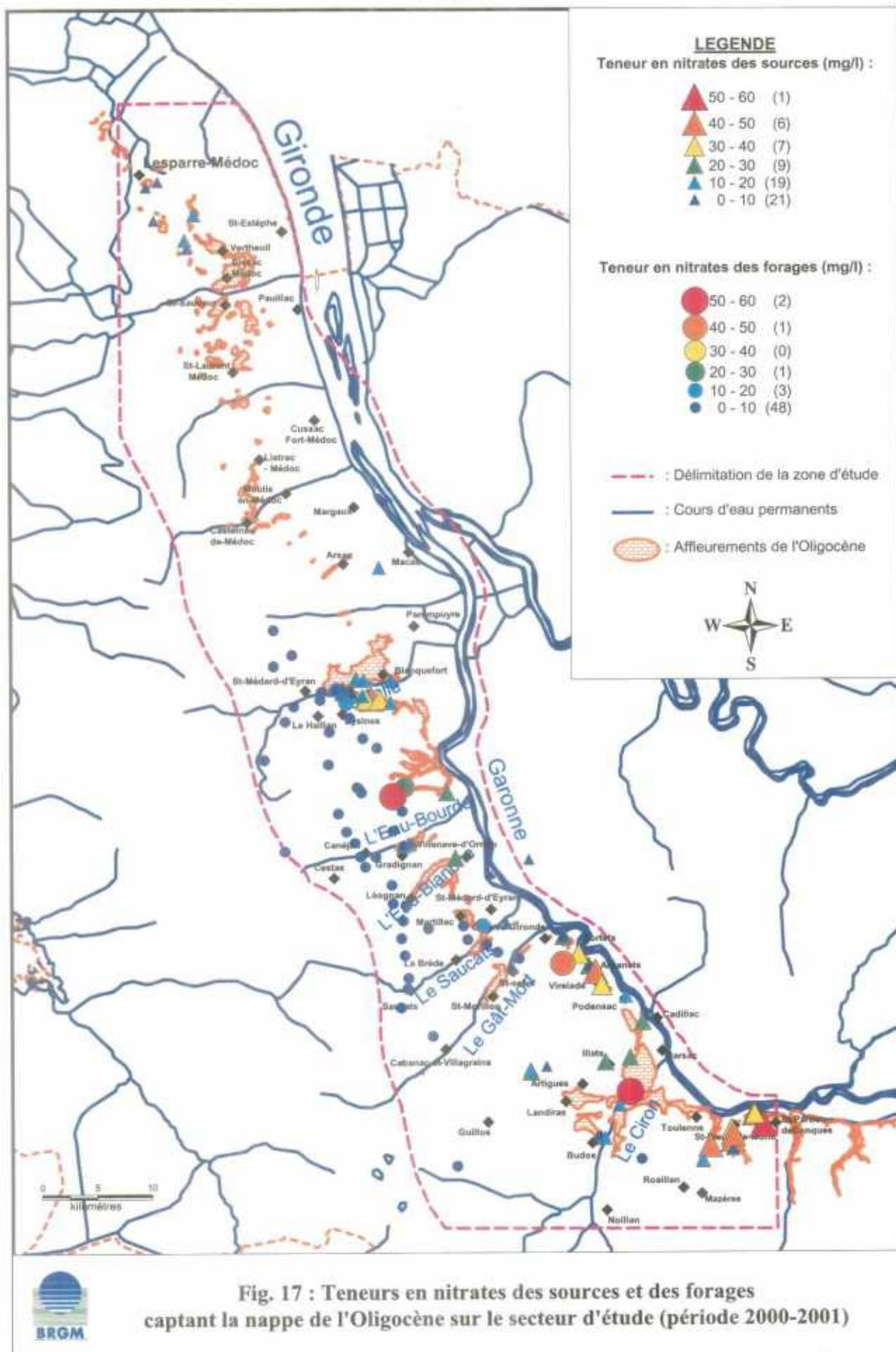


Fig. 16 : Localisation des sources et des forages captant la nappe de l'Oligocène sur le secteur d'étude





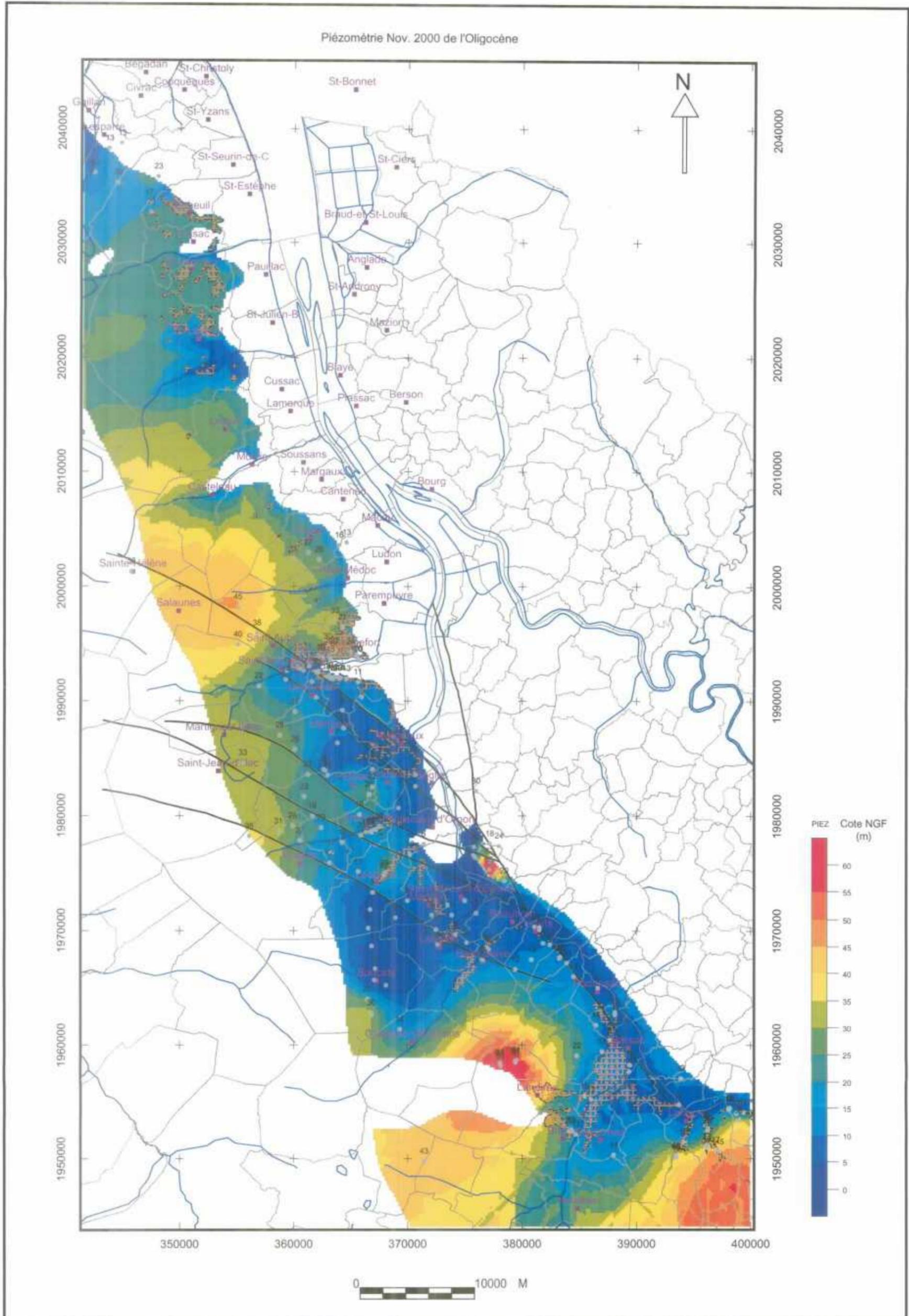


Fig. 18 : Piézométrie de la nappe des calcaires de l'Oligocène en novembre 2000
 Carte piézométrique estimée à partir des cotes piézométriques mesurées dans les forages
 et des cotes piézométriques des griffons des sources



- au Nord du secteur, la jalle du Breuil, le ruisseau de la Berle du Gargoulh et la jalle de l'Horte à St-Laurent, la jalle de Castelnau prolongé par la jalle de Tiquetorte, la jalle d'Artigues au Pian-Médoc ;
- au Centre, les jalles du Taillan et d'Eysines, les ruisseaux du Serpent, de l'Ars, de l'Eau-Bourde, de l'Eau-Blanche et de Bourrant ;
- au Sud du secteur, les ruisseaux du Saucats, du Gât-Mort (de façon moins marqué) et du Ciron.

Localement des dépressions sont observées ; elles sont dues à des pompages ponctuels *plus importants*. C'est le cas à Méridnac, Pessac, Gradignan et surtout entre Léognan et Saucats, le long de la ligne dite des "100 000 m³/j".

A faible distance du fleuve, les cotes piézométriques de l'Oligocène et du Plio-Quaternaire sont pratiquement confondues lorsque les calcaires sont peu recouverts. Par contre, vers l'Ouest, les épontes semi-perméables et imperméables entre l'Oligocène, le Miocène et le Plio-Quaternaire s'épaississent. De ce fait, les piézométries des différents systèmes aquifères s'individualisent. La piézométrie du système aquifère apparaît légèrement inférieure à celles des systèmes du Miocène et du Plio-Quaternaire, d'où une alimentation par drainance de ces nappes.

b) Relations nappe de l'Oligocène – ruisseaux et risques de pollution

Généralités

Les eaux des ruisseaux participent à l'alimentation de la nappe des calcaires de l'Oligocène dans les zones d'affleurements, lorsque la piézométrie locale est inférieure à celle des ruisseaux. Les observations effectuées depuis plusieurs années sur le secteur d'étude ont montré la chute de débit des sources à l'étiage et même leur tarissement total en bordure de certains ruisseaux tels que la Jalle de St-Médard, l'Eau-Bourde et le Saucats. Ce phénomène est lié à l'accroissement local des prélèvements. Etant donné cet abaissement piézométrique, un risque d'inversion de circulation nappe - ruisseau existe. Les ruisseaux pourraient ainsi alimenter la nappe des calcaires de l'Oligocène à proximité des forages en exploitation.

Le risque de pollution de la nappe de l'Oligocène à partir des cours d'eaux est de nature chimique et bactériologique. L'apports d'éléments polluants dans les ruisseaux peut se faire :

- soit directement par les rejets d'eau de drainage des terrains superficiels et les rejets d'eaux usées (réseaux d'assainissement, station d'épuration, industries, ...)
- soit indirectement par les eaux de ruissellement le long des bassins versants, qui entraînent des substances polluantes tels que les nitrates et les produits phytosanitaires.

Ce risque de pollution est inversement proportionnel à l'importance de la couverture résiduelle et du colmatage relatif des berges et du lit.

Etudes ponctuelles des relations entre la nappe de l'Oligocène et les ruisseaux sur le secteur d'étude

Hydrométrie

Cette partie traite des jaugeages sériés. La comparaison des mesures réalisées à la même date permet d'estimer l'échange nappe - ruisseau existant (par exemple, pertes du ruisseau vers la nappe).

① Cas du ruisseau Monastère à St-Aubin-de-Médoc (LARAG, 1993)

❑ Localisation des jaugeages

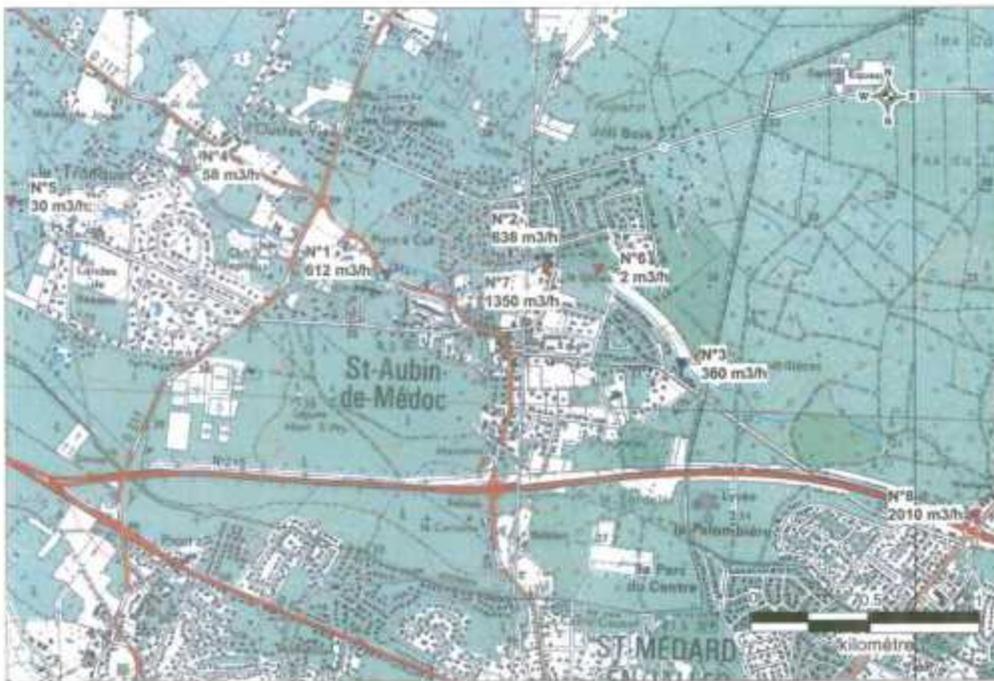


Fig. 19 : Localisation des jaugeages du 20/11/1991 sur le Monastère

❑ Détail des jaugeages

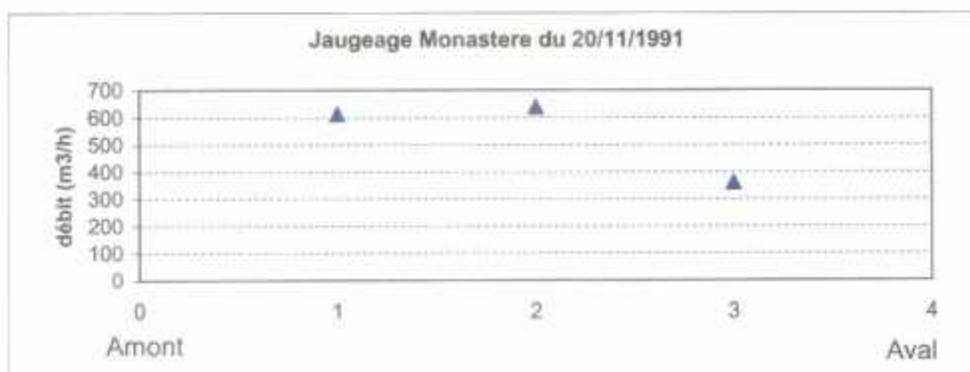


Fig. 20 : Résultats des jaugeages du 20/11/1991 sur le Monastère

Une perte de la rivière vers la nappe est globalement observée entre le site 2 (pont de la D211) et 3 (lieu-dit les Renardières).

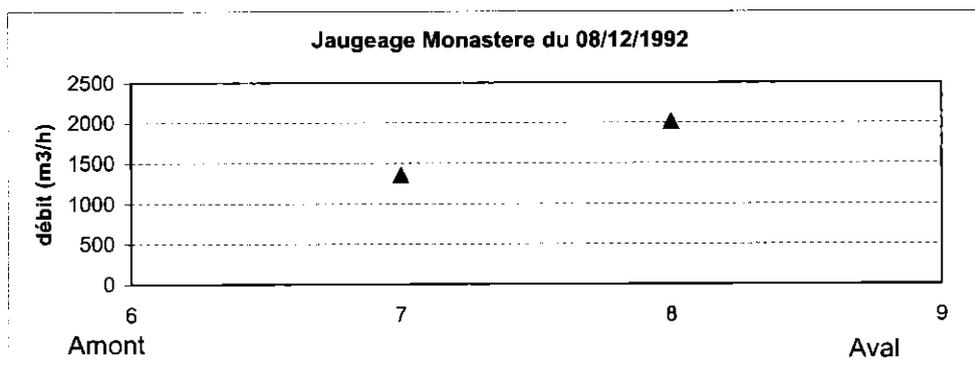


Fig. 21 : Résultats des jaugeages du 08/12/1992 sur le Monastère

Aucune perte vers le nappe n'est observable au travers de la comparaison de ces deux sites et de la période.

② Cas du ruisseau Monastère (SAFEGE, 1996a)

□ Localisation des jaugeages



Fig. 22 : Localisation des jaugeages d'avril 1996 sur le Monastère

☐ **Détail des jaugeages**

Tabl. 7 : Débits mesurés sur le Monastère en avril 1996

<i>N° jaugeage</i>	<i>Débit (m³/h)</i>
20	120
21	93
22	80
23	78
perte	perte

En avril 1996, le ruisseau Monastère disparaît de façon diffuse dans les sables de couverture au niveau au lieu-dit "Déhés" sur la commune de St-Aubin-de-Médoc.

③ **Cas de la jalle de St-Médard et du ruisseau Monastère (SAFEGE, 1996b)**

☐ **Jaugeages sériés sur la jalle de St-Médard**

Quatre jaugeages sériés ont été réalisés du 19/12/1994 au 18/04/1995 entre le pont des Lanciers, localisé 500 m à l'amont de la source du Thil, et la passerelle Gamarde-Thil situé pratiquement au centre du champ captant. Aucun d'entre eux ne laisse apparaître de perte de la rivière vers le nappe. Les débits évalués sont croissants d'amont en aval.

Tabl. 8 : Débits mesurés du 19/12/1994 au 18/04/1995 sur la jalle

<i>Date</i>	<i>Débits (m³/h)</i>	
	<i>Pont des Lanciers</i>	<i>Passerelle</i>
19/12/1994	5400	5500
10/03/1995	-	42500
20/03/1995	23300	24000
18/04/1995	7870	8250

☐ **Jaugeages sériés sur le ruisseau Monastère**

Durant les quatre jours où le Monastère a atteint la jalle (9, 10, 11 et 12 mars 1995), des jaugeages ont été réalisés entre le Pont de la RN 215 à Germignan et le pont de l'aqueduc, près de la source du Thil. Une perte a été mise en évidence entre ces deux points :

Tabl. 9 : Débits mesurés le 09/03/1995 sur le Monastère

<i>Jaugeage</i>	<i>Débit (m³/h)</i>
Pont RN 215	568
Pont aqueduc Thil	418

④ Cas du Saucats à La Brède (LARAG et SAFEGE, 1994)

□ Localisation des jaugeages

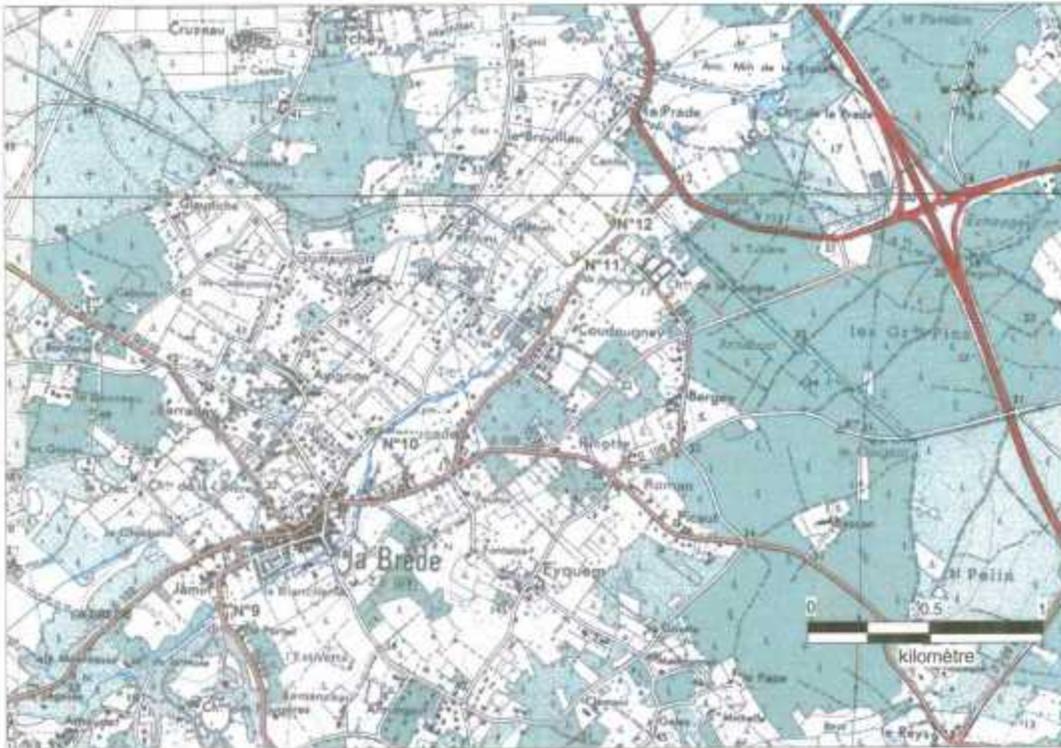


Fig. 23 : Localisation des jaugeages du 03/06/1994 au 22/08/1994 sur le Saucats

□ Détail des jaugeages

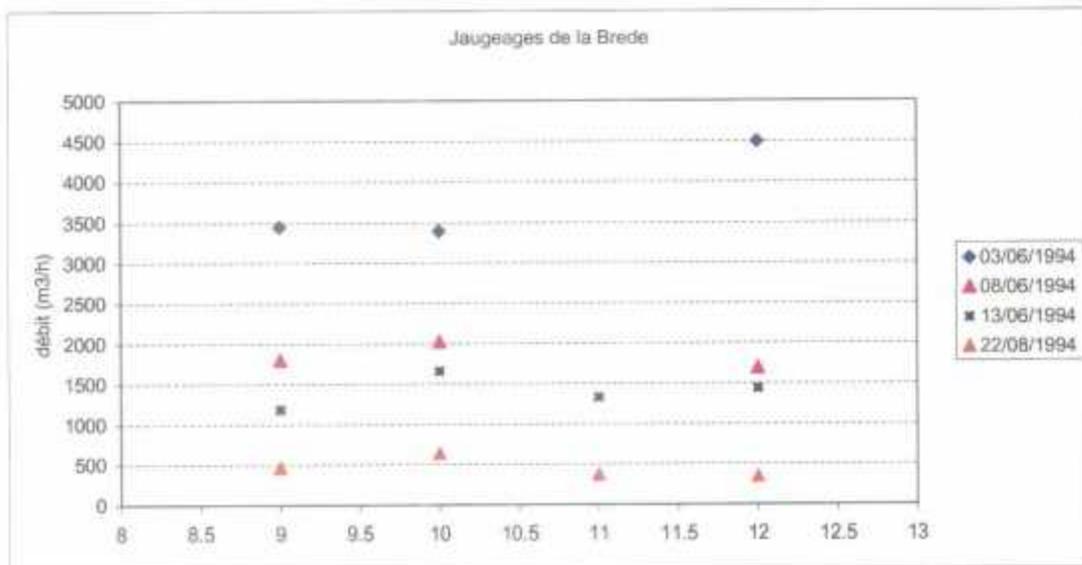


Fig. 24 : Résultats des jaugeages du 03/06/1994 au 22/08/1994 sur le Saucats

Une zone de perte du ruisseau du Saucats vers la nappe est localisée au niveau du site 11 (décroissance du débit).

Traçages

① Cas du ruisseau Monastère à St-Aubin-de-Médoc (SAFEGE, 1996a)

❑ Localisation du traçage



Fig. 25 : Traçage du Monastère en 1996

❑ Descriptif du Traçage

La solution initiale de 120 litres d'eau était sursaturée en iodures de sodium (750 g/l).

Lors de ce traçage, les pompages sur le champ captant furent maximum. Les sites suivis étaient notamment :

- la source du Thil ;
- la station du Thil ;
- les Barbacanes ;
- la galerie de Gamarde.

❑ Résultats du traçage

L'apparition du traceur à la source du Thil et à Gamarde confirme que le Monastère participe à l'alimentation de la nappe au niveau du champ captant de Thil-Gamarde.

② Cas de la jalle de St-Médard et du ruisseau Monastère (SAFEGE, 1996b)

❑ Localisation du traçage de la jalle

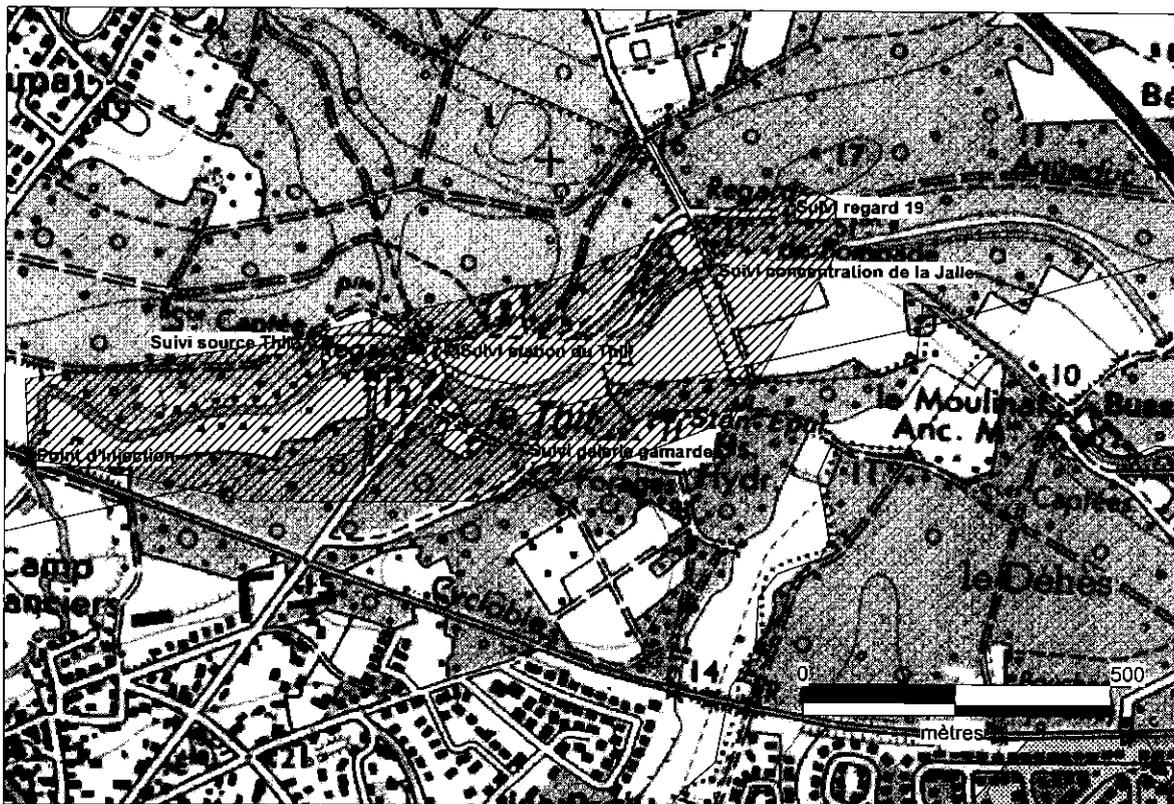


Fig. 26 : Traçage de la jalle en avril 1995

❑ Descriptif du traçage de la jalle

La solution initiale de 60 litres d'eau contenant 38 kg de iodure de sodium a été injectée le 18 avril 1995 au niveau du pont des Lanciers.

Lors de ce traçage, les prélèvements d'eau ont été réalisés au droit de :

- la source du Thil ;
- la station du Thil ;
- le regard 19 ;
- la galerie Gamarde.

❑ Résultats du traçage de la jalle

Ce traçage a montré que l'échange ruisseau – nappe est faible (environ 1% avec la galerie Gamarde et nulle avec la station du Thil).

❑ Localisation du traçage du Monastère

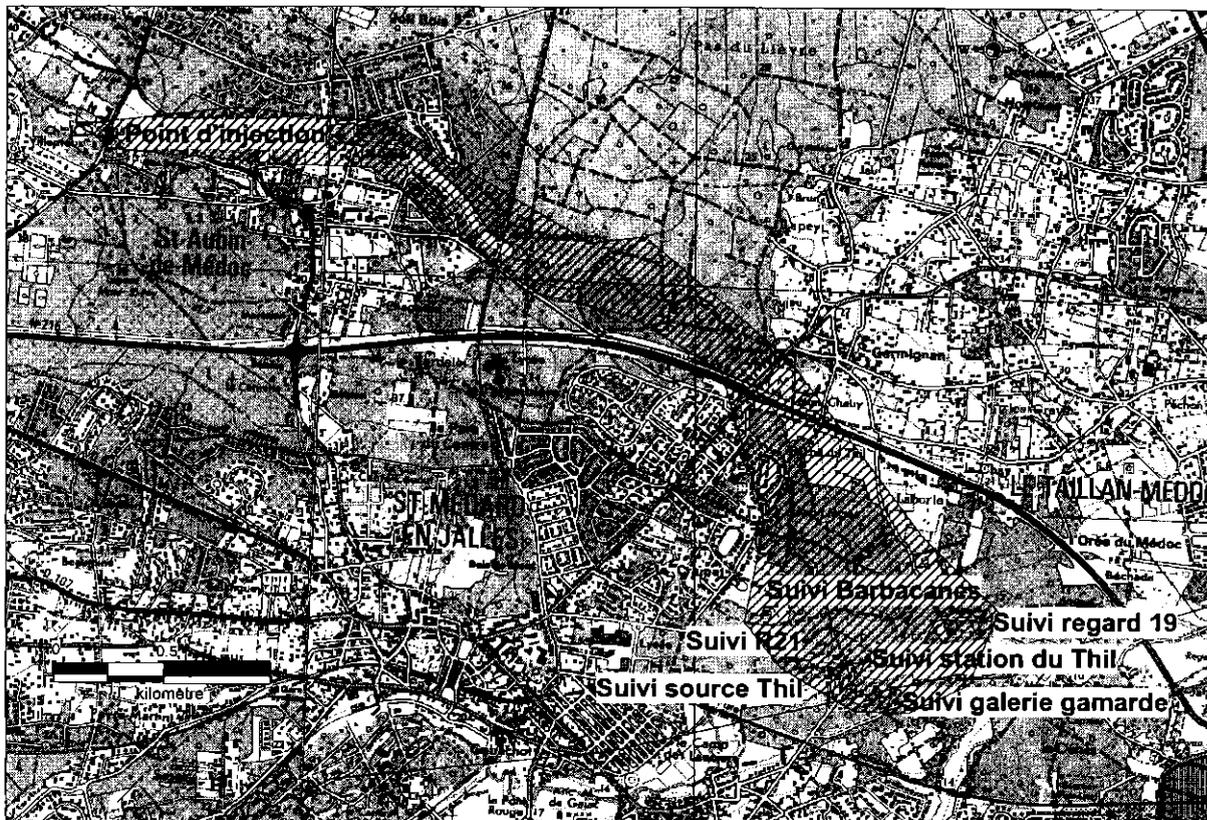


Fig. 27 : Traçage du Monastère en avril 1995

❑ Descriptif du traçage du Monastère

La solution initiale de 60 litres d'eau contenant 12 kg de iodure de sodium a été injectée le lundi 10 avril 1995 en amont de St-Aubin-de-Médoc.

Lors de ce traçage, les pompages sur le champ captant furent maximum. Les sites suivis étaient notamment :

- la source du Thil ;
- la station du Thil ;
- le forage R21 ;
- les Barbacanes.

❑ Résultats du traçage du Monastère

La participation du Monastère à l'alimentation des captages n'est mis en évidence de manière nette. Un suivi de longue durée, avec des concentrations supérieures en traceur et en période d'étiage permettrait de confirmer la relation ruisseau - nappe.

③ Cas du Saucats à La Brède (LARAG et SAFEGE, 1994)

☐ Localisation du traçage

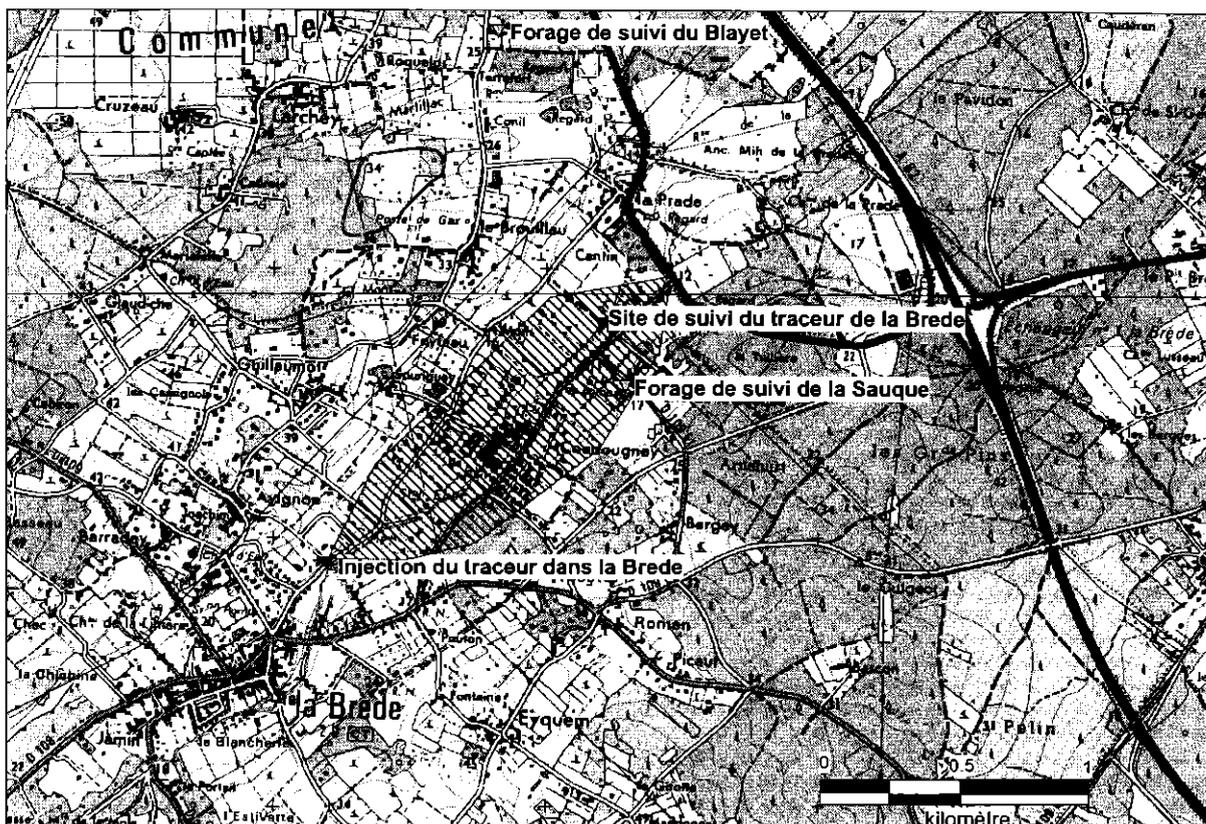


Fig. 28 : Traçage du Saucats en juin 1994

☐ Descriptif du traçage

Une solution initiale de 25 litres d'eau contenant 10 kg d'iodure de sodium a été injectée au niveau du lieu-dit « la Perrucade » de façon continue pendant 1h 45. La concentration supposée du Saucats était donc de 2,8 mg/l durant 1h 45. Trois sites ont été retenus pour le suivi (Fig. 28):

- un site pour le suivi de l'évolution de la concentration dans La Brède ;
- deux forages pour l'évaluation de l'échange nappe - rivière (forage du Blayet et de la Sauque).

☐ Résultats du traçage pour le forage de la Sauque

L'évolution du traceur montre l'apparition d'un pic entre 12 et 13 heures après l'injection du traceur (21 $\mu\text{g/l}$ à la 13^{ème} heure). On note ensuite une décroissance régulière de la concentration en iodure de sodium. Le bruit de fond étant retrouvé au niveau de 22^{ème} heure.

Les distances étant comprises entre 225 m (distance minimale au cours d'eau) et 1250 m (distance au point d'injection), les vitesses de transferts peuvent être estimées comprises entre $26,7 \cdot 10^{-3}$ m/s et $5,6 \cdot 10^{-3}$ m/s (1^{er} pic) et $17,4 \cdot 10^{-3}$ et $3,3 \cdot 10^{-3}$ m/s (2nd pic). La masse de traceur restituée au niveau de cet ouvrage est de 110 g (intégration de la courbe réponse), soit environ 1,6 % de la masse d'iode du traceur injectée dans le ruisseau.

❑ Résultats du traçage pour le forage du Blayet

Deux pics sont mis en évidence dans la courbe de restitution. Ces deux pics apparaissent après respectivement 4 heures (20 µg/l) et 24 heures (24 µg/l) après le début de l'injection. Les distances allant de 850 m (distance minimale au cours d'eau) à 2300 m (distance au point d'injection), les vitesses de transferts peuvent être évaluées entre $160 \cdot 10^{-3}$ m/s et $52 \cdot 10^{-3}$ m/s pour le 1^{er} pic et entre $27 \cdot 10^{-3}$ m/s et $8,6 \cdot 10^{-3}$ m/s pour le 2^{ème} pic. La masse restituée est ici de 180 g, soit 2,6 % de la masse d'iode injectée.

Conclusion

Les études ponctuelles sur le ruisseau Monastère et la jalle de St-Médard dans la partie Nord du secteur d'étude, et sur le ruisseau du Saucats à La Brède dans la partie Sud du secteur, mettent en évidence l'existence de relations entre les ruisseaux et la nappe des calcaires de l'Oligocène. Il serait judicieux de prendre en compte les zones de pertes dans la détermination de la vulnérabilité à la pollution de la nappe de l'Oligocène, soit par l'intermédiaire du critère "recharge" si l'apport d'eau du ruisseau peut être quantifiée, soit par l'intermédiaire du critère "pente" qui permet de distinguer le type d'infiltration (diffuse ou ponctuelle). Toutefois, les zones de pertes actuellement connues ne sont de loin pas exhaustives et leur prise en compte dans la réalisation de la carte de vulnérabilité risque d'introduire un biais. Pour cette raison, elles ne seront pas intégrées dans le calcul mais pourront compléter l'interprétation de la carte et la prise de décision.

3.3. CARACTERISATION DES CRITERES DE VULNERABILITE SUR LE SECTEUR D'ETUDE

3.3.1. Méthode

Les critères utilisés dans la détermination de la vulnérabilité à la pollution de la nappe de l'Oligocène sont rappelés ci-après (cf. paragraphe 3.1) :

- la recharge annuelle nette ;
- la topographie (variabilité de la pente de la surface du sol) ;
- la nature de la couverture surmontant l'aquifère de l'Oligocène et l'aquifère de l'Oligo-Miocène ;
- l'épaisseur de cette couverture.

Ces quatre critères ont été cartographiés sur le secteur d'étude à l'aide des logiciels MapInfo et GDM. Une grille à la maille de 200 m sur 200 m a été utilisée. Elle est compatible en étendue et en finesse avec les cartographies déjà réalisées sur le secteur d'étude, notamment celle de la surface topographique issue du MNT.

Conformément aux méthodes de pondération et d'indexation des paramètres, la gamme de variation de chaque critère sur le secteur d'étude est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Dix intervalles ont ainsi été définis, en général de façon linéaire, pour chaque critère. Un index ou note est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les index varient de 1 à 10, l'index 1 représentant la situation la moins vulnérable et l'index 10 la situation la plus vulnérable.

Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final est la somme pondérée des quatre critères. Le système de pondération utilisé est présenté dans le **Tabl. 10**. Il s'inspire du système de la méthode DRASTIC (cf. paragraphe 2.3.3.).

Tabl. 10 : Systèmes de pondération utilisés pour la détermination de la carte de vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène

<i>Critères de vulnérabilité</i>	<i>Facteurs de pondération</i>
Recharge annuelle nette	3
Topographie (pente de la surface du sol)	1
Nature de la couverture surmontant l'aquifère	4
Épaisseur de la couverture surmontant l'aquifère	4

3.3.2. Cartographie du critère recharge annuelle nette

La recharge de la nappe de l'Oligocène sur le secteur d'étude provient de l'infiltration des eaux de pluies au droit des affleurements des calcaires oligocènes et de la drainance à partir des nappes sus-jacentes.

Les valeurs de recharge des différentes nappes ont été calculées à partir de la carte de répartition des RFU en Aquitaine au 1/500 000 (Wilbert, 1987) et des moyennes trentenaires des précipitations décennales et des ETP Penman décennales à la station météorologique de Mérignac. La carte ainsi obtenue est une image de type vecteur qui est transformée en image de type raster (sous forme de mailles) à l'aide du logiciel GDM (Fig. 29).

La recharge annuelle nette sur le secteur d'étude varie de 200 à 376 mm. Les recharges les plus faibles sont observées pour les zones de marais (RFU de 140 mm) qui bordent la vallée de la Garonne et de ses affluents. Des valeurs de recharge comprises entre 331 et 370 mm accompagnent les sols argilo-calcaires variés (RFU de 53 mm) présent sur les affleurements calcaires, et les sables noirs de la Lande humide (RFU de 27 mm) qui couvrent toute la partie Ouest du secteur d'étude. Les recharges les plus élevées, supérieures à 375 mm, correspondent aux "Graves" (RFU de 23 mm) qui couvrent une surface parallèle à la Garonne et s'étendant de Jau-Dignac-et-Loirac au Nord à Langon au Sud. Les aires de recharge correspondant aux "Graves" constituent, du fait de l'importance de la lame d'eau infiltrée, des zones privilégiées de contamination des nappes sous-jacentes.

3.3.3. Cartographie du critère pente

Les pentes de la surface topographique du secteur d'étude ont été calculées à partir des données d'altitude du MNT.

Une des particularités morphologiques de la région bordelaise réside en la monotonie de sa topographie plane. Les altitudes passent insensiblement de 90 m à l'Ouest, dans la zone du plateau landais, à 2 m à l'Est, près de la Garonne, avec une pente qui ne dépasse pas 4 % (Fig. 30). Toutefois, les terrasses supérieures et moyennes peuvent présenter localement des pentes légèrement plus élevées (de 6 à 8 %) lorsqu'elles sont entaillées par les affluents de la Garonne. En tenant compte du degré de vulnérabilité, on constate que la quasi-totalité du secteur d'étude présente une pente très faible, ce qui favoriserait le transfert de polluant vers les nappes.

3.3.4. Cartographie du critère nature de la couverture

La nature de la couverture de l'aquifère oligocène a été déterminée à partir de la nature et de l'épaisseur des différentes formations constituant cette couverture : marnes et argiles oligo-miocènes, formations aquifères du Miocène inférieur, formations pliocènes et quaternaires. La notation N de la nature de la couverture (Fig. 31) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$N = \sum_{i=1}^m \frac{N_i \times e_i}{e}$$

où : N_i : notation de la formation i
m : nombre de formations de la couverture à l'endroit considéré
 e_i : épaisseur de la formation i
e : épaisseur totale de la couverture.

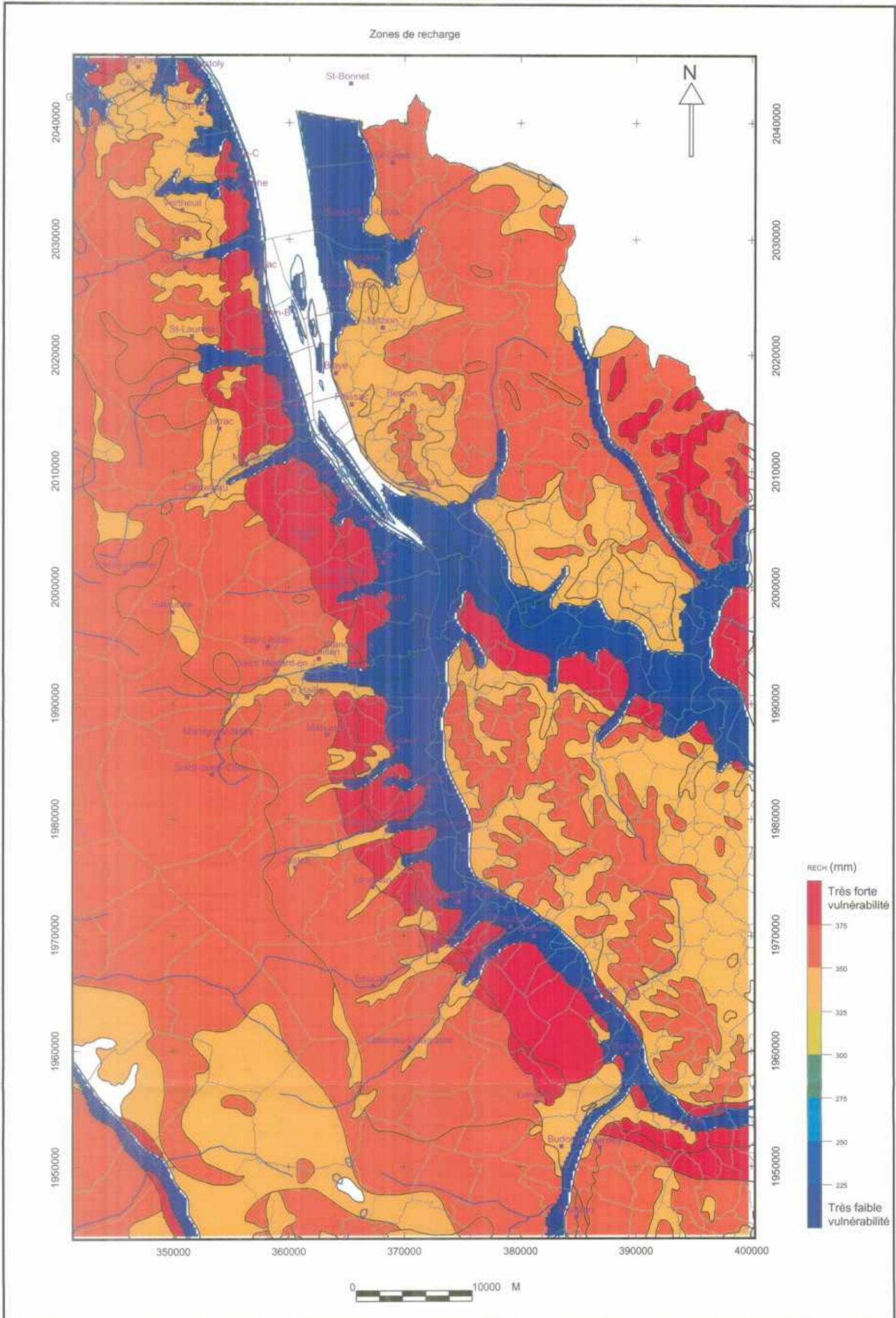


Fig. 29 : Carte de vulnérabilité des nappes oligocène et miocène relative à la recharge

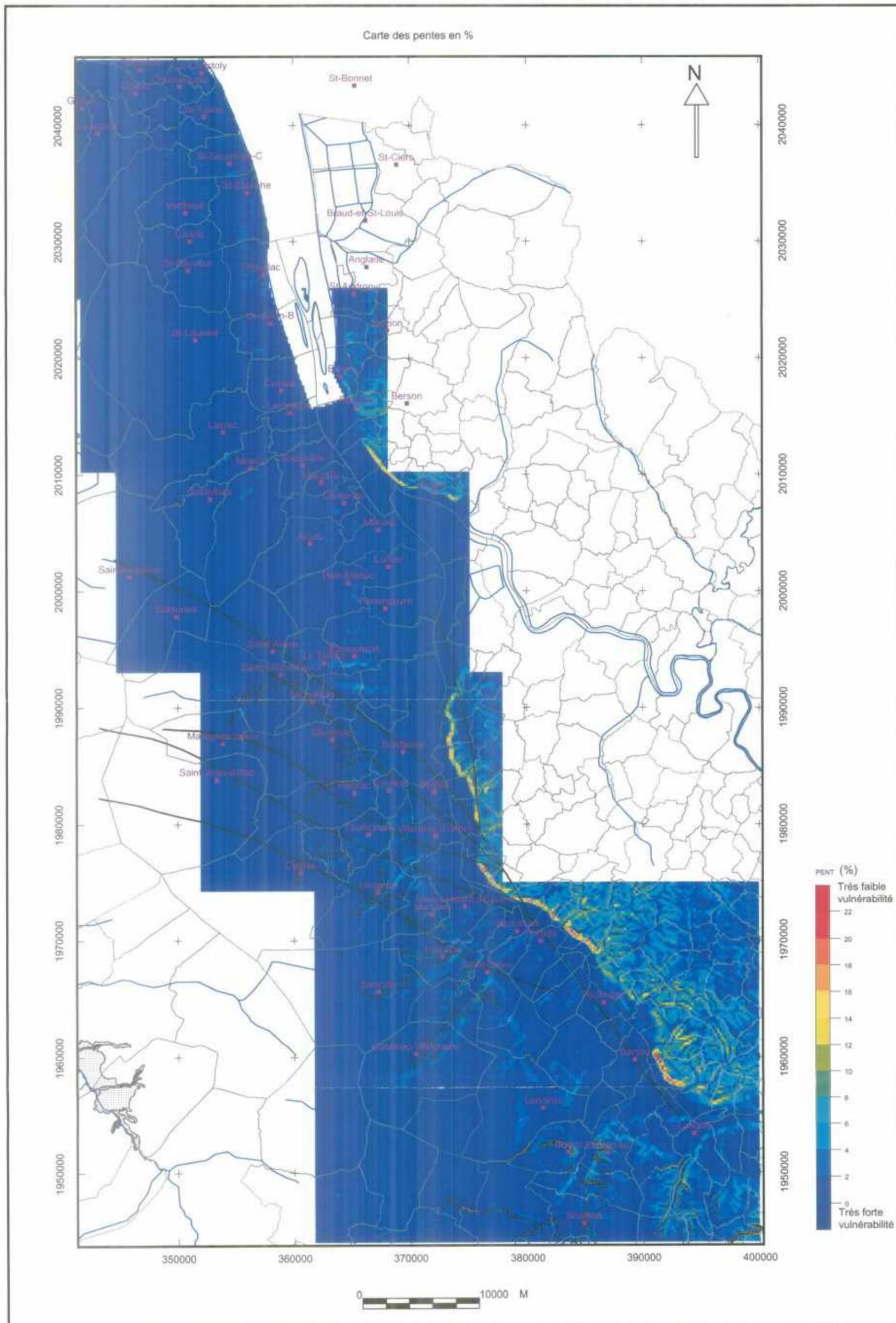


Fig. 30 : Carte de vulnérabilité des nappes oligocène et miocène relative à la topographie (pente de la surface du sol)



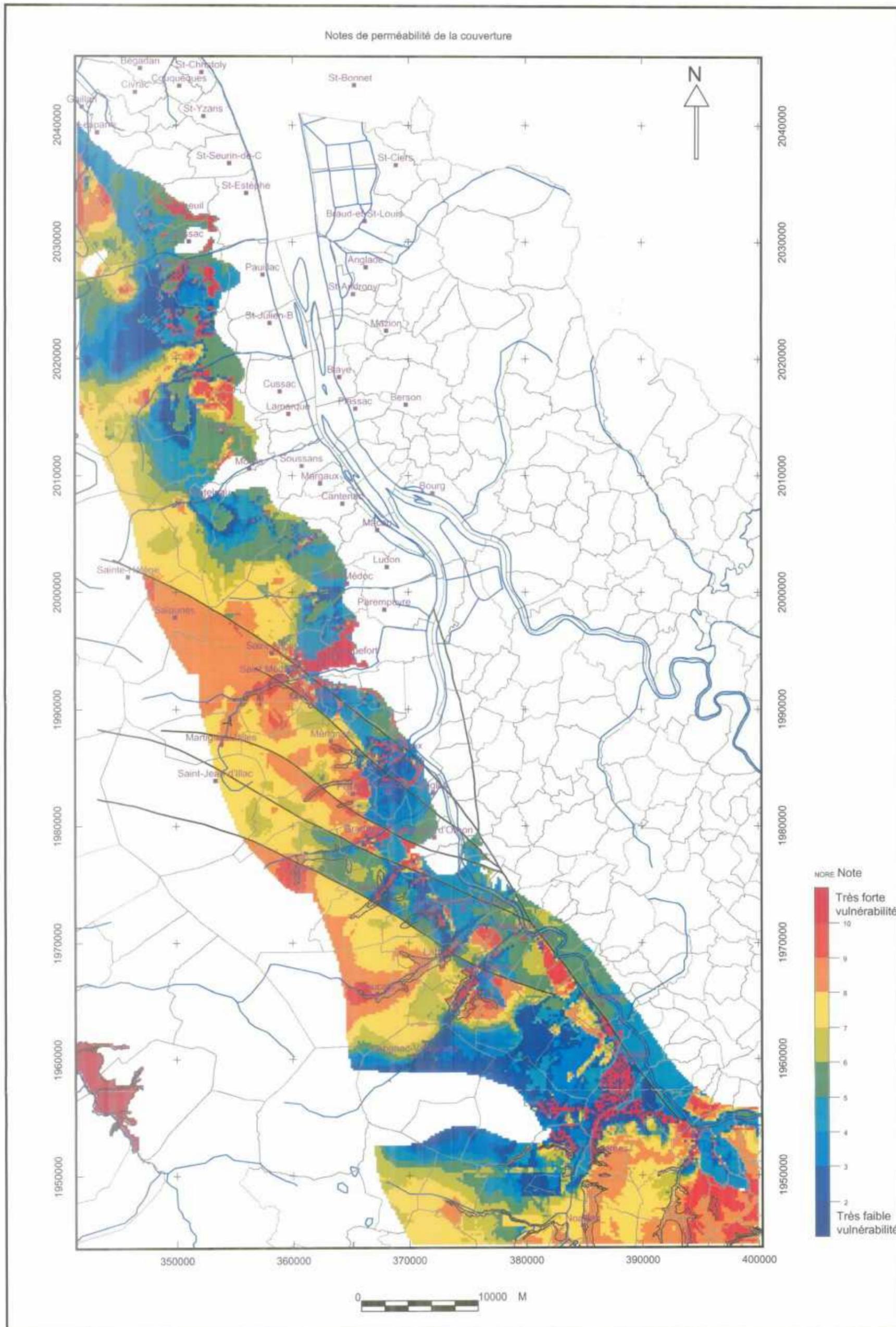


Fig. 31 : Carte de vulnérabilité de la nappe oligocène relative à la nature de la couverture (perméabilité)



Une note de 1 a été attribuée à toute la formation des marnes et argiles oligo-miocènes, correspondant à une situation de très faible vulnérabilité pour la nappe de l'Oligocène, et une note de 10 à l'ensemble des formations aquifères du Miocène inférieur, correspondant à une situation de très forte vulnérabilité. Les notes des formations pliocènes et quaternaires ont été définies à partir de la carte de la nature du recouvrement plio-quaternaire présentée au paragraphe 3.2.1 (**Fig. 9**). Elles sont comprises entre 1 pour les argiles et 7 pour les sables graveleux. Par ailleurs, sur la carte de la nature de la couverture de l'aquifère oligocène présentée **Fig. 31**, les zones d'affleurements oligocènes ont été affectées d'une note de 10.

Le report des notations relatives à la nature de la couverture de l'aquifère oligocène permet de distinguer des zones à différents degrés de vulnérabilité vis-à-vis de ce critère. Ainsi, dans la zone de Saucats (notes de 8 et 9), la forte vulnérabilité est liée à la faible épaisseur des formations du Plio-Quaternaire et de l'imperméable oligo-miocène, et à la présence d'une grande épaisseur de formations aquifères du Miocène (67 m). Au Nord de Cabanac-et-Villagrains, la vulnérabilité moyenne (note de 5 à 8) est fonction de la présence d'environ 9 m de formations plio-quaternaires, 35 m de formations aquifères Miocène et de 7 m de marnes et argiles oligo-miocènes. Au Sud de Budos (note de 3 à 5), la faible vulnérabilité est liée à la présence d'une épente oligo-miocène de plus d'une dizaine de mètres.

3.3.5. Cartographie du critère épaisseur de la couverture

La cartographie de l'épaisseur totale des terrains de recouvrement de l'aquifère oligocène a déjà été présentée au paragraphe 3.2.1 (**Fig. 11**). La puissance de la couverture augmente de l'Est vers l'Ouest, depuis des épaisseurs inférieures à 10 m jusqu'à des épaisseurs de 90 à 110 m dans le secteur de St-Hélène, St-Jean-d'Illac, Saucats, et des épaisseurs très importantes (plus de 160 m) au Sud de Sauternes et de Langon (163 m au sondage pétrolier de Noaillan 1. Les épaisseurs les plus faibles sont observées dans les zones de forte érosion : flanc bordant la vallée de la Garonne, talwegs et autour de l'anticlinal de Villagrains-Landiras et de Listrac.

Contrairement aux autres critères, le domaine de variation du critère épaisseur de la couverture sur le secteur d'étude a été discrétisé non pas en intervalles linéaires mais en intervalles "tassés" permettant de mieux détailler les faibles épaisseurs. Sur une épaisseur de couverture variant de 0 à 160 m, c'est en effet les 20 premiers mètres qui sont essentiels.

3.4. REALISATION DE LA CARTE DE VULNERABILITE FINALE ET INTERPRETATION

3.4.1. Réalisation

Le calcul de la carte de vulnérabilité finale se fait à partir des quatre précédentes correspondant chacune à un des critères choisis pour déterminer la vulnérabilité de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. L'analyse multicritère a été faite avec le logiciel GDM.

Le calcul est effectué maille par maille. Un indice global de vulnérabilité est donc attribué à chaque maille. La gamme de variation de l'indice globale sur le secteur d'étude est de 50 à 125. Cette gamme est divisée en cinq classes égales allant du moins au plus vulnérable. La carte de vulnérabilité finale résultante est présentée **Fig. 32**.

3.4.2. Interprétation

a) Zones à très forte vulnérabilité

Les zones à très fortes vulnérabilité (indice globale supérieur à 110) correspondent :

- Aux zones d'affleurements des calcaires oligocènes, à Langon, Barsac, St-Selve, La Brède, Léognan, Gradignan, Talence, Bordeaux, St-Médard-en-Jalles, Blanquefort, St-Laurent, St-Sauveur et Vertheuil ;
- Aux zones caractérisées par une faible épaisseur du recouvrement de l'aquifère (notamment de l'imperméable oligo-miocène), un faciès de la couverture dominé par des formations perméables (sable graveleux, sable), et une recharge importante. C'est le cas au Sud de Langon, à l'Ouest de Podensac, Portets et Beautiran, à Gradignan, Le Haillan et St-Médard-en-Jalles, au Nord de Lustrac et au Sud de Lesparre.

b) Zones à forte vulnérabilité

Les principales zones à fortes vulnérabilité sont situées au Sud de Langon, à l'Ouest de Podensac et de St-Selve, à Pessac, au Nord de St-Aubin, à Lustrac et à l'Ouest de St-Sauveur. L'indice de vulnérabilité dans ces zones est contrôlé par les mêmes critères que précédemment, sauf pour la nature de la couverture qui est légèrement moins perméable (sable, sable argileux).

c) Zones à moyenne vulnérabilité

Les zones moyennement vulnérables représentent la majorité de la surface du secteur d'étude. Un grand nombre de combinaison entre les quatre critères aboutit à cette classe de vulnérabilité. L'épaisseur de la couverture de l'aquifère, notamment des marnes et argiles oligo-miocènes, est généralement importante (jusqu'à 90 m). La nature de la couverture peut toutefois être perméable, comme à Saucats et Salaunes.

d) Zones à faible vulnérabilité

Les zones à faible vulnérabilité sont principalement localisées à l'Est de Noaillan et au Sud de Martignas et St-Jean-d'Illac. C'est essentiellement l'épaisseur de la couverture de l'aquifère, supérieure à 90 m, qui réduit le degré de vulnérabilité.

3.4.3. Validation

Une première validation de la carte de vulnérabilité finale a été réalisée à partir des analyses de polluants (nitrates) effectuée sur les eaux de la nappe de l'Oligocène.

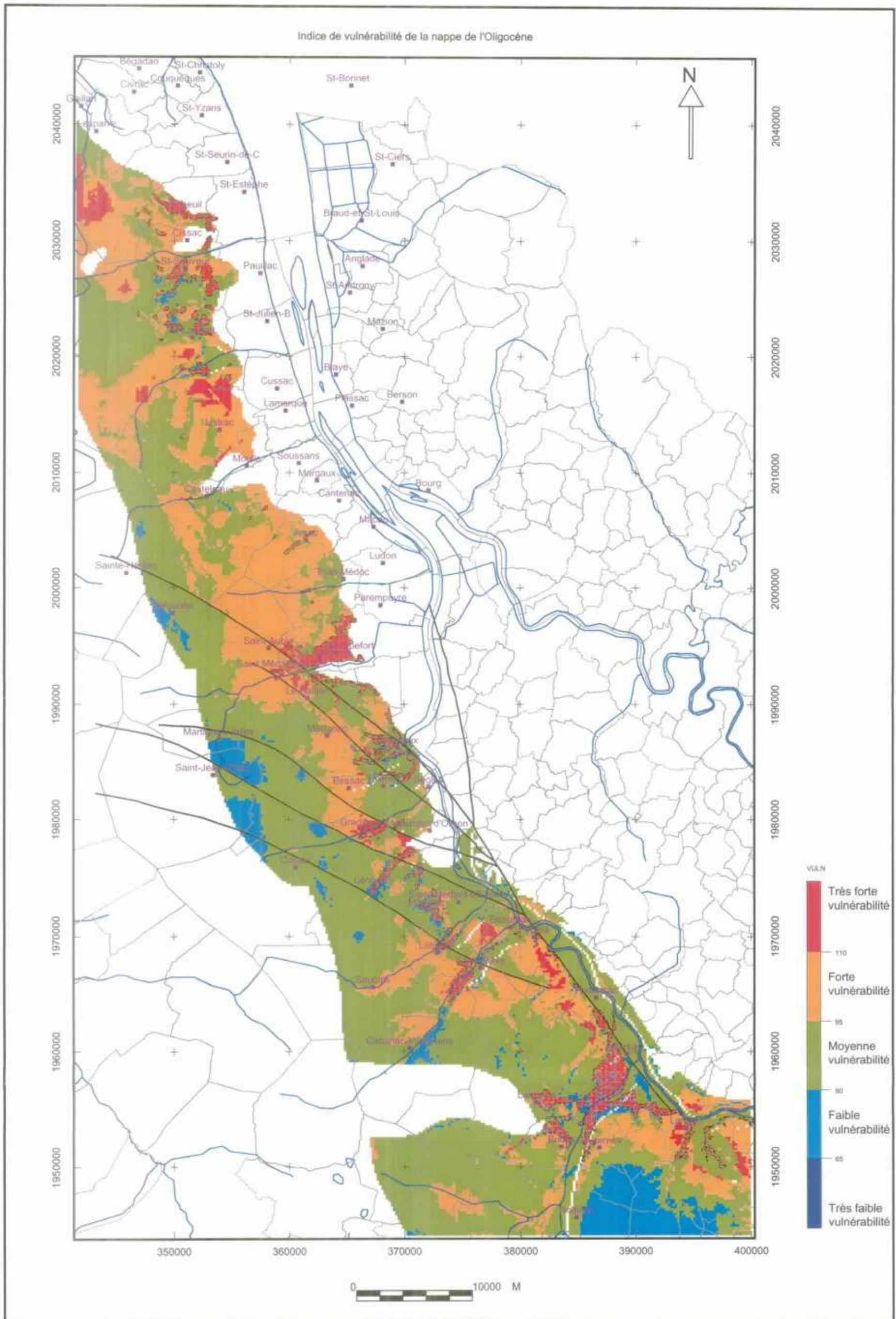


Fig. 32 : Carte de vulnérabilité finale de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise



Les teneurs en nitrates les plus élevées (**Fig. 17**) sont bien observées au droit des zones les plus vulnérables : au Sud de Langon et de Barsac, à l'Ouest de Podensac et de Portets, à Pessac et à l'Est de St-Médard-en-Jalles. La carte de vulnérabilité définit ainsi les zones à protéger en priorité, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif.

4. Conclusions

Face à la dégradation progressive de l'aquifère oligocène dans la région bordelaise, et afin d'assurer la pérennité de cette ressource tant en qualité qu'en quantité, il était devenu important de réaliser une étude sur la vulnérabilité de la nappe, en particulier dans la zone affleurante à sub-affleurante de la rive gauche de la Garonne. L'aquifère est fortement sollicité par pompages dans ce secteur. Ainsi, la nappe s'est fortement abaissée depuis quelques décennies dans la zone sud entre Gradignan et Cabanac. Des risques de dénoyage du réservoir sont à craindre en périodes de pompage intensif. Des pollutions depuis la surface existent localement : des augmentations de la teneur en nitrates ont été par exemple constatées depuis quelques années dans certains captages.

Le programme de cette connaissance était prévu sur deux années dans le cadre des études sectorielles du projet "*Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine*". L'objectif de la **première phase de ce programme** (année 2000) a été de réviser l'ensemble des données géologiques connues, tant à l'affleurement que par les nombreux sondages archivés dans la Banque des Données du Sous-Sol du BRGM Aquitaine, afin d'obtenir une vision modernisée de la **géométrie des formations oligocènes et miocènes**. Elle a permis de mieux connaître les rapports du système aquifère oligocène avec ses épontes inférieure et supérieure et avec les rivières affluentes de la Garonne qui traversent les secteurs d'affleurement.

Au cours de la **deuxième phase du projet**, la révision des données géologiques s'est poursuivie, portant plus particulièrement sur la détermination de la nature lithologique et de l'épaisseur du recouvrement de l'aquifère oligocène. Ce sont surtout les **données hydrogéologiques et hydrochimiques sur l'aquifère qui ont été structurées** à partir de campagnes de recensement et de caractérisation des exutoires de la nappe (sources) et d'une étude des relations nappe - ruisseaux.

L'étude des émergences de la nappe de l'Oligocène permet d'accéder de façon aisée à la partie libre de la nappe, qui est à priori la plus vulnérable. Pendant la phase 2, 120 sources alimentées par la nappe oligocène ont été recensées et caractérisées sur le plan quantitatif (jaugeages des débits d'écoulement) et qualitatif (analyses physico-chimiques de l'eau). Dans certaines zones du secteur d'étude (Sud de Langon et de Barsac, Ouest de Podensac et de Portets, à Pessac et St-Médard-en-Jalles), la qualité des eaux des sources oligocènes est dégradée par des teneurs en nitrates élevées. Ceci confirme les indices de pollution mis en évidence depuis plusieurs années dans les forages captant la nappe de l'Oligocène.

Les jaugeages sériés et les traçages effectués sur les ruisseaux de la région bordelaise (Monastère, Jalle de St-Médard, Saucats) lors d'études de protection de champ captant de la nappe oligocène montrent dans certaines zones une alimentation de la nappe par les ruisseaux. Ce type d'alimentation entraîne fréquemment une dégradation de la qualité de l'eau de la nappe (cas de la zone de La Brède).

Ces études géologiques et hydrogéologiques ont abouti à la **réalisation d'une carte de vulnérabilité de la nappe Oligocène à la pollution** en rive gauche de la Garonne. La

vulnérabilité est définie ici comme la vulnérabilité intrinsèque, qui est fonction uniquement des caractéristiques physiques de l'aquifère et des dépôts géologiques et du sol sus-jacent. Cette vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme "immuable" dans le temps, le type et l'intensité des activités humaines au droit de l'aquifère oligocène, qui sont susceptibles d'évoluer dans le temps, n'étant pas pris en compte.

Quatre critères physiques de vulnérabilité ont été utilisés pour la détermination de la vulnérabilité de la nappe oligocène : la recharge annuelle nette, la topographie (pente de la surface du sol), **la nature de la couverture surmontant l'aquifère oligocène et l'épaisseur de cette couverture**. Une carte de vulnérabilité relative à chacun de ces critères a été réalisée sur le secteur d'étude. La carte de vulnérabilité finale est obtenue par combinaison de ces différentes cartes, selon un modèle additif de notations et de coefficients de pondération accordés aux différents critères.

L'analyse de la carte de vulnérabilité ainsi établie permet de distinguer sur le secteur d'étude **quatre classes à degré de vulnérabilité différent**, allant d'une faible vulnérabilité à une très forte vulnérabilité. Les zones à faible vulnérabilité sont principalement localisées à l'Est de Noaillan et au Sud de Martignas et St-Jean-d'Illac. C'est essentiellement l'épaisseur de la couverture de l'aquifère, supérieure à 90 m, qui réduit le degré de vulnérabilité. **Les zones à très forte vulnérabilité** correspondent :

- aux zones d'affleurements des calcaires oligocènes, à Langon, Barsac, St-Selve, La Brède, Léognan, Gradignan, Talence, Bordeaux, St-Médard-en-Jalles, Blanquefort, St-Laurent, St-Sauveur et Vertheuil ;
- aux zones caractérisées par une faible épaisseur du recouvrement de l'aquifère (notamment de l'imperméable oligo-miocène), un faciès de la couverture dominé par des formations perméables (sable graveleux, sable), et une recharge importante. C'est le cas au Sud de Langon, à l'Ouest de Podensac, Portets et Beautiran, à Gradignan, Le Haillan et St-Médard-en-Jalles, au Nord de Listrac et au Sud de Lesparre.

Une première validation de la carte de vulnérabilité finale a été réalisée à partir des analyses de polluants (nitrates) effectuée sur les eaux de la nappe de l'Oligocène. Les teneurs en nitrates les plus élevées sont bien observées au droit des zones les plus vulnérables. La carte de vulnérabilité définit ainsi les zones à protéger en priorité, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif. Elle constitue un **document d'aide à la décision indispensable pour la gestion de la ressource en eau et l'aménagement du territoire**.

Ce document n'est cependant pas figé. Il peut être amené à évoluer en fonction des éléments apportés par des études ultérieures, en particulier des études locales très précises (cas des relations nappe-ruisseaux). Dans ces conditions, et compte tenu de l'échelle de travail utilisée (maille de 200 m x 200 m), la carte de vulnérabilité finale a une vocation synthétique. Elle donne les grandes orientations à retenir, mais ne constitue pas un document permettant la détermination de l'emplacement définitif d'aménagement ou de périmètre de protection sans une étude locale détaillée.

5. Bibliographie

Adams B. et Foster S.S.D., 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal Institution of Water Environmental Management*, **6**, 612-320.

Albinet M., 1970. Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Orléans, France, Bull. BRGM, 2^{ème} série, section 3, **4**.

Albinet M. et Margat J., 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Orléans, France, Bull. BRGM, 2^{ème} série, section 3, **4**, 13-22.

Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. et Hackett G. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings*. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 pp.

Barrocu G. et Biallo G., 1993. *Application of GIS for aquifer vulnerability evaluation*. Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. IAHS Publication, **211**.

Benacchio S. et al., 1988. *Difesa degli acquiferi dell'alta pianura veneta, stato di inquinamento e vulnerabilità delle acque sotterranee del bacino del Brenta*, Vol. 5 : *Vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei all'inquinamento*, Monography GNDCI-CNR Venice, n. 207, 21 p.

Blanchard F., 1993. *Cartes de vulnérabilité de Lifou et Mare (Nouvelle Calédonie) au 1/50 000*. BRGM.

Braux C., 1996. *Cartographie multicritère : guide méthodologique*. Rapport BRGM R 39146, 69 p.

Civita M., 1990. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Assessment of aquifer vulnerability to contamination). *Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Technologie e Obiettivi*, Marano sul Panaro, **3**, 39-86.

Doerfliger N., 1996. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping*. Thèse 3^{ème} cycle, Université de Neuchâtel, Suisse, 292 p.

Doerfliger N., Zwahlen F., Meylan B., Tripet J.P. et Wildberger A., 1997. Vulnérabilité des captages en milieu karstique. Nouvelle méthode de délimitation des zones de protection – méthode multicritère EPIK. *Gas Wasser Abwasser*, **77** (5), 295-302.

Foster S.S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, RIVM, TNO Committee on Hydrological Research*, 69-86.

Gogu R.C. et Dassargues A., 1998. A short overview on groundwater vulnerability assessment (basic statements for use in the framework of the COST 620 Action). *Workshop: Vulnérabilité et protection des eaux karstiques*, Neufchâtel (Suisse).

Gogu R.C. et Dassargues A., 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39 (6), 549-559.

Golwer A., 1983. *Underground purification capacity.* In *Ground water in water resources planning*, Proc. UNESCO Intl. Symp., Koblenz, Germany, Aug. 28-Sept. 3, 1983, UNESCO/IAH/IAHS, National Committee of the Federal Republic of Germany for the IHP, II, 1063-1072.

Jamen A.S. 1994. *Applicabilité d'une méthode d'analyse multicritère à 4 domaines de l'environnement.* Rapport ANTEA A 02190, 51 p.

Lallemand-Barrès A., 1994. *Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions.* Rapport BRGM R37929, 15 p.

Landreau A., 1996. *Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines.* Rapport BRGM R38846, 28 p.

LARAG, 1993. *Champ captant du Thil et de Gamarde – Bassin versant du Monastère. Recueil des données piézométriques de 1990 à août 1993.* Rapport Université Bordeaux 1.

LARAG et SAFEGE, 1994. *Etude de vulnérabilité de l'aquifère stampien – Secteur de La Brède.* Rapport LARAG-SAFEGE, 63 p.

Lodwick W.A., Monson W. et Svoboda L., 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 (4), 413-428

Lyakhloufi S., Er-Rouane S., Ouazzani N; et El Hebil A.E., 1999. Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech (Maroc). *Hydrogéologie*, 3, 43-52.

Margat J., 1968. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Bases de la cartographie*, (Doc.) BRGM, 69 SGL 198 HYD, Orléans, France.

Margat J. et Monition L., 1970. *Qualité des eaux. Pollutions.* Bull. BRGM, 2^{ème} série, section 3, 4.

Napolitano P. et Fabbri A.G., 1996. *Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS.* HydroGIS 96: application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. IAHS Publ., 559-566.

Olmer M. et Rezác B., 1974. *Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale 1:200 000.* Intl. Assoc. Hydrogeologists, Mémoires, Tome X, Congrès de Montpellier, 1. Communications, 105-107.

Pernel F., 1992. *Risque de pollution des eaux souterraines par les transports routiers. 2^{ème} phase : cartographie multicritère.* Rapport NRG M R35516.

Petelet-Giraud E., Doerfliger N. et Crochet P., 2000. *RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques – Outil de gestion adressé aux décideurs de l'aménagement du territoire.* Rapport ANTEA, 102 p.

Platel J.P., Schnebelen N., Le Nindre Y. et Sourisseau B., 2000. *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 4. Opération sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Synthèse des connaissances géologiques – Etat des connaissances hydrogéologiques.* Rapport BRGM/RP-50468-FR, 71 p.

Ricour J., 1988. *Elaboration des cartes de vulnérabilité, de sensibilité à la pollution de la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais) à l'aide du logiciel Synergis.* Rapport BRGM 88 NPC 101.

Ricour J., 1991. *Risque de pollution des eaux souterraines par les transports routiers. 1^{ère} phase : définition des concepts et choix des paramètres à prendre en compte dans un traitement cartographique multicritère.* Rapport BRGM R33219 NPC 4S 91.

SAFEGE, 1996a. *Protection du champ captant Thil-Gamarde. Traçage du Monastère.* Rapport SAFEGE MM/LH/F212, 15 p.

SAFEGE, 1996b. *Etude hydrogéologique et définition des potentialités aquifères des champs captants de Thil-Gamarde, Bussac-Moulinat, Cantinolle.* Rapport SAFEGE MM/LH/D258, 130 p.

Schnebelen N., Mauroux B., Seguin J.J. et Dubreuilh J., 2001. *Contrôle qualité et gestion des nappes d'eau souterraine en Gironde – Etat des connaissances à fin 2000.* Rapport BRGM/RP-51307-FR, 96 p et figures.

Sotorníková R. et Vrba J. 1987. *Some remarks on the concept of vulnerability maps.* In van Duijvenbooden W. et van Waegeningh H.G. (Ed.), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, TNO Committee on Hydrological Research, La Haye, Proceedings and Information, **38**, 471-476.

Suais M.F., Vinatier J.M. et Barat A., 1990. *Vulnérabilité des aquifères. Recherche de critères cartographiques pertinents.* Rapport BRGM R30890 RHA 4S 90.

Van Stempvoort D., Evert L. et Wassenaar, 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, **18**, 25-37.

Villumsen A. Jacobsen O.S. et Sonderskov C., 1983. *Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution.* Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen, 17-38.

Vrána M., 1984. *Methodology for construction of groundwater protection maps.* (Lecture for UNESCO/UNEP Project PLCE-3/29, Moscou, Sept. 1981). In Kozlovsky E.A. (Ed.), *Hydrogeological principles of groundwater protection*, UNSECO/UNEP, Moscou, **1**, 147-149.

Vrba J., 1991. *Mapping of groundwater vulnerability.* Intl. Assoc. Of Hydrogeologists, Ground water protection commission, FL, USA, 35 p.

Vrba J. et Civita M., 1994. *Assessment of groundwater vulnerability.* In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, **16**, 31-48.

Wilbert, 1987. *La Pédologie en Aquitaine – Cartographie et inventaire.* Cartes et documents du CRAA – INRA – Ministère de l'Agriculture.

Zaporozec A. (Ed.), 1985. *Groundwater protection principles and alternatives for Rock County, Wisconsin.* Wis. Geological and Natural History Survey, Madison, WI, Special Report 8, 73 p.

Zaporozec A., 1994. *Concept of groundwater vulnerability.* In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, **16**, 3-7.

Zaporozec A. et Vrba J., 1994a. *Executive summary.* In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, **16**, xv-xxiii.

Zaporozec A. et Vrba J., 1994b. *Classification and review of groundwater vulnerability maps.* In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, **16**, 21-29.