

DOCUMENT PUBLIC

Les aquifères littoraux de France métropolitaine

Etude réalisée dans le cadre des actions de service public du BRGM 94-D-124

décembre 1996
R 39298

Mots clés : Eau, Littoral, Synthèse, Biseau salé.

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

PETIT V. (1996) - avec la collaboration pour les synthèses régionales : Caous JY. (Nord-Pas-de-Calais), Czernichowski I. (Picardie), de La Quèrièrè P. (Haute-Normandie), Mazenc B. (Basse-Normandie), Talbo H. (Bretagne), Duermael G. (Poitou-Charentes), Sourisseau B. (Aquitaine), Bérard P. (Languedoc-Roussillon), Bel F. (Provence-Côte-d'Azur). Les aquifères littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM R 39298. 120 p. 36 figures, 1 annexe.

© BRGM, 1996, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

On dénombre, en France métropolitaine, sur les 5 500 km de côte, 95 aquifères superficiels et 17 aquifères profonds. Ces aquifères littoraux ont une importance très forte pour l'activité et pour l'environnement. Leurs ressources doivent satisfaire des besoins concurrentiels.

La zone littorale est le point de rencontre entre deux types d'eau souterraine : l'eau douce des nappes du continent, et l'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage de la côte. Les conditions de prélèvement sont donc particulières si on souhaite maintenir la qualité chimique (eau douce) de l'aquifère car on risque de provoquer une avancée des eaux salées vers l'intérieur des terres, ou même une remontée de l'interface eau douce/eau salée à l'aplomb du forage en exploitation.

L'inventaire et la description des aquifères littoraux en France a conduit à distinguer les types de nappe suivants :

- *Les nappes superficielles sédimentaires.* Elles sont généralement particulièrement vulnérables en cas de surexploitation.
- *Les nappes profondes.* Bien que généralement, il n'y ait pas de contact direct entre les eaux de la nappe et la mer, l'eau salée peut provenir par drainance des aquifères supérieurs de moins bonne qualité chimique, ou par des forages mal conçus ou en mauvais état qui mettent en communication plusieurs aquifères.
- *Les nappes karstiques.* Le fonctionnement de leur exutoire en mer, ou dans des zones lagunaires, est souvent extrêmement complexe. Les zones d'intrusion se délimitent difficilement, peuvent varier très rapidement dans le temps et l'espace.
- *Les nappes en milieu fissuré.* L'invasion saline peut se produire par les mêmes phénomènes hydrauliques, mais sur une moins grande extension à cause de la compartimentation d'aquifères de ce type ; dans ce cas, le problème de recherche de substitution reste posé, et devra être trouvé sur un aquifère indépendant du premier.

La salinité dans les aquifères côtiers peut être naturelle. C'est le cas dans le Nord-Pas-de-Calais et en Picardie dans des zones de très faible altitude, en Bretagne pour des eaux fossiles, sur l'île de Noirmoutier, en Languedoc-Roussillon dans les aquifères superficiels, dans des sources karstiques et en Camargue. Les conséquences sont limitées : soit d'autres ressources sont proches, soit les aquifères sont peu productifs, soit les économies locales se sont adaptées.

Lorsqu'elle est d'origine anthropique, la surexploitation des aquifères est la principale raison de la salinité. En France, nous avons recensés des secteurs :

- Avec une extension généralisée des venues d'eau salée (zones d'estuaire en Haute-Normandie par exemple).
- Avec invasions d'eau salée limitées et stables (plaines alluviales du littoral méditerranéen).
- Avec invasions d'eau salée saisonnières et réversibles (dans les départements du Calvados et de la Manche et aussi dans la nappe du Lias et du Dogger à proximité du marais poitevin).
- Avec une invasion saline localisée (sur le littoral et sur certaines plaines alluviales de Méditerranée et en Bretagne).

En revanche, il n'y a pas (pour le moment, en 1996) de vastes étendues d'aquifères atteintes par des venues d'eau salée, comme c'est le cas sur le littoral méditerranéen de l'Espagne.

Lorsque la salinité est d'origine anthropique, les conséquences ne sont pas négligeables, et consistent en : mise en place d'activités adaptées ou utilisant l'eau salée (aquaculture), diminution ou arrêt des prélèvements, mise en place de dispositifs de protection, organisation de la gestion de l'aquifère, fermeture correcte de forages en mauvais état. Dans certains cas, les conséquences sur l'alimentation en eau potable pourront être fortes car les ressources de substitution possible sont de mauvaise qualité (cas de la Bretagne où, souvent, les teneurs en nitrates sont élevées dans les eaux de surface).

Les résultats de la synthèse des aquifères littoraux permettent de formuler des recommandations sur leur gestion. Celle-ci doit pouvoir s'appuyer sur une bonne connaissance du contexte naturel : reconnaissances, mesures suffisantes pour appréhender correctement les phénomènes du biseau salé. Compte-tenu des risques, on doit pouvoir orienter les choix et décider en connaissance de cause.

La gestion des aquifères littoraux doit s'inspirer fortement des principes énoncés dans la loi sur l'eau : solidarité de bassin hydrographique, concertation et partenariat, gestion intégrée des milieux aquatiques, planification par des structures de type SAGE.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Service public du BRGM, à la demande du Ministère de l'Environnement.

Sommaire

Présentation globale des nappes littorales	11
1.1. Cadre naturel	11
1.2. Enjeux des aquifères littoraux.....	11
1.3. Particularités des aquifères littoraux	14
1.4. Problématique des prélèvements.....	19
1.5. Méthodes de localisation du biseau salé.....	20
I- Première partie. Caractéristiques locales des aquifères littoraux	
I-1. Les aquifères littoraux de la région Nord-Pas-de-Calais	23
I-1.1. Secteur méridional	23
I-1.2. Secteur médian.....	25
I-1.3. Secteur septentrional.....	25
I-1.4. Conclusion	25
I-2. Les aquifères littoraux dans la région Picardie	27
I-2.1. Description générale des aquifères	27
I-2.2. Etat des aquifères en bordure littorale	27
I-2.3. Conclusion.....	29
I-3. Les aquifères littoraux en Haute-Normandie	31
I-3.1. Description générale des aquifères	31
I-3.2. Etat des aquifères en bordure littorale	31
I-3.3. Exploitation à Yport.....	33
I-3.4. Conclusion.....	33
I-4. Aquifères littoraux de Basse-Normandie	35
I-4.1. Principaux réservoirs aquifères	35
I-4.2. Département du Calvados	36
I-4.3. Département de la Manche.....	38
I-4.4. Conclusion.....	38
I-5. Les aquifères littoraux en région Bretagne	41
I-5.1. Les chlorures en Bretagne	42
I-5.1.1. A proximité du littoral	42
I-5.1.2. Eaux fossiles.....	42
I-5.1.3. Effet des pompages sur les concentrations en chlorure	46
I-5.2. Vulnérabilité des aquifères littoraux.....	47

I-5.2.1. Sensibilité intrinsèque	47
I-5.2.2. Vulnérabilité anthropique.....	49
I-6. Les aquifères littoraux des pays de Loire	51
I-6.1. Les aquifères côtiers de faible extension de la région	51
I-6.2. Ile de Noirmoutier.....	51
I-6.3. Aspects économiques et gestion	55
I-6.4. Aquifères du Jurassique (Dogger et Lias).....	55
I-6.5. Le biseau salé dans les aquifères du Jurassique.....	56
I-6.6. Les risques d'invasion saline	59
I-6.7. Mesure de protection.....	59
I-7. Les aquifères littoraux de la Côte Aquitaine	61
I-7.1. Cadre général.....	61
I-7.2. Systèmes aquifères littoraux.....	61
I-7.3. Les pompages dans la Gironde.....	65
I-7.4. SDAGE Adour-Garonne	65
I-7.5. Conclusion.....	67
I-8. Les aquifères littoraux du Languedoc Roussillon	69
I-8.1. Description générale des aquifères	69
I-8.2. Les nappes alluviales.....	69
I-8.3. Les aquifères profonds	76
I-8.4. Les aquifères karstiques	80
I-8.5. Conclusion.....	86
I-9. Les aquifères littoraux en Provence Côte d'Azur.....	89
I-9.1. Description générale des aquifères	89
I-9.2. Etat des aquifères en bordure littorale	89
I-9.3. Conclusion.....	92
I-10. Aquifères littoraux en Corse	93
I-10.1. Contexte géologique général	93
I-10.2. Contexte hydrogéologique général	93
I-10.3. Etat des aquifères en bordure littorale	94
II- Deuxième partie. Synthèse nationale	
II-1. Typologie des aquifères	99
II-1.1. Les nappes superficielles sédimentaires	99
II-1.2. Les nappes profondes.....	99

II-1.3. Le karst.....	100
II-1.4. Le milieu fissuré.....	100
II-2. Inventaire des cas et des conséquences remarquables au niveau national	101
II-2.1. Cas de salinité d'origine naturelle.....	101
II-2.1.1. Inventaire	101
II-2.1.2. Conséquences	102
II-2.2. Cas de salinité d'origine anthropique.....	102
II-2.2.1. Inventaire	102
II-2.2.2. Conséquence.....	105
II-2.3. Résumé des conséquences.....	106
III- Troisième partie. Recommandations pour la gestion des aquifères littoraux	107
III-1. Objectifs	109
III-2. Recommandations.....	111
Bibliographie	113

Annexe 1 - Région Nord-Pas-de-Calais, coupes hydrogéologiques

Liste des figures

- 1 - Aquifères superficiels de France ayant une façade littorale
- 2 - Aquifères profonds de France ayant une façade littorale
- 3 - Zones humides remarquables
- 4 - Schéma des écoulements souterrains en bordure de mer
- 5 - Représentation du principe de Ghijben-Herzberg
- 6 - Représentation selon les modèle de Hubbert et de Glover
- 7 - Typologie des biseaux salés
- 8 - Exploitation des aquifères littoraux
- I.1 - Nord-Pas-de-Calais, plan de situation
- I.2 - Picardie, schéma de position des différentes nappes du littoral
- I.3 - Haute-Normandie, plan de situation
- I.4 - Département du Calvados, position des ouvrages
- I.5 - Département de la Manche, région de Créance-Lessay et situation des zones de prospection.
- I.6 - Bretagne, site de Loc Maria
- I.7 - Bretagne, localisation des exemples
- I.8 - Bretagne, site de Raden
- I.9 - Forage F5 de Plougerneau : évolution des concentrations en chlorures dans l'eau
- I.10 - Bretagne, sensibilité des aquifères au risque d'invasion salée et vulnérabilité anthropique
- I.11 - Pays de Loire, aquifères côtiers
- I.12 - Vendée, coupe géologique synthétique du sous-sol de l'île de Nourmoutier
- I.13 - Vendée, fonctionnement schématique du système hydraulique nappe-marais
- I.14 - Pays de Loire, schéma représentant les nappes du Lias inférieur et du Dogger
- I.15 - Aquitaine, principaux systèmes aquifères captifs
- I.16 - Aquitaine, coupe géologique schématique le long du littoral atlantique des Pyrénées à l'estuaire
- I.17 - Aquitaine, nappe de l'Eocène moyen. Carte piézométrique (1990)
- I.18 - Photographie de la qualité des eaux brutes des nappes de la région Languedoc-Roussillon (Sud)
- I.19 - Photographie de la qualité des eaux brutes des nappes de la région Languedoc-Roussillon (Centre)
- I.20 - Photographie de la qualité des eaux brutes des nappes de la région Languedoc-Roussillon (Est)
- I.21 - Languedoc-Roussillon, coupe géologique le long de la vallée de l'Hérault
- I.22 - Languedoc-Roussillon, nappe des sables de l'Astien : évolution piézométrique à Valras
- I.23 - Languedoc-Roussillon, bassin de Thau et de Vic. Plan de localisation
- I.24 - Languedoc-Roussillon, système hydrominéral et thermal au Nord-Ouest du Bassin de Thau
- I.25 - Provence-Côte d'Azur, carte des aquifères littoraux
- I.26 - Provence-Côte d'Azur, coupe schématique de la galerie de Port-Miou
- I.27 - Corse, état de la qualité des eaux souterraines en bordure littorale
- II-1 - Contexte global des aquifères en bordure littorale vis-à-vis de la ressource en eau

1. Présentation globale des nappes littorales

L'espace littoral attire de nombreuses activités (agricoles, touristiques, industrielles,...). Il s'ensuit que ce sont des zones à plus forte densité de population que le reste de la France et sur lesquelles les besoins en eau sont élevés. Les aquifères littoraux participent fortement au maintien de ces activités, mais leur exploitation est soumise à des contraintes supplémentaires et particulières du fait de la présence de la mer.

Avant de dresser un inventaire des aquifères littoraux en France, comportant des exemples concrets de conséquences dues à la proximité de la mer, nous présentons quelques généralités sur le cadre naturel, les enjeux, les particularités hydrauliques des aquifères littoraux et la problématique des prélèvements qui en découle.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Service public du BRGM, à la demande du Ministère de l'Environnement.

1.1. CADRE NATUREL

Les milieux souterrains, en bordure littorale comme ailleurs, peuvent être représentés par des terrains aquifères. Ils ne présentent pas de géologie particulière car tous les terrains peuvent, au gré de l'évolution du trait de côte et de la surrection des continents, se trouver placés en bordure de mer. Toutefois, il est fréquent que des plaines alluviales et/ou des cordons dunaires s'interposent entre les aquifères ordinaires et la mer. Par ailleurs, des zones basses des marais ou lagunes, souvent liés aux estuaires des fleuves provoquent l'interpénétration de l'eau de mer, ou d'eau saumâtre, à l'intérieur des terres (marais vendéen, Charente, Camargue, littoral languedocien).

Considérant la France métropolitaine, sur les 5 500 km de côte, on dénombre (fig. 1 et fig. 2) :

- 95 aquifères superficiels littoraux de 25 à 3 200 km² ;
- 17 aquifères profonds de 175 à 130 000 km².

L'extension des aquifères superficiels est en moyenne plus élevée sur la façade atlantique que sur la façade méditerranéenne et sur celle de la mer du Nord. Les aquifères profonds sont essentiellement ceux des bassins sédimentaires du Bassin Parisien et du Bassin Aquitain, auxquels se rajoutent sur la façade méditerranéenne ceux des plaines du Roussillon et des sables astiens.

1.2. ENJEUX DES AQUIFERES LITTORAUX

Dans l'ensemble, les ressources en eaux souterraines sur la bordure littorale sont fortement sollicitées par des usages concurrentiels :

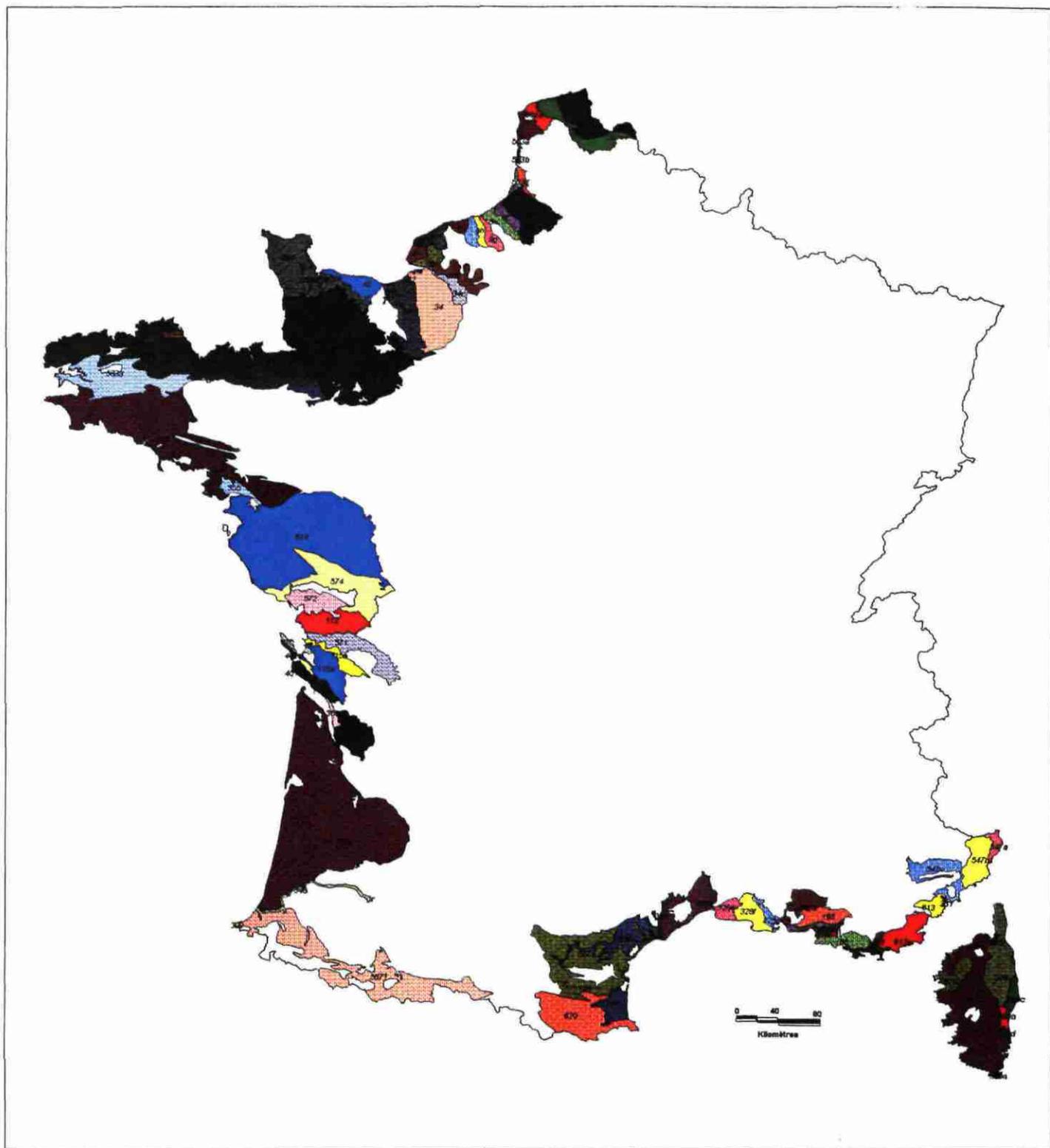


Fig. 1 - Aquifères superficiels de France ayant une façade littorale

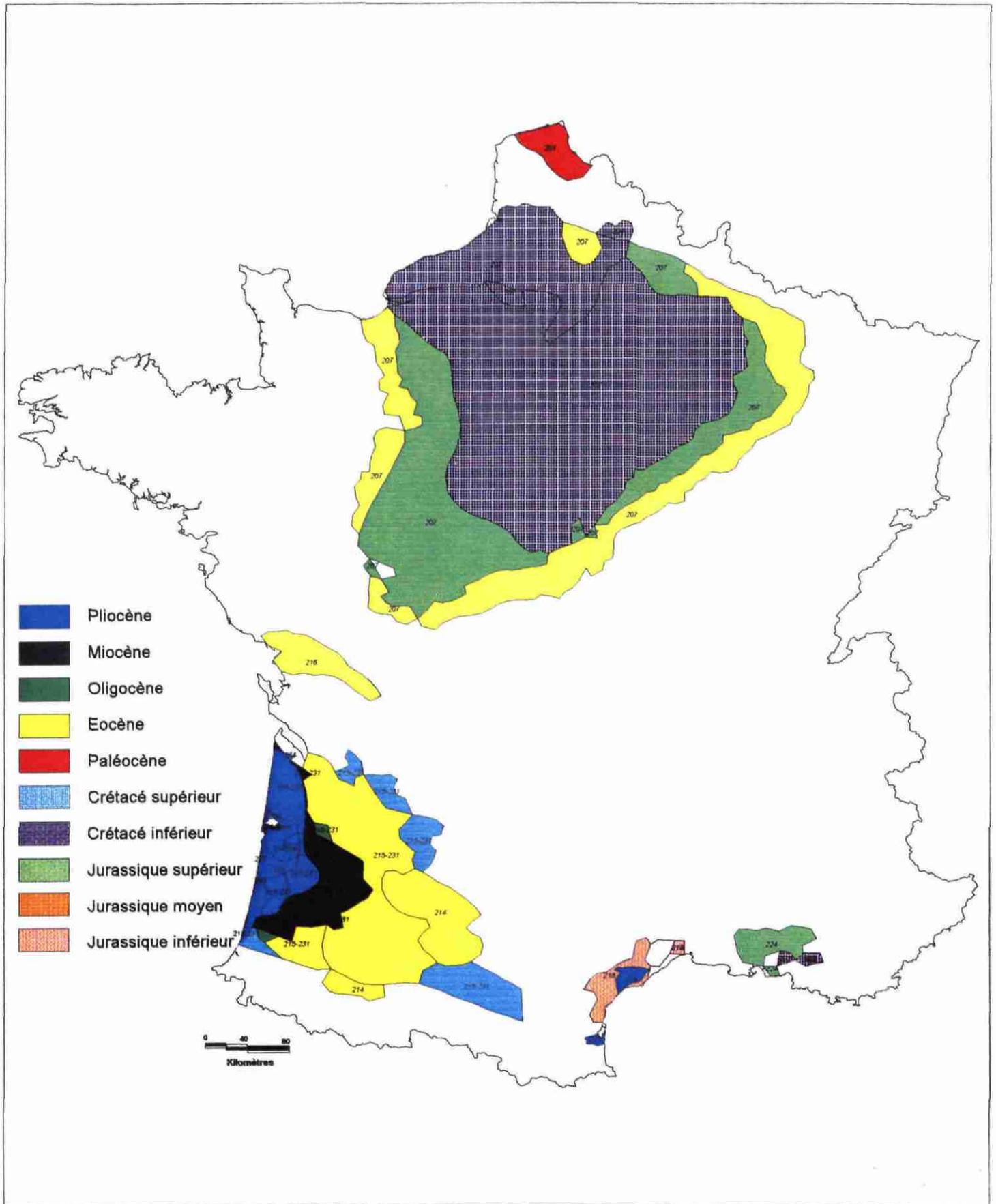


Fig. 2 - Aquifères profonds de France ayant une façade littorale

- la pression anthropique est plus forte. Les communes littorales regroupaient en 1990, 5,6 millions d'habitants sur 4 % du territoire, soit une densité moyenne de 257 hab/km² (2,5 fois la moyenne nationale). En été, la population locale est multipliée par 2, 3 ;
- le long du littoral, souvent existent des plaines littorales fertiles, propices aux cultures maraîchères et horticoles, avec un climat plus clément que celui qui règne à l'intérieur des terres (Roussillon, Var). Ces zones sont souvent irriguées ;
- l'économie portuaire a attiré des industries lourdes consommatrices d'eau (Dunkerque, Basse-Seine, Saint-Nazaire, Gironde, Fos-sur-Mer).

De plus, l'accès à l'eau souterraine est souvent facile, la mer et l'océan représentant le niveau de base (nappe peu profonde, en terrain meuble et plat) et l'eau de surface est souvent dégradée. Ainsi, sont réunis plusieurs facteurs conduisant à une exploitation intensive et parfois à la surexploitation. Or, le maintien de la qualité chimique des eaux des nappes littorales exige généralement que les prélèvements soient correctement gérés : limitation des débits et des rabattements, répartition et implantation des forages...

Les aquifères littoraux ont aussi un rôle important dans la préservation de l'environnement vis-à-vis des zones humides dont une grande partie se situe en bordure littorale (fig. 3) et qui sont souvent dépendantes d'exutoires de nappes.

Les aquifères littoraux ont donc une importance très forte pour l'activité, pour l'environnement. Leur exploitation est soumise à des règles. Leurs ressources doivent satisfaire des besoins concurrentiels.

1.3. PARTICULARITES DES AQUIFERES LITTORAUX

La présence de la mer induit des caractéristiques particulières des aquifères sur le plan hydraulique et chimique.

Le niveau d'eau de la mer constitue un niveau de base hydraulique auquel se raccordent les niveaux d'eau des nappes des aquifères superficiels. Les fluctuations des marées, dans les mers où celles-ci sont notables, se propagent parfois assez loin dans les terres. Ces oscillations biquotidiennes demeurent centrées sur un niveau moyen. C'est une variation de pression qui ne correspond pas à un transfert d'eau (de la mer vers l'aquifère ou inversement). Par contre, ce phénomène favoriserait le mélange au niveau du contact eau douce/eau salée.

Le fait que la densité de l'eau de mer (1.025) soit supérieure pour des eaux de salinité moyenne (35 g/l), à celle de l'eau douce (1), a d'importantes conséquences sur le plan hydrodynamique avec le phénomène du biseau ou coin salé. En effet, la zone littorale est le point de rencontre entre deux types d'eau souterraine : l'eau douce des nappes du continent, et l'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage de la côte.

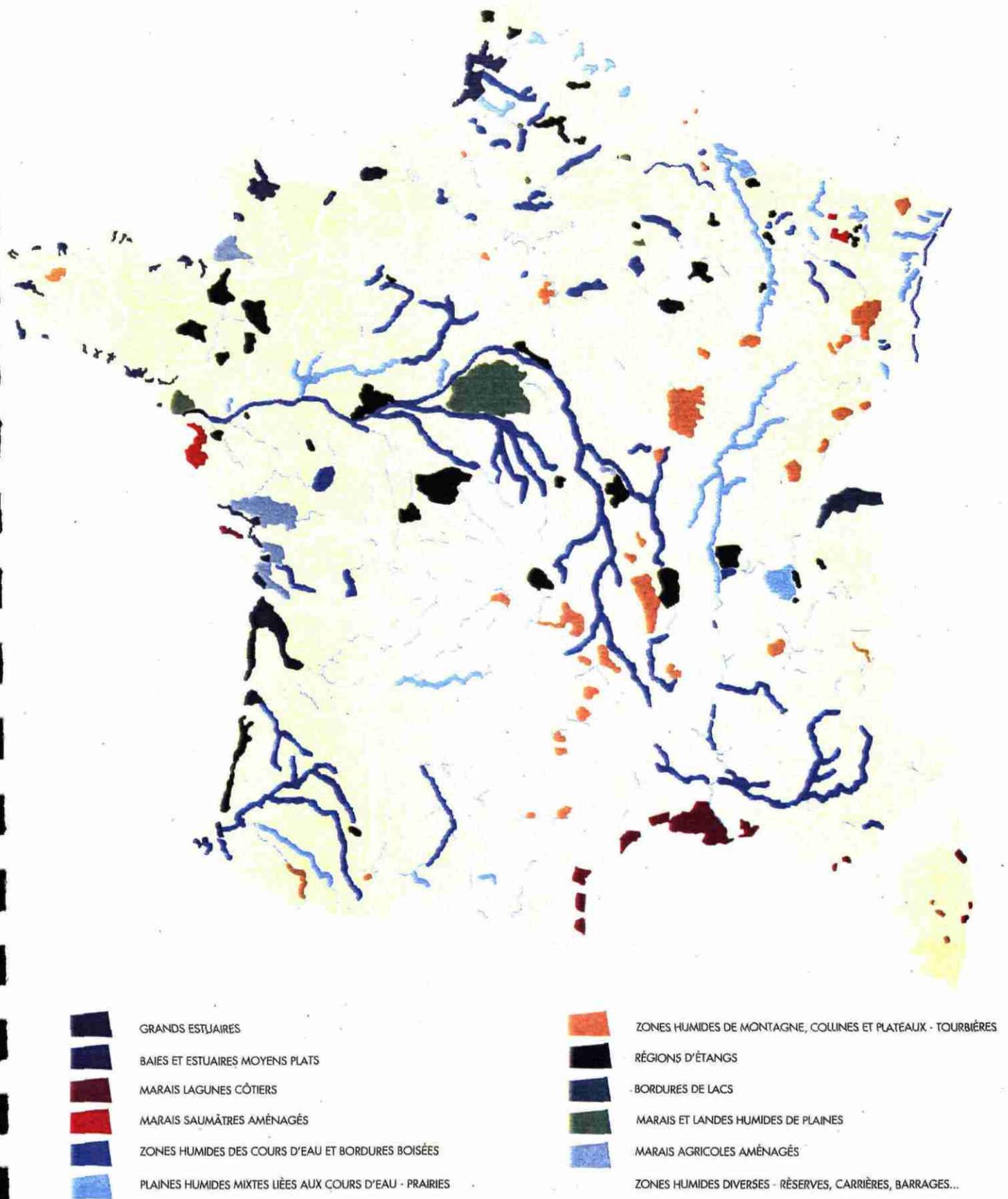


Fig. 3 - Zones humides remarquables
(Document Ministère de l'Environnement et des Agences de l'eau)

Les écoulements souterrains en bordure de mer sont schématisés sur la figure 4 : sous l'effet des apports pluviaux (la recharge de la nappe), une charge hydraulique entretient une pression d'eau douce qui s'oppose à la pénétration de l'eau de mer. L'eau douce s'écoule le long d'une zone de transition entre eau douce et eau salée. Globalement, cette interface, hors influence a pour origine le bord de mer, puis s'enfonce en profondeur vers l'intérieur des terres.

La première description mathématique de ce phénomène est due à Ghyben-Herzberg, qui a formulé deux hypothèses :

- l'eau salée est immobile ;
- l'interface entre eau douce et eau salée est abrupte et sans mélange.

On démontre, dans ce cas de régime permanent avec interface abrupt, que le niveau de l'interface (z) est lié à la charge de l'aquifère (h) et au contraste de densité selon la relation (fig. 5) :

$$z = - 40 h$$

Par la suite, des modèles plus sophistiqués ont pris en compte l'aspect dynamique du phénomène de biseau salé (fig. 6) : ce sont les modèles de HUBBERT (appliqué aux nappes libres) ou de GLOVER (appliqué aux nappes captives). Ces modèles décrivent plus convenablement ce phénomène, mais on retiendra, dans un premier temps, **l'ordre de grandeur de la position en profondeur de l'interface situé à 40 fois l'équivalent de la hauteur de la nappe au-dessus de la mer.**

Une typologie sommaire de biseau salé est présentée figure 7.

Diverses conséquences découlent de cette dynamique en bordure littorale.

La lentille d'eau douce ne persiste que dans la mesure où un apport régulier compense les sorties, sinon la nappe s'abaisse, tend vers zéro et le volume de la lentille va s'annuler. La forme de la surface piézométrique dépend à la fois de l'importance de l'apport d'eau et de la perméabilité :

- dans un climat désertique, sans recharge, l'eau de mer envahit la totalité du terrain, quelle qu'en soit la perméabilité ;
- dans un milieu très perméable (karstique par exemple) et malgré des pluies abondantes, la nappe se vide si vite qu'il ne se crée pas de dôme piézométrique marqué. Dans ce cas également, la mer peut envahir le massif rocheux, jusqu'à une grande distance du littoral.

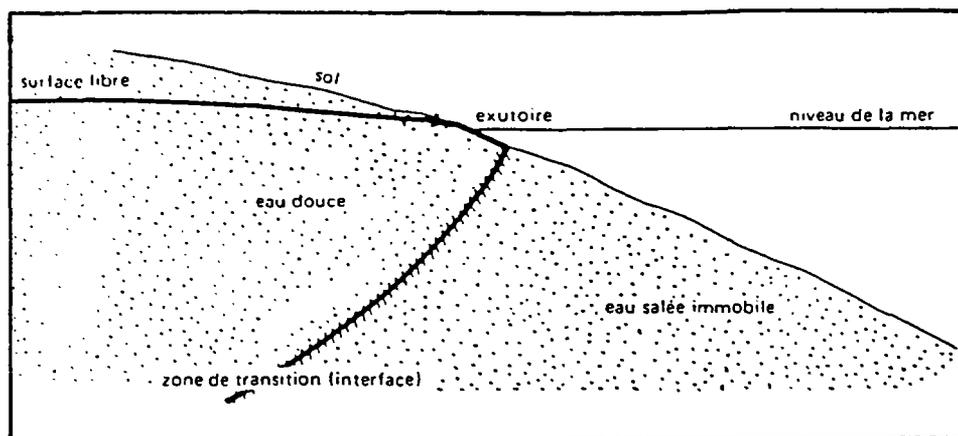


Fig. 4 - Schéma des écoulements souterrains en bordure de mer

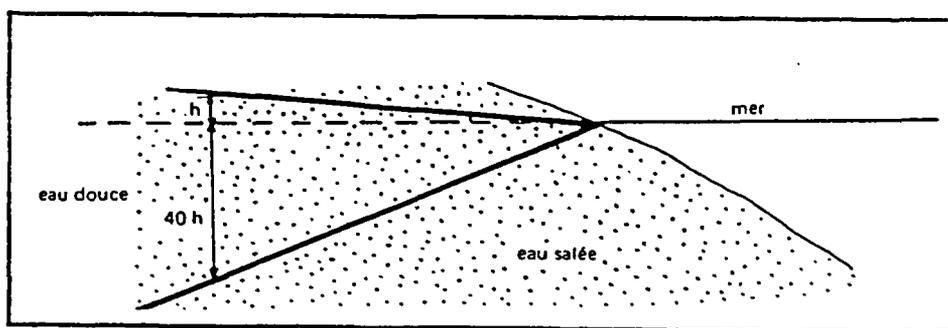


Fig. 5 - Représentation selon le modèle de Ghijben-Herzberg

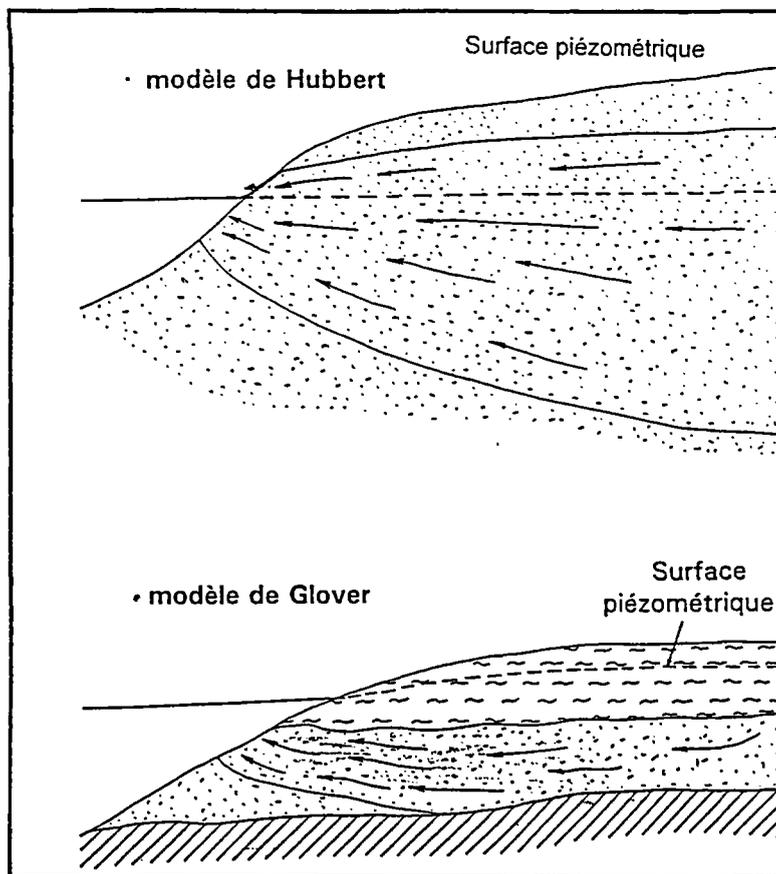


Fig. 6 - Représentation selon les modèle de Hubbert et de Glover

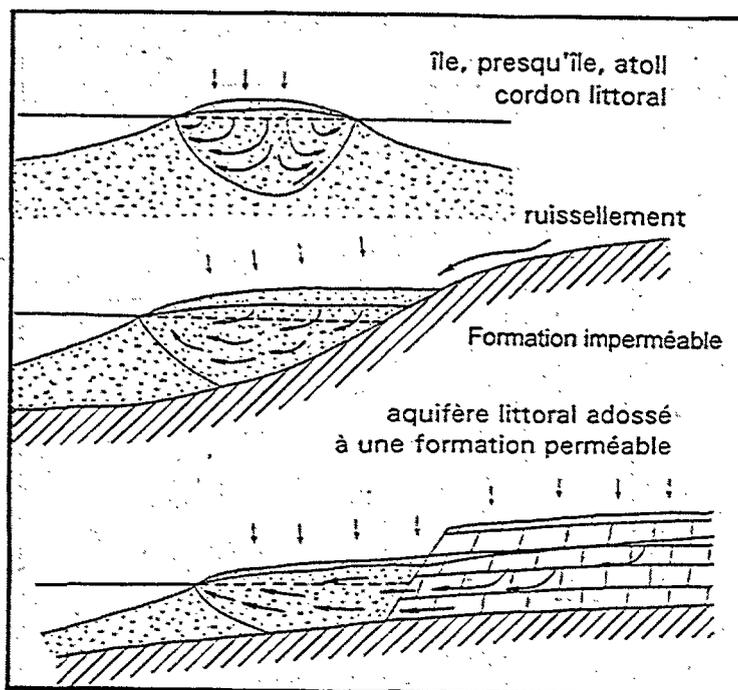


Fig. 7 - Typologie des biseaux salés

1.4. PROBLEMATIQUE DES PRELEVEMENTS

La présence de la mer à proximité implique des conditions de prélèvement particulières, si l'on souhaite maintenir la qualité chimique (eau douce) des eaux de l'aquifère, à cause du phénomène du biseau salé.

Lorsque la nappe est exploitée par des pompages, les niveaux d'eau de la nappe baissent et induisent, selon l'importance de la baisse soit une remontée de l'interface eau douce/eau salée à l'aplomb d'une zone centrée sur le forage, soit une avancée massive des eaux salées vers l'intérieur des terres qui vient combler la dépression créée par les prélèvements (fig. 8).

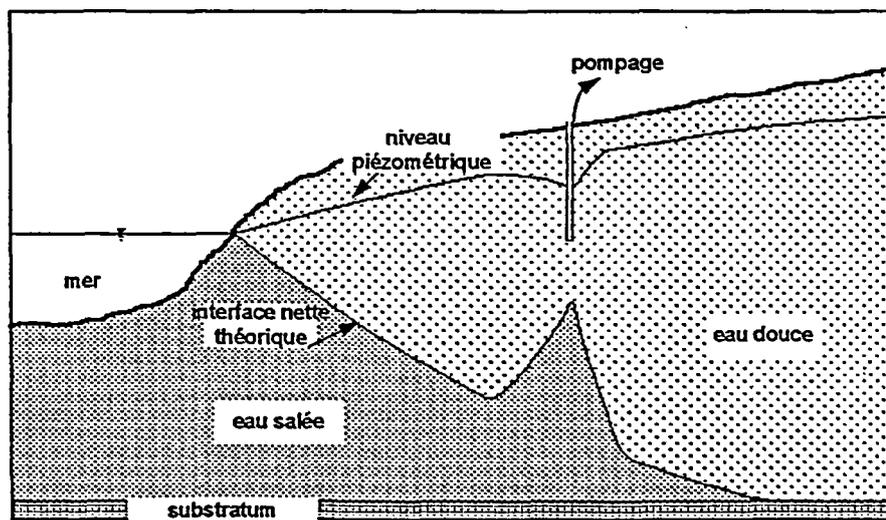


Fig. 8 - Exploitation des aquifères littoraux

Les dommages causés par ce type d'exploitation sont quelque peu différés par l'inertie des nappes (le temps nécessaire pour épuiser la réserve) et par la lenteur des écoulements souterrains. Parfois, le phénomène est réversible à l'échelle saisonnière (nous verrons des exemples en France), parfois l'avancée est généralisée, imparable et durable, comme c'est le cas sur une grande partie du littoral méditerranéen espagnol.

Cette présentation des problèmes posés par les aquifères situés en bordure de mer va être précisée par des exemples concrets dans l'inventaire des aquifères côtiers en France métropolitaine et en Corse. La diversité de leur nature géologique, de leur contexte (importance des pompages, des ressources de substitution) montrera aussi la diversité des réponses en matière de gestion de ces aquifères.

1.5. METHODES DE LOCALISATION DU BISEAU SALE

La localisation du biseau salé est évidemment primordiale dans le cadre des aquifères côtiers. Plusieurs méthodes sont disponibles :

- **Les schémas théoriques** (Ghijben-Herzberg, Hubber, Glover) ne présente qu'un intérêt pratique limité. En effet, dans de nombreux cas, la présence d'une zone de transition importante rend sans signification bien précise la détermination d'une interface virtuelle nette.
- **La prospection électrique** (sondages électriques, profils et cartes de résistivité). Il existe plusieurs techniques de prospection électrique qui permettent de déterminer à partir de la surface du sol la résistivité des terrains en profondeur fonction, entre autres, de la salinité des terrains.
- **Les diagraphie géophysiques**, encore appelées carottages géophysiques, sont des mesures de paramètres physiques effectuées dans des forages. Celles qui présentent un intérêt direct dans la localisation du biseau salé sont les diagraphies électriques, la diagraphie de résistivité par induction et celle de la conductivité de l'eau en forage.
- **Les analyses chimiques** sont évidemment la méthode la plus précise pour connaître la salinité exacte d'une eau. Quand ces analyses sont effectuées sur des échantillons d'eau provenant d'ouvrages en exploitation, la salinité mesurée permet de vérifier que la qualité de l'eau ne se dégrade pas, sans fournir d'indication sur la position du biseau salé. Par contre, celle-ci est possible si on dispose d'un réseau de puits d'observation (piézomètres), sans pompage. L'interprétation des analyses chimiques privilégiera les teneurs en Cl, Br, Na, K, Ca et Mg.
- **Les analyses isotopiques** permettent d'identifier les mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines des aquifères côtiers (lessivage des sols par l'eau d'infiltration, intrusion d'eaux salées, concentration de sels dissous par évaporation). Les principaux isotopes sont les suivants :
 - ^{16}O , ^{18}O , ^2H et ^1H pour déterminer l'origine marine, météorique ou mixte ;
 - ^3H pour dater la recharge potentielle, estimer l'âge de l'intrusion marine, détecter la participation d'eau anciennes à la minéralisation de l'aquifère ;
 - ^{18}O et ^{34}S pour déterminer l'origine des sulfates (marines, évaporites anciennes, oxydation de sulfures présents dans la matrice de l'aquifère) ;
 - ^{14}C peut permettre d'estimer l'âge de l'intrusion, les vitesses de transfert au sein de l'aquifère.

Première partie

Caractéristiques locales des aquifères littoraux

I-1. Les aquifères littoraux de la région Nord-Pas-de-Calais

Seul le département du Pas-de-Calais a une façade littorale dans la région Nord-Pas-de-Calais. Les aquifères de la frange littorale s'étendent en moyenne sur 10 km de large sur près de 130 km de long.

Exclusivement de nature sédimentaire, la géologie de cette zone côtière permet de distinguer plusieurs aquifères ou groupe d'aquifères littoraux répartis en trois secteurs principaux (fig. I-1 et coupes hydrogéologiques en annexe I), à savoir :

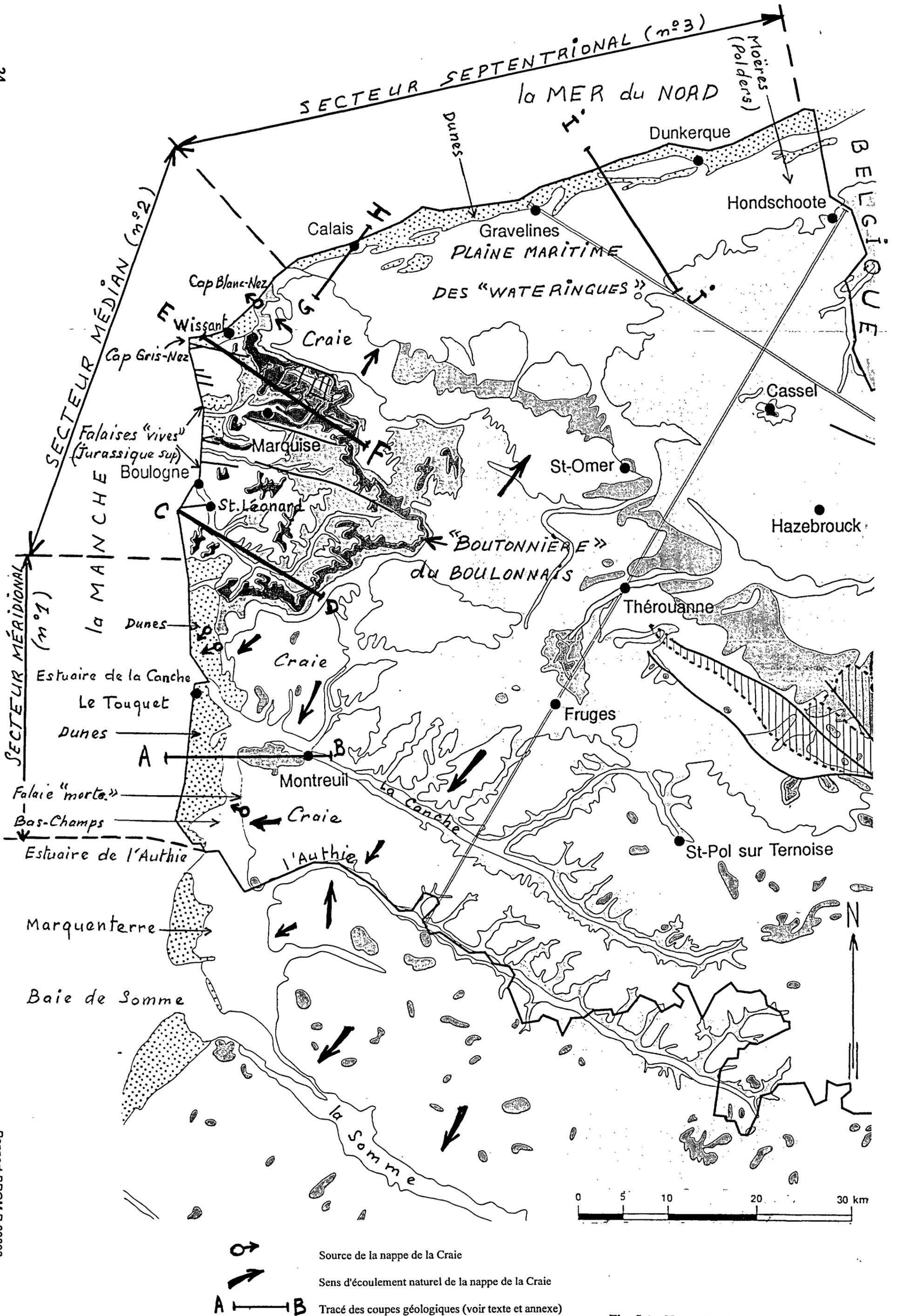
I-1.1. SECTEUR MERIDIONAL

Dans ce secteur, à côte basse situé entre l'estuaire de l'Authie et le Boulonnais, existent trois aquifères superposés mais d'inégale extension :

- en profondeur, la craie séno-turonienne que l'on retrouve largement affleurante sous les plateaux de l'intérieur. Elle constitue à la fois, le soubassement des plateaux de Picardie et de l'Artois où elle renferme une nappe très importante, drainée principalement par les vallées (transmissivité de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} m²/s) ;
- le substratum anté-quadernaire de la plaine maritime des "bas-champs". Moins fissurée, la roche crayeuse est nettement moins perméable (T proche de 10^{-4} m²/s), la nappe y circule mal. Ce phénomène est à l'origine de quelques sources de débordement.

Hormis au droit des plateaux de l'arrière-pays ou le long de la falaise "morte" (sources parfois importantes), cette nappe ne présente pas d'intérêt économique particulier dans la zone littorale. De plus, et bien que l'existence d'un véritable biseau salé n'ait pu encore y être mis en évidence, faute de points d'observation en nombre suffisant, sa qualité physico-chimique laisse semble-t-il à désirer dans certains forages de recherche en raison d'une salinité trop importante (plusieurs g/l de ClNa) ;

- le remplissage flandrien sablo-argileux et tourbeux des "bas-champs". Il constitue un système aquifère multicouche de faible perméabilité (10^{-5} m/s) renfermant une nappe libre. Elle est très peu utilisée (quelques puits particuliers) ; sa minéralisation est celle d'une eau relativement douce. On ne dispose pas d'information renseignant sur l'interface eau douce/eau salée ;
- les dunes côtières reposent sur la formation précédente. Elle contient une petite nappe drainée vers la mer (petites sources), vers la plaine intérieure, et vers de petites dépressions topographiques inter-dunaires. L'eau est utilisée pour l'arrosage (pelouse, golf). Proche de la mer, mais en position haute par rapport à celle-ci, la nappe n'est pas en contact avec l'eau salée.



Les aquifères littoraux de France métropolitaine

Fig. I-1 - Nord-Pas-de-Calais, plan de situation

I-1.2. SECTEUR MEDIAN

Le secteur médian se compose au Boulonnais proprement dit, dans les falaises "vives" dans lesquelles apparaissent plusieurs niveaux aquifères du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Ils sont d'extension généralement faible car très morcelés par un système de failles assez dense et des pendages variables, généralement plutôt vers la mer. Ils ne présentent pas d'intérêt économique particulier. La disposition du pendage a l'avantage de limiter fortement l'intrusion du biseau salé dans les nappes inférieures, situées au-dessous du niveau de la mer.

I-1.3. SECTEUR SEPTENTRIONAL

Dans le secteur septentrional, de nouveau à côte basse, entre le Boulonnais et la frontière belge se développent :

- principalement, l'aquifère quaternaire marin dit "des sables pissards" qui contient une nappe libre avec une eau saumâtre à salée en profondeur (plusieurs g/l) ;
- plus localement les dunes côtières.

Ces deux formations reposent sur l'argile des Flandres qui elle-même recouvre les aquifères profonds :

- du Landénien captif (sables d'Ostricourt). Le faciès physico-chimique est bicarbonaté-sodique et localement chloruré-sodique. A l'ouest de Dunkerque, l'écoulement de la nappe est orienté vers la mer. Au-delà, elle s'écoule au contraire vers l'intérieur du pays, sous la sollicitation probable de nombreux forages de faible débit, et ;
- du Séno-turonien (nappe de la craie), relativement compact et improductif dans cette zone.

Cet aquifère de perméabilité médiocre et mal réalimenté, présente de plus en plus de risques de surexploitation locale.

I-1.4. CONCLUSION

Les caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité essentiellement) plutôt médiocres de ces aquifères et la qualité physico-chimique relativement mauvaise (salinité parfois très importante) de la plupart des nappes qu'ils renferment font qu'ils ne sont que peu ou pas exploitables ni même exploités du tout à l'heure actuelle, les gros prélèvements en nappes se faisant dans l'arrière-pays, notamment dans la craie.

Par ailleurs enfin, un autre paramètre qui, en fait, constitue plutôt un véritable atout pour l'environnement général de la frange littorale, viendrait également limiter l'exploitation trop intensive de ces nappes : il s'agit de la conservation et de la protection des milieux humides ou aquatiques naturels qui s'y sont formés, en liaison hydraulique plus ou moins directe avec ces dernières (zones de marais, étangs "pannes" des dunes, etc.).

I-2. Les aquifères littéraux dans la région Picardie

La Somme est le seul des trois départements picards à avoir une ouverture sur la mer. La longueur de côte est de 72 km.

I-2.1. DESCRIPTION GENERALE DES AQUIFERES

Les aquifères littoraux picards sont au nombre de trois : la nappe de la craie, la nappe des Bas-Champs sus-jacente, et localement la nappe des dunes. Un schéma de leurs différentes positions est en figure I-2. Leurs principales caractéristiques sont résumées ci-après :

- la **nappe de la craie** est alimentée à partir du plateau picard. A l'extrême sud de la côte picarde, elle s'écoule principalement vers les vallées, puis secondairement vers la mer où elle donne naissance à de petites sources de débordement. Plus au nord, elle devient captive sous la formation des Bas-Champs, peut localement pénétrer du bas vers le haut dans les graviers des "foraines" (formation très perméable et reposant directement sur la craie) et s'écoule en direction de la mer. Le battement intersaisonnier de la nappe est très faible (< 1 m ainsi que le battement journalier (< 5 cm) ;
- la **nappe des Bas-Champs** circule dans des formations sablo-argileuses. Elle s'écoule très peu et très faiblement, l'individualisation des sens d'écoulement étant masqués par la présence du réseau de drainage.
- la **nappe des dunes**, perchée sur les formations quaternaires des Bas Champs, de perméabilité plus faible.

I-2.2. ETAT DES AQUIFERES EN BORDURE LITTORALE

La nappe des dunes, par sa position perchée par rapport à la mer, ne subit pas directement son influence. Par ailleurs, elle n'est pratiquement pas utilisée sauf pour des besoins particuliers locaux.

La nappe des Bas-Champs, difficile à capter à cause de sa faible perméabilité, est peu exploitée. Elle est parfois inondée par la mer ce qui entraîne une eau qui peut être légèrement saumâtre (4 g/l).

La nappe de la craie est également peu exploitée car sa productivité est faible. Compte tenu de ses caractéristiques, des travaux de recherche d'eau ont été menés pour alimenter une station d'épuration de coquillages. Ils n'ont pas abouti du fait de la salinité inférieure au minimum requis de 20 g/l. Sur l'ensemble de la nappe, des salinités jusqu'à 19 g/l ont été rencontrées. Sa teneur en fer est souvent excessive (> 10 g/l).

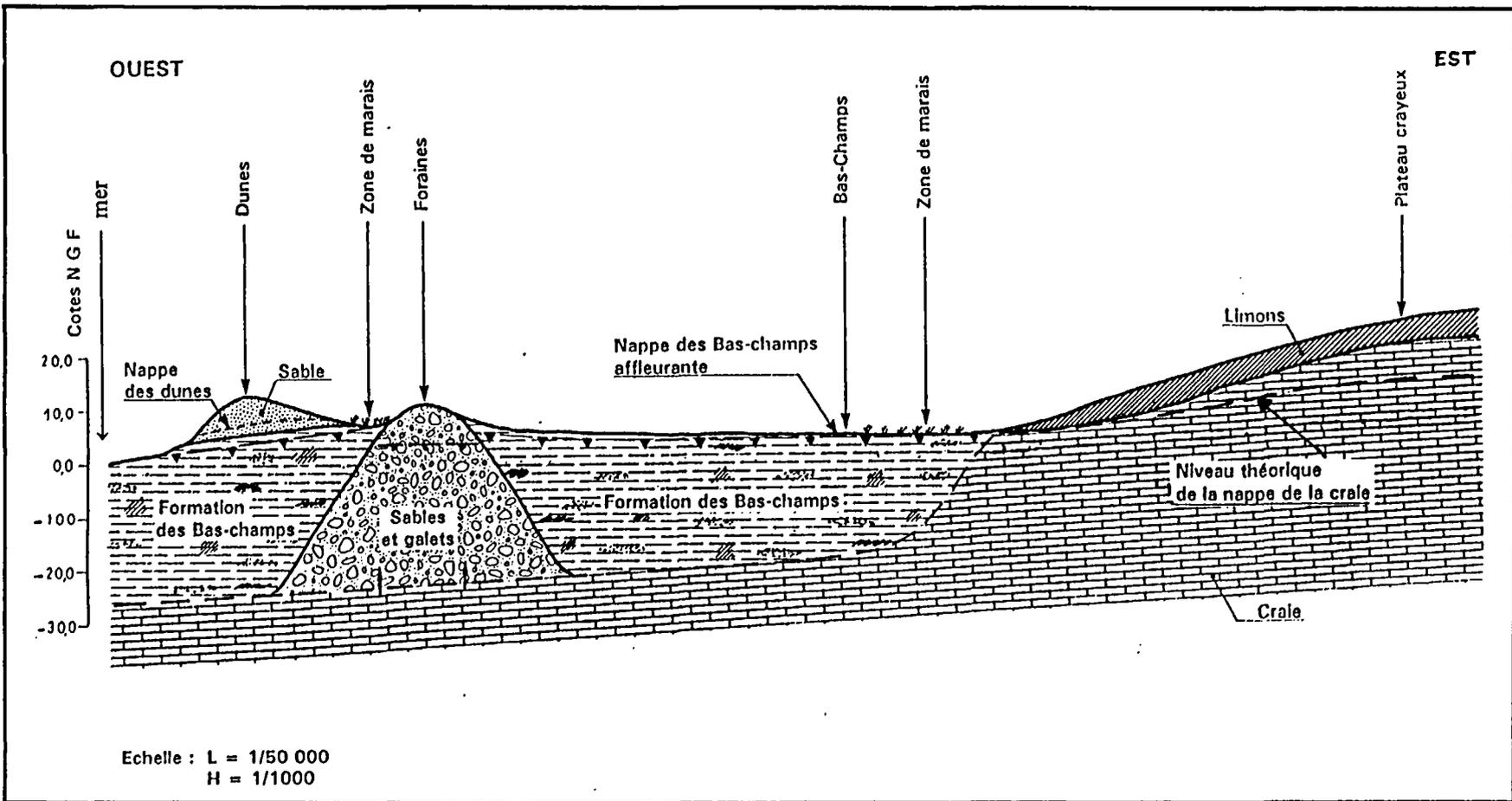


Fig. I-2 - Picardie, schéma de position des différentes nappes du littoral

Sur l'existence et la position du biseau salé, il existe trop peu de forages permettant de le cartographier. On sait seulement, par les piézomètres réalisés dans le cadre des études d'impact pour les exploitations de graviers marins que :

- la nappe est d'autant plus salée que l'on se rapproche de la mer ;
- la salinité de l'eau des bassins d'exploitation a tendance à augmenter du fait de l'homogénéisation de la stratification naturelle de la nappe ;
- que le biseau salé a une pente très prononcée.

Il est probable qu'une alimentation partielle et temporaire de la nappe de la craie par la mer ait lieu lors des fortes marées, lorsque la hauteur de la mer devient supérieure au niveau de la nappe.

I-2.3. CONCLUSION

Les aquifères littoraux picards n'ont pas un intérêt économique vital pour la région. Les besoins en eau sont principalement assurés par des captages isolés en dehors de la zone littorale, sur le plateau picard. C'est la nappe libre de la craie, de bonne productivité et de bonne qualité physico-chimique, qui y est exploitée. Aucun problème de biseau salé n'y a pour l'instant été détecté ; cependant, si on devait l'exploiter plus intensément, il faudrait éviter de créer un champ captant dans la vallée de la Somme car l'effet des marées y est sensible jusqu'à Abbeville.

Comme dans la région Nord, ces aquifères jouent un rôle majeur pour l'environnement avec la conservation et la protection des zones humides, situées autour des pannes (dépressions dunaires).

I-3. Les aquifères littoraux en Haute-Normandie

On considère dans la région Haute-Normandie les départements de la Seine maritime et de l'Eure. La longueur des côtes est de 270 km.

I-3.1. DESCRIPTION GENERALE DES AQUIFERES

Les aquifères littoraux de Haute-Normandie sont constitués de craie seule (falaises et platiers), de craie sous alluvions sablo-graveleuses (estuaires des fleuves) et d'alluvions sablo-graveleuses uniquement, reposant sur des substratums imperméables (estuaires de la Risle et de la Seine).

On trouve dans la craie de Haute-Normandie des conduits ouverts (d'ordre pluridécimétrique à métrique) où la circulation de l'eau se fait en régime turbulent. Les émergences de nappe sont de natures diverses : conduits ouverts en pied de falaise ou même sous le platier, fissures horizontales. La nappe n'est exploitable que par des galeries ou des puits recoupant ces fissures. Tant qu'il n'y a pas de rabattement dans la source, il n'y a pas de risques d'intrusion saline. Les prélèvements sont limités (sauf dans le cas de la ville du Havre à Yport).

Les nappes littorales sont exploitables dans les estuaires où existe la craie éventuellement recouverte par des alluvions graveleuses. Les transmissivités ont des valeurs suffisantes pour y prélever des débits de l'ordre de 100 m³/h.

La côte est bordée essentiellement par des falaises avec des estuaires (de la Seine et de la Risle pour les principaux).

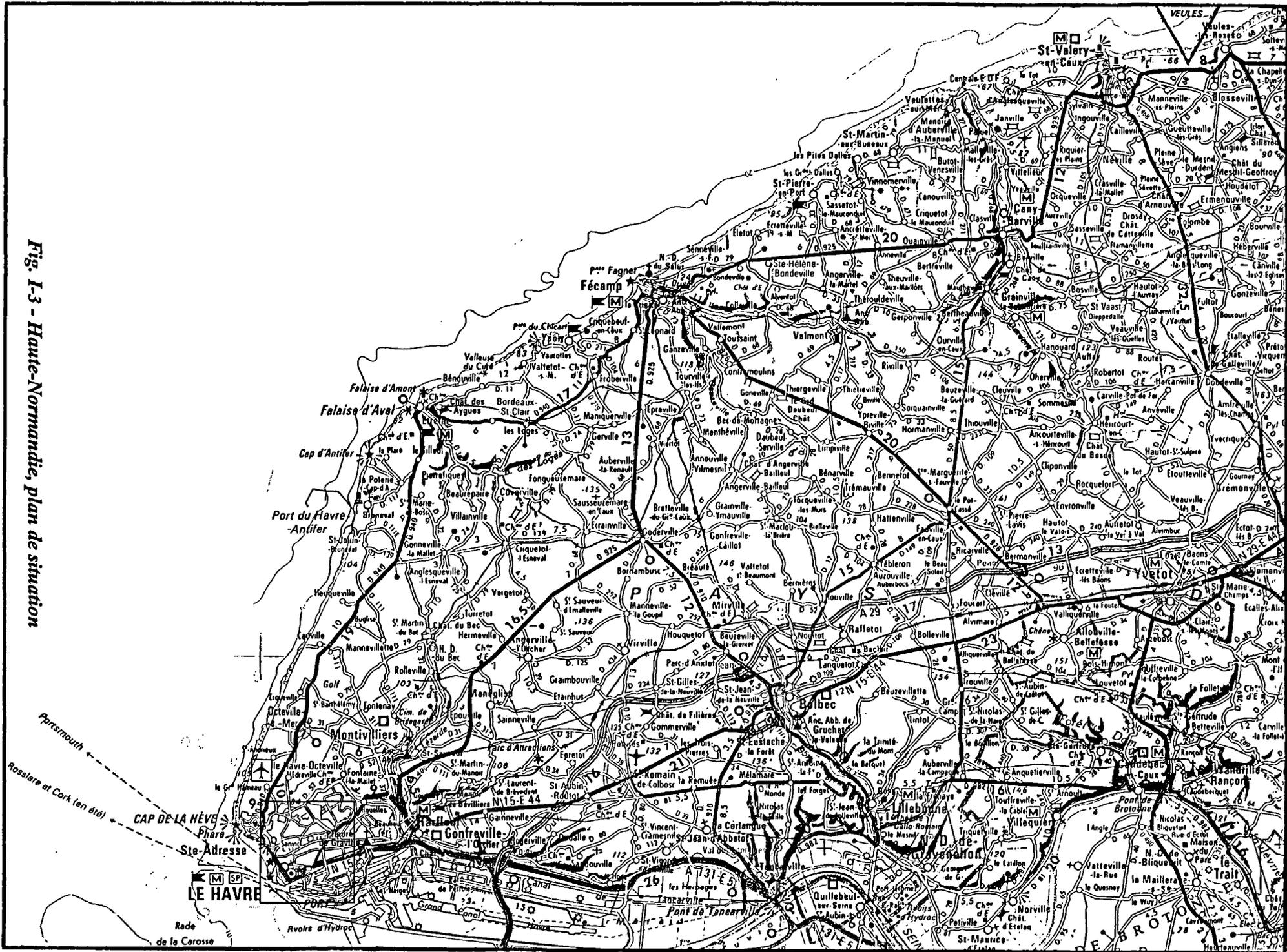
I-3.2. ETAT DES AQUIFERES EN BORDURE LITTORALE

De manière générale, l'exploitation de la nappe pour l'alimentation en eau potable se fait largement à l'intérieur des terres avec des débits limités (la plupart du temps, pour ne pas induire de problèmes d'invasion du biseau salé).

C'est dans les zones des estuaires qu'on peut craindre des problèmes de surexploitation et d'invasion du biseau salé. On recense les principaux prélèvements suivants (fig. I-3) :

- la verrerie Desjonquères dans l'estuaire de la Bresle prélève près de 300 m³/h, mais l'usine n'est pas directement sur la côte ;
- à Dieppe, la chambre de commerce et les pêcheries utilisent l'eau souterraine en bordure du port (eaux salées). Les quantités sont faibles et l'extension du biseau salé est limité à la zone proche du port ;

Fig. I-3 - Haute-Normandie, plan de situation



- à Fécamp, la Bénédicte préleve 40 000 m³/an d'eau douce. Les autres prélèvements sont aussi trop faibles pour provoquer l'invasion du biseau salé ;
- dans l'estuaire de la Seine, les prélèvements sont plus importants :
 - . 200 à 250 000 m³ par an par les carrières Lafarge à Saint Igor d'Ymonville (avant rejet dans les alluvions),
 - . 650 à 700 000 m³ par an, d'eau saumâtre captée par un puits à drains rayonnants à Sandouville. Cette exploitation est assez négligeable vis-à-vis des ressources potentielles que la salinité rend peu exploitables.

I-3.3. EXPLOITATION A YPORT

Le cas d'Yport est assez spécifique. La collectivité intéressée est la ville du Havre qui veut assurer la sécurité de son alimentation en eau tant quantitative que qualitative.

Il s'agit d'un conduit qui draine la nappe dans un bassin de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. L'eau resurgissant en mer sur le platier, le débit moyen écoulé est de l'ordre de 1,5 à 2 m³/s. Les eaux sont captées à l'aide d'un puits débouchant dans des chambres naturelles de plusieurs mètres cubes de volume intérieur. Le dispositif est situé à 2 km de la mer dans une vallée sèche. Le volume prélevé dans un premier temps a atteint 20 à 25 000 m³/j. On prévoit à un terme plus éloigné 50 000 m³/j, soit moins de 40 % du débit moyen annuel écoulé. L'enregistrement du niveau d'eau des cavités montre qu'il est soumis à l'influence des marées hautes seulement : les marées basses ne sont pas visibles (effet d'un seuil) ; un test a montré que le milieu poreux encaissant le conduit est faiblement perméable et a une fonction essentiellement capacitive. L'effet de seuil correspondant à une barrière inférieure physique, la capacité d'emmagasinement du réservoir, la charge hydraulique positive à l'amont maintenue par l'inertie de la nappe rendent le projet faisable sans crainte d'une invasion du conduit par les eaux marines.

I-3.4. CONCLUSION

La ville du Havre dispose d'un captage original dans un conduit de la craie. Malgré la proximité de la mer, le contexte est favorable pour ne pas craindre l'invasion du conduit par des eaux salées. Ailleurs, c'est dans les estuaires que les risques d'invasion sont à prendre en compte. Cependant, pour cette raison, les eaux souterraines sont plutôt captées vers l'intérieur des terres où des ressources en eau souterraine existent.

C'est d'ailleurs vers ces aquifères (à l'intérieur des terres) que le SDAGE Seine-Normandie porte ses recommandations.

I-4. Aquifères littoraux de Basse-Normandie

I-4.1. PRINCIPAUX RESERVOIRS AQUIFERES

* Aquifère du Bajocien

Développé dans la fissuration du calcaire (la dissolution du calcaire par les eaux infiltrées dans les fissures de la roche donne naissance à des réseaux karstiques, importants sous les vallées), il se présente en nappe libre vers Bayeux et au sud-ouest de Caen (sous la Prairie) et en nappe captive sous les marnes de Port en Bessin. En nappe captive, la productivité est extrêmement variable. Cet aquifère est très sensible aux nitrates en nappe libre. En nappe captive, la qualité est très variable (dans certains secteurs on trouve des concentrations en fluor très importantes).

* Aquifère du Bathonien

C'est le plus important de Basse-Normandie. La nappe est libre et contenue dans le réseau de fissures du calcaire. Les meilleurs débits pour les ouvrages de captage atteignent 300 m³/h dans l'Orne, mais c'est aussi l'aquifère le plus sensible à la pollution nitratée (surtout en partie supérieure).

* Aquifère du Crétacé

C'est une nappe libre importante (perchée) dans la craie des Pays d'Auge et d'Ouche. La productivité est intéressante, mais l'eau présente une forte teneur en fer.

* Aquifère des alluvions modernes

Cet aquifère est très développé dans les estuaires et les basses vallées de la Touques, de la Dives et de l'Orne. La productivité peut atteindre 300 m³/h dans la nappe du Galet (Caen) ; en centre Manche (zone Carentan - Périers) se trouve l'aquifère bien protégé des alluvions tertiaires et quaternaires avec une excellente productivité (150 à 200 m³/h) et une qualité de l'eau souvent satisfaisante pour un usage AEP.

* Aquifères plus modestes en superficie et de productivité plus faible

- Nappes libres limitées des terrains primaires du Cotentin et du Bocage normand, très sensibles aux aléas climatiques et présentant parfois des teneurs en fer et manganèse excessives dans des eaux souvent acides et agressives.
- Nappes libres du Trias (axe Isigny-Torteval) présentant une eau généralement de qualité satisfaisante pour l'alimentation en eau potable.

- Nappes superficielles des zones dunaires de la côte Ouest du Cotentin, dont la qualité est parfois sujette à caution : excès de fer, de manganèse et de matières organiques.

I-4.2. DEPARTEMENT DU CALVADOS

Dans le Calvados le tableau suivant présente les valeurs maximales de concentration en chlorures mesurées sur les points d'alimentation en eau potable touchés par le phénomène de biseau salé. Ces points sont reportés sur la carte (fig. I-4) où l'on peut constater la faible extension du phénomène, ce qui explique l'absence d'études approfondies. Un seul secteur a fait l'objet de recherches plus spécifiques dans la plaine de la Dives.

COMMUNE	Indice de classement	Concentration MAX. mg/l de Chlorures	Concentration minimale
ARROMANCHES	0096-6X-0012	105	81
ISIGNY/MER	0117-4X-0006	252	45
COLOMBIERES	0118-2X-0040	177	17
OUISTREHAM	0120-2X-0003 F1	326	81
OUISTREHAM	0120-2X-0020 F3	318	62
RANVILLE	0120-2X-0086	196	63
AMFREVILLE	0120-2X-0095	204	73
BAVENT	0120-7X-0012 F4	161	129
BAVENT	0120-7X-0061 F5	113	99

On remarque que certains points (Bavent et Colombières) ne sont pas situés en bordure de mer ou de canal maritime, mais dans une zone de marais dont les canaux de drainage sont envahis à marée haute. Cependant, dans ces marais il existe d'autres ouvrages qui ne présentent pas ce phénomène d'intrusion saline, mais ceux-ci sont souvent exploités à des débits très inférieurs à ceux de ces captages contaminés.

Dans le secteur de la Dives il a été procédé à une reconnaissance de l'extension du biseau salé par différentes méthodes géophysiques :

- méthode électromagnétique ;
- mesure de conductivités en forages ;
- sondage électrique
- panneau électrique.

Deux anomalies (l'une conductrice, l'autre résistante) ont été mises en évidence montrant des variations altimétriques du toit des calcaires aquifères en relation avec la teneur en chlorure dans la nappe (?). Le suivi régulier de l'évolution des concentrations en chlorure, sur une douzaine de puits et forages durant 3 années, a mis en évidence une augmentation des concentrations en été, lors des gros prélèvements et une diminution lors de la reprise de la recharge en automne, où l'on assisterait à une chasse du biseau. L'étude n'est pas allée au-delà de ces constatations.

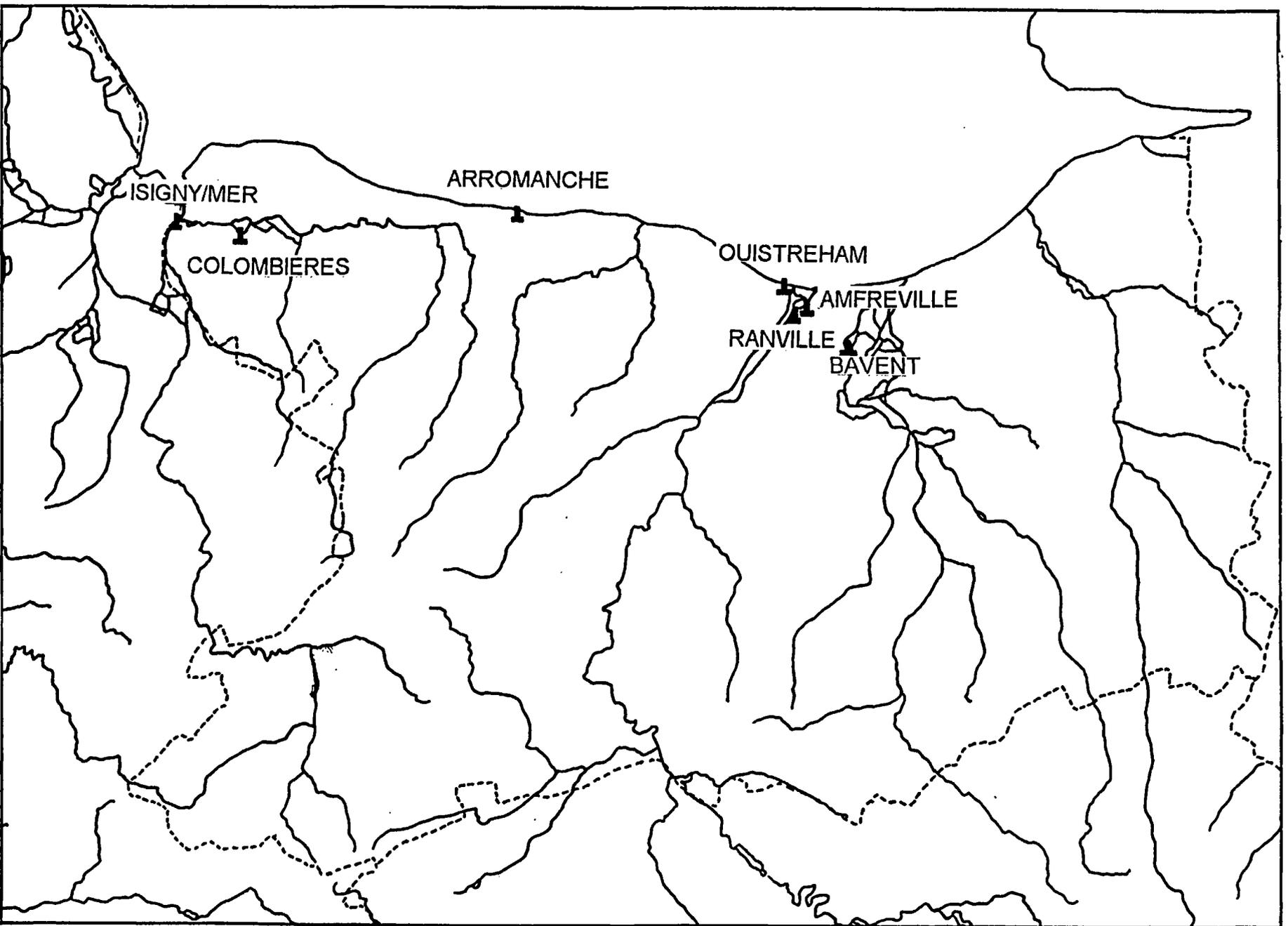


Fig. I-4 - Département du Calvados - Position des ouvrages (échelle : $\approx 1/500\ 000$)

I-4.3. DEPARTEMENT DE LA MANCHE

Le contexte et la structure géologique du département de la Manche font qu'il n'existe pas d'aquifère de taille suffisante en bordure de mer pour répondre aux besoins de l'alimentation en eau potable. Quelques recherches ont été effectuées par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, mais la crainte d'intrusion du biseau salé et la présence d'autres solutions d'approvisionnement ont fait que les projets ont été abandonnés.

L'exploitation des aquifères dunaires existe cependant avec des problèmes de biseau salé dans les zones maraîchères où l'irrigation est pratiquée. Un seul secteur a fait l'objet d'une étude hydrogéologique : la région de Créances-Lessay (voir carte jointe fig. I-5). Dans ce secteur qui forme une bande Nord-Sud d'environ 22 km de long sur 4 km de large, on comptait en 1990 :

- 103 irriguants ;
- 367 forages ;
- 1030 ha de surface irriguée ;
- 1 757 ha de cultures non irriguées.

Concernant le biseau salé, l'étude¹ indique : "Dans la Manche, l'interface devrait se trouver à une profondeur de 38 fois (environ) la hauteur du niveau de la nappe d'eau douce au dessus du niveau de la mer. En réalité, à cause du battement des marées et des recharges périodiques, une importante zone de transition saumâtre existe. Un rabattement de la nappe d'eau douce provoque immédiatement une remontée de l'interface eau douce-eau salée.

On notera également dans ce département une "campagne de recherche d'eau salée sur le littoral du département de la Manche" réalisée dans le but de sélectionner des sites propices à la création de zones aquacoles marines. Huit zones ont fait l'objet de prospections géophysiques complétées, lorsqu'elles semblaient favorables, par des forages de reconnaissance. Trois zones ont ainsi été sélectionnées pour faire l'objet de projets de création de zones conchylicoles.

I-4.4. CONCLUSION

En règle générale, il n'existe pas de problème majeur et étendu dans l'exploitation des captages AEP en bordure du rivage bas-normand, lié à l'intrusion de biseaux salés. Seuls quelques dysfonctionnements saisonniers ont pu être observés, mais ils résultent le plus souvent d'une surexploitation temporaire. Généralement, face à ces problèmes des solutions ont été apportées par des interconnexions et des coupages avec la ressource disponible en retrait de la côte. En conséquence, il n'existe pas d'étude spécifique sur le sujet, et ces zones n'ont fait l'objet d'aucun développement particulier dans le cadre du SDAGE.

¹ Synthèse hydrogéologique de la région de Créances-Lessay - Département de la Manche - Application à l'irrigation des cultures légumières. - Rapport Général Juin 1992 - GEOARMOR - OUEST AMENAGEMENT

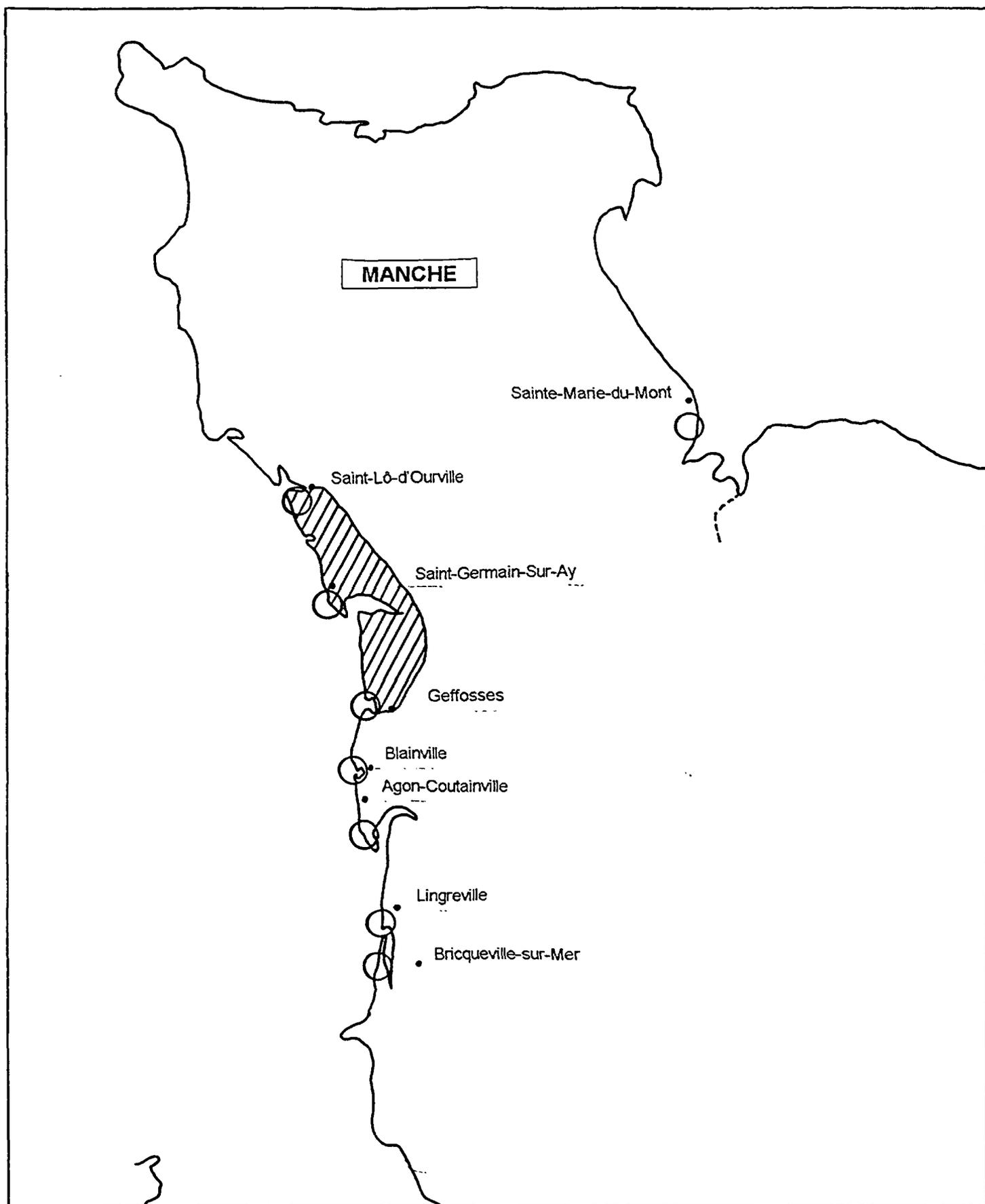


Fig. I-5 - Département de la Manche. Région de Créances-Lessay et situation des zones de prospection (échelle : $\approx 1/500\ 000$)

I-5. Les aquifères littoraux en région Bretagne

En Bretagne, l'eau souterraine n'a longtemps été exploitée que par des puits traditionnels, profonds de seulement quelques mètres, et par des captages de sources. Ce mode d'exploitation n'imposant que des rabattements très limités n'était pas en mesure de perturber suffisamment les équilibres pour provoquer des avancées du biseau salé.

La technique des forages "profonds" (descendus maintenant assez couramment jusqu'à plus de 100 m) a été introduite dans la région dans les années 1975, avec l'apparition du "marteau fond de trou"; si un grand nombre de forages a été réalisé depuis, essentiellement pour l'agriculture, l'élevage et l'industrie, le déficit de connaissance reste important.

Le sous-sol de la Bretagne est constitué par les formations indurées du Massif armoricain (granites, gneiss, schistes, quartzites) constituant des aquifères hétérogènes et anisotropes, le stockage et la circulation des eaux souterraines sont guidés par la fracturation et l'altération.

Les forages fournissent des débits limités le plus souvent de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres cubes par jour (1 000 à 1 500 m³ par jour pour les plus performants qui restent rares).

Il n'existe pas en Bretagne de grands aquifères aux caractéristiques constantes sur de larges domaines géographiques, mais une multitude de petits systèmes imbriqués constituant une mosaïque dont chaque élément, lui-même hétérogène dans le détail, n'a pas plus de quelques dizaines d'hectares de superficie au sol.

Dans les conditions hydrogéologiques de la région, les surexploitations ne peuvent être que locales, un forage, ou un groupe de forages, ne peut provoquer une avancée massive de front salé. Il convient toutefois de noter que :

- dans certaines situations (configuration de presqu'île en particulier), le cumul des effets individuels peut entraîner un impact global ;
- l'anisotropie du milieu souterrain peut être un facteur aggravant (circulations privilégiées) ;
- les eaux souterraines sont le support d'activités économiques que leur dégradation pénaliserait lourdement (cf. plus loin ; le cas de la région Saint-Malo-Cancalle). Face aux pollutions diffuses (azote, pesticides) qui progressent fortement dans les eaux de surfaces et les eaux souterraines peu profondes, les eaux "profondes" sont souvent la seule ressource de bonne qualité et des contaminations par le sel aggraveraient des situations déjà difficiles.

I-5.1. LES CHLORURES EN BRETAGNE

Les concentrations rencontrées dans les eaux souterraines non suspectes de pollutions sont le plus souvent comprises entre 20 et 40 mg/l (Cl⁻).

I-5.1.1. A proximité du littoral

La proximité du littoral peut avoir un rôle significatif sur la salinité des eaux rechargeant les nappes. Cet effet, dépendant largement de l'exposition des versants par rapport aux pluies susceptibles d'être chargées d'embruns, peut se faire sentir jusqu'à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres : l'exemple qui suit concerne des échantillons d'eau prélevés dans des forages de 20 m de profondeur, alignés selon un profil Nord-Sud perpendiculaire à la direction générale de la côte et ayant son origine à Pléneuf-Val André (Côtes d'Armor) :

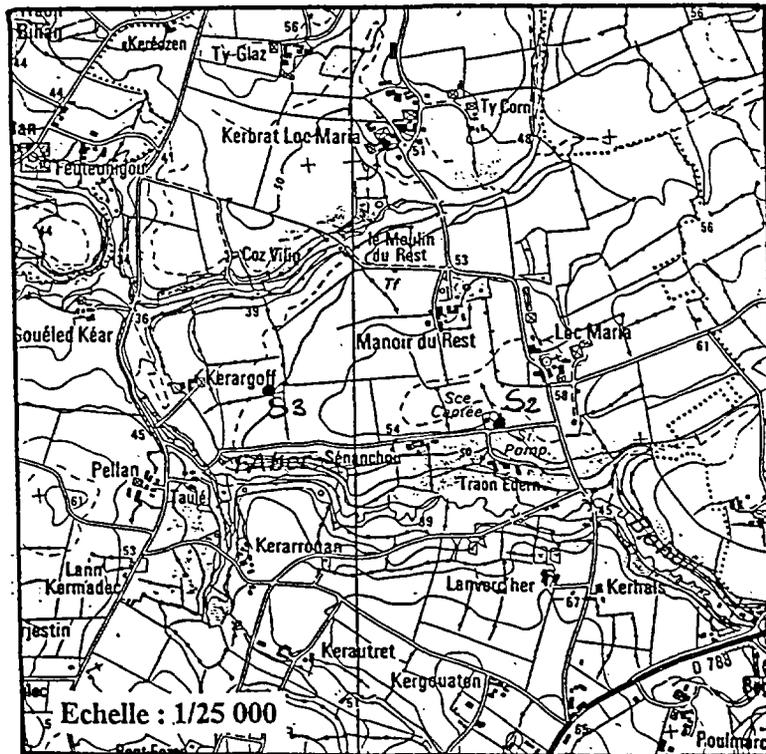
Identification (n° de chantier)	Distance à la cote (en km)	mg/l - Cl
185	1,2	100,4
229	4,5	69,6
245	5,75	69,4
249	6,25	77,5
261	7	47,9

A partir du point 261, les concentrations redeviennent "normales".

I-5.1.2. Eaux fossiles

Un certain nombre de forages (une douzaine de cas sont répertoriés dans le seul Finistère Nord) a rencontré des eaux saumâtres, qu'on interprète actuellement comme des résidus fossiles, peut-être d'origine pléistocène. Il pourrait s'agir de "bulles d'eau salée dont l'écoulement vers la mer est arrêté ou freiné par des limites étanches, dont le "nettoyage" se poursuit encore actuellement. On ne dispose pas de mesures isotopiques pour confirmation.

Exemples : (localisation d'ensemble sur la figure I-7 de l'extrait de carte à 1/100 000 plus loin.



Les deux forages S1 et S3 sont à des altitudes comparables, voisines de + 50 m NGF. En S3, les teneurs en chlorure ont évolué pendant les forations de la façon suivante :

Profondeur (m)	Cl ⁻ mg/l
55	80
61	80
67	140
79	1400
103	2100

A 700 m à l'Est, S2 n'a rencontré que de l'eau douce (50 mg/l Cl⁻)

Fig. I-6 - Bretagne, site de Loc Maria (Plabennec - 29)

Les aquifères littoraux de France métropolitaine

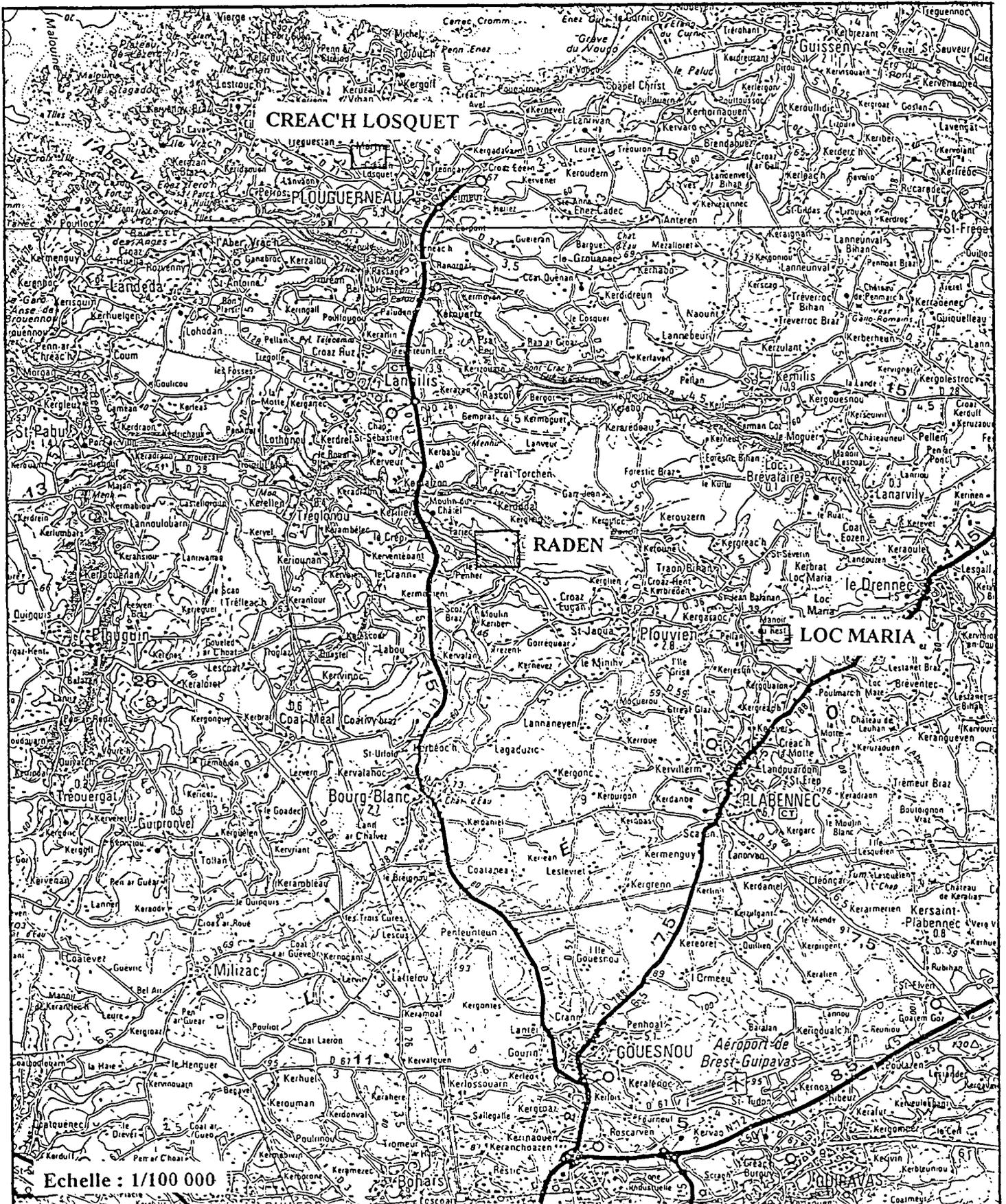


Fig. I-7 - Bretagne, localisation des exemples

I-5.1.3. Effet des pompages sur les concentrations en chlorure

Plusieurs cas sont connus, en général incomplètement, où la salinité des eaux pompées dans des forages a augmenté dans des proportions sensibles.

Forage S2 du site de Loc Maria

Lors d'un pompage d'essai de 2 mois (août-septembre 1993) au débit de 12 m³/h, les chlorures ont progressé de 50 à 90 mg/l. Les pompages ont été repris l'année suivante, de début juin à fin août, les concentrations en Cl⁻ ont repris leur progression jusqu'à la 2^{ème} quinzaine de juillet puis se sont stabilisés vers 125-130 mg/l.

Site du Creac'h Losquet (Plouguerneau - 29)

Le forage F5 de Creac'h Losquet est profond de 150 m, les arrivées d'eau les plus importantes sont situées entre 135 et 145 m, le débit instantané passant alors de 7 à 40 m³/h.

Le graphique I-9 ci-après (information ANTEA) montre l'évolution des chlorures au cours d'un pompage (12 m³/h) commencé en novembre 1995 et se poursuivant toujours en juillet 1996.

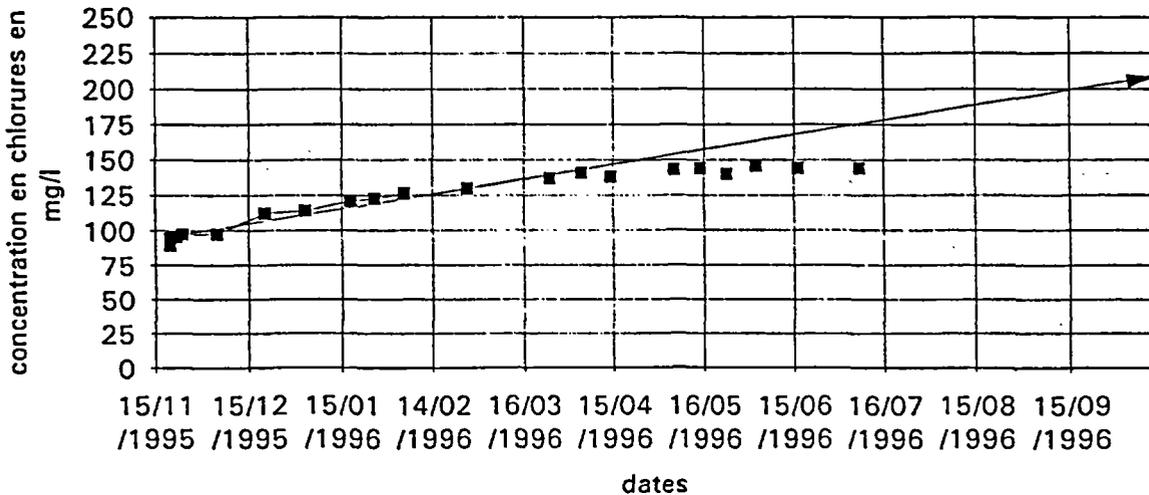


Fig. I-9 - Forage F5 de Plouguerneau :
évolution des concentrations en chlorures dans l'eau

On observe comme à Loc Maria une stabilisation, dont la constance reste à vérifier.

Dans les deux cas, la salinité augmente dans des proportions limitées et les concentrations restent compatibles avec les normes de potabilité. Ces deux exemples montrent que le risque d'invasion salée existe et qu'il doit être considéré avec attention.

Dans les deux cas, l'eau, exempte de nitrate (et de pesticide) doit servir à conforter les ressources locales devenues hors normes, en les potabilisant par dilution. A Plabennec, 5 500 habitants sont concernés par le forage de Loc Maria et à Plouguerneau, 2 000 habitants par le forage de Creac'h Losquet.

I-5.2. VULNERABILITE DES AQUIFERES LITTORAUX

Les connaissances restent trop limitées et le nombre de cas possibles trop grand, pour qu'on puisse caractériser la salinité ou le risque de salinité des aquifères littoraux par des éléments quantitatifs.

Pour le moment, le risque d'invasion salée n'est pas ressenti comme un problème.

On peut craindre cependant que l'intensification de l'exploitation des eaux souterraines, rendue indispensable par la dégradation généralisée des ressources traditionnelles ne conduise à des contaminations certes locales, mais irréversibles.

Le document cartographique présenté tente, à partir de l'état actuel des connaissances, de subdiviser la frange côtière en fonction d'une sensibilité intrinsèque, liée aux caractéristiques des formations géologiques et d'une vulnérabilité anthropique résultant directement de l'exploitation qui est faite de l'eau souterraine en dehors de toute préoccupation de gestion.

I-5.2.1. Sensibilité intrinsèque

La sensibilité intrinsèque au risque d'intrusion salée est directement liée à la plus ou moins grande facilité de circulation de l'eau dans le sous-sol.

L'extrême hétérogénéité du socle armoricain ne permet pas de délimiter clairement des systèmes aquifères aux caractéristiques connues (même approximativement). Cependant, l'examen des résultats enregistrés (débits instantanés fournis par les forages au moment de leur réalisation) montre des possibilités de regroupements, des valeurs moyennes et des fréquences d'obtention de débits importants ou notables qui varient dans l'espace.

L'étude statistique des 9 400 forages recensés en Bretagne à fin 1994, et pour lesquels sont connus la localisation, le contexte géologique, la profondeur atteinte et le débit instantané mesuré en fin de foration a permis d'identifier environ 70 séries de résultats pour l'ensemble de la région, en croisant les paramètres géographie, géologie et débit, regroupées en 4 "classes d'intérêt", images de la perméabilité et de l'homogénéité-hétérogénéité des secteurs ainsi caractérisés.

Les classes de sensibilité au risque d'invasion salée ont ici été identifiées aux "classes d'intérêt", numérotées de 1 à 4, dans l'ordre des sensibilités décroissante.

Les classes d'intérêt ont été calculées par formations géologiques ou regroupement de formations et par départements afin d'en établir la hiérarchie, puis recalculées par secteurs (chaque département étant subdivisé en 4 à 6 secteurs géographiques). Que dans un secteur donné, une formation n'ait pas le même classement qu'à l'échelle départementale, ou qu'elle change de classement d'un secteur à l'autre peut traduire l'existence de variations latérales des conditions de sous-sol.

La représentation adoptée distingue par une couleur à plat, les classements issus de populations en nombre suffisant (au moins 40 forages pour la formation du secteur considéré) pour que les résultats statistiques puissent être jugés représentatifs. Lorsque les données sont insuffisantes dans un secteur, la formation est affectée de la couleur de son classement départemental posée sous forme de rayures.

Les classes d'intérêt prennent en compte.

- Les "probabilités de succès" définies pour chaque formation de chaque secteur étudié par le pourcentage d'ouvrages ayant fourni au moins 10 m³/heure.
- Les "débits attendus" définis par les débits moyens des 25 % meilleurs résultats de chaque population concernée.

L'indice global d'intérêt (probabilité de succès x débit attendu) varie de 0,28 (granito-gneiss antéhercyniens du Morbihan) à 45,9 (roches volcaniques du nord des Côtes d'Armor) et, si on exclut ces deux extrêmes, de 1,19 à 18,5. Les limites entre classes d'intérêt ont été définies conventionnellement en fonction de la valeur de l'indice global :

Classes d'intérêt	Indice global	% de débits \geq 10 m ³ /h	Moyenne (m ³ /h) des 25 % meilleurs résultats
1	> 7	30 à 54	22,2 à 85
2	7 à 5	25 à 35	17,9 à 24,9
3	5 à 2,5	17 à 28	13,8 à 22,9
4	< 2,5	4 à 25	7 à 16,2

Résultats aux échelles départementales - 9 400 forages au total

L'indice global n'est pas une quantification exacte des potentiels en eau souterraine profonde, il en fournit une image.

I-5.2.2. Vulnérabilité anthropique

On a considéré que la vulnérabilité des aquifères littoraux aux risques d'intrusions salées était d'autant plus forte que la densité de forages était grande à proximité des côtes.

Deux classes de vulnérabilité ont été retenues :

- 1 : Vulnérabilité très forte.
- 2 : vulnérabilité forte.

Les zones de vulnérabilité ont été tracées sur une carte localisant les 9 400 forages recensés en Bretagne, les densités de forage étant appréciées visuellement (fig. I-10).

Deux secteurs paraissent particulièrement menacés ont été classés en "vulnérabilité très forte".

- Au Sud de la Bretagne, la presqu'île de Quiberon, l'étroitesse du territoire laissant craindre une surexploitation locale par l'exploitation du grand nombre de forages qui y existent. Il s'agit pour beaucoup de forages à usage domestique ou d'agrément (arrosage des pelouses, remplissage des piscines), ce qui limiterait l'impact socio-économique d'invasions salées.

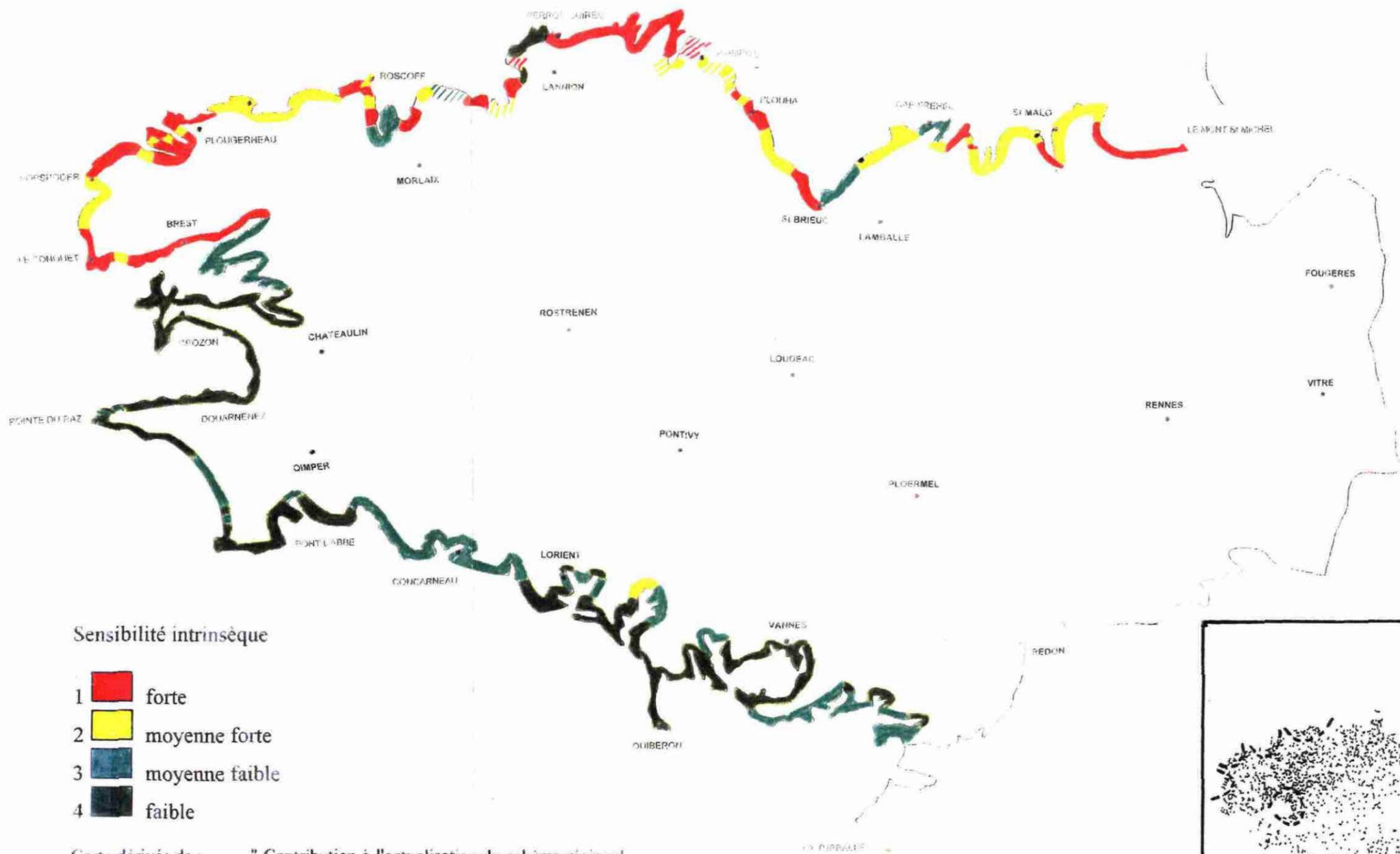
On remarque par ailleurs que la sensibilité intrinsèque du sous-sol est limitée (classe 4).

- Au Nord de la Bretagne, la région de Saint Malo-Cancale : le secteur a également une configuration de presqu'île, l'eau salée pouvant progresser depuis l'Ouest, le Nord et l'Est. Les nombreux forages qui y existent sont essentiellement exploités pour l'irrigation des cultures maraîchères à des débits de l'ordre de 5 à 15 m³/heure. Les débits restent limités, mais leur multiplication et la concentration des irrigations sur de courtes périodes sont de nature à provoquer une invasion salée dont l'impact économique serait grave : disparition d'une ressource en eau souterraine de bonne qualité et, si l'irrigation se poursuivait un temps sans précautions, stérilisation de terres agricoles parmi les plus productives. La sensibilité intrinsèque de cette zone est en classe 1 et 2, ce qui est un facteur aggravant.

Les secteurs placés en classe de vulnérabilité 2 sont, a priori, moins préoccupants, ce qui n'exclut pas la possibilité d'invasions de micro-zones par de l'eau salée.

Dans ces différents secteurs, il n'y a pas actuellement, de cas graves connus et vérifiés. Des inventaires spécifiques seraient nécessaires pour réaliser un état des lieux, identifier d'éventuels signes d'évolutions défavorables, évaluer la situation et définir les moyens de gestion à mettre en place. Le SDAGE Loire-Bretagne ne formule pas de recommandations particulières concernant les aquifères littoraux en Bretagne.

Les aquifères littoraux de France métropolitaine



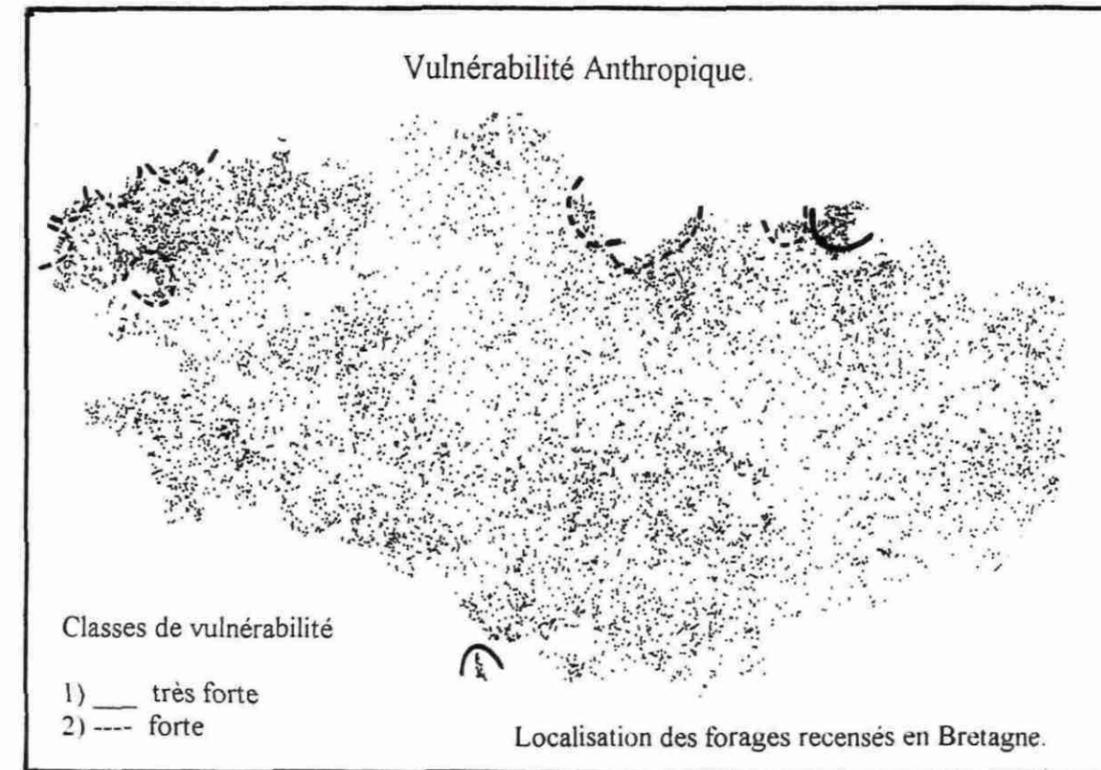
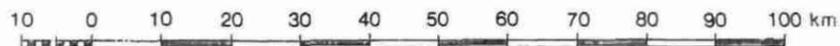
Sensibilité intrinsèque

- 1 ■ forte
- 2 ■ moyenne forte
- 3 ■ moyenne faible
- 4 ■ faible

Carte dérivée de : " Contribution à l'actualisation du schéma régional d'alimentation en eau potable - Nouvelles ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables - BRGM 1995 - R38264 (Région Bretagne - Agence de l'eau - Ministère de l'Industrie)

Fond géologique : maquette à 1/500 000 de la nouvelle carte de la France à 1/1 000 000 (BRGM)

Echelle : 1/1 000 000



Classes de vulnérabilité

- 1) — très forte
- 2) - - - forte

Localisation des forages recensés en Bretagne.

Fig. I-10 - Bretagne, sensibilité des aquifères au risque d'invasion salée et vulnérabilité anthropique

I-6. Les aquifères littoraux des pays de Loire

Ce chapitre traite des aquifères littoraux des départements de la Loire Atlantique et de la Vendée. La longueur du littoral est de 320 km.

I-6.1. LES AQUIFERES COTIERS DE FAIBLE EXTENSION DE LA REGION

On recense, dans cette région, un certain nombre d'aquifères littoraux (fig. I-11) dont l'exploitation est très ponctuelle, avec des débits très modérés. Les risques d'intrusion d'eau salée marine y sont réduits. C'est le cas :

- de l'anticlinal de Cornouaille, au nord de la Loire, constitué de micaschistes, gneiss, granites (aquifère 615a) ;
- du massif granitique de Guérande (aquifère 639b) ;
- des terrains cristallophyliens du domaine métamorphique vendéen (aquifère 614c) ;
- des terrains primaires (schistes, grauwackes, arkoses, quartzites) de la Roche-sur-Yon (aquifère 652a) ;
- des massifs rhyolitiques (Saint-Martin-de-Breun, Saint-Julien des Landes) intrusifs dans les sédiments primaires.

Les sédiments secondaires crétacés (argiles marnes, sables et calcaires) et tertiaires (calcaires lutétiens, sables et graviers éocènes, calcaires et faluns helvétiens) forment des bassins côtiers vendéens des marais de Bouin et Challans. Un recouvrement par les alluvions marines est en place.

Cet aquifère fait l'objet de prélèvements d'eau salée (30 à 38 %) pour de la pisciculture à Noirmoutier et à Beauvoir-sur-mer : 0,6 hm³ (millions de m³) en 1995.

Le cas de l'île de Noirmoutier est intéressant sur les plans de l'hydrologie et de la politique de gestion raisonnée ; il fait l'objet du paragraphe suivant.

I-6.2. ILE DE NOIRMOUTIER

(d'après "les eaux souterraines de l'île de Noirmoutier" du service d'hydrogéologie du Conseil Général de Vendée)

L'île de Noirmoutier constitue un ensemble hydraulique à la fois fragile et complexe. On y trouve des aquifères d'eau douce et d'eau salée (fig. I-12). Les deux nappes d'eau douce sont :

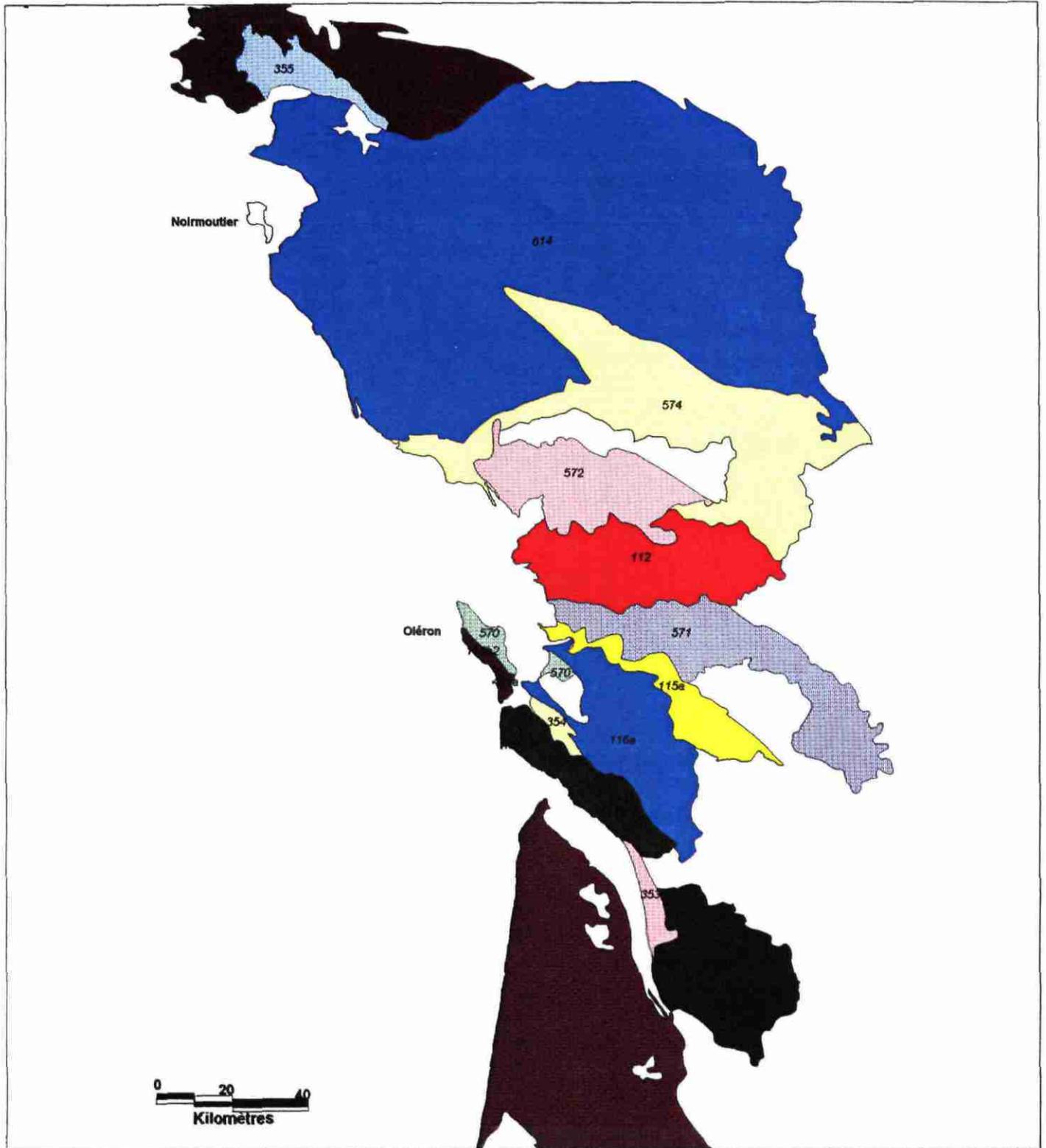


Fig. I-11 - Pays de la Loire, Aquifères côtiers

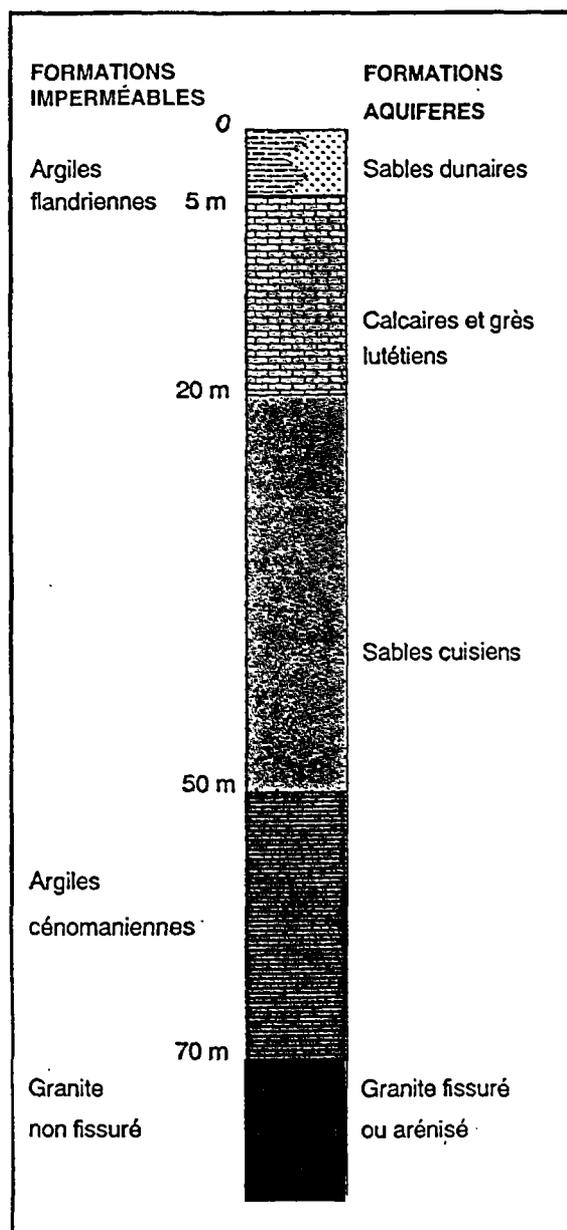


Fig. I-12 - Vendée, coupe géologique synthétique du sous-sol de l'île de Noirmoutier (d'après document du Service Départemental d'Hydrogéologie de Vendée)

- la nappe des sables dunaires. Son eau est captée par de nombreux puits ou trous d'eau et utilisée à des fins domestiques (arrosage des jardins, pompes à chaleur,...) ou agricole (arrosage de cultures) ;
- la nappe des granites, discontinue et circulant dans les zones fissurées ou altérées. De nombreux puits captent l'eau des arènes à quelques mètres de profondeur pour un usage domestique, un forage plus profond (63 m) fournit au collège Molière de Noirmoutier-en-l'île plus de 15 m³/h d'une eau à forte teneur en chlorures et fer.

Cette nappe est indépendante de la nappe salée des calcaires.

Les nappes d'eau salée circulent dans les calcaires lutétiens et dans les sables cuisiers.

Nappe d'eau salée des calcaires lutétiens

Les calcaires du Lutétiens renferment une nappe d'eau salée en relation hydraulique avec l'océan à l'ouest et l'eau de la baie de Bourgneuf à l'est.

Très fissurés, ces calcaires ont une productivité aquifère importante et permettent de prélever des débits de 50 à 200 m³/h pour des ouvrages de 10 à 15 m de profondeur (débits spécifiques compris entre 35 et 95 m³/h/m). Cette eau est utilisée pour l'aquaculture avec les objectifs suivants :

- maintenir la température de l'eau des bassins au-dessus de 5°C (utilisation annuelle de quelques jours à quelques semaines) ;
- maintenir l'eau d'élevage à la température optimale de croissance du poisson (11 mois/12) ;
- support d'élevage (utilisation toute l'année) ;
- pas d'espèces ou de parasites qui entrent en compétition.

La production a été de 7,6 millions de m³ en 1995.

L'eau à faciès maritime de la nappe des calcaires, de température quasiment constante et riche en éléments nutritifs est, depuis 10 ans, un atout majeur du développement de l'aquaculture sur l'île de Noirmoutier.

Nappe d'eau salée des sables cuisiers

De caractéristiques physico-chimiques proches de la nappe des calcaires, avec une température légèrement plus élevée (14,5°C), l'eau des sables cuisiers n'a cependant pas été exploitée jusqu'à présent :

- la productivité est inférieure (10 à 20 m³/h par ouvrage et débit spécifique de 1 à 2 m³/h/m.

I-6.3. ASPECTS ECONOMIQUES ET GESTION

Les ressources en eaux souterraines de l'île de Noirmoutier constituent un système hydraulique complexe utilisé pour des usages multiples. Dans ce contexte, l'interaction entre les nappes d'eau douce et d'eau salée, ainsi que la déstabilisation des argiles superficielles ont mis en évidence les limites d'utilisation de la ressource et la nécessité de sa gestion raisonnée.

La mise en place, en 1990, d'un réseau de suivi quantitatif (niveaux, débits soutirés) et qualitatif (évolution physico-chimique) a permis dans un premier temps de mieux cerner le fonctionnement de ces nappes.

Les résultats acquis ont alors permis d'élaborer un modèle mathématique de simulation permettant de prévoir l'évolution des nappes (niveau et qualité) en fonction de leur exploitation future envisagée.

Dans les conditions actuelles d'exploitation, l'alimentation en eau salée de la nappe se fait par infiltration d'eau de la baie de Bourgneuf en bordure immédiate de la cote (à moins de 100 m de celle-ci).

Le modèle montre ainsi que :

- les affaissements de la couverture argileuse superficielle constituent le risque principal qui menace la qualité de l'eau de la nappe salée des calcaires lutétiens par infiltration d'eau douce de surface ;
- pour éviter ces désordres, un déplacement de certains points de prélèvements réduirait de 60 % la superficie de la zone à "risque potentiel" ;
- en l'absence d'infiltration "accidentelle" d'eau de surface, l'exploitation de la nappe salée au régime actuel (position des forages, débit et périodes de pompages), ne provoquera pas de modification de sa qualité physico-chimique.

Ce modèle représente un outil de gestion fort utile pour orienter les décisions qui doivent être prises afin de préserver la ressource en eau (douce ou salée) et son environnement.

Au moment où, conformément à la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, se met en place une politique de gestion raisonnée de l'eau, la démarche entreprise sur l'île de Noirmoutier par le Conseil Général de la Vendée et l'ensemble des utilisateurs des eaux souterraines apparaît comme exemplaire.

I-6.4. AQUIFERES DU JURASSIQUE (Dogger et Lias)

"Deux niveaux aquifères majeurs sont localisés dans les calcaires jurassiques. Ce sont les calcaires dolomitiques et gréseux du Lias inférieur d'une part (plus anciens) et les calcaires graveleux blanchâtres du Dogger d'autre part (plus récents). Ils renferment

chacun une nappe exploitée à la fois pour les besoins de l'alimentation en eau potable et de l'irrigation. L'eau est essentiellement contenue dans des fractures plus ou moins élargies par la dissolution du calcaire au contact des eaux infiltrées et chargées en gaz carboniques (processus de karstification).

L'aquifère du Lias inférieur a pour substratum imperméable des formations argileuses (Infralias et socle). Il est séparé de l'aquifère supérieur du Dogger par des terrains marneux du Toarcien qui n'assurent probablement pas une parfaite étanchéité entre les deux nappes. La nappe du Lias inférieur est libre sur la bordure nord de la plaine où ces terrains affleurent et devient rapidement captive vers le sud (fig. I-13 et fig. I-14).

Sous la plaine, la nappe du Dogger est libre. Cependant l'aquifère est rapidement dénoyé dans sa partie nord. De ce fait la nappe n'est exploitable que dans la partie sud de la plaine et en bordure du marais où elle devient à son tour captive sous les formations argileuses des terrains sus-jacents : bri ou marnes du Callovien. De nombreuses sources situées en bordure du marais assurent la vidange de cette nappe en hautes eaux.

Sous le marais, les deux aquifères contiennent de l'eau salée. Il s'agit d'une eau ancienne qui est restée sur place depuis les invasions marines du début du Quaternaire. Il existe donc une zone de contact entre l'eau douce et l'eau salée, appelée biseau salé, qu'il convient de connaître pour mieux comprendre les échanges et les mouvements relatifs entre eau douce et eau salée".

I-6.5. LE BISEAU SALE DANS LES AQUIFERES AU JURASSIQUE

Le biseau salé dans ces aquifères séparent les eaux douces des aquifères de l'eau salée du Marais Poitevin. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un aquifère littoral, mais le contexte d'exutoire dans des eaux salées est similaire.

Les caractéristiques du biseau sont les suivantes :

- relative stabilité de sa position, exception faite dans des conditions climatiques et d'exploitation particulière (1990) ; le risque de migration existe localement (secteur de Pont-à-Didot à Luçon et du Laugon) ;
- à une diminution de charge égale suite à une sollicitation par pompage, le comportement des forages concernant la qualité chimique des eaux n'est pas similaires ;
- existence de phénomènes locaux de remontée du niveau salé sous forme de dômes salins à l'aplomb de certains sondages.

D'après "Plaine et Marais du Sud-Vendée" et de "l'Ouest des Deux-Sèvres". Etude globale pour la gestion de la ressource en eau souterraine. Synthèse générale - Rapport CALLIGEE (pour les paragraphes I-6.4 et I-6.5).

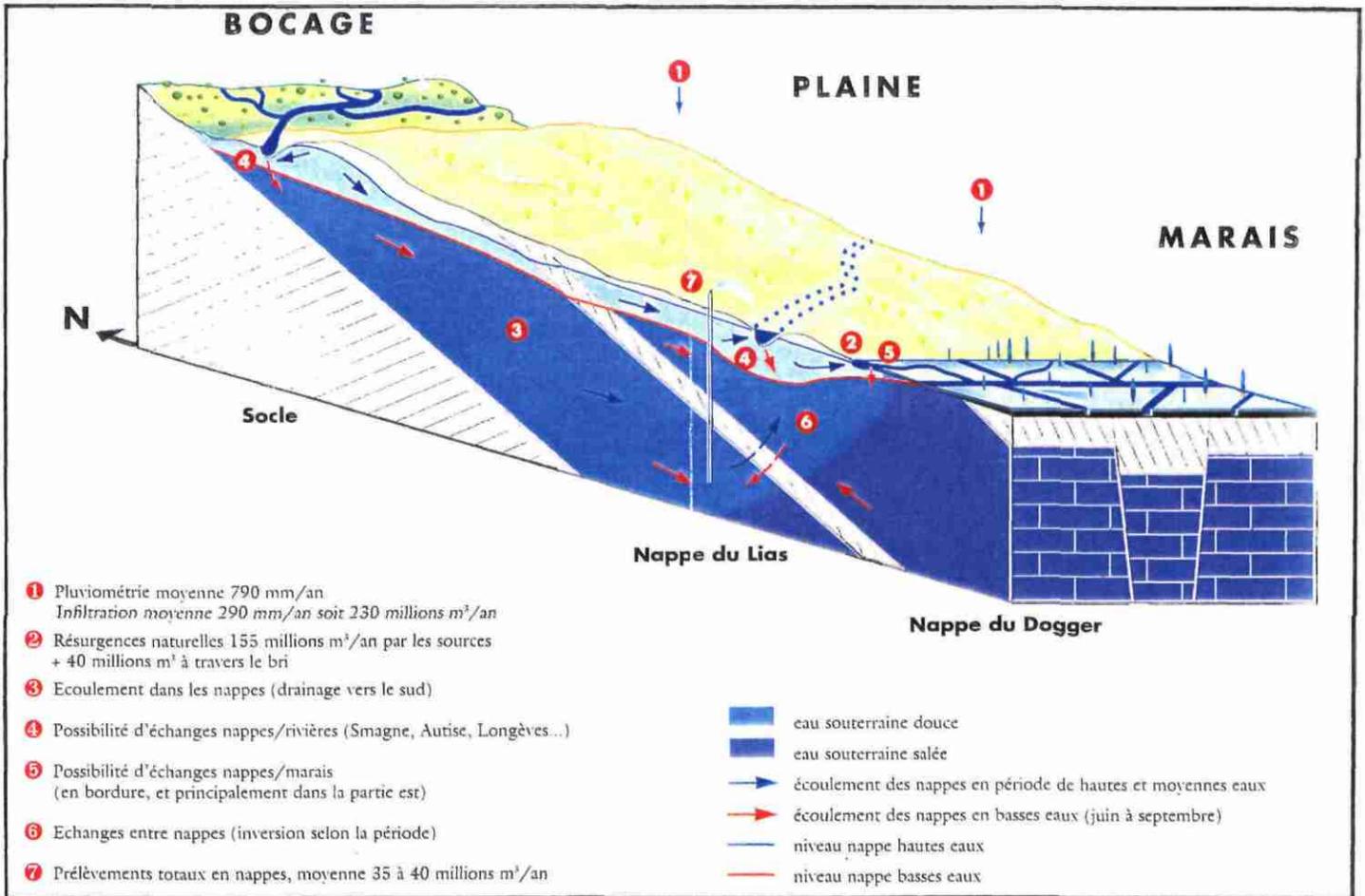
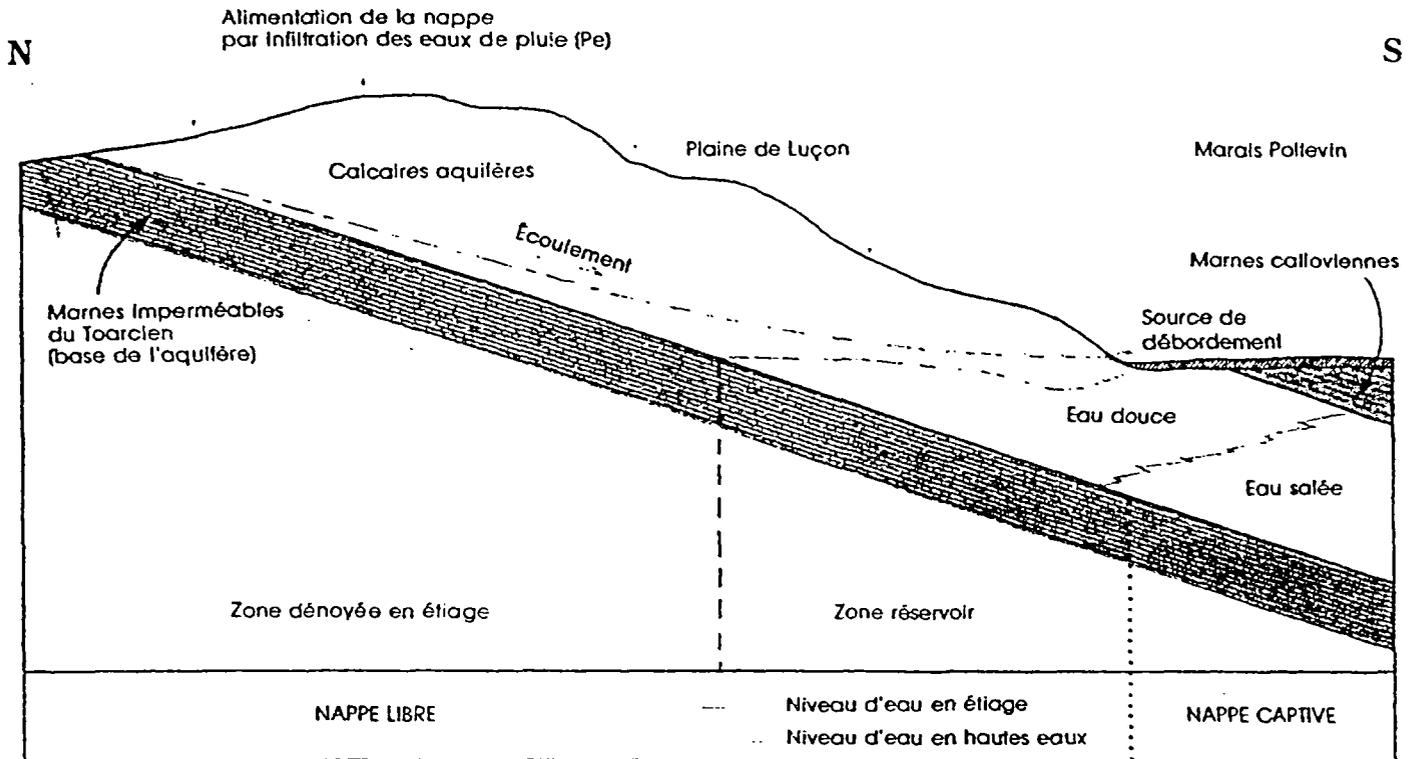


Fig. I-13 - Vendée, fonctionnement schématique du système hydraulique nappe/marais (d'après document du Service Départemental d'Hydrogéologie de Vendée)

NAPPE DU DOGGER



NAPPE DU LIAS INFÉRIEUR

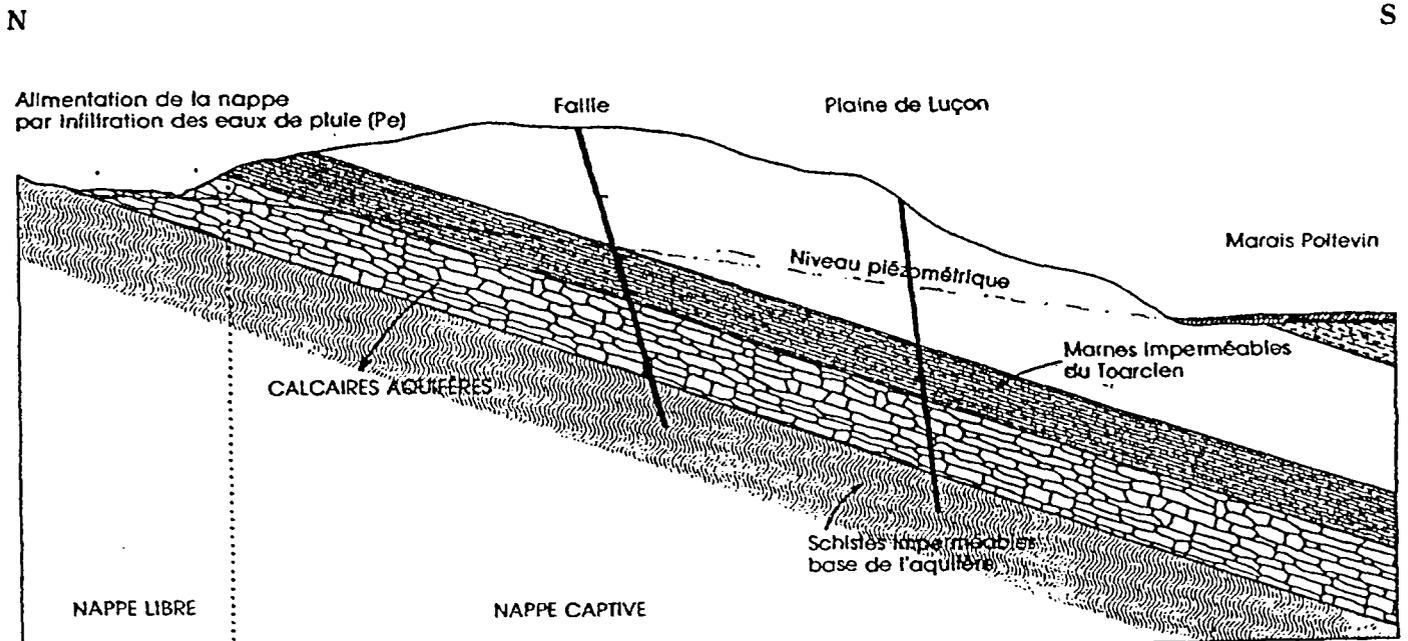


Fig. I-14 - Pays de Loire, schémas représentant les nappes du Lias inférieur et du Dogger (d'après document du Service Départemental d'Hydrogéologie de Vendée).

I-6.6. LES RISQUES D'INVASION SALINE (aquifères du Jurassique)

On considère qu'ils sont limités, à condition de ne pas recréer les conditions d'exploitation de 1990. A cette fin, a été mis en place un protocole de réglementation des forages.

Actuellement, on estime que les prélèvements dans la nappe (AEP et autres) représentent 36 à 12% de la recharge moyenne, respectivement pour les nappes du Lias et du Dogger. Pour les deux aquifères, l'alimentation est estimée à 236 hm³ et les prélèvements à près de 34 hm³.

La partie de l'aquifère du Dogger envahie par de l'eau impropre à toute utilisation à des fins d'irrigation débute à quelques centaines de mètres du contact plaine-marais. Sur une bande de 400 à 500 m de large en bordure du marais où l'interface eau douce/eau salée existe, le risque de remontée d'eau salée à l'aplomb d'un forage d'exploitation est bien réel. Ce risque est d'autant plus élevé, que le forage recoupe la zone de transition et que l'épaisseur d'eau douce la surmontant est réduite. Si le débit d'exhaure augmente, le risque s'accroît également. On peut estimer que ce risque est important si l'épaisseur minimale d'eau douce reste inférieure à 10 m.

Afin de réduire ce risque en bordure du marais, il convient d'exploiter des forages peu profonds ne descendant pas jusqu'à la zone de transition. Il suffit pour cela de cesser la foration quelques mètres après avoir rencontré les arrivées d'eau principales, localisées généralement à faible profondeur. Pour les forages trop profonds, une cimentation de la partie inférieure de l'ouvrage doit être envisagée.

I-6.7. MESURE DE PROTECTION

En plus du protocole de réglementation des forages déjà signalé, un modèle d'écoulement des deux nappes a été bâti. Il a permis de préciser le fonctionnement de la nappe (influence de la recharge hivernale du niveau d'eau imposé par le marais, des prélèvements pour l'irrigation...).

A partir des résultats sur les niveaux de nappe, des règles de gestion sont formulées en tenant compte de la présence du biseau dont cependant la position précise n'est pas calculée par le modèle.

I-7. Les aquifères littoraux de la Côte Aquitaine

I-7.1. CADRE GENERAL

Le bassin d'Aquitaine est largement ouvert sur la façade atlantique (fig. I-15). Il est bien alimenté en eau, grâce :

- à des couches géologiques sédimentaires constituant des aquifères captifs très étendues et bien alimentées ;
- à des formations superficielles perméables qui favorisent l'infiltration d'une grande proportion de la pluie sur de vastes surfaces.

La coupe géologique de la figure I-16 indique la position des différentes formations (Sourisseau, 1996).

Au niveau du littoral, il est probable que les nappes profondes se confinent à cause de variation de faciès qui deviendront moins perméables. Les exutoires seraient en majorité des flux par drainance dans d'autres aquifères.

I-7.2. SYSTEMES AQUIFERES LITTORAUX

Les systèmes aquifères littoraux de la côte aquitaine sont présentés sous la forme d'un tableau rassemblant leurs principales caractéristiques et les conséquences liées à la proximité de la mer. Le cas de la Gironde est développé au paragraphe I-7.3.

Aquifère	Caractéristiques générales	Contexte littoral	Aspect littoraux des aquifères
Crétacé inférieur	système profond et minéralisé		
Base du Crétacé supérieur	calcaires du Turonien et sables du Cénomaniens (calcaires dolomitiques dans le sud de la côte aquitaine) Dans la pointe de la Grave, il est situé à 500 m de profondeur	Seul aquifère à eau douce utilisable dans ce secteur mais avec teneur élevée en fluor, sodium et potassium	
Sommet du Crétacé supérieur	accessible depuis l'estuaire de la Gironde jusqu'à Arcachon - à grande profondeur dans le sud (plus de 1 000 m)	exploité par une centrale nucléaire et par le district sud du bassin d'Arcachon	eaux douces à l'intérieur et en relation avec les eaux océaniques jusqu'à 5 g/l en bordure du littoral (origine fossile probable)

Les aquifères littoraux de France métropolitaine

Aquifère	caractéristiques générales	Contexte littoral	Aspects littoraux des aquifères
Eocène	système multicouche sables, graviers et calcaire, grès vers l'ouest en continuité Pointe de Grave jusqu'au chenal de Gua	nappe en équilibre avec les milieux marins et estuariens	eaux minéralisées, inuti- lisables pour l'eau potable. Hypothèse : eaux fossiles datant de la dernière transgression du Flandrien, des usages aquacoles ont été recherchés, mais les teneurs en fer et en ammonium sont élevées
	plus au sud jusqu'à Arcachon	eau de qualité pour de l'eau potable, bonne productivité ($> 100 \text{ m}^3/\text{h}$ par forage) Pas d'évolution de la minéralisation suite aux pompages, malgré la présence d'un gradient d'est en ouest	l'exutoire principal est l'estuaire de la Gironde, ce qui la rend localement vulnérable à des pollutions, alors que d'importantes dépressions de niveaux dues à des pompages intensifs affectent la zone bordelaise. Un programme d'étude est en cours (reconnaissance de terrain, mise en place d'un réseau de suivi et d'alerte)
	Sud Arcachon : situé à plus de 1 000 m de profondeur	pas de forage AEP	
Oligocène	calcaires gréseux de Vendays- Montalivet à Mimizan	aquifère bien protégé ; eau de qualité pour AEP production de 100 à $200 \text{ m}^3/\text{h}$ pour des forages profonds de 100 à 200 m	aucune intrusion saline identifiée
	au sud de Mimizan, l'Oligocène est souvent marneux, compact et n'est plus aquifère		
Miocène	D'Hourtin à Arcachon les calcaires à faluns contiennent une nappe en charge	eau de qualité pour l'AEP souvent artésien jaillissant, débits entre 30 et $100 \text{ m}^3/\text{h}$	
	jusqu'à la faille de Parentis, passage à des sables verts à glauconie	sables difficiles à capter, eau douce	
Pliocène	graviers	nappe artésienne, parfois jaillissante, débits importants (40 à plus de $100 \text{ m}^3/\text{h}$) eau de mauvaise qualité (eau acide et jusqu'à 20 mg/l de fer)	
Quaternaire	sables fluviatiles avec des niveaux de graviers, tourbes, argiles, lignites. 70 à 80 m d'épaisseur le long du littoral	eau de très mauvaise qualité (fer, azote, acidité, matières organiques). Exutoire principal : la mer	charge piézométrique amont très élevée (lacs landais entre 6,5 m et 2 m d'altitude) quasi- impossibilité de provoquer des intrusions salines par pompage
Systèmes alluviaux	Gironde, Adour, Bidassoa		envahis par les eaux marines
			aquaculture marine au sud de Bayonne

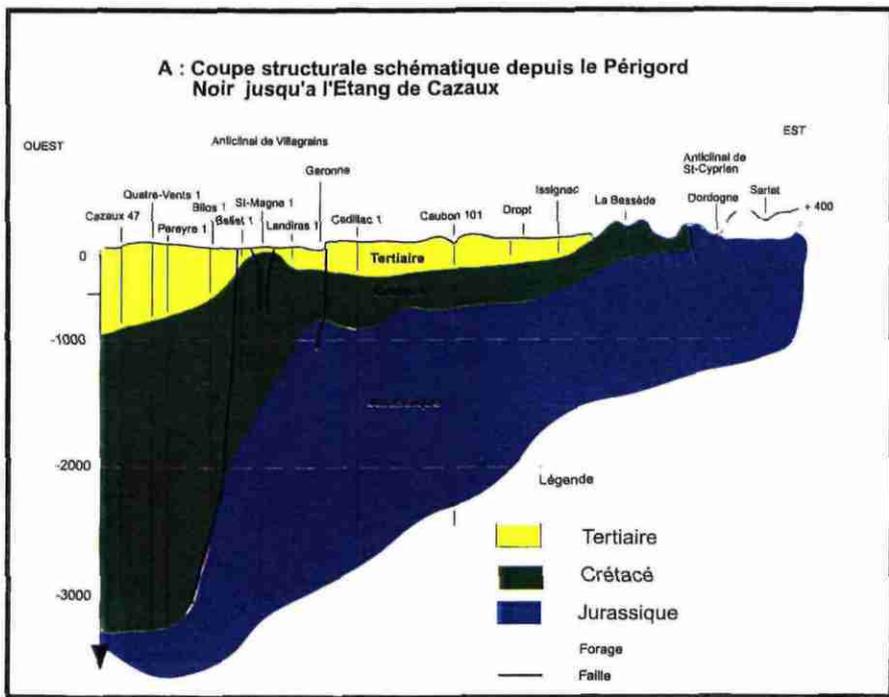
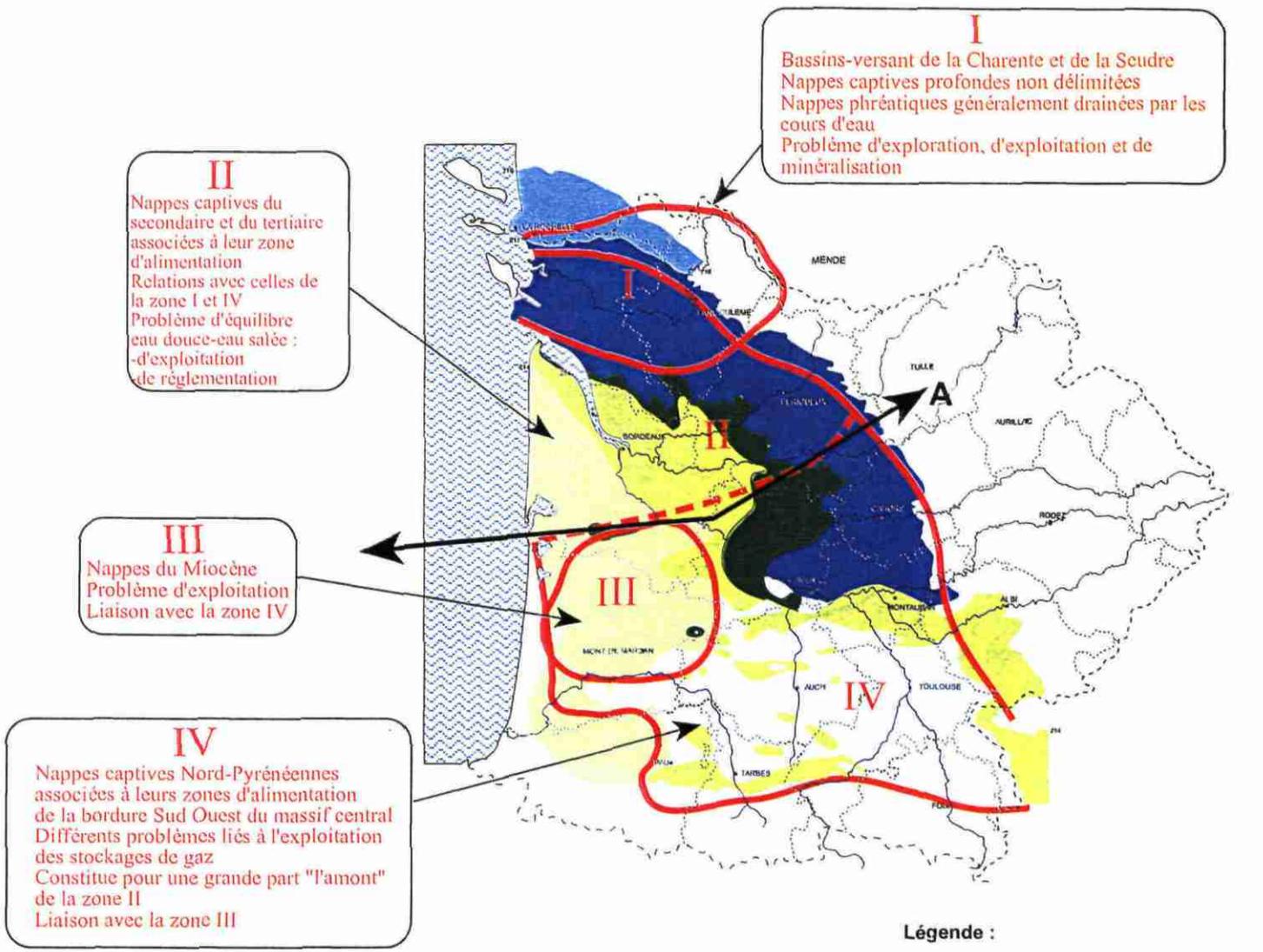


Fig. I-15 - Aquitaine, principaux systèmes aquifères captifs (d'après document SDAGE Adour-Garonne)

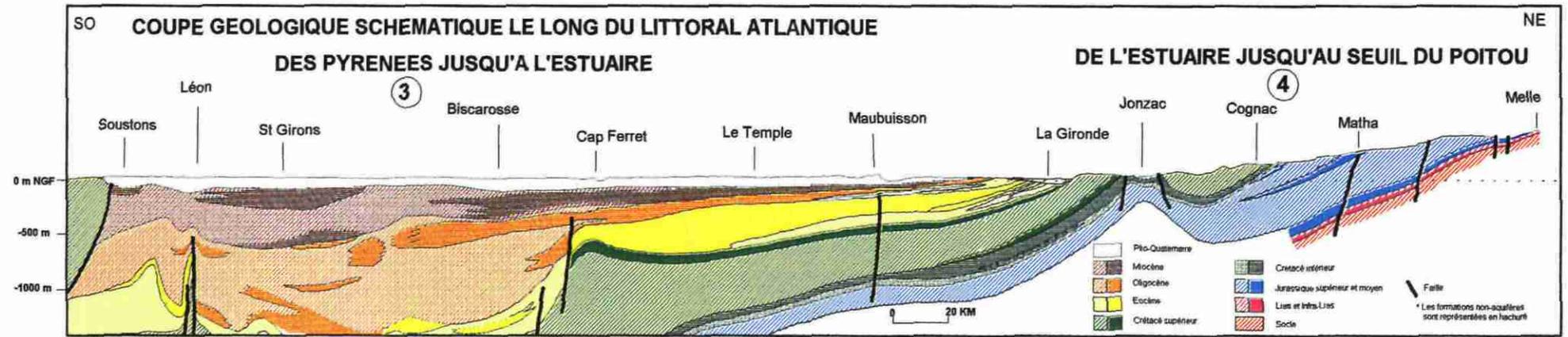


Fig. I-16 - Aquitaine, coupe géologique schématique le long du littoral atlantique des Pyrénées à l'estuaire

I-7.3. LES POMPAGES DANS LA GIRONDE

Le département de la Gironde, l'un des plus riches en France en eau souterraine, est aussi celui où les nappes de qualité sont les plus exploitées.

En 1959, le décret-loi de 1935 qui permet de protéger les nappes (autorisation préalable d'exécution et de prélèvement pour tout forage de plus de 60 m) est étendu au département de la Gironde.

Entre 1959 et 1994, les volumes extraits des nappes profondes passent de 31 à 124 millions de m³/an, avec un débit de pointe de 1 million de m³/j.

Le quadruplement des soutirages depuis 1959 a pu s'effectuer sans incident grâce à la gestion qu'autorise une surveillance et une gestion constantes :

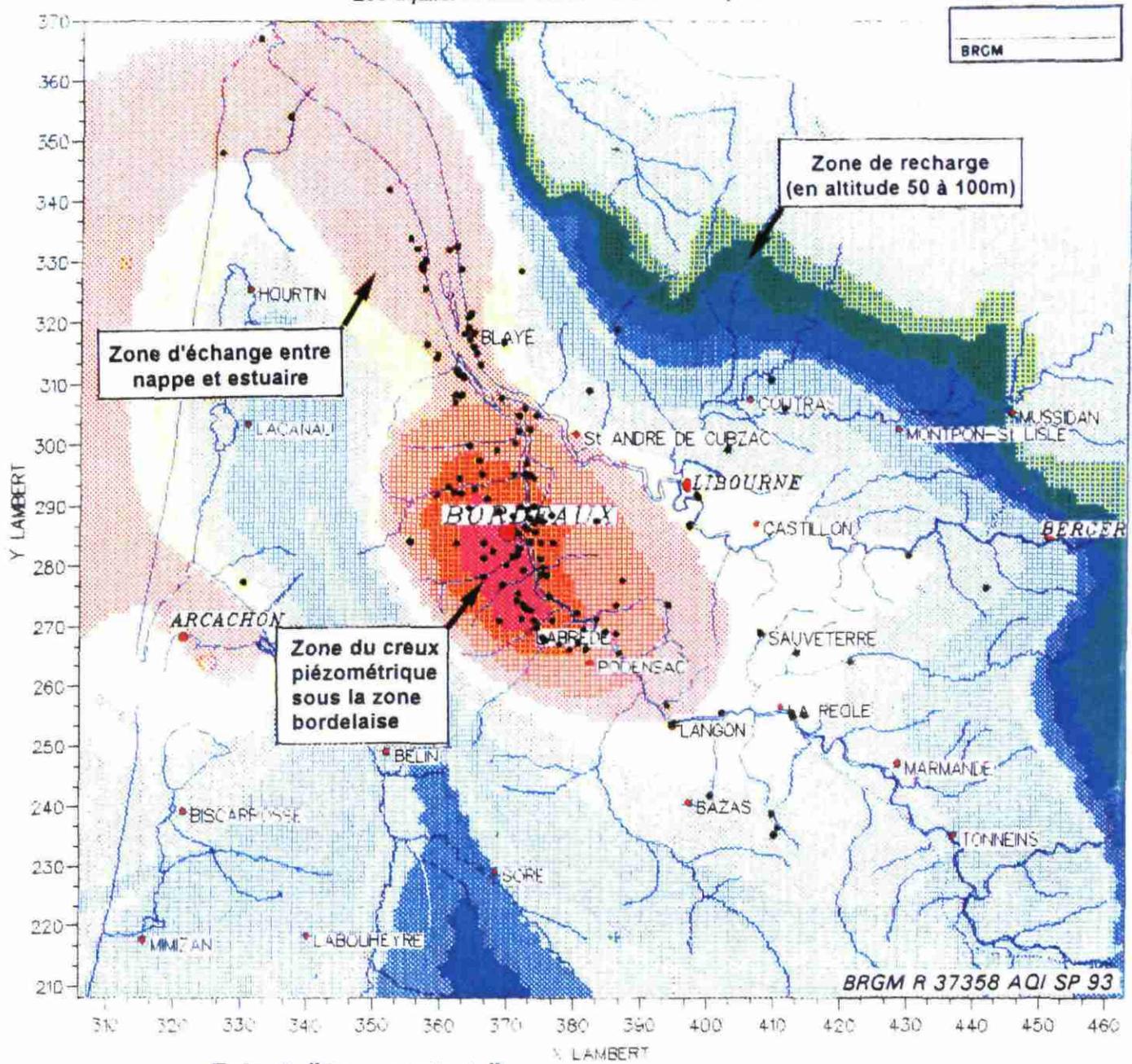
- des niveaux qui ont baissé de 80 m sous Bordeaux, où la nappe se situe maintenant à 30 m sous le niveau de la mer (fig. I-17) ;
- des volumes prélevés ;
- de la qualité des eaux brutes qui évolue avec les pompages

Les équilibres de nappe sont instables et les risques de pollution par infiltration d'eau saumâtre et polluées de l'estuaire et des rivières existent, en particulier dans l'Eocène au niveau de l'estuaire de la Gironde, si le creux piézométrique sous Bordeaux n'est pas stabilisé. Le BRGM a mis en place un modèle régional multicouches dans le but de reconstituer le comportement des nappes. Les simulations ont montré que :

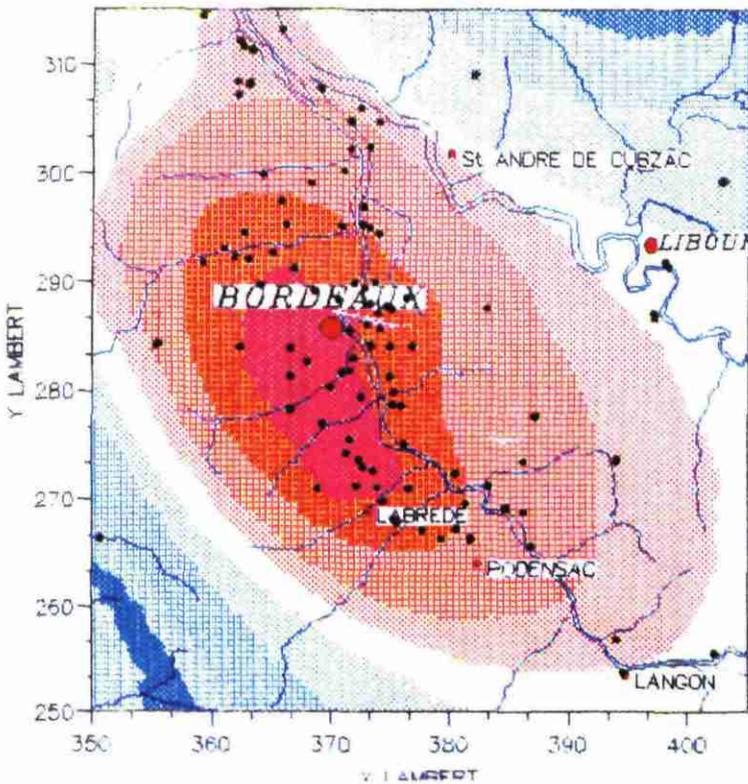
- des mesures de sauvegarde doivent être mises en place sur les secteurs où la nappe oligocène est libre ou faiblement captive ;
- une augmentation à peine sensible des prélèvements dans l'Eocène entraînerait une situation critique dès 1997 ;
- l'augmentation des prélèvements dans l'Eocène dans la zone Ambes-Basses ne doit pas être envisagée ;
- l'augmentation des prélèvements en Dordogne, Lot-et-Garonne et zone atlantique sont possibles en prenant quelques précautions.

I-7.4. SDAGE ADOUR-GARONNE

Le SDAGE ADOUR-GARONNE recommande que le Comité de Bassin, après consultation de sa commission "Nappes profondes", mette en place une structure de concertation visant la gestion globale des aquifères captifs profonds dont la constitution tient compte, entre autre, des principaux problèmes affectant les nappes profondes. L'équilibre eau douce-eau salée (exploitation, réglementation) en fait partie.



Extrait "Zone centrale"

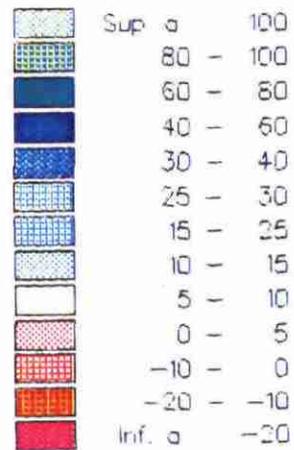


NAPPE DE L'EOCENE MOYEN

Carte piézométrique

ANNEE 1990

isopiezies en mNGF



• Point de mesure

Fig. I-17 - Aquitaine, nappe de l'Eocène moyen - Carte piézométriques (1990)
(extrait du rapport BRGM R 37358 - AQI SP 93)

I-7.5. CONCLUSION

De la Pointe de Grave jusqu'au sud des Landes, les nappes profondes captives assurent, sans problème, la majorité des besoins en eau potable du littoral. Seule la région d'Arcachon est alimentée par le lac de Cazaux en période estivale. La nappe la plus profonde du Crétacé est délaissée car fluorée. Elle permet des usages géothermiques encore peu développés (Aquacity à Arcachon, pisciculture d'esturgeons au Teich - projet d'écloserie au Verdon).

Dans les Pyrénées-Atlantiques et l'extrême sud des Landes, les nappes superficielles sont salées et les aquifères littoraux sont quasi inexistantes. Le district de Bayonne-Biarritz est alimenté en eau potable majoritairement par des eaux superficielles.

Les nappes des sables des Landes et du Pliocène contiennent de très importantes quantités d'eau qui alimentent les lacs, les rivières très utilisées pour la pisciculture de huîtres (première en France), les irrigations de propriétés maïscicoles, et naturellement permet la sylviculture extensive des pins maritimes. D'autres valorisations sont recherchées.

Plusieurs centaines de millions de mètres cubes d'eau souterraine s'écoulent de la nappe des sables des Landes vers l'océan. Nul doute, que ces apports ont un rôle fondamental dans l'écosystème du littoral atlantique aquitain et contribuent aux équilibres biologiques actuels. Cette nappe est bien protégée d'invasion saline grâce au gradient hydraulique de la nappe très élevé.

I-8. Les aquifères littoraux en Languedoc Roussillon

Les départements littoraux faisant partie de la région Languedoc-Roussillon sont, d'Ouest en Est, les suivants : les Pyrénées-Orientales, l'Aude, l'Hérault et le Gard. La longueur des côtes est de 150 km environ.

I.8.1. DESCRIPTION GENERALE DES AQUIFERES

La région Languedoc-Roussillon regroupe une grande diversité d'aquifères le long du rivage de la Méditerranée avec d'Ouest en Est : nappes alluviales des fleuves côtiers : Aude, Orb, Hérault, Vidourle et Rhône (partie Ouest de la Camargue), nappes profondes : aquifère pliocène du Roussillon, nappe captive des sables astiens entre Béziers et Agde, nappe de la Vistrenque sous couverture, aquifères de type karstique : nappe des Corbières, Montagne de la Clape, Montagne de la Gardiole, aquifères de plaines littorales (de Sète à Lunel).

Sur la zone littorale, les prélèvements dans les nappes correspondent à 80 hm³/an (1986) et l'alimentation en eau potable est assurée à 94 % par les eaux souterraines :

- nappes alluviales : 43 %
- karst : 34 %
- nappes profondes : 17 %
- eaux de surface : 6 %

Les eaux souterraines sont également utilisées pour :

- l'agriculture avec une partie des besoins agricoles couverts par des eaux de surface (eaux du Rhône par le canal Philippe Lamour) ;
- le thermalisme : station de Balaruc-les-Bains, troisième station de France avec 35 000 curistes par an ;
- pour la thalassothérapie et pour le seaquarium, pompages d'eau salée dans ou sous le cordon dunaire à la Grande-Motte, au Grau du Roi, à Port Camargue.

I-8.2. LES NAPPES ALLUVIALES

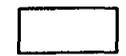
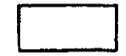
Une carte de la qualité des aquifères a été établie en 1985 (fig. I-18 à I-20). D'après les analyses réalisées depuis cette date, il n'y a pas eu de modifications notables (Marchal JP., 1976).

On observe des eaux qui présentent une salinité supérieure à 350 mg/l sur une frange cotière qui couvre une surface comprise entre 400 et 500 km². Cette frange qui a vraisemblablement toujours existé n'est pas globalement d'origine anthropique.

Légende des figures I.18 - I.19 - I.20

Carte dressée par J.P. MARCHAL

Echelle 1/250 000

-  Limite de département
-  Limite du système ou du domaine aquifère
- 558d** Numéro du système ou du domaine aquifère
-  Limite des bassins RHONE-MEDITERRANEE-CORSE, ADOUR-GARONNE et LOIRE-BRETAGNE
-  Limite de compétence des Agences de bassins
-  Eau de bonne qualité générale
-  Eau de qualité satisfaisante, mais avec des caractéristiques physiques ou organoleptiques médiocres :
 -  Agressivité
 -  Dureté (supérieure à 20/25° français)
-  Eau de qualité médiocre ou mauvaise
-  Zone sans ressource en eau souterraine notable
-  Contamination bactériologique fréquente dans le temps ou dans l'espace (captages en zones essentiellement karstiques ou cristallines)
-  Zone à l'intérieur de laquelle les eaux souterraines présentent des concentrations avoisinant ou dépassant la norme maximale admissible relative à la qualité des eaux livrées à la consommation humaine :

SO ₄	Sulfate	Fe	Fer ou/et Manganèse	H	Hydrocarbures, phénols
NO ₃	Nitrate	F	Fluor	NO ₂	Nitrite, ammoniacque
Cl	Chlorure				

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL LANGUEDOC-ROUSSILLON

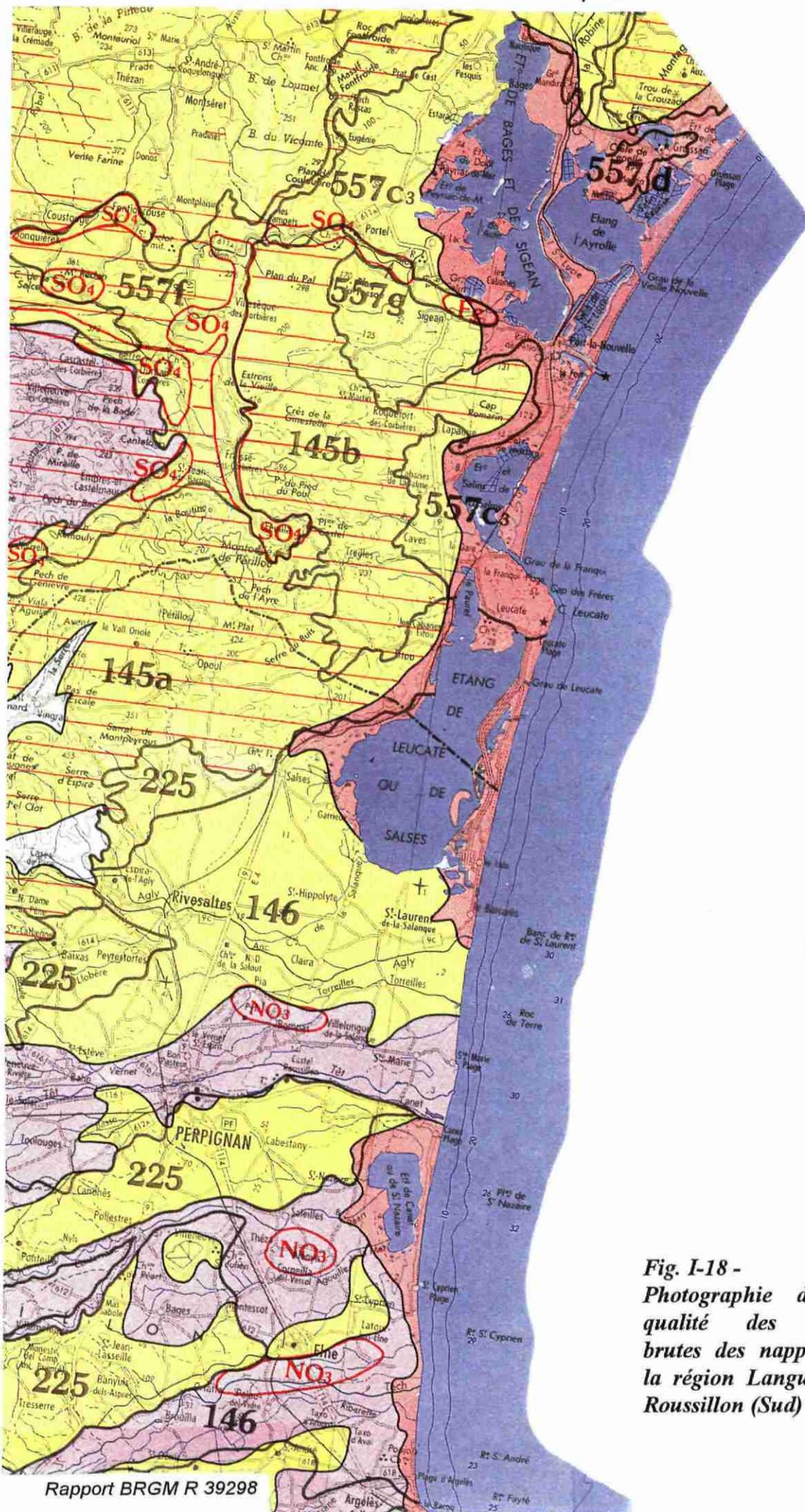


Fig. I-18 -
Photographie de la
qualité des eaux
brutes des nappes de
la région Languedoc-
Roussillon (Sud)

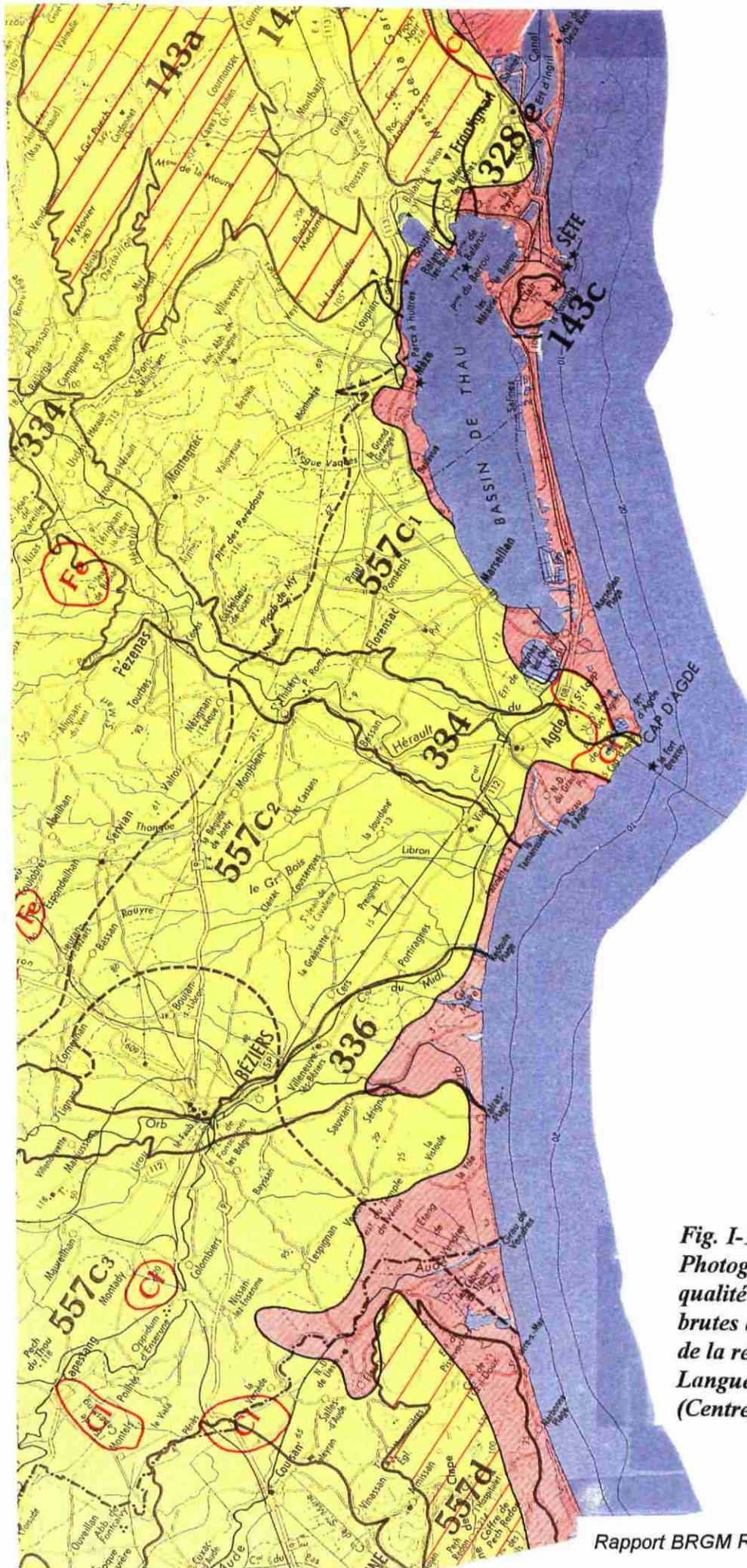
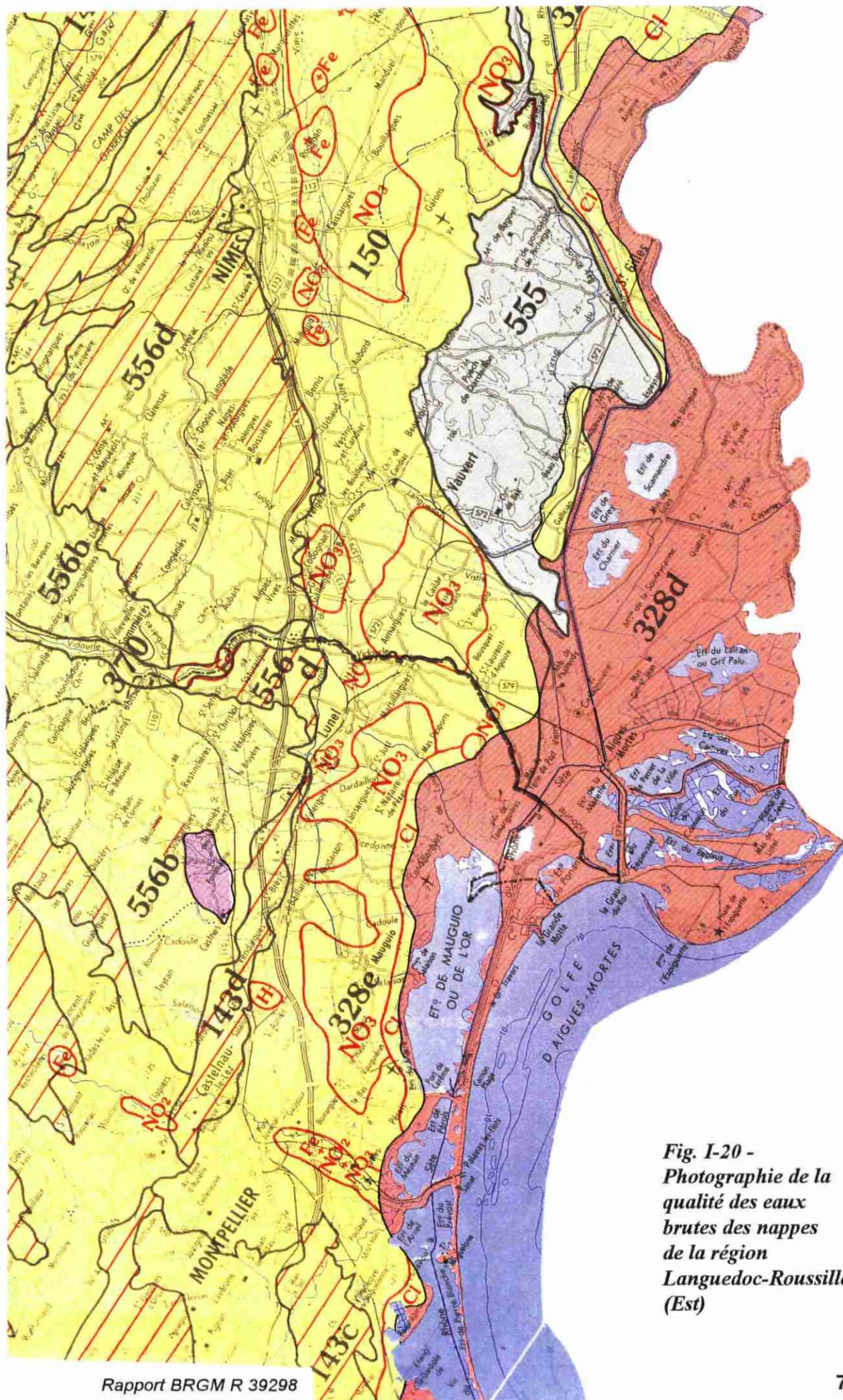


Fig. I-19 -
Photographie de la
qualité des eaux
brutes des nappes
de la région
Languedoc-Roussillon
(Centre)



*Fig. I-20 -
Photographie de la
qualité des eaux
brutes des nappes
de la région
Languedoc-Roussillon
(Est)*

Par système aquifère, la situation est la suivante :

a) Les alluvions quaternaires (unité 146)

Les alluvions quaternaires sont associées aux vallées de l'Agly, de la Têt et du Tech et s'étendent sur le littoral entre l'Etang de Leucate et Argelès-sur-Mer. Leur épaisseur reste inférieure à 30 m, constituent un réservoir très largement exploité et notamment pour l'irrigation. *Dans la partie orientale du système, cet aquifère superficiel n'est plus utilisé pour l'alimentation en eau potable des agglomérations pour cause de salinité excessive (Cl > 300 mg/l).*

Dans les alluvions quaternaires, le prélèvement total atteint 45 hm³ dont 16 hm³ pour l'alimentation en eau potable de certaines collectivités, notamment Perpignan, St Cyrien, le secteur d'Elne-Argelès-Côte Vermeille et la vallée du Tech.

b) La nappe alluviale de la Berre (557g)

Elle est composée de sables et de graviers qui se situent à une profondeur de 10 à 25 m sous la surface du sol, protégés par des limons superficiels. Son extension est irrégulière, et son substratum est imperméable. *C'est un aquifère très exploité, mais à potentialités modestes (10 à 50 m³/h), avec des risques de pollution par les eaux saumâtres plus en aval (Etang de Bages et de Sigean). L'agglomération de Sigean constitue aussi un autre risque de pollution.*

c) La nappe alluviale de l'Aude

Cette nappe est faiblement productive car il y a peu d'alluvions et elles sont faiblement perméables. *Le biseau salé remonte d'environ 5 km vers l'intérieur des terres, mais sans conséquences économiques véritables car, en aval du fleuve, la nappe y a toujours été peu exploitée (CERH, 1965).*

d) La nappe alluviale de l'Orb (336)

C'est une nappe libre en relation plus ou moins directe avec le fleuve, protégée sous 2 à 3 mètres de limons d'inondation, et constituée de sables, graviers et galets.

Les débits ponctuels d'exploitation varient en fonction de la nature et de la texture des alluvions. Ils peuvent aller jusqu'à 100 m³/h quand la nappe est réalimentée par la rivière. *Cette nappe est sollicitée pour l'AEP de Béziers sans problème d'intrusion saline. Le biseau salé est situé à l'aval de Sérignan.*

e) La nappe alluviale des basses plaines de l'HERAULT

Cette nappe est contenue dans les horizons détritiques sableux et graveleux du Quaternaire déposés par le fleuve Hérault (alluvions propres) et surmontés par

d'épaisses séries de limons. Le substratum est constitué de grès, de molasses, de marnes ou argiles du Tertiaire (557c).

La nappe alluviale de l'Hérault, d'une épaisseur mouillée de 0 à 25 m, est captée par 12 puits sur la commune de Florensac en rive gauche du fleuve Hérault. Elle fournit l'eau potable à de très nombreuses communes dont Agde, Sète, et jusqu'en limite Ouest de la ville de Montpellier (Syndicat d'AEP du Bas-Languedoc). Ce champ captant, avec des potentialités unitaires de 200 à 400 m³/h par puits représente le deuxième captage AEP du département de l'Hérault (après la source du Lez : près de 50 000 m³/h).

A ce secteur en relation plus en amont avec le fleuve (nappe d'accompagnement entre 2 et 20 m de profondeur) fait suite un enfoncement des horizons détritiques vers l'aval, jusqu'à des profondeurs comprises entre 30 et 40 m, et donc sans relation avec les eaux superficielles.

Les eaux sont de bonne qualité jusqu'en amont d'Agde, puis sont polluées par l'intrusion marine au-delà (concentration en chlorures ou en sulfates supérieure à 350 mg/l). De part et d'autre de l'embouchure de l'Hérault, l'aquifère sableux et graveleux est captif, son épaisseur va de 10 à 30 m, avec un toit situé entre 30 et 40 m de profondeur. Les productivités sont bonnes, de 150 à 200 m³/h par forage, associées à des températures de l'ordre de 18 °C. Elles offrent ici et jusqu'à Marseillan-Plage des possibilités d'utilisations pour l'aquaculture.

f) La nappes alluviale du Lez

Entre Montpellier et Palavas, cette nappe a fait l'objet d'exploitation intensives pour l'AEP avec les captages de la station St-Jean à Lattes, abandonnés par suite de l'augmentation notable de la minéralisation de l'eau (passant de 600 à plus de 1 300 mg/l). Cette dégradation résultait de pompages à trop fort débit.

g) La nappe des cailloutis villafranchiens

♦ La nappe de la plaine de Mauguio-Lunel (unité 328e)

Cette nappe s'étend au Nord de l'Etang de l'Or (secteur de Mauguio), jusqu'à la faille de Nîmes, jusqu'en rive droite du Vidourle (Diop M., 1980). Les formations de cailloutis du Plio-Quaternaire (ou Villafranchien) correspondent à d'anciennes alluvions du Rhône, localement remaniés par des dépôts plus récents comme c'est le cas pour les alluvions récentes du Vidourle, et du Lez. Les réserves dans cet aquifères sont estimées à 25 hm³.

Cette nappe est fortement sollicitée pour AEP de Lunel et de Mauguio, avec des débits ponctuels pouvant dépasser 200 m³/h, plus importants en secteur Est qu'à l'Ouest où elle se trouve en situation perchée.

Il n'y a pas de problèmes de qualité ayant pour origine la mer sur ces captages. Il y a néanmoins des problèmes liés à des teneurs élevées en nitrates.

♦ La nappe alluviale de Vidourle

Les formations alluviales du Vidourle remanient pour une grande partie les cailloutis villafranchiens du secteur aval de la Vistrenque (unités 150 et 328e). Elles sont composées de sables, graviers et galets, épais de 2 à 20 m, recouverts par des limons d'inondation en surface épais de 1 à 15 m. Les réserves sont estimées à 30 hm³ avec cependant le problème des nitrates et de l'intrusion saline (Cl > à 250 mg/l) en secteur aval sur 2 à 9 km depuis le littoral.

♦ La terminaison méridionale des cailloutis de la Vistrenque (unité 150)

Les anciennes alluvions du Rhône s'enfoncent à plus de 50 mètres de profondeur en secteur méridional. Là, se posent les problèmes de salinité (chlorures supérieurs à 350 mg/l), en aval de St-Laurent-d'Aigouze. Leur substratum est représenté par les argiles sableuses et les sables argileux de l'Astien ou par les marnes bleues du Plaisancien. Les débits ponctuels vont jusqu'à 200 m³/h par ouvrage.

Cette nappe est utilisée pour le centre de thalassothérapie de la Grande-Motte, au-dessous du cordon dunaire. L'eau salée est ici naturellement filtrée au travers des sables fins. Elle est aussi exploitée pour le seaquarium du Grau-du-Roi.

h) Les alluvions grossières du Rhône, (328d)

En partie Ouest de la Camargue, les alluvions du Rhône avec des galets, des graviers, des sables et des limons, associent les débits potentiels élevés aux possibilités locales d'artésianisme. Dans ce secteur de Parc National, les besoins en eau sont toutefois limités. Au-delà vers le Nord-Est, on note la présence de fer et de manganèse, et vers le Sud, depuis Bellegarde et St-Gilles, les alluvions sont confrontées aux problèmes d'intrusions salines.

Une stratification verticale de la qualité des eaux est généralement observée :

- eau douce en surface ;
- ensuite des niveaux avec une minéralisation comprise entre 5 et 10 g/l ;
- des eaux avec une minéralisation à 35 g/l en profondeur.

I-8.3. LES AQUIFERES PROFONDS

★ L'aquifère multicouche du Roussillon (Marchal JP., 1976)

L'aquifère plio-quadernaire du Roussillon s'étend sur une superficie voisine de 850 km² depuis les Albères (au Sud) et les Aspres (à l'Ouest), les Corbières (au Nord-Ouest) et la Mer Méditerranée (à l'Est).

Les formations pliocènes formant plusieurs horizons composées d'argiles et de sables sont recouvertes par les alluvions quaternaires. Sur cette zone littorale, le réservoir multicouche du Pliocène s'avère de plus en plus exploité, en particulier en été. Cet aquifère de grande importance économique alimente 75 % de la population des Pyrénées-Orientales : 250 000 habitants permanents et à 800 000 habitants en période estivale.

Le volume d'eau prélevé dans l'aquifère pliocène atteignait 27,5 hm³ en 1993, dont 20,7 hm³ pour l'alimentation en eau potable des collectivités publiques (le reste pour l'agriculture). En 1975, le prélèvement en eau dans le réservoir pliocène était estimé à 16 hm³. L'accroissement des pompages est donc lié à l'augmentation des besoins en eau potable.

La continuité de l'aquifère sous la Mer et les liaisons hydrauliques avec les formations quaternaires de surface par drainage constituent des risques de dégradations de la qualité des eaux souterraines contenues dans ces nappes profondes du Pliocène.

Si les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques s'avèrent actuellement bien connues sur le continent, il n'en est pas de même en mer. L'extension des formations perméables ne peut être précisée en l'absence des sondages "off shore" et le contact des niveaux pliocènes avec les eaux marines n'est pas vérifié.

Malgré tout, des entrées d'eau saumâtre à salée s'avèrent possibles dans ces nappes profondes par drainance des couches supérieures (Quaternaire "contaminé", étangs et mer). Le souci de protéger cet aquifère profond s'est manifesté dès 1973, avec l'extension du décret-loi de 1935 pour le département des Pyrénées-Orientales, qui a permis de limiter les prélèvements.

Au Sud de Torreilles, l'ensemble des données actuellement disponibles ne montre pas de signe d'évolution de la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère pliocène multicouche, avec déplacement d'un éventuel biseau salé.

Par contre, au Nord de l'Agly et notamment sur la commune du Barcarès, une dégradation locale de l'eau exploitée dans l'horizon supérieur du Pliocène (chlorures dépassant 150 mg/l), situé vers 50 à 60 m de profondeur, a été constatée. Les analyses isotopiques semblent montrer que l'eau de mer actuelle participe pour une très faible part (moins de 10 %) dans la composition de l'eau contenue dans ce niveau aquifère. On a donc une dégradation de la qualité de l'eau associée ici à une percolation d'eaux salées le long de forages en mauvais état (phénomène ponctuel).

Un modèle de gestion de simulation des écoulements a été mis en place en 1982 par le BRGM. Le modèle est maintenant géré par la DDAF. Il indique, sur la base d'un scénario prenant en compte l'évolution des besoins jusqu'en 2010 (eau potable, industrielle et agricole), qu'il y aurait une baisse inacceptable des niveaux d'eau qui atteindraient la côte -10 m NGF tout le long du littoral si les nouveaux prélèvements

étaient effectués dans l'aquifère Pliocène. Il y aura donc nécessité de satisfaire l'accroissement des besoins en eau par des captages situés plus à l'intérieur où des potentialités existent dans des aquifères plus superficiels.

Le réseau de surveillance de la nappe du Roussillon comporte actuellement 17 points, dont 10 équipés d'un enregistreur de niveau. Compte tenu de l'extension de l'aquifère, de sa caractéristique multicouche, ce réseau est insuffisant.

*** La nappe captive des sables de l'ASTIEN entre MEZE, AGDE et VALRAS (unité 226) (Valencia G., 1971 ; Laurent A., 1993)**

Ce système presque totalement captif qui s'étend sur 450 km² est le plus sollicité en secteur aval, à moins de 5 km du littoral où 580 forages le captent aujourd'hui. La somme des prélèvements est de l'ordre de 4,5 hm³/an, dont 50 % se situent dans les trois mois de la période estivale (70 000 habitants permanents et 325 000 saisonniers).

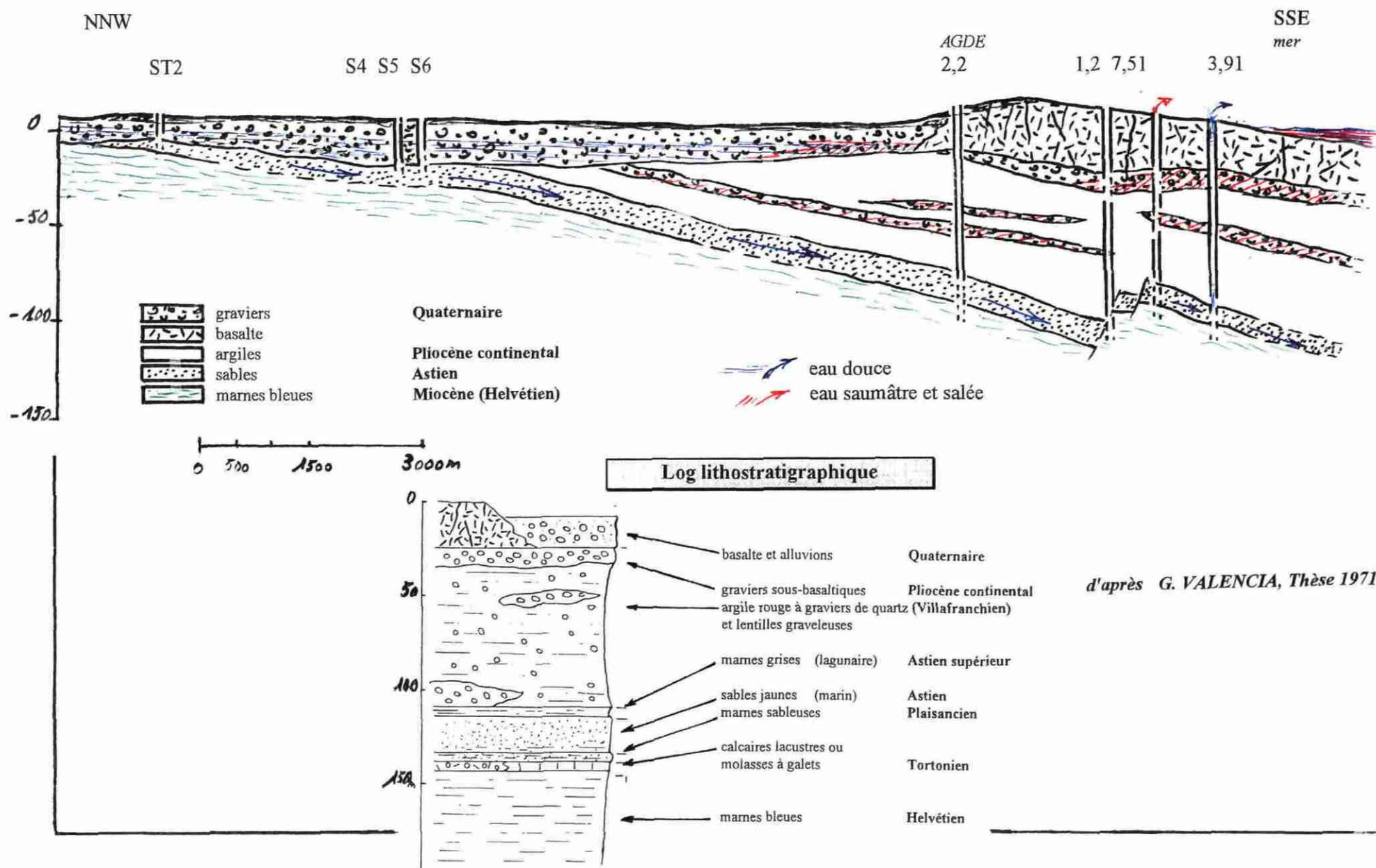
Les sables de l'Astien sont fins, moyens et rarement grossiers, surmontés par les horizons hétérogènes à niveaux imperméables du Pliocène continental. L'épaisseur de cet aquifère va de 5 à 40 mètres, son toit se situe entre -50 et -130 m NGF. Les eaux sont douces, artésiennes et jaillissantes, avec des débits ponctuels pouvant aller jusqu'à plus de 100 m³/h par forage. Les eaux de cette nappe sont exploitées pour les AEP des communes, des campings, et de très nombreux particuliers.

Cette nappe est soumise à deux risques de pollution (fig. I-21) :

- *par intrusion d'eau de mer avec le phénomène de drainance provoqué par une surexploitation locale de l'aquifère;*
- *par pollution à partir de forages défectueux ou abandonnés (une centaine) mettant l'Astien en communication avec des nappes superficielles déjà dégradées sur le littoral.*

Les teneurs en chlorures atteignent respectivement 60 mg/l pour les valeurs les plus basses et la majorité du secteur, à 3,7 g/l en bordure de l'étang de Thau.

Pour faire face à ces risques, une structure de gestion a été mise en place à l'initiative de la DIREN/LRO : le **Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de l'Astien (SMEGA)**, créé en 1990, qui regroupe les 20 communes concernées, le CG de l'Hérault, la CCI et la Chambre d'Agriculture. Elle rend compte de l'évolution annuelle et pluriannuelle des exploitations et des variations piézométriques en hautes et basses eaux, complétée par la mise à jour d'une banque de données usages-ressources et l'exécution de simulations de suivi et de prospectives par modèle mathématique. La réflexion porte sur la gestion de la nappe astienne et sur sa sauvegarde, sur l'information-sensibilisation du public, sur l'animation d'une approche technico-économique visant à la protection de la nappe et à la mobilisation de ressources de substitution. Un cahier des charges de bonne pratique du forage d'eau sur la nappe astienne est en cours de rédaction.



Les aquifères littoraux de France métropolitaine

Fig. I-21 - Languedoc-Roussillon, coupe géologique le long de la vallée de l'Hérault

Les fluctuations piézométriques de la figure I-22 montrent :

- l'importance des fluctuations saisonnières avec un rabattement très important en été (de l'ordre de 10 à 15 m) ;
- la remontée sensible des niveaux à partir de 1990 avec la mise en place du programme de détermination des prélèvements dans l'Astien.

I-8.4. LES AQUIFERES KARSTIQUES

Dans la région Languedoc-Roussillon, plusieurs aquifères karstiques se déversent dans ou à proximité de la mer par l'intermédiaire de sources pérennes ou temporaires. C'est pour l'une d'entre elles (à Ambressac) qu'a été défini le terme d'"INVERSAC", phénomène qui correspond à l'invasion du karst par de l'eau salée ; en fonction de la cote du plan d'eau du Bassin de Thau, l'eau salée pénètre dans la source, il y a absorption lorsque cette cote est supérieure à celle de la nappe d'eau douce de la Gardiole. Par la suite, la salinité de l'eau augmente considérablement.

*** Les nappes karstiques des Corbières jusqu'au Nord de Fitou (unités 145 a, 145b, et 557f)**

Le karst des Corbières est représenté par les calcaires et dolomies du Lias, du Jurassique moyen et supérieur, et du Crétacé inférieur, dont l'extension et les relations avec des pertes connues d'eaux superficielles sont mal définies (bassin versant étendu, domaine mal connu et complexe). Les termes du bilan estimés dans la synthèse hydrogéologique de 1985 indiquent des apports de l'ordre de 132 hm³, très largement excédentaires par rapport aux prélèvements qui sont estimés à 1,1 hm³ (Gadel F., 1966).

Les deux sources principales de Font Estramar et de Font Dame sont situées en aval hydraulique du système. Elles alimentent l'étang de Salses-Leucate, où on trouve des usages multiples et concurrentiels des eaux entre conchyliculture, pêche et loisirs. Les caractéristiques des sources sont les suivantes (Alonzo SL., 1995) :

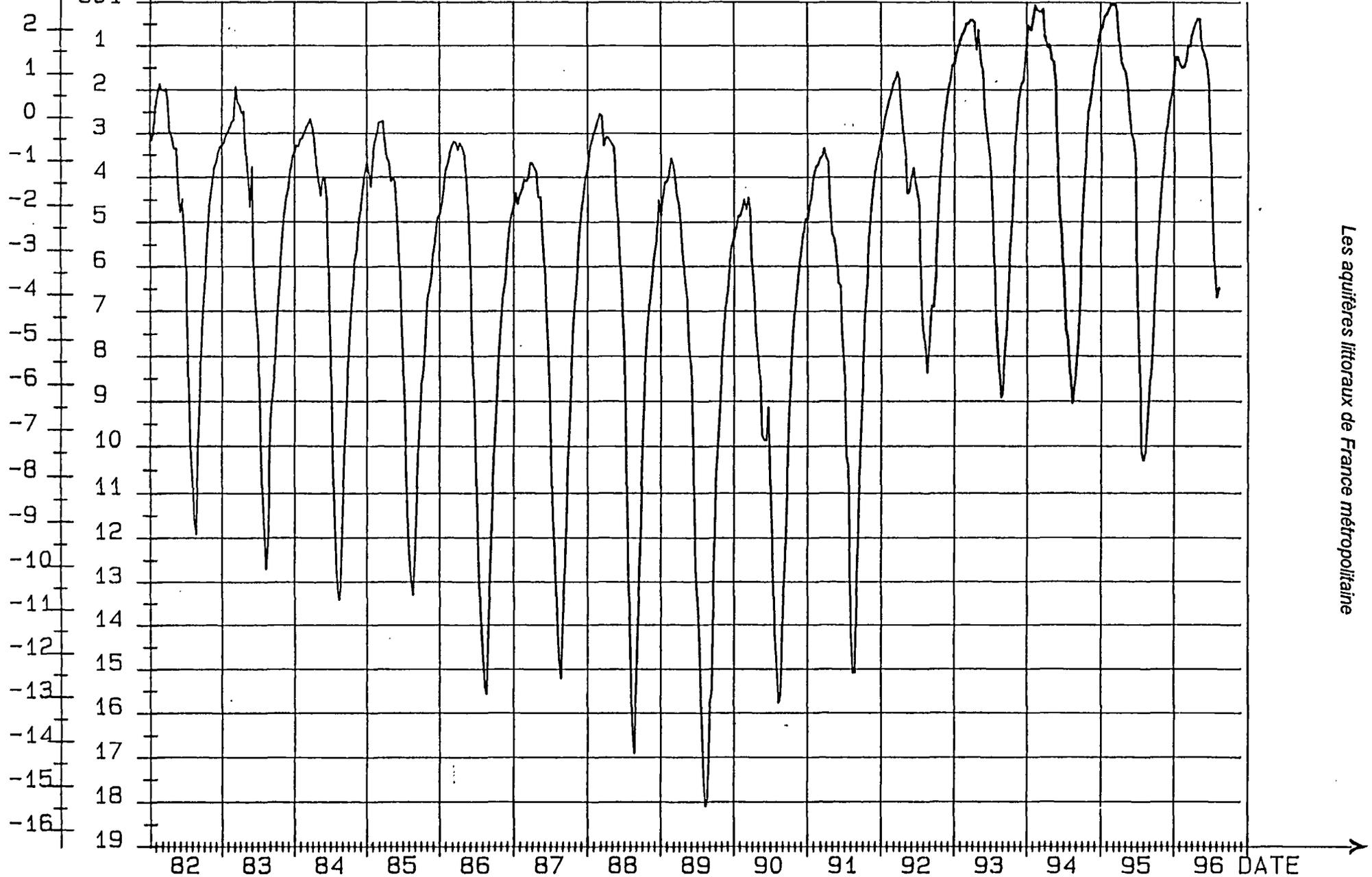
	Température °C	Conductivité µS/cm	Débit moyen m ³ /s
FONT ESTRAMAR	18 à 20	4200	2
FONT DAME	17,5	3300	1

La minéralisation moyenne à Font Estramar est de 3g/l. Les faciès chimiques sont chloruré-sodiques. Les eaux de ces deux sources correspondent à des venues d'eau douce qui deviennent saumâtres par mélange à plus ou moins grande profondeur avec des eaux marines. L'hypothèse de la contamination par les niveaux salifères du Trias n'est plus retenue.

DIREN LANGUEDOC-ROUSSILLON Aquif.: ASTIEN D'AGDE-V Piezo.: VALRAS

NGF PROF Cote du repere : 2.26 N.G.F Profondeur : 123 m No : 1
S01 Representation sur la periode de reference 1982 a 1996 (15 annes)

Rapport BRGM R 39298



Les aquifères littoraux de France métropolitaine

Fig. I-22 - Languedoc-Roussillon, nappe des sables de l'Astien : évolution piézométrique à Valras

*** La nappe karstique du massif de la Clape (557d)**

Entre Gruissan au Sud, St-Pierre-sur-Mer au Nord et à l'Est de Narbonne, le Massif de la Clape à calcaires et marno-calcaires du Crétacé inférieur, présente une structure géologique assez comparable à celle de la Montagne de la Gardiole.

Les potentialités aquifères sont ici encore mal connues, mais probablement modestes compte-tenu d'une nature moins propice à la karstification des séries carbonatées du Crétacé.

Les quelques sources à faibles débits du secteur NE présentent une qualité physico-chimique médiocre, saumâtre ou salée (supérieure à 150 mg/l). Ceci tient à la proximité de la côte : Gouffre de l'Oeil Doux, source des Escales,... et à l'absence de liaison "évidente" avec l'arrière-pays à eau douce.

*** Le système karstique du Causse d'Aumelas
ou "Pli de Montpellier-Ouest" (unite 143a) (fig. I-23)**

La source d'Issanka captée pour l'AEP de la ville de Sète, est plutôt liée au système karstique d'Aumelas qu'à celui de la Montagne de la Gardiole. L'exploitation autrefois gravitaire s'effectue désormais par pompage.

La source sous-marine de la Vise (fig. I-24), (captée pendant 12 ans pour l'aquaculture), à -31 m de profondeur dans la crique de l'Angle au NE de l'étang de Thau réunit plusieurs composantes d'eaux souterraines : d'origine profonde, chaude et minéralisée, d'eaux douces et froides de la Gardiole (?), et du Causse d'Aumelas. Son débit est compris entre 0,3 et 1 m³/s. *La minéralisation de l'eau se situe entre 2 et 3 g/l, et sa température entre 21 et 23 °C, soit 7 °C de plus que les autres sources d'eaux douces de Cauvy (captée pour les AEP de Frontignan-Balaruc), d'Ambressac (autrefois captée pour des usages industriels) et d'Issanka. Toutes ces sources, émergences et résurgences, participent à l'équilibre physico-chimique des eaux superficielles de l'Etang de Thau (pisciculture, aquaculture et conchyliculture) (Bérard P., 1995).*

En secteurs semi-captifs, comme à Usclade en bordure du bassin de Villeveyrac, ou en secteurs captifs, comme au domaine de la Castillonne, ou dans le secteur de Pézenas (forages pétroliers), les eaux sont chaudes et peu minéralisées. La charge ascendante et artésienne peut en outre alimenter par drainance ascendante ou latérale les séries surincombantes du Crétacé au Pliocène.

Trois piézomètres du BRGM rendent compte des fluctuations de la nappe dans ce secteur, 6 autres sont disposés en aval d'Issanka (suivis par la CGE). Des expériences de colorations sont à reprendre ou à compléter, elles seront couplées à la quantification aussi précise que possible des débits évacués qui s'ajoutent aux volumes prélevés pour les différents usages (de l'ordre de 3,5 hm³/an), les apports globaux annuels étant d'environ 30 hm³.

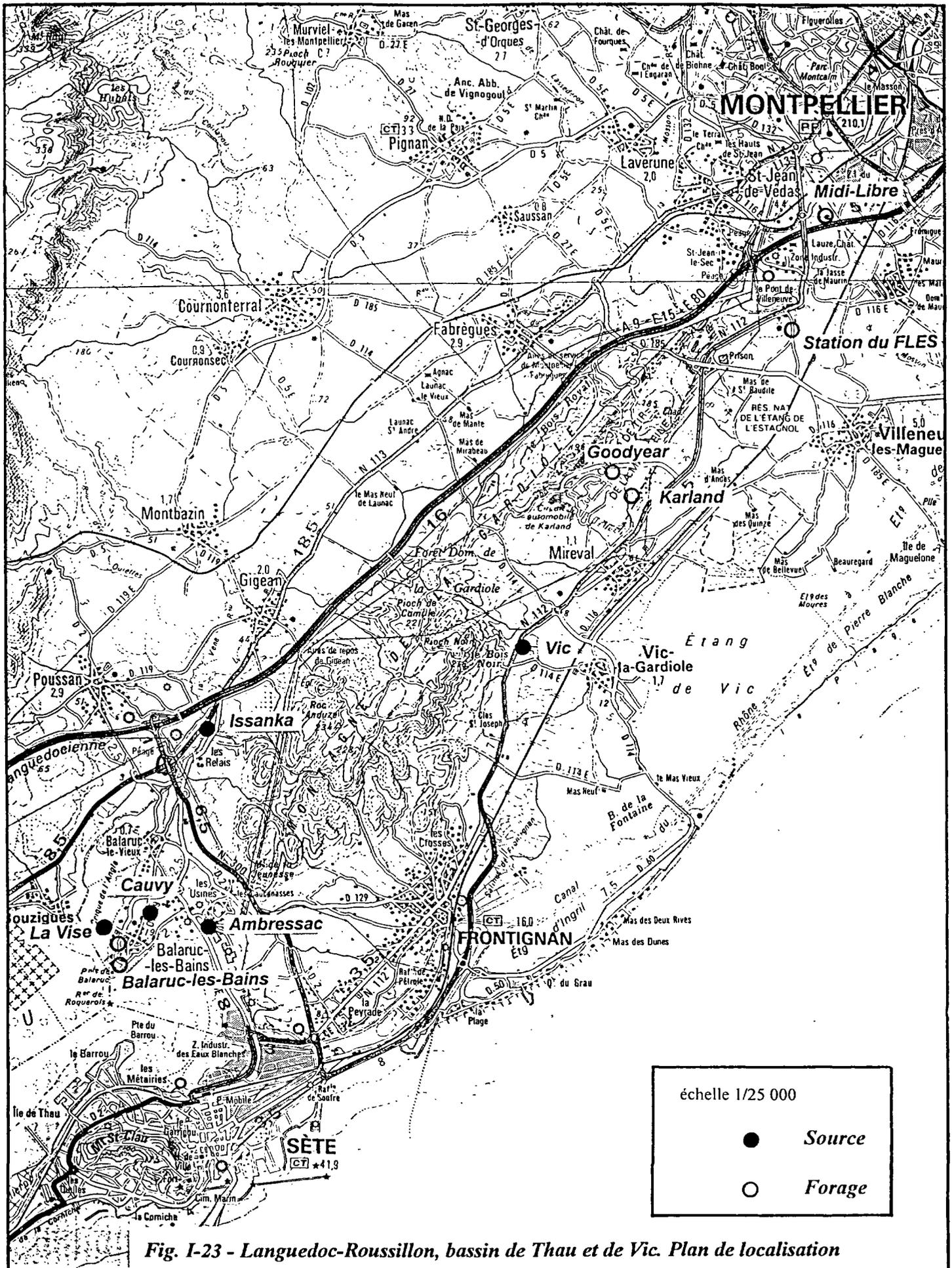


Fig. I-23 - Languedoc-Roussillon, bassin de Thau et de Vic. Plan de localisation

FIGURE 16 - SYSTEME HYDROMINERAL ET THERMAL AU NORD-EST DU BASSIN DE THAU

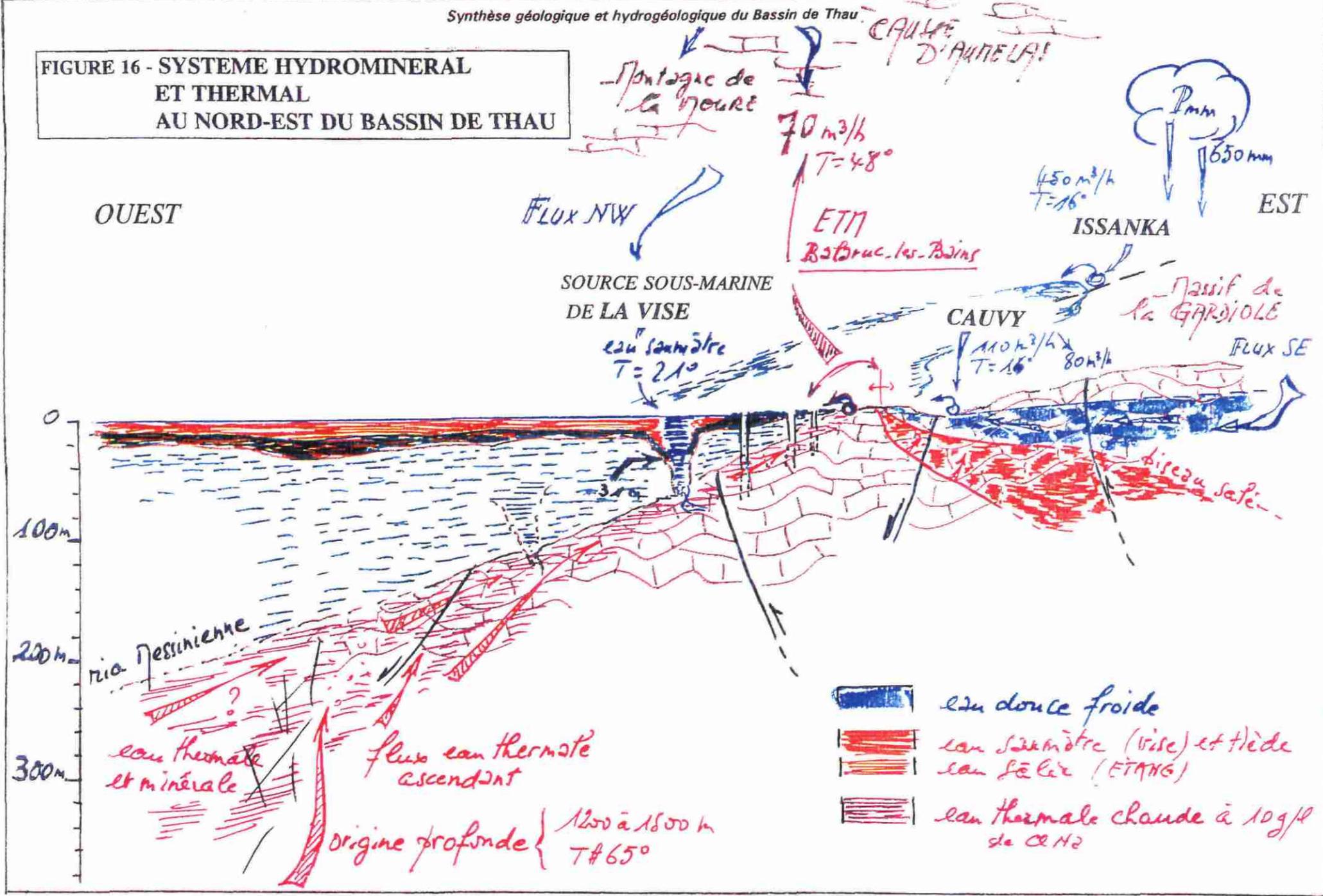


Fig. I-24 - Languedoc-Roussillon, système hydrominéral et thermal au Nord-Ouest du bassin de Thau

* La nappe karstique de la montagne de la Gardiole

Cette nappe est représentée par les calcaires, dolomies et marno-calcaires du Jurassique moyen et supérieur. Depuis Sète, avec le Mont St-Clair isolé, et jusqu'aux structures cachées sous couverture du Pont Trinquat, la Montagne de la Gardiole se prolonge tant vers le SW que vers le NE (Bonnet A. ; Paloc H., 1969). Les exploitations d'eaux douces les plus notables dans cet aquifère sont celles de MIDI-LIBRE pour les pompes à chaleur et climatisation des locaux, de la station de pompage St-Jean, des forages d'exploitation de la station du Flès pour l'AEP de Villeneuve-les-Maguelonne en remplacement du forage Rémy, en rive droite de la Mosson.

Toutes les sources littorales issues de la Gardiole sont par ailleurs saumâtres ou salées : source de la Madeleine, du Creux de Miège, de Font Forte, de la Roubine de Vic, d'Ambressac (avec des minéralisations de 0,3 à plus de 2 g/l). Les eaux des forages profonds de la ville de Sète : puits Di Shino, forage des Métairies, de la carrière de Py, des Eaux Blanches, sont chaudes et fortement minéralisées, à très bonnes potentialités géothermiques et thermales.

La nappe de la Gardiole dans le secteur SE est utilisée pour des usages multiples et concurrentiels, en limite d'un équilibre hydrodynamique difficile à maintenir. Les utilisations par trois forages semi-profonds pour le thermalisme à Balaruc-les-Bains (3^{ème} de station de France pour la fréquentation avec 35 000 curistes/an) est confrontée à des limitations de production à moins de 70 m³/h. La température de l'eau est comprise entre 40 et 50 °C, sa minéralisation est de l'ordre de 10 g/l. Ce sont des eaux de type chlorurées sodiques.

Les utilisations pour l'AEP à la source de Cauvy sont limitées à des débits de moins de 100 m³/h, plus modestes en étiage à cause des risques d'intrusions d'eaux superficielles salées de l'étang dans la nappe. Les teneurs en chlorures sont proches de la concentration maximale admissible (200 mg/l). Pour le Syndicat de Balaruc-Frontignan, des recherches sont en cours, financées par le Conseil général de l'Hérault, pour accroître et diversifier les points d'exploitation des eaux douces, plus à l'écart du littoral.

En effet, les mesures de conductivité effectuées dans les ouvrages du secteur de Frontignan montrent une progression du biseau salé qui affecte l'eau souterraine du karst de la Gardiole vers l'intérieur des terres.

Ce même constat a été mis en évidence dans les années 1980 sur le puits peu profond du Poilu à Mireval, puis dans les années 1990 sur les forage de Karland et de Goodyear, dans le même secteur, plus en retrait. *Cette intrusion saline a conduit à l'arrêt de l'exploitation de cet ouvrage pour l'AEP de la commune.*

Pour ce qui concerne la prévention, des mesures ont été prises pour mettre en place un réseau de surveillance piézométrique et qualitatif en aval d'Issanka, vers la Crique de l'Angle.

Dans ce même sens, un suivi en continu des niveaux, des températures et de la conductivité des eaux a également été instauré sur les forages de la station de pompage du Flès (AEP de Villeneuve-Lès-Maguelonne). Il indique, lors des périodes d'étiage, une augmentation de la conductivité de l'eau pour l'instant limitée, mais réelle.

Une approche globale à l'aval hydraulique du système karstique de la Gardiole est à entreprendre afin de rendre compte de l'évolution de ces intrusions salines, notamment avec l'installation d'équipements de mesures de prévention et d'alerte.

Enfin, l'exemple de l'INVERSAC constaté à plusieurs reprises sur la Roubine de Vic devrait conduire à l'exécution, à très brefs délais, d'aménagements efficaces de protection de la nappe au droit des griffons, comme il l'a déjà été demandé par certains hydrogéologues et rappelé par la DDASS.

Il est à noter qu'au NE de la Gardiole, dans le secteur du Pont Trinquat et de Boirargues des ressources très importantes ont été mises en évidence dans les séries de calcaires du Jurassique sous couverture Mio-Pliocène et des alluvions récentes du Lez. L'obtention de forts débits est ici liée à la karstification très poussée de ces calcaires à leur toit, cependant, des risques de dégradation de la qualité des eaux sont évidents si les sollicitations étaient trop conséquentes.

I-8.5. CONCLUSION

Les aquifères littoraux en Languedoc-Roussillon sont très diversifiés. Les plus superficiels sont contaminés (chlorures supérieurs à 250 mg/l) sur la quasi-totalité de la bordure du littoral, mais cette salinité des aquifères, à quelques exception près, est naturelle et n'est que rarement provoquée par une surexploitation. Cette zone est faiblement exploitée. Les captages AEP dans les aquifères superficiels sont situés à l'écart du rivage sans influencer la position du biseau salé.

* **Les aquifères profonds** de l'aquifère plio-quadernaire du Roussillon et de la nappe des sables de l'Astien ont une grande importance économique grâce à leurs capacités de production d'eau de bonne qualité pour un usage "noble" en eau potable. Ils sont cependant, tous les deux, vulnérables à des venues d'eau salée.

Le premier ne pourra pas produire les volumes estimés nécessaires en 2010 sans provoquer des intrusions salines ; il faudra s'orienter vers d'autres ressources, dans des aquifères plus superficiels situés plus à l'intérieur des terres.

Le second bénéficie d'une structure (le SMEGA) depuis 1990 qui associe les partenaires locaux dans la gestion de cet aquifère. Cette organisation a permis de proposer et de lancer des programmes d'action : allègement des prélèvements, interventions sur les forages dégradés, élaboration d'un guide de bonne pratique de foration, information des usagers, économies d'eau, poursuite de la surveillance de la nappe.

* **Les aquifères karstiques** sont caractérisés par des écoulements particulièrement complexes au niveau des exutoires : mélange d'eaux de nature et d'origine différentes (eau douce, eau salée, eau thermale), usages concurrents (AEP, thermalisme, aquaculture). Les équilibres sont fragiles et toute modification dans les prélèvements ou les dispositifs de captage peut avoir des conséquences pour les usages concurrents (exemple : fermeture d'une source pour de l'alimentation en eau potable), y compris sur la qualité des eaux superficielles des étangs.

Les réseaux de surveillance des aquifères à proximité des rivages devraient être plus denses. En effet, la discontinuité entre eau douce et eau salée, l'importance de la connaissance de la piézométrie dans la protection de l'aquifère, la nécessité de posséder des informations sur la qualité des eaux font que la connaissance du système requiert plus de mesures et d'analyses que sur un aquifère hors influence marine. Dans la région Languedoc-Roussillon, les réseaux de surveillance semblent largement insuffisants : 10 piézomètres avec enregistreur de niveau sur la nappe du Roussillon, 10 également sur la nappe de l'Astien, 1 sur l'étang de Thau, 2 sur la Nappe de l'Aude.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse a défini un territoire littoral constitué d'une double frange terrestre et marine, subdivisé en 50 zones. Il n'y a cependant pas de grandes orientations concernant les aquifères en bordure littorale.

Compte tenu du contexte, il semble que les SAGE soient une structure bien adaptée pour la gestion des aquifères littoraux conformément à la Loi sur l'Eau et particulièrement concernant la notion de durabilité. Cependant, dans la région Languedoc-Roussillon, seul le SAGE Etang de Leucate commence à s'organiser. D'autres sont prévus, mais ont des difficultés à débiter : SAGE de l'Aude, du Lez, de l'Agly, du Roussillon.

I-9. Les aquifères littoraux en Provence-Côte-d'Azur

Les départements faisant partie de la région Provence-Côte d'azur sont, d'ouest en est, les suivants : les Bouches-du-Rhône, le Var et les Alpes-Maritimes. La longueur des cotes est de 420 km.

I-9.1. DESCRIPTION GENERALE DES AQUIFERES

Le long du littoral de cette région, se développent des aquifères karstiques et des aquifères alluviaux. Les aquifères karstiques sont étendus, mais mal connus et peu exploités. Il s'agit principalement de (fig. I-25) :

- la chaîne de l'Estaque et de la Nerthe à l'ouest de Marseille (223 km²) ;
- la chaîne de Beausset à l'est de Marseille (660 km²).

Le premier permet d'alimenter en eau des industries à hauteur de 22 10⁶ m³/an et est très peu utilisé pour un usage en alimentation en eau potable à cause de l'environnement industriel et de la vulnérabilité du karst. On ne dispose pas d'informations sur l'interface entre les eaux douces et les eaux de la mer.

Le second est moins exploité (3.6 10⁶ m³/an), mais des projets existent. Un captage de la résurgence sous-marine de Port-Miou a été tenté. Les eaux sont captées à l'amont d'un ouvrage en chicane destiné au blocage des eaux salées. Cependant les venues d'eau salé persistent (fig. I-26). Une partie de la salinité est d'origine continentale, profonde et donc irréductible (Collin *et al.*, 1980).

Les aquifères alluviaux en contact avec la mer sont au nombre de six. Le plus important est celui de la plaine de la Crau qui s'étend sur 545 km² et qui est composé des cailloutis du Plio-quaternaire. Son alimentation est particulière car elle provient majoritairement (60 %) d'eau d'irrigation extérieure au bassin (eau de la Durance). Les autres sont situés à l'est de Toulon et sont d'importance moindre : 15 à 44 km².

I-9.2. ETAT DES AQUIFERES EN BORDURE LITTORALE

L'exutoire de la nappe de La Crau est mal connu. On suppose que la nappe s'écoule sous le lit du Rhône, sans drainage par celui-ci, vers la Camargue. Des simulations sur un modèle d'écoulement souterrain (BRGM, 1996) montrent que l'on pourrait, dans cette hypothèse, doubler les débits prélevés par pompage sans provoquer des rabattements importants et sans, a priori, modifier l'équilibre eau douce/eau salée. On estime ainsi entre 2 et 3 m³/s le débit supplémentaire disponible (si l'alimentation par les excès d'irrigation est maintenue).

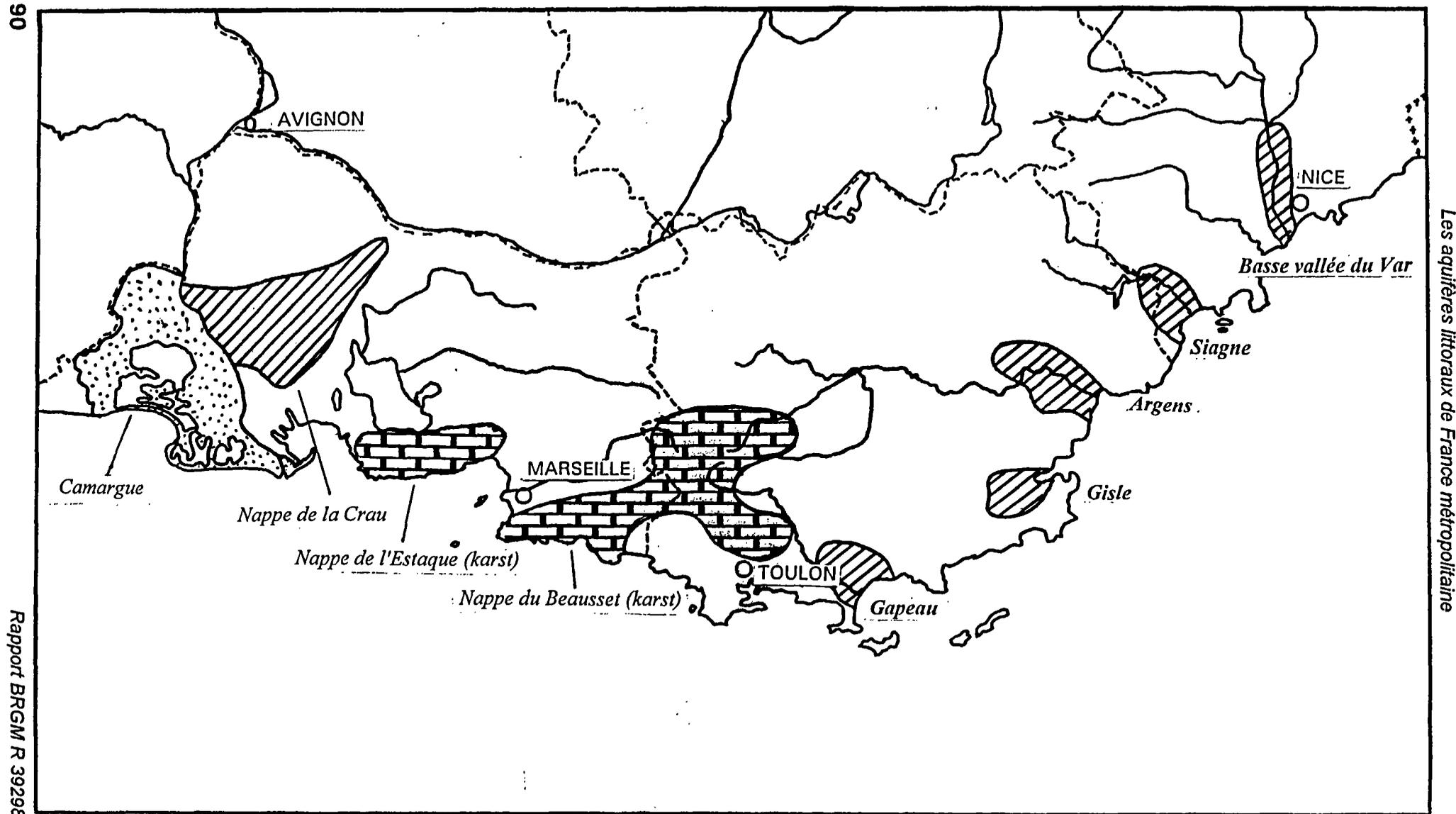


Fig. I-25- Provence-Côte-d'Azur, carte des aquifères littoraux

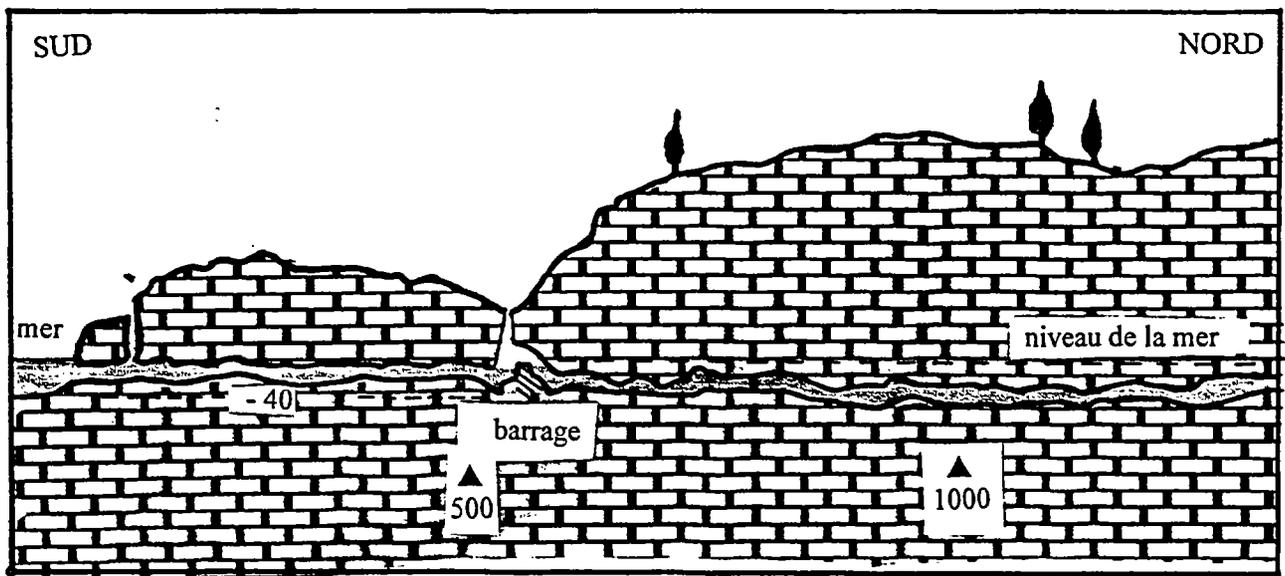


Fig. I-26 - Provence-Côte-d'Azur, coupe schématique de la galerie de Port-Miou

Peu d'information sont disponibles sur la bordure littorale des aquifères karstiques. Les petits aquifères à l'est de Toulon sont exploités intensément. Leur réaction et les moyens mis en place face à l'invasion des eaux salines sont différentes :

- pas de menace, pour le moment, semble-t-il sur l'aquifère de la Siagne ;
- la nappe du Var est très allongée perpendiculairement au rivage et les pompages les plus importants sont à plusieurs kilomètres de la côte. Le biseau salé est stable. Le comportement hydraulique de cette nappe a été modélisé. Les simulations indiquent que l'augmentation des prélèvements est possible sans risque d'invasion salée dans les captages actuels ;
- la nappe du Gapeau alimente la ville d'Hyères par deux champs captant. L'aquifère est composé de formations fluviales de 5 à 25 m d'épaisseur. Au voisinage de la mer, le faciès alluvial devient marin et présente des sables fins peu perméables. Dans les années 1948 à 1968, la ressource est considérée comme abondante et d'un accès facile. Mais, l'augmentation des débits a entraîné à plusieurs reprises une invasion de la zone littorale par des eaux saumâtres. En 1969, un barrage anti-sel est installé sur le Gapeau, les pompages sont limités (20 000 m³/j maximum) et des achats d'eau à l'extérieur compense le déficit. La concentration en chlorures croît de 30 mg/l (1989) à 800 mg/l (1991) où on observe une stabilisation due à une diminution importante des débits pompés. L'avancée de la salinité a été expliquée par :
 - une progression des eaux marines par un étroit surcreusement du substratum, dans une situation piézométrique très déprimée en 1990/1991 ;
 - un arrêt de l'avancée saline par une restauration de conditions piézométriques favorables quasi exclusivement due à l'arrêt des pompages sur le forage contaminé
 - un étalement de la lentille d'eau salée par diffusion et dispersion ;
 - une situation piézométrique favorable de 1993 qui a repoussé la lentille vers la mer en laissant derrière elle des traces de salinité qui semblent disparaître relativement vite.

Pour sauvegarder la ressource, un modèle de simulation de la nappe a été bâti pour mieux comprendre le fonctionnement de la nappe et pour tester des dispositifs (recharge artificielle par drains ou par bassins d'infiltration, barrière hydraulique en bordure du littoral) et différents scénarios de gestion. Des protections et aménagements ont été mis en place pour améliorer les possibilités de prélèvements.

- des problèmes de qualité sur la nappe de l'Argens où on procède à des infiltrations d'eau de la rivière pour stabiliser le biseau salé. On ne dispose pas d'indication sur l'efficacité de ces dispositifs.

I-9.3. CONCLUSION

L'influence de la mer est prise en compte pour l'exploitation des aquifères côtiers, dans la région Provence-Côte-d'Azur. Les volumes exploitables sont évalués par modèle de simulation des écoulements souterrains pour plusieurs d'entre eux. Des dispositifs de protection sont mis en place ailleurs. Des projets existent pour capter les eaux du massif karstique de Beausset.

I-10. Aquifères littoraux en Corse

I-10.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL

Du point de vue géologique, on distingue classiquement la Corse occidentale ancienne dite "hercynienne" granitique, la Corse orientale dite "alpine" schisteuse, séparées par la dépression de Corte, allant de la région de l'île Rousse à Solenzara et la Corse sédimentaire.

La partie alpine est constituée par le tiers nord-est de l'île. On y rencontre un cortège diversifié de roches cristallophyliennes (schistes, cipolins, quartzites, ophiolites,...).

La partie hercynienne au sud-ouest est la plus importante, avec un relief rajeuni par les mouvements alpins. Elle est constituée de roches plutoniques (granitoïdes) et d'un complexe volcanique rhyolitique (Cinto, Porto).

La partie sédimentaire néogène comprend les terrains de la plaine orientale (Aleria-Solenzara) ainsi que les bassins de Saint-Florent et Bonifacio, constitués de molasses miocènes.

Les terrains récents alluvionnaires sont en relation avec les cours d'eau.

I-10.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE GENERAL

Le caractère montagneux de la Corse induit aux estuaires des rivières de petits aquifères littoraux. Les formations adjacentes ne soutenant pas les débits, ils dépendent des eaux de surface pour l'essentiel.

Les systèmes aquifères corses se répartissent :

- en aquifères alluviaux avec des systèmes bien individualisés, peu étendus (2,6 % de la superficie totale) et assurant la majorité des prélèvements en Corse (65 % en 88) ;
- en aquifères sédimentaires : les formations miocènes de la plaine orientale permettent de produire 10 à 20 m³/h par forage. De manière générale, les formations sédimentaires sont mal connues sur le plan hydrogéologique et peu exploitées : aquifères de l'Eocène au sud de la Corse ou de la Balagne, le Causse de Bonifacio, les calcaires burdigaliens de la région de Saint-Florent ;
- en aquifères du socle (métamorphique, volcanique et cristallin), aquifères de fissuration généralement peu productifs.

I-10.3. ETAT DES AQUIFERES EN BORDURE LITTORALE

Les phénomènes de salinisation des eaux souterraines (biseau salé, rentrant salé, etc.) affectent essentiellement les aquifères alluviaux car :

- ils sont situés en quasi-totalité en bordure du littoral, à l'embouchure des fleuves côtiers ;
- ils sont particulièrement exploités en période estivale. Le rabattement de nappe est maximal au moment hydrologique le moins favorable.

La localisation des biseaux salés est reportée sur la carte (fig. I-27). Elle a été établie à partir de la synthèse hydrogéologique de la Corse (1988). Les biseaux salés sont généralement connus lorsque les eaux exploitées par un forage deviennent salées. Seul deux aquifères alluviaux dans le Cap Corse (Pietracorba et nord Cap Corse) font l'objet d'un suivi avec des piézomètres de contrôle. Ailleurs le biseau salé affecte les exploitations soit en permanence, soit périodiquement (étiage et/ou surexploitation).

Des recherches sur la quantification des différents phénomènes à l'origine de la salinisation de deux aquifères de Haute-Corse (Figarella et Bevinco) devraient débiter en 1997.

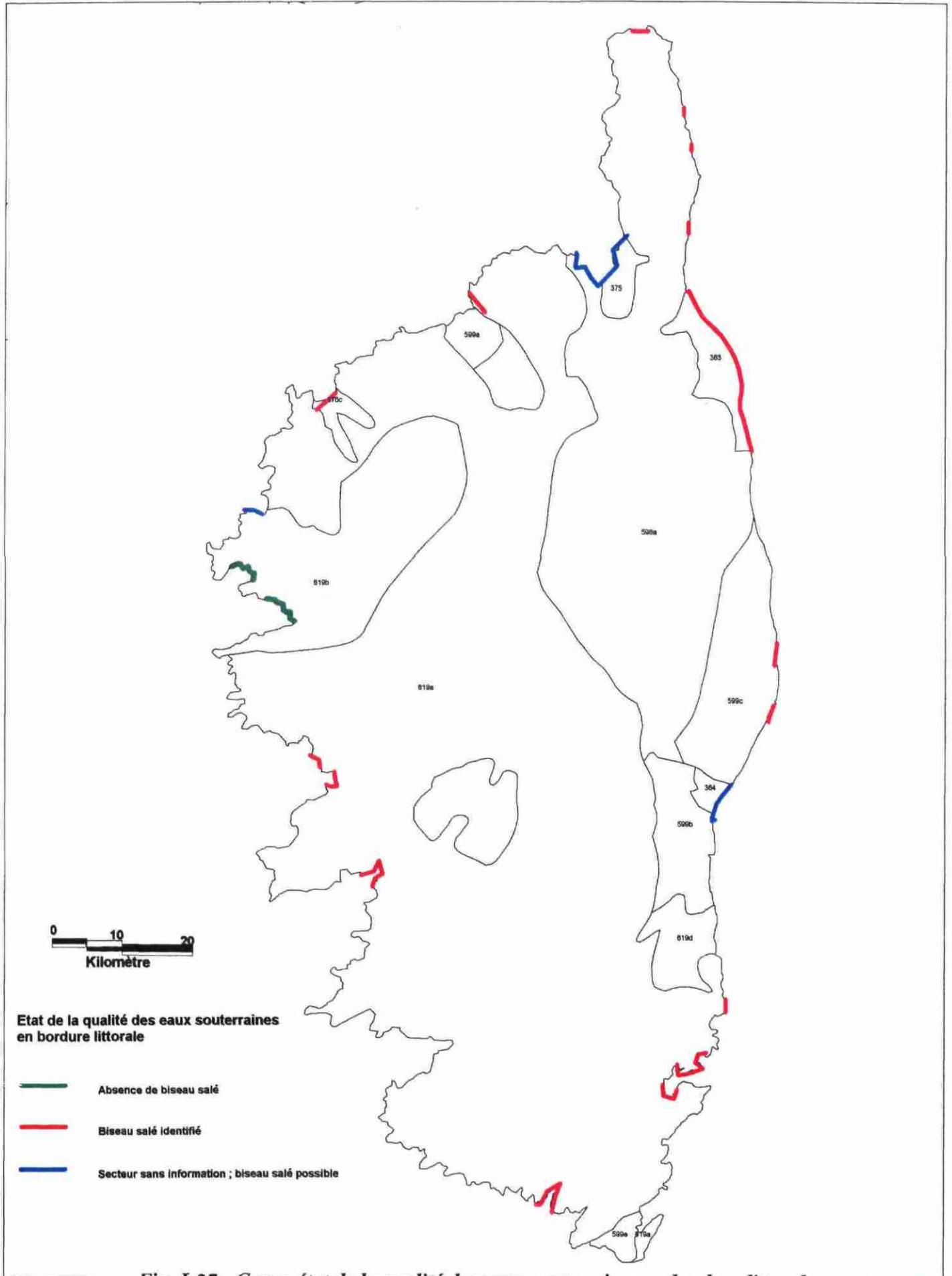


Fig. I-27 - Corse, état de la qualité des eaux souterraines en bordure littorale
(d'après la synthèse hydrogéologique de la Corse - Etat des connaissances en 1988 (R30150 CSC45 89))

Deuxième partie

Synthèse nationale

II-1. Typologie des aquifères

La description des aquifères littoraux en France a permis de présenter des cas différents en fonction du contexte naturel, de la pression anthropique, etc. Quelques caractéristiques communes peuvent être dégagées en fonction du type d'aquifère. On distinguera :

II-1.1. LES NAPPES SUPERFICIELLES SEDIMENTAIRES

Les nappes sédimentaires en bordure de mer peuvent dans leur quasi-totalité être envahies par les eaux salées en cas de surexploitation. Le mécanisme de base a été présenté dans le premier chapitre. Il se réfère à des cas simples qui bien souvent n'existent pas tels quels dans la réalité ou ne sont valables qu'en première approximation et/ou sur une portion limitée de la zone concernée par les problèmes d'intrusion d'eau salée. La complication du mécanisme de base peut avoir pour origine :

- une structure géologique complexe du réservoir : variations d'épaisseur, plissements, failles, etc.
- l'hétérogénéité de la lithologie qui peut entraîner de très importants contrastes dans les valeurs des paramètres hydrodynamiques.
- une forte influence des marées induisant un développement de la zone de transition à salinité variable ;
- de fortes variations du débit des fleuves côtiers entraînant des fluctuations sur les charges d'eau douce et également une extension de la zone de transition ;
- de fortes variations de recharge par les pluies littorales entraînant le même phénomène précédent.

II-1.2. LES NAPPES PROFONDES

Dans ce type de nappe, il n'y généralement pas de contacts direct entre les eaux de la nappe et la mer : soit l'aquifère se confine en direction de la mer (cas le plus fréquent), soit l'exutoire sous la mer est éloigné des zones de pompages. Mais l'eau salée peut provenir par drainance des aquifères supérieurs de moins bonne qualité chimique, car moins bien protégés ou par des forages mal conçus ou en mauvais état qui mettent en communication plusieurs aquifères.

II-1.3. LE KARST (M. Bakalowicz)

En région littorale, l'eau de mer peut s'engouffrer totalement dans certaines cavités karstiques, le mélange avec l'eau douce se faisant alors plus à l'intérieur des terres et parfois dans d'autres cavités ou galeries en connexion.

L'eau de mer peut aussi s'engouffrer partiellement dans une cavité déversant de l'eau douce dans la mer. Suivant l'importance relative des flux et des vitesses, le mélange peut se faire relativement progressivement, avec une certaine conservation de l'individualisation des flux inverses (l'eau douce s'écoulant par dessus l'eau marine), ou alors au contraire très rapidement par un fort brassage des eaux. Ces transports de matières sont tels que fréquemment des sources karstiques un peu au-dessus du niveau marin (moins de 5 m en général) fournissent des eaux saumâtres, c'est-à-dire que l'eau salée est remontée, mélangée à de l'eau douce, à un niveau supérieur au niveau marin.

Pour ce qui concerne les aquifères karstiques, on ne peut donc plus parler de biseau salé, celui-ci n'existant pas sous cette forme générale. Tout au plus, on peut parler de zone(s) d'intrusion ou d'influence marine, mais il convient également dans ce cas d'être très prudent, car souvent cette (ou ces) zone(s) ne peuvent pas être délimitées de manière simple. Certains conduits peuvent en effet être envahis, totalement ou partiellement, alors que des conduits voisins, situés plus haut ou plus bas, peuvent transiter uniquement de l'eau douce. De plus, ces situations respectives peuvent évoluer très rapidement et de manière discontinue, ou cyclique comme sous l'effet des marées ou sous celui des crues.

II-1.4. LE MILIEU FISSURE

Le milieu fissuré est représenté essentiellement en France, sur la bordure littorale, par la Bretagne. Il forme des aquifères qui sont fortement compartimentés. A l'intérieur de chaque compartiment, des venues d'eau salée peuvent se produire sous l'effet des mécanismes hydrauliques déjà présentés. Cependant, en cas d'invasion saline, les zones atteintes resteront circonscrites dans l'aquifère dans lequel la sollicitation a lieu. Le problème de la recherche de ressources de substitution reste posé, et devra être trouvé sur un aquifère indépendant du premier.

II-2. Inventaire des cas et des conséquences remarquables au niveau national

Dans les aquifères, la proximité de la mer peut engendrer une dégradation de la qualité des eaux par le mélange des eaux salées de la mer avec les eaux douces de l'aquifère. Les cas recensés en France ont été reportés sur la carte. Nous avons distingué les cas où l'origine de la salinité est naturelle, des cas où elle est anthropique.

II-2.1. CAS DE SALINITE D'ORIGINE NATURELLE

II-2.1.1. Inventaire

En bordure littorale, la salinité des aquifères est parfois d'origine naturelle. En France, c'est notamment le cas :

- dans le Nord-Pas-de-Calais et en Picardie. Dans ces deux régions, on trouve des zones littorales de très faible altitude. Pendant les grandes marées, l'eau de mer peut pénétrer à l'intérieur des terres par des canaux de drainage (Picardie) ou même submerger les terres (Nord-Pas-de-Calais). Dans ces circonstances, il y a alimentation directe en eau salée par le haut des aquifères. La salinité est proche de 20 g/l. Pendant les autres périodes, les écoulements sont insuffisants pour lessiver les sols et évacuer la salinité (faible transmissivité et faible gradient hydraulique pour les aquifères concernés de ces deux régions) ;
- en Bretagne, des forages (une douzaine dans le département du Finistère Nord) ont rencontré des eaux saumâtres (quelques grammes par litre) qu'on interprète actuellement comme des eaux fossiles, peut-être d'âge pléistocène ;
- sur l'île de Noirmoutier, les formations du Lutétien et du Cuisien contiennent des eaux dont la salinité est comprise entre 28 et 35,8 g/l ;
- dans la région Aquitaine, dans l'aquifère profond de l'Eocène, dans le secteur Nord (Pointe de Grave). Les analyses isotopiques ont montré que la salinité faisait partie de la formation elle-même, et ne provenait pas des eaux de la mer ;
- sur la bordure du littoral en Languedoc-Roussillon dans les aquifères superficiels ;
- en Languedoc, plusieurs sources se déversant à proximité de la mer ou de lagunes sont salées (de l'ordre de quelques mg/l) par des phénomènes de mélange à leur exutoire ;
- dans la Camargue. Dans cette zone deltaïque en formation de 75 000 ha, la nappe est salée du fait de la formation des terrains en milieu marin et du déficit de l'alimentation par les pluies (pluviosité de 500 mm /an pour une forte évapotranspiration de 1500 mm/an).

II-2.1.2. Conséquences

Dans le Nord-Pas-de-Calais et dans la Picardie, la pression anthropique sur le littoral est plutôt faible. Les besoins en eau peuvent être satisfaits par des ressources situées plus à l'intérieur des terres. Sur le littoral picard, des recherches d'eau salée destinée à une station d'épuration de coquillages ont été tentées dans la nappe de la craie, mais n'ont pas abouti jusqu'à présent, car la minéralisation de l'eau de nappe est inférieure à 20 mg/l, concentration minimale recherchée. Dans les zones maraîchères, le risque d'invasion salée existe (dans la région de Dunkerque).

Par leurs caractéristiques hydrodynamiques, les aquifères littoraux n'ont pas un intérêt économique vital pour ces régions. D'autres ressources facilement mobilisables existent.

A Noirmoutier, la nappe salée des calcaires lutétiens est un atout majeur du développement de l'aquaculture.

Dans la région Aquitaine, on exploite d'autres aquifères produisant de l'eau ayant la qualité recherchée (aquifère de l'Eocène). En Languedoc-Roussillon, on utilise également la possibilité d'exploiter d'autres aquifères ayant la qualité recherchée.

En Camargue, des activités adaptées au contexte, ont pu se développer depuis la mise en valeur par l'homme de cette région.

II-2.2. CAS DE SALINITE D'ORIGINE ANTHROPIQUE

II-2.2.1. Inventaire

La surexploitation des aquifères en bordure littorale provoque des venues d'eau salée. C'est la principale raison de la salinité des aquifères lorsqu'elle est d'origine anthropique. Les effets de la surexploitation sont variés en terme d'extension des zones atteintes, de durabilité ou de réversibilité des effets, en niveau de concentration de la salinité.

En France, nous avons recensé :

Des secteurs avec une extension généralisée des venues d'eau salée

C'est le cas d'aquifères en bordure de certains estuaires de Haute-Normandie où des industries fortement consommatrices d'eau se sont installées : estuaires de la Seine, de l'Arques. Quand les industriels peuvent se contenter d'eaux saumâtres, les prélèvements se poursuivent. Les aquifères des autres estuaires, bien que vulnérables à ce phénomène, ne sont pas atteints (prélèvements plus faibles et/ou plus éloignés).

On ne recense pas en France, de vastes étendues d'aquifères atteintes par des venues d'eau marine, comme c'est le cas sur la côte méditerranéenne d'Espagne où on estime que 14 % (2 423 km²) de la surface des aquifères ont un problème généralisé d'intrusion.

Des secteurs avec invasions d'eau salée limitées et stables

Des plaines alluviales sur le littoral méditerranéen (y compris la Corse) : plaine du Gapeau, de l'Argens et la plaine du Golo en Corse.

Des secteurs où les invasions d'eau salée sont saisonnières et réversibles en l'état actuel des connaissances

Dans les cas cités ci-dessous, le phénomène est considéré réversible car lors de la recharge hivernale des aquifères, on a observé une diminution des chlorures dans l'eau de la nappe.

Dans le département du Calvados, on constate que sur sept sites de pompages (sur les 250 du département), les teneurs en chlorures (jusqu'à 326 mg/l) traduisent des venues d'eau salée. Quelques uns de ces points sont situés à proximité de marais dont les canaux sont envahis à marée haute. L'augmentation des concentrations, en été lors des gros prélèvements et une diminution lors de la reprise de la recharge en automne, ont été mises en évidence (suivi dans le secteur de la Dives sur une douzaine de points, pendant trois ans). Dans ce contexte, la recharge est suffisamment forte pour que la salinisation des eaux, qui reste limitée, soit réversible à l'échelle de la saison.

Dans le département de la Manche, dans la région de Créance-Lessay, les aquifères de la bordure littorale, peu étendus, sont exploités pour l'irrigation des cultures maraîchères. A cause des marées et des recharges périodiques, une importante zone de transition saumâtre existe.

Dans la nappe du Lias et du Dogger à proximité du marais poitevin où elles s'écoulent, un biseau salé existe. Cependant, il présente une relative stabilité, hors conditions d'exploitation et climatiques exceptionnelles et cette évolution est temporaire et réversible si la recharge hivernale est suffisante. Dans la nappe du Dogger, il existe également des phénomènes locaux de remontée du biseau salé, à l'aplomb de certains forages sous l'effet des pompages. Ce même phénomène pourrait apparaître dans l'aquifère du Lias.

Des secteurs où l'invasion saline est localisée

Le long du littoral méditerranéen du Roussillon et du Languedoc, sur une frange plus ou moins profonde (1 à 3 km).

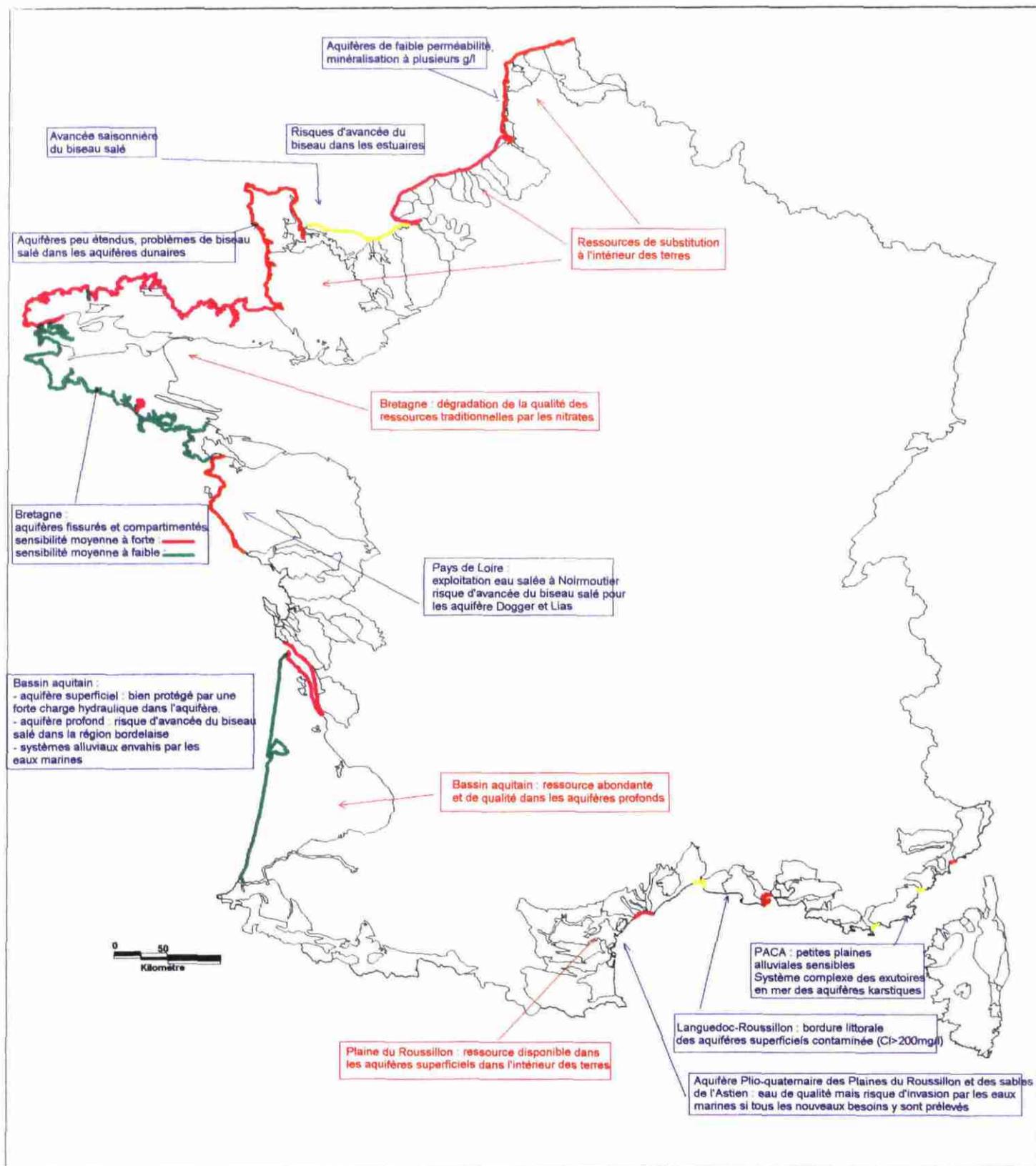


Fig. II.1 - Contexte global des aquifères en bordure littorale vis-à-vis de la ressource en eau

Dans de nombreuses plaines alluviales du littoral méditerranéen (France continentale et Corse) : plaine de l'Aude et de l'Orb où le biseau salé est identifié mais reste stable, proche de la mer et éloigné des captages existants.

En Bretagne, la teneur en chlorures des eaux pompées à proximité des zones salées a augmenté, puis s'est stabilisée jusqu'à des valeurs de l'ordre de 150 mg/l montrant que le risque d'invasion salée existe et doit être considéré avec attention.

Des venues d'eau salée dans des aquifères profonds

La nappe captive des sables astiens en Languedoc, dans le secteur d'Agde. Dans cet aquifère, les venues d'eau salée ont deux origines. La première est provoquée par la surexploitation de la nappe de l'Astien qui entraîne une drainage de l'aquifère supérieur contenant des eaux plus salées. La seconde est due aux anciens forages dans l'Astien, en mauvais état, et qui sont des points de communication entre les deux aquifères.

II-2.2.2. Conséquence

Dans les situations citées dans l'inventaire précédent, on relève d'abord des cas où les conséquences sont peu importantes et où des adaptations ont été trouvées : c'est le cas de la Haute-Normandie où les industriels peuvent se satisfaire de la qualité saumâtre des eaux pompées et où des ressources facilement mobilisables existent en dehors de la frange littorale. Néanmoins, les conséquences sont :

- de nouveaux prélèvements sont à exclure dans certains secteurs ;
- une surveillance (niveaux d'eau, débits, qualité des eaux,...) est nécessaire sur l'ensemble des aquifères des estuaires ;
- en Bretagne, on peut craindre que l'intensification de l'exploitation des eaux souterraines conduise à des contaminations, certes locales à cause de l'hétérogénéité des aquifères, mais irréversibles et ayant des conséquences sur l'alimentation en eau potable (autres ressources ayant souvent des problèmes de teneurs élevées en nitrates).

Ensuite, il y a des situations où la production d'eau est poursuivie, malgré la présence d'un biseau salé identifié mais, qui d'après les observations courantes, reste stable ou est réversible au gré des saisons. C'est le cas dans le département de la Manche et dans l'aquifère du Dogger en Vendée. Les conséquences se limitent :

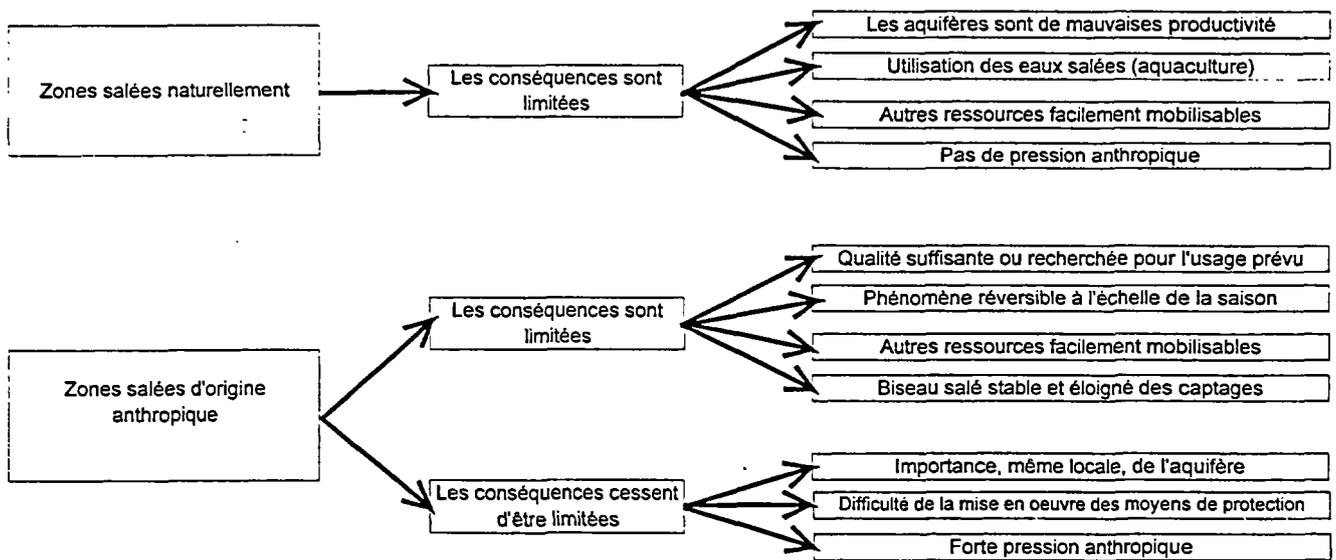
- à des baisses des pompages en cas de salinité dépassant un certain seuil ;
- à la mise en place d'une gestion des prélèvements avec une modélisation des écoulements.

Enfin, les autres situations ont influencé la qualité des eaux d'aquifères ayant une grande importance régionale ou locale en terme de situation, de qualité et de quantité. En conséquence, des dispositifs de protection ont été mis en place (barrage anti-sel,

fermeture d'anciens forages en mauvais état,...) et la gestion des prélèvements a été adaptée.

II-2.3. RESUME DES CONSEQUENCES

Les conséquences de l'influence de la mer sur la qualité des aquifères sur le plan de l'utilisation des eaux sont résumées dans le tableau ci-dessous.



Salinité dans les aquifères littoraux - Conséquences

Troisième partie

Recommandations pour la gestion des aquifères littoraux

III-1. Objectifs

"L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation".

La première phrase de la loi sur l'eau du 3 janvier 1993 trouve tout particulièrement son application dans la gestion des aquifères littoraux :

- le "patrimoine", résultat d'un don de la nature et de l'intervention humaine, est une valeur permanente à condition d'être géré. Les aquifères littoraux font partie du patrimoine. En effet, les exemples décrits précédemment montrent leur rôle dans l'alimentation en eau potable, dans l'activité économique (aquacole, agricole, touristique et industrielle), dans la préservation des zones humides ;
- le bien "commun" demande la responsabilité de chacun et situe les usages particuliers dans une solidarité collective. En zone littorale, la pression anthropique est souvent forte, les conflits d'usage plus marqués, les zones humides plus nombreuses. La gestion nécessite donc, encore plus qu'ailleurs, une concertation.

En vertu de ces principes, l'objectif de base dans la gestion des aquifères littoraux est la préservation de la qualité des eaux. En effet, en cas de surexploitation, la dégradation de la qualité des eaux est la première des conséquences. En général, il s'agit de préserver les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la nappe en amont des influences marines. Cependant, d'autres objectifs peuvent être définis quand on est en présence des contextes particuliers eaux douces/eaux salées (Camargue, île de Noirmoutier) et où des activités adaptées se sont développées. Alors, l'objectif pourra être de conserver la salinité de l'aquifère pour des activités aquacoles ou thermales.

III-2. Recommandations

La gestion correcte des aquifères littoraux doit :

- Pouvoir s'appuyer sur une bonne connaissance du contexte naturel pour évaluer les conséquences des choix et décider en connaissance de cause.

Les études à mener et les mesures à réaliser sont propres à chaque site. Les indications données ci-après sont générales, mais fournissent les principes essentiels dans ce type de problématique avec des techniques d'investigation et les études envisageables.

En premier lieu, il faut connaître la géométrie de l'aquifère avec en particulier, la configuration des couches entre le milieu marin et l'aquifère situé plus en amont en essayant de mettre en évidence les structures naturelles pouvant jouer un rôle protecteur, ou le contraire, vis-à-vis du biseau salé (pendage, failles,...). La position et la profondeur du biseau salé, naturelle ou influencée par des pompages, sont à repérer. Pour cette phase, la consultation des données des informations de la Banque du sous-sol peut fournir généralement les données de base (géométrie, hydrochimie,...). Différentes techniques sont disponibles pour la caractérisation du site : prospection géophysique, analyses chimiques et isotopiques.

Ensuite, les conditions hydrodynamiques doivent être identifiées : carte piézométrique à différentes époques, valeurs des paramètres hydrauliques, hauteur des cours d'eau, prélèvements par pompages,...

A partir de la caractérisation du site, et selon les cas, l'étude de la nappe par un modèle de simulation des écoulements souterrains permet de mieux comprendre le fonctionnement de la nappe et de pouvoir tester des hypothèses de gestion.

- Sur le plan de la gestion s'inspirer des principes énoncés dans la loi sur l'eau

La loi sur l'Eau conduit à de réelles innovations dans le mode d'aménagement et de gestion de l'eau :

- solidarité de bassin hydrographique. Cette notion conduit à une gestion à l'échelle du bassin, ce qui est essentiel pour un aquifère littoral où les conditions amont de la nappe et la relation nappe-mer sont fortement imbriquées ;
- concertation et partenariat. Ce mode de gestion paraît le plus adapté pour les aquifères littoraux où les acteurs et les usages sont nombreux ;
- gestion intégrée des milieux aquatiques. Les aquifères littoraux rassemblent souvent des milieux interdépendants à prendre en compte dans leur globalité (zones humides, lagunes, eau, espèces faunistiques, espaces riverains) ;

- planification par des structures décentralisées. La loi sur l'eau a créé :
 - . le SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux). Il fixe les orientations fondamentales à l'échelle des grands bassins. Il y en a six pour la France dont cinq ont une façade littorale. Dans le secteur Adour-Garonne, il est proposé de mettre en place une structure de concertation de gestion pour les nappes profondes, avec, entre autre, la prise en compte des équilibre eau douce/eau salée ;
 - . le SAGE (Schéma d'aménagement des eaux). Compatible avec le SDAGE, il s'applique sur un périmètre plus réduit constituant un système hydrographique cohérent. De nombreux SAGE sont envisagés. On peut citer un exemple dans le département d'Outre-mer, la Guyane, où les études du SAGE de l'Ile de Cayenne sont en cours.

Les besoins d'une gestion concertée sont apparus localement et ont donné lieu à des initiatives avant la publication de la loi sur l'eau. On peut citer notamment :

- l'île de Noirmoutier où une gestion raisonnée a été lancée à partir de 1990 : mise en place d'un réseau quantitatif et qualitatif, étude du fonctionnement des nappes, élaboration d'un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains,... La démarche a été entreprise par le Conseil Général de Vendée et rassemble l'ensemble des utilisateurs : professionnels de la conchyliculture, de l'aquaculture, de la saliculture, de l'IFREMER, la Région des Pays-de-Loire, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne ;
- la nappe astienne de Valras-Agde. Le SMEGA (Syndicat mixte d'étude et de gestion de l'Astien) a pour vocation de gérer cette nappe. Parmi les actions menées, on peut citer : suivi de la nappe, programme d'allègement des prélèvements, interventions sur les forages défectueux, informations des usagers, économies d'eau, et réalisations de nouveaux forages dans des conditions satisfaisantes. Concernant ce dernier point, un code de bonne pratique de foration est en cours d'élaboration qui sera finalisé par la signature d'une charte-qualité avec la branche professionnelle. Seules les entreprises s'engageant sur le respect des règles établies pourront intervenir sur le secteur.

Bibliographie

IFEN (1996) - Données de l'Environnement, n° 19. "Les pressions sur le littoral".

REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

Agence de L'eau Artois-Picardie (1995) - L'Atlas du Bassin Artois-Picardie.

BRGM-BURGEAP (1969) - Etude hydrogéologique des "Wateringues" - Rapport BRGM 69 SGL 103 NPA et BURGEAP R.477.

Caous J.Y., Legrand M. (1974) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31-12-1973 sur le territoire des feuilles topographiques à 1/50 000 RUE - 23 HESDIN - 24 - Rapport BRGM 75 SGN 215 PNO.

d'Arcy D. (1970) - Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de l'Authie - Thèse de 3^{ème} cycle - Faculté des Sciences de l'Université de Paris - Laboratoire de Géographie physique et de Géologie dynamique de la Sorbonne.

Gerin B. (1966) - Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Canche. Thèse de 3^{ème} cycle - Faculté des Sciences de l'Université de Paris - Laboratoire de Géographie physique et de Géologie dynamique à la Sorbonne.

Louche B. (1994/1995) - Limites littorales de la nappe de la craie - Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer. Travaux de thèse de 3^{ème} cycle en cours pour une soutenance au dernier trimestre 1996 - USTL - UFR des Sciences de la Terre.

Mania J. (1971) - Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens des Flandres franco-belges et dans le Bassin d'Orchies - Thèse de 3^{ème} cycle - USTL.

Rousset J. (1971) - Etude générale des "Wateringues" - Rapport de présentation (Service Hydrologique Centralisateur).

PICARDIE

Allard J.F. (1992) - Le Galet de Mer Français - Exploitation de la Pointe du Hourdel (Somme) - Suivi de l'évolution du niveau de la nappe. Note BRGM PIC 92/72, 8 p., 1 ann.

Allard J.F. (1993) - Zone des Carrières du Crotoy - Hydrogéologie dans le secteur du Crotoy (Somme). Note BRGM 93 NPC 91, 14 p.

Belpaume D. (1985) - Chambre de Commerce et d'Industrie d'Abbeville (Somme) - Station d'épuration de coquillages du Crotoy (Somme) - Etude quantitative et qualitative de l'eau exploitée au forage existant. Note BRGM PIC 85/61, 9 p. 6 ann.

Beun N. (1973) - Contribution à l'étude hydrogéologique des Bas-Champs de Cayeux (Somme). Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université de Lille, 151 p.

Caous J.Y. (1986) - Chambre de Commerce et d'Industrie d'Abbeville (Somme) - Station d'épuration de coquillages du Crotoy (Somme) - Travaux de récupération du forage existant - Interprétation des analyses. Note BRGM PIC 86/27, 5 p.

Caous J.Y., Legrand M. (1974) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31-12-1973 sur le territoire des feuilles topographiques à 1/50 000 Rue -23-Hesdin -24. Rapport BRGM 75 SGN 215 PNO, 57 p., 6 ann.

Caous J.Y., Belpaume D. (1978) - Commune du Crotoy (Somme) - Renforcement de l'adduction d'eau potable - Forage aux sources de Genville, Commune de Bernay (Somme) - Acidification, développement et essais par paliers réalisés en juin 1977. Rapport BRGM 78 SGN 012 PNO, 7 p., 7ann.

Comon D. (1984) - Direction Départementale de l'Agriculture de la Somme - Commune de Quend - Reconnaissance hydrogéologique aux environs de Villers-Sur-Authie en vue de la création de nouveaux captages. Rapport BRGM 84 SGN 060 PIC, 18 p.

Comon D. (1991) - Complexe Conchylicole - Recherche d'eau par forage à la craie au Crotoy (Somme) - Compte-rendu des travaux et résultats. Note BRGM PIC 91/17, 11 p., 3 ann.

de Lammerville J.M. (1968) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine du Marquenterre. Thèse de 3^{ème} cycle de la Faculté des Sciences de Paris, 84 p.

Garcia H. (1987) - Syndicat de Quend - Recherche de nouvelles ressources en eau à Villers-Sur-Authie (Somme) et à Colline-Beaumont (Pas-de-Calais). Rapport BRGM 87 SGN 464 PIC, 14 p.

Louche B. (1994) - Reconnaissance des hydrosystèmes souterrains côtiers picards et approche de leur fonctionnement - Région du Marquenterre - Secteur de Fort-Mahon et Quend. Rapport préliminaire de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 54 p.

Roux J.C. (1963) - Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Somme. Thèse de 3^{ème} cycle de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 509 p.

SRAE (1982) - Les Bas Champs de Cayeux et le Marquenterre - Propositions pour la reconquête de la qualité des eaux. Rapport du Service Régional de l'Aménagement des Eaux (Ministère de l'Agriculture, Région Picardie), 48 p., + Annexes.

Station d'études en Baie de Somme (1980) - Bilan hydrogéomorphologique du Marquenterre - Rapport pour la séance de travail inter-services, Sous-Préfecture d'Abbeville, le 22 mai 1980. Etude confiée par l'OREAP à la station d'études en Baie de Somme. Non paginé.

PAYS DE LA LOIRE

Direction de l'Environnement et de l'Aménagement (Conseil Général de Vendée) (1994) - Les eaux souterraines de l'île de Noirmoutier, caractéristiques, utilisation et gestion. Brochure du Service d'hydrogéologie.

Mondain P.H. (1995) - Plaine et marais de Sud Vendée et de l'Ouest des Deux-Sèvres. Etude globale pour la gestion de la ressource en eau souterraine. Synthèse Générale - Rapport CALLIGEE.

REGION AQUITAINE

Agence de l'eau Adour-Garonne Département Géologie d'océanographie, Ifremer, labo océanographie biologique B&I, Cemagref - BRGM-SGR/AQI - DIREN AQI - Port autonome de Bordeaux. (1994) - Etat des connaissances sur l'Estuaire de la Gironde.

Albinet M., Bourgeois M., Trupin G. (1965) - Etude de la nappes des sables éocènes en Gironde. Travaux expérimentaux à St-Christoly-de-Médoc.

Allard A., Dubreuilh J. Marionnaud J.M. (1974) - Contribution de la méthode historique à la résolution d'un problème de géologie récente (exemple du Bas-Médoc en Gironde). BRGM Bulletin 2^{ème} série n° 1.

Allen P., Castaing P., Feral A., Klingebiel A., Vigneaux M. (1970) - Contribution à l'étude des faciès de comblement et interprétation paléogéographique de l'évolution des milieux sédimentaires récents et actuels de l'Estuaire de la Gironde. Bulletin n° 8 IGA.

Astié H., Bourgeois M. (1966) - Esquisses des nappes d'eau souterraine de l'Aquitaine occidentale. Rapport DSGR 66 A 37.

Astié H., Chamayou J. (1970) - Etude hydrogéologique des alluvions de la Garonne entre La Réole et Podensac. Rapports BRGM : 70 SGN 309 AQI - 72 SGN 081 AQI - 72 SGN 143 AQI.

Astié H., Chamayou J. (1973) - Etude hydrogéologique préliminaire au captage de la nappe alluviale de la Dordogne en Gironde. Rapports BRGM : 73 SGN 305 AQI et 74 SGN 323 AQI.

Astié H., Chamayou J. (1977) - Les eaux souterraines en Gironde (Atlas). Rapport BRGM : 77 SGN 104 AQI.

Bellegarde R., Chamayou J., Heng B. (1972) - Evaluation des ressources en eau du département de la Charente-Maritime. Rapport BRGM : 72 SGN 145 AQI.

Bellegarde R., Chamayou J., Heng B., Marionnaud J.M. (1973) - Possibilité de recharge artificielle de la nappe des "sables éocènes" en Gironde et étude hydrogéologique de la nappe phréatique à l'ouest de Bordeaux, préalable à la réalisation de captages destinés à la remise en charge de l'aquifère Eocène et à l'alimentation en eau des zones industrielles bordelaises. Rapports BRGM : 73 SGN 058 AQI - 74 SGN 315 AQI.

BRGM (1975) - Sables et graviers d'alluvions entre Bordeaux et Castets-en-Dorthe.

BRGM-ELF-ESSO-SNPA (1972) - Géologie du Bassin d'Aquitaine (Atlas).

Chamayou J., Heng B. (1972) - Etude hydrogéologique des alluvions de la Dordogne entre Libourne et Flaujacgues (33). Rapport BRGM : 72 SGN 349 AQI.

Dubreuilh J. (1976) - Contribution à l'étude sédimentologique du système fluvial Dordogne-Garonne dans la région bordelaise. Thèse de doctorat d'Université.

Fabre A. (1939) - Les terrains de revêtement du Médoc.

Famechon C., Louvrier M., Trupin G. (1977) - Les matériaux sous-flandriens dans la vallée de la Garonne entre Bordeaux, Castets-en-Dorthe et Cadaujac. Rapports BRGM : 77 SGN 365 AQI et 77 SGN 394 AQI.

Famechon C., Trupin G. (1974) - Les matériaux alluvionnaires du département de la Gironde.

IGBA (1973) - Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la Garonne entre Barsac et Virelade

IGBA (1973) - Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la Garonne entre Blanquefort et Le Verdon.

IGBA (1977) - Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la Garonne entre Virelade et Villenave d'Ornon. Micro-résumé : évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau de la nappe des graviers sous-flandriens.

Landry J. (1969) - Reconnaissance géologique dans l'Estuaire de la Gironde (résultats et interprétations des coupes lithologiques des sondages - Synthèse géologique et géotechnique). Rapports BRGM : 69 SGL 137 AQI et 69 SGL 239 AQI.

Lavigne L., Marionnaud J.M. (1968) - Etude géologique des aquifères éocènes de l'Aquitaine occidentale. Rapport BRGM : 69 SGL 05 AQI.

Sourisseau B. (1994) - Les ressources en eau souterraine de la côte Aquitaine. Bordeaux Aquaculture - Journées Aquitaine du Littoral. Archi. 23 mars 1994.

REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON

Alonso S.L. (1995) - Le karst de FONT ESTRAMAR et l'alimentation de l'étang de SALSES-LEUCATE (Pyrénées-Orientales). DESS Univ. d'Avignon, encadrement BRGM-SGR/LRO de Montpellier.

Assise régionales de l'EAU en Languedoc-Roussillon. Propositions. Rapport SGAR - Comité Technique de l'Eau.

Astier A., Delmas J.P., Nappes aquifères du littoral méditerranéen dans la région Languedoc-Roussillon. Etude préliminaire. Estimation provisoire de leur extension et de leur possibilité d'utilisation. Rapport DATAR/CTE Languedoc.

Auroux F. (1992) - Modèle mathématique de gestion de l'aquifère plio-quadernaire du Roussillon. Modélisation mathématique des risques d'intrusion marine dans l'aquifère plio-quadernaire. Rapport BRGM R 34981 LRO 45 92.

Auroux F. (1995) - Modélisation du système aquifère multicouche du Roussillon. Vademecum pour la mise en oeuvre de nouvelles simulations. Rapport ANTEA A 02708.

Auroux F. (1995) - Simulations d'exploitation complémentaire de l'aquifère multicouche du Roussillon pour assurer les besoins en eau à l'horizon 2010. Rapport BRGM N 1878.

Berard P. (1995) - Synthèse géologique et hydrogéologique de l'Etang de Thau.

Biscaldi R. (1964) - Hydrogéologie du bassin inférieur du Tech (de Céret à la mer). Thèse de 3^{ème} cycle, Montpellier.

Bonnet A., Paloc H. (1969) - Les eaux des calcaire jurassiques du bassin de Montbazin-Gigean et de ses bordures. Pli de Montpellier et Massif de la Gardiole.

Carte de vulnérabilité de la vallée de l'Hérault (1990).

CERGA - Etudes et travaux sur les ouvrages d'AEP de Mauguio.

CERGA/CERH - Atlas établis suivant les coupures des cartes géologiques dans les années 1965 à 1975. Feuilles disponibles de Pézenas, Agde, Narbonne, Leucate, Lézignan-Corbières, Béziers, Montpellier cartes hydrogéologiques (Sète et Plaines du Roussillon).

Debuisson J., Lemaire B., Paloc H. (1966) - Les sources littorales et sous-marines du Languedoc-Roussillon. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM DS.66.A63 de juin 1966. (RT8).

Delmas J.P. (1961) - Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de Villeveyrac et de la rive Ouest de l'étang de Thau. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. de Montpellier.

Diop M. (1980) - Nappe des cailloutis entre Montpellier et Lunel. Thèse de 3^{ème} cycle.

DIREN/SEMA - Plaquette : La nappe astienne de Valras-Adge.

Gadel F. (1966) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des Corbières orientales (région Est) et des plaines de Rivesaltes, Lapalme, Caves et Sigean. Thèse de 3^{ème} cycle, Montpellier.

Got H. (1965) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Feuilla Fitou (Corbières) et de la Salanque (Roussillon). Thèse de 3^{ème} cycle, Montpellier.

Laurent A. (1993) - La gestion en bien commun des eaux souterraines : la nappe des sables astiens de Valra-Agde (Hérault), une opération pilote en Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Marchal J.P., Berard P., Camus A. (1985) - Synthèse hydrogéologique de la région Languedoc-Roussillon. Quantité - qualité. Rapport BRGM : 85 LRO 349 PR d'août 1985.

Marchal J.P., Camus A. (1984) - Surveillance de la qualité chimique des eaux souterraines dans la zone littorale du Languedoc-Roussillon. Secteur compris entre l'embouchure de l'Aude et le Grau-du-Roi. Observations effectuées en 1983. Rapport BRGM 77 84 AGI 153 LRO du 7 juin 1984.

Marchal J.P., Camus A., Renault P., Paloc H. (1977) - Examen de l'état actuel de la contamination par le sel marin des réservoirs aquifères littoraux à nappe libre de la région Languedoc-Roussillon. Synthèse des résultats d'une enquête documentaire et de mesures de salinité effectuées durant le deuxième semestre 1976. Rapport BRGM : 77 SGN 051 LRO du 18 janvier 1977.

Marchal J.P., Camus A., Viala J.P. (1987) - Surveillance de la qualité chimique des eaux souterraines dans la zone littorale du Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM 87 LRO 688 PR du 19 mars 1987.

Marchal J.P., CHERY L. (1995) - Contamination marine de l'aquifères plio-quaternaire du Roussillon (Pyrénées-Orientales) Rapport BRGM : R38604.

Margat J. (1976) - Carte et catalogue des principaux systèmes aquifères du territoire français. Rapport BRGM 76 SGN 531 AME de décembre 1976.

Orengo R., Pappalardo A., (1983) - Données géologiques et hydrogéologiques sur les formations tertiaires du bassin de Montbazin-Gigean.

Paloc H. *et al.* (1969 et 1970) - Etude de la Vène, réalisation de sondages de reconnaissance et expériences de coloration.

Paternot C. (1964) - Contribution à l'études hydrogéologique du bassin du Réart. Thèse de 3^{ème} cycle, Montpellier.

Rapport d'exécution du forage de la Castillonne. Etude SGR/LRO.

Santamaria L. (1995) - DEA sur l'interface nappe-étang de Mauguio.

Santamaria L. (1995) - Etude des caractéristiques des eaux souterraines et de ses relations avec l'étang de l'OR. DEA Univ. de Montpellier II, encadrement BRGM/Conservatoire du Littoral/DIREN.

SOGREAH (1962) - Basses plaines Orb-Hérault. Etude hydrogéologique.

Solages S. (1970) - Atlas hydrogéologique du Languedoc-Roussillon. Feuille de Narbonne-Leucate. CERH, Montpellier.

Suchon C. (1973) - Hydrogéologie du jurassique du bassin de Villeveyrac. USTL, thèse de 3^{ème} cycle.

Valencia G. (1971) - Etude hydrogéologique de la nappe astienne Valras-Agde. Thèse 3^{ème} cycle, Montpellier.

REGION PROVENCE-COTE-D'AZUR

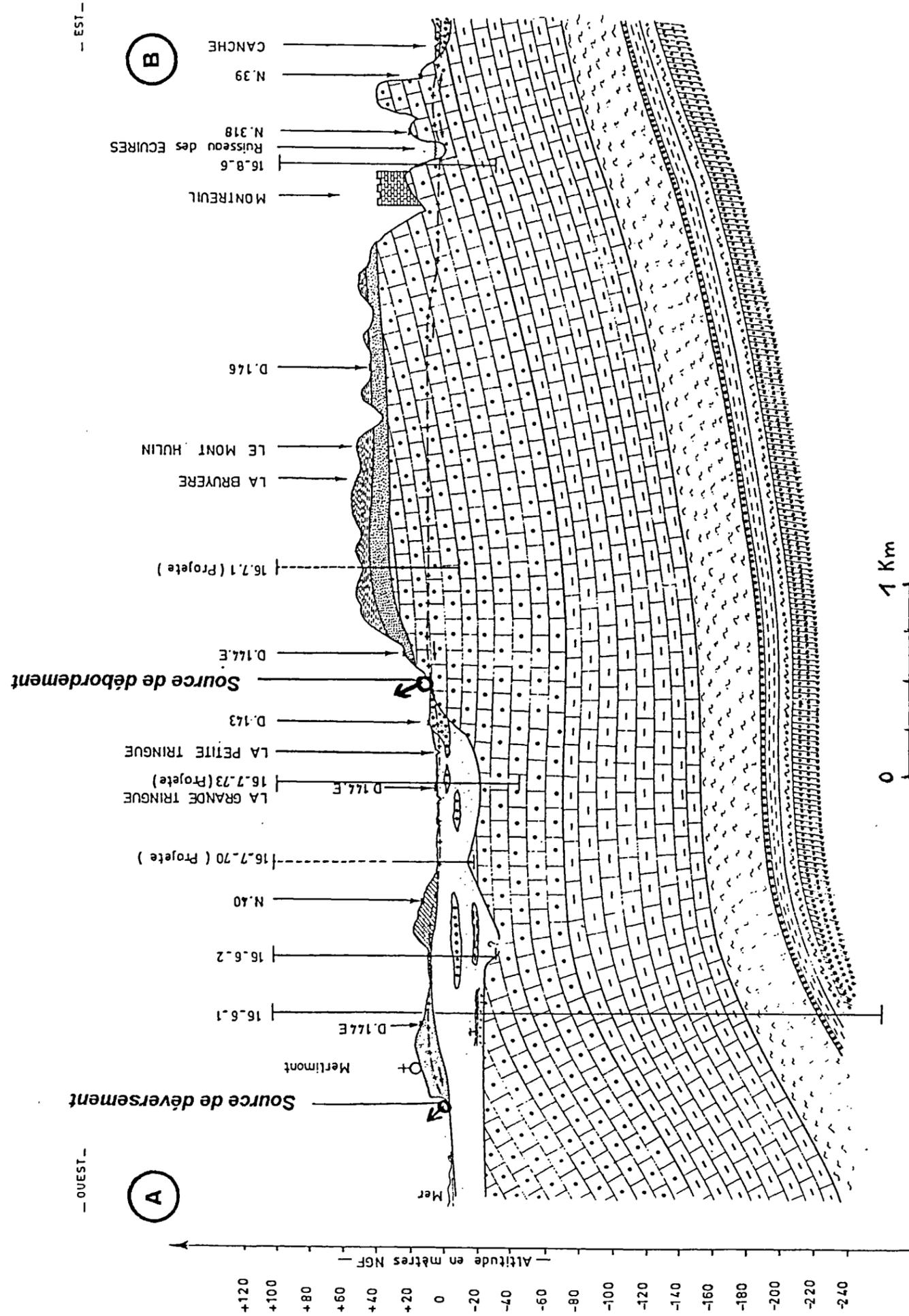
Mary JP., Riou V., Lefevre A., Rovira E. - Protection de la nappe alluviale du Bas Gapeau vis-à-vis d'intrusions salines. Mise au point d'un instrument de gestion. Document BRGM 256.

Annexe

Région Nord-Pas-de-Calais

Coupes hydrogéologiques

Nota : Les coupes sont situées sur la figure I-1. de la page 24.



Coupe géologique A-B

**E.R.H. LITTORAL
COUPE GEOLOGIQUE
OUEST-EST DE MERLIMONT A MONTREUIL
(Tracé de la coupe sur l'annexe VII)**

- | | | |
|--|-----------------------------------|---------------|
| | Alluvions modernes | } Holocène |
| | Sables dunaires récents | |
| | Sables dunaires remaniés | |
| | Sable fin argileux | } Pléistocène |
| | Dépôts de silex roulés | |
| | Lentille argileuse | |
| | Sable et gravier | } Tertiaire |
| | Tourbe sableuse | |
| | Argile de St Aubin | |
| | Sable de St Josse | } Crétacé |
| | Craie blanche à silex du Sénonien | |
| | Craie grise du Turonien | |
| | Marne du Cénomanién | } Trias |
| | Tourtia | |
| | Argile du Gault | |
| | Grès du Trias | } Primaire |
| | Grès du Primaire | |
| | Niveau piézométrique | |
| | Sens d'écoulement de l'aquifère | |

B. R. G. M.
Service géologique régional
NORD - PAS-DE-CALAIS
Rapport n° : 76 SGN 122 NPA
Plan n° : G3633
Date : 4-12-1976

Echelle des hauteurs 1/2 000
longueurs 1/25 000

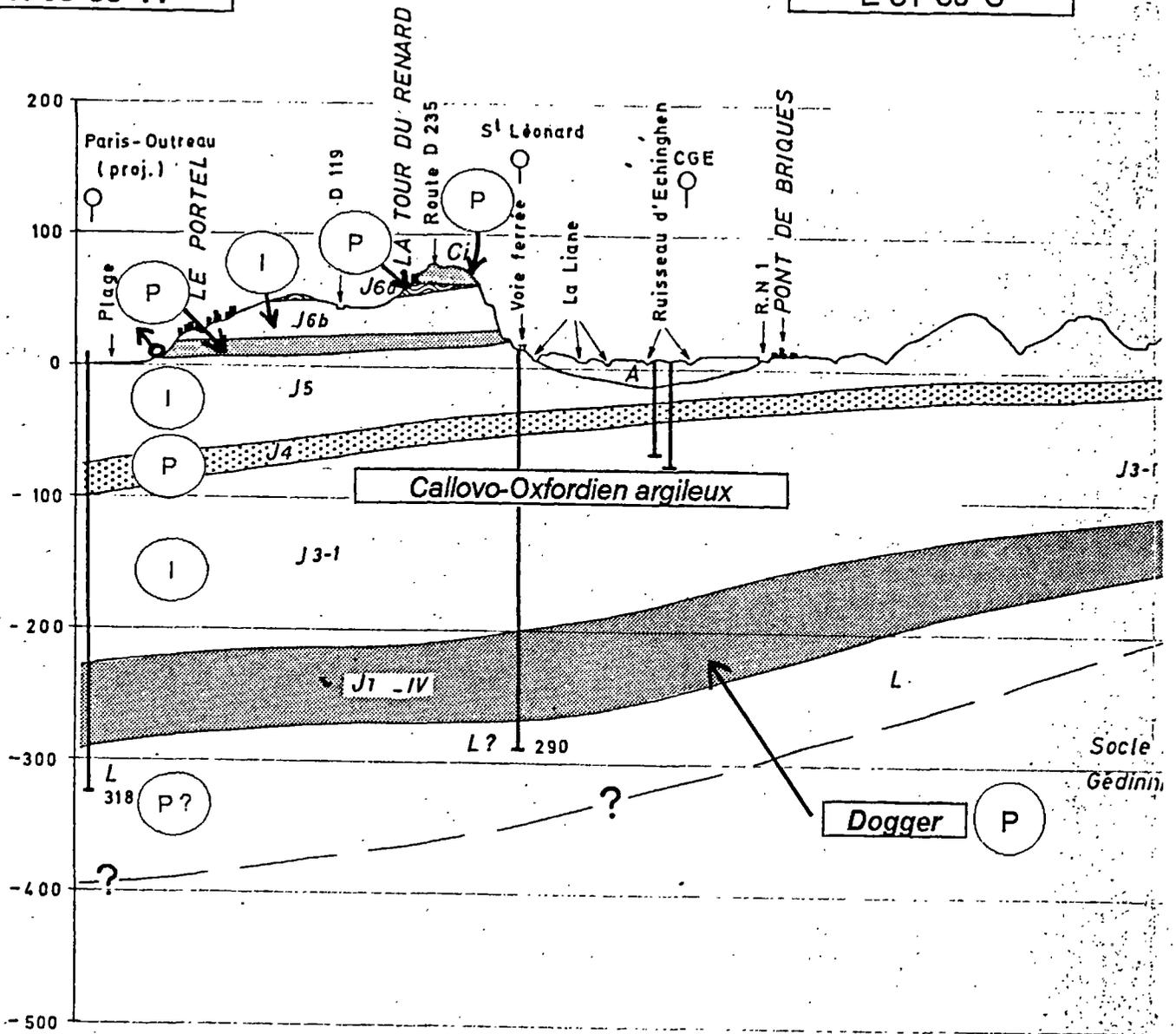
Coupe géologique C-D

C

D

N 58°30' W

E 31°30' S

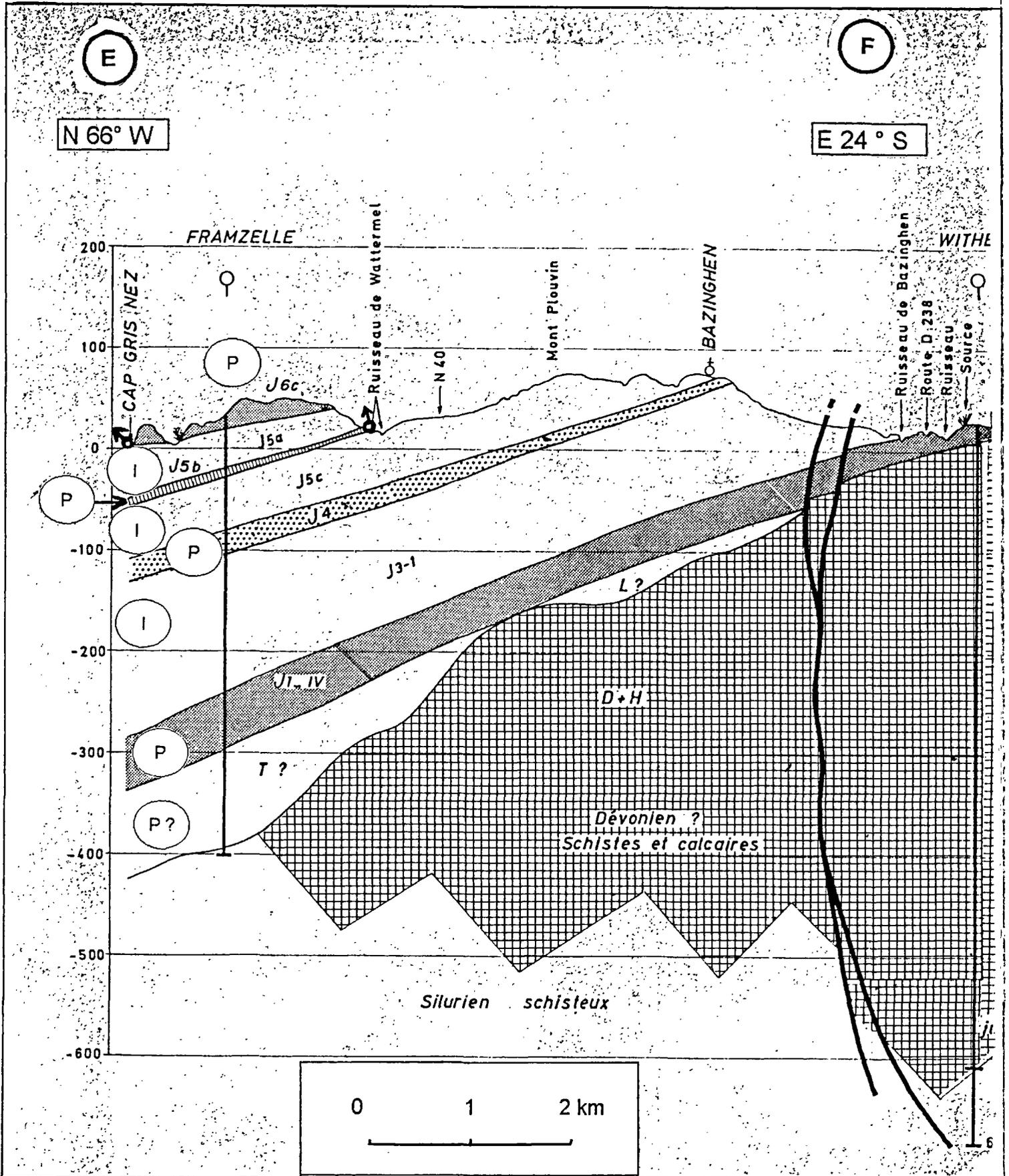


- P
Perméable
- I
Imperméable

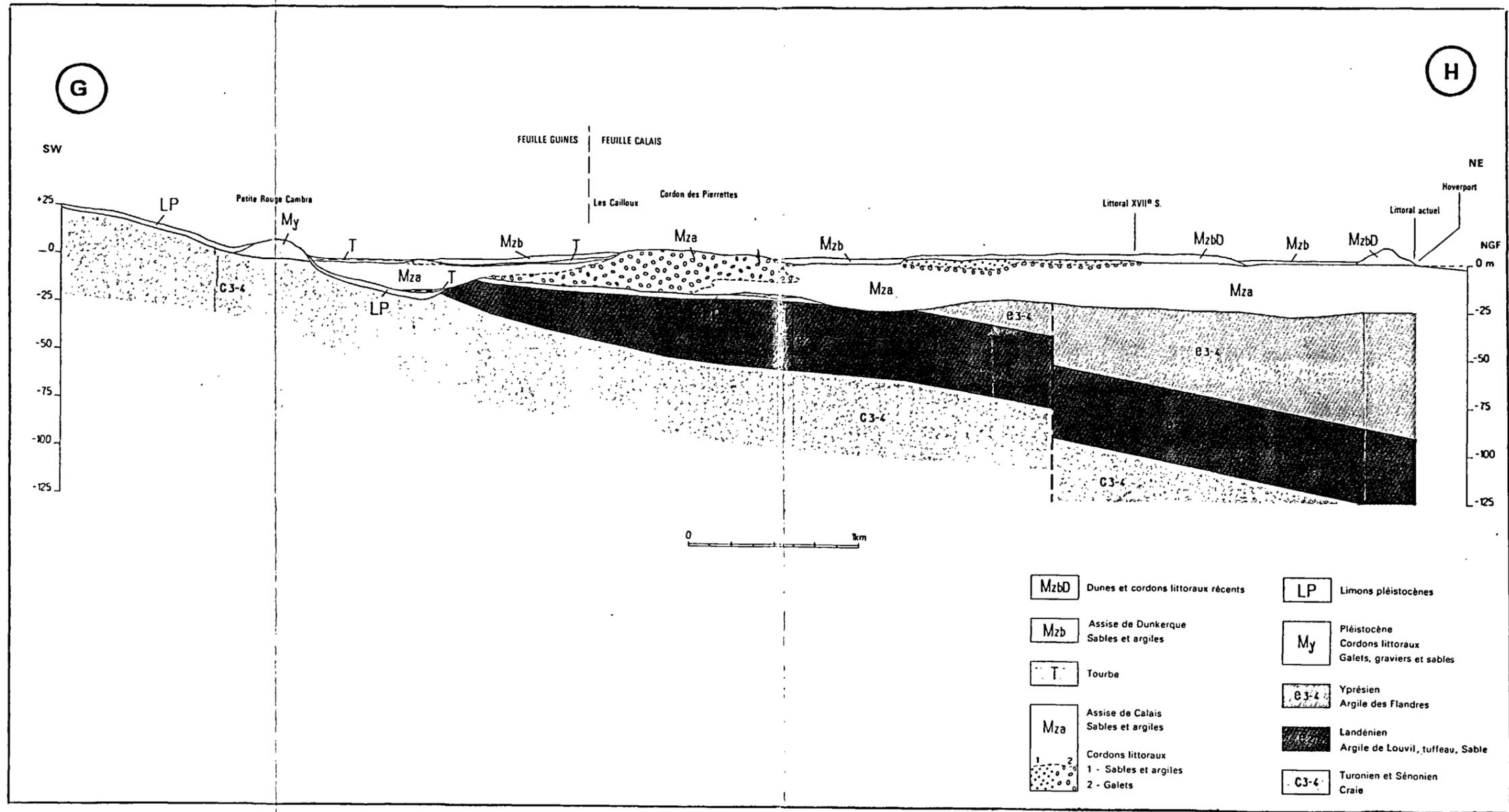
0 1 2 km



Coupe géologique E-F



Coupe géologique G-H



Coupe géologique I-J

