

Ville d'Hyères les Palmiers (83)



2-4, Allée de Lodz  
(près avenue Tony Garnier)  
69363 LYON CEDEX 07  
Tél. 04 72 71 26 00  
Document No 20842

**PROTECTION DE LA NAPPE ALLUVIALE  
DU BAS GAPEAU VIS A VIS  
D'INTRUSIONS SALINES**

BURGÉAP - REGION SUD  
R/Av.336-A.3286  
Décembre 1994

Le Gapeau, équipé d'un barrage anti-sel afin de limiter les avancées salines dans la nappe, est essentiellement caractérisé par des faibles débits d'étiage ; débit qui peuvent être nuls lors de sécheresses exceptionnelles.

## **Recueil des données nécessaire à la modélisation mathématique**

### **Données de terrain**

La piézométrie, relevée début juin 1994, donne un état de nappe peu déprimé avec présence d'un dôme entre les captages et le littoral empêchant toute intrusion saline.

Les mesures de conductivités, associées au levé piézométrique, mettent en évidence des apports minéralisés en provenance des Maures et ont permis d'établir une relation entre la conductivité et la teneur en chlorures.

Grâce à des enquêtes sommaires menées sur le terrain, nous avons pu :

- vérifier que la basse plaine présente toujours une vocation agricole ; activité pour laquelle les besoins en eau sont en totalité assurés par le Canal de Provence depuis 1993 ;
- recenser quelques pompages autres que les captages A.E.P. ;
- constater que les berges du Gapeau et du Roubaud présentent des aménagements, diminuant les échanges avec la nappe, jusqu'à la RN 98 pour le premier, et jusqu'à 300 m en amont du barrage anti-sel pour le second.

### **Données bibliographiques**

La consultation des archives et études antérieures a permis :

- d'établir les différents historiques nécessaires à la modélisation : piézométrie, salinité, prélèvements A.E.P. et agricoles, pluviométrie, niveaux et débits des cours d'eau ;
- de sélectionner les états de référence pour le calage du modèle :
  - période de mars 1989 à juin 1994 pour le régime transitoire ;
  - états piézométrique d'octobre 1966, mai 1979, mars 1989 et juin 1994 pour le calage en régime permanent.

## Protection de la ressource

Grâce à des simulations de scénarios prédéfinis, le modèle mathématique a permis d'estimer les conséquences de 4 aménagements sur le régime général de la nappe alluviale. Ces aménagements ont été testés afin :

- d'améliorer l'exploitation des captages A.E.P. (« réorganisation optimale »),
- de protéger la ressource avec une exploitation de 20 000 m<sup>3</sup>/j.

### Réorganisation optimale des prélèvements A.E.P.

Dans des conditions d'étiage du type de 1989 - 1991, le débit maximum exploitable est de l'ordre de 18 000 m<sup>3</sup>/j avec une répartition de 3 à 4 000 m<sup>3</sup>/j au Père Eternel et de 14 à 15 000 m<sup>3</sup>/j pour le groupe Golf Hôtel - Moulin Premier.

### Recharge artificielle par drains (berges filtrantes)

L'efficacité d'implantation de cet aménagement permet une protection des captages avec un débit d'alimentation de 60 l/s. La non maîtrise des débits infiltrés, les possibilités de colmatage des drains et l'annulation probable des débits d'alimentation en période d'étiage ne permettent pas à cette solution un fonctionnement permanent.

### Recharge artificielle par bassins d'infiltration (Moulin Premier ou golf d'Hyères)

Les débits à injecter pour protéger la ressource sont de 125 l/s durant les 7 premiers mois de l'année hydrologique puis de 25 l/s pendant les 5 derniers mois.

Cette solution présente le net avantage de pouvoir maîtriser les débits à infiltrer. Par contre, avec l'hypothèse d'une prise d'eau au Gapeau, la fourniture des débits nécessaires à l'infiltration pourra ne pas être assurée durant les périodes sèches.

### Barrière hydraulique en bordure du littoral

Pour être efficace, cet aménagement se compose de 4 forages pompant un débit total de 20 l/s. Par la création d'une avancée saline jusqu'à la barrière, cette solution présente un risque pour la protection des captages A.E.P.

### Proposition pour assurer la protection

Aucune des 3 solutions d'aménagements étudiées n'est en mesure, à elle seule, de garantir la pérennité de la protection de la nappe avec une exploitation de 20 000 m<sup>3</sup>/j.

La protection de la nappe pourrait être assurée par une solution mixte :

- bassins tant que le Gapeau peut fournir le débit nécessaire à l'infiltration ;
- dès que le débit du Gapeau n'est plus suffisant, mise en service temporaire :
  - des drains si leur alimentation est suffisante pour maintenir le dôme,
  - de la barrière hydraulique sinon.

# SOMMAIRE

<b>AVANT PROPOS - DEFINITION DU PROBLEME .....</b>	<b>1</b>
<b>1. CADRE GENERAL DU SITE ETUDIE.....</b>	<b>3</b>
1.1. CADRE PHYSIQUE (CF. FIGURE 1) .....	3
1.2. CLIMATOLOGIE.....	3
1.3. HYDROLOGIE.....	4
1.3.1. <i>Le Gapeau</i> .....	4
1.3.2. <i>Le barrage anti-sel sur le Gapeau (cf. photo 1)</i> .....	5
1.3.3. <i>Les autres cours d'eau</i> .....	5
1.4. CADRE GEOLOGIQUE (CF. FIGURE 2).....	6
1.4.1. <i>Les massifs entourant la plaine alluviale</i> .....	6
1.4.2. <i>La plaine alluviale du Gapeau</i> .....	6
1.5. CADRE HYDROGEOLOGIQUE .....	7
1.5.1. <i>Hydrogéologie des massifs entourant la plaine alluviale</i> .....	7
1.5.2. <i>Hydrogéologie générale de la plaine alluviale du Gapeau</i> .....	7
1.5.3. <i>Alimentation de la nappe alluviale</i> .....	7
1.5.4. <i>Piézométrie - Gradient - Fluctuations saisonnières</i> .....	8
1.5.5. <i>Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale</i> .....	8
1.5.6. <i>Exploitation de la nappe alluviale</i> .....	9
1.6. HYDROGEOCHIMIE.....	9
<b>2. RECUEIL DE DONNEES.....</b>	<b>10</b>
2.1. LEVE PIEZOMETRIQUE ET DE SALINITE SYNCHRONE.....	10
2.1.1. <i>Piézométrie de la nappe alluviale (cf. figure 4)</i> .....	10
2.1.2. <i>Mesures de la conductivité de l'eau (cf. figure 5)</i> .....	11
2.1.3. <i>Profils verticaux de conductivité</i> .....	12
2.2. ENQUETES SUR LE TERRAIN .....	12
2.2.1. <i>Occupation actuelle des sols</i> .....	12
2.2.2. <i>Autres pompages que les pompages de la Ville d'Hyères</i> .....	13
2.2.3. <i>Etat actuel des berges du Gapeau et du Roubaud (cf. figure 7)</i> .....	14
2.3. HISTORIQUES DES DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION.....	15
2.3.1. <i>Historiques de la piézométrie et de conductivité</i> .....	15
2.3.2. <i>Historique de prélèvements A.E.P.</i> .....	16
2.3.3. <i>Historique de prélèvements agricoles</i> .....	16
2.3.4. <i>Historique de pluviométrie</i> .....	16
2.3.5. <i>Historique de niveau et de débit des cours d'eau</i> .....	17

<b>3. MODELISATION MATHEMATIQUE .....</b>	<b>18</b>
3.1. PRESENTATION GENERALE DU MODELE MATHEMATIQUE .....	18
3.1.1. Généralités.....	18
3.1.2. Cas de la nappe alluviale du bas Gapeau.....	19
3.2. CONSTRUCTION DU MODELE MATHEMATIQUE.....	19
3.2.1. Substratum du modèle (cf. annexe C).....	19
3.2.2. Conditions de débits imposés.....	20
3.2.3. Les niveaux d'eau des eaux superficielles.....	20
3.3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DU MODELE EN REGIME PERMANENT .....	21
3.3.1. Etats de référence .....	21
3.3.2. Paramètres à caler.....	21
3.3.3. Résultats des calages (cf. annexe D).....	21
3.4. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE (CF. ANNEXE E).....	24
3.4.1. Eléments de calage .....	24
3.4.2. Paramètres imposés .....	24
3.4.3. Paramètre à caler .....	24
3.4.4. Résultats du calage .....	24
3.5. CALAGE HYDRODISPERSIF DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE.....	25
3.5.1. Eléments de calage .....	25
3.5.2. Conditions aux limites.....	25
3.5.3. Paramètres à caler.....	25
3.5.4. Résultats du calage (cf. annexe F).....	26
3.6. TESTS DE SENSIBILITE .....	27
3.6.1. Tests liés aux débits imposés .....	27
3.6.2. Tests liés aux paramètres hydrodynamiques .....	28
<b>4. PROTECTION DE LA RESSOURCE : SIMULATIONS .....</b>	<b>29</b>
4.1. PROPOSITIONS D'AMENAGEMENTS .....	29
4.2. SIMULATIONS DES AMENAGEMENTS PROPOSES.....	30
4.2.0. Conditions communes à toutes les simulations.....	30
4.2.1. Réorganisation optimale des prélèvements A.E.P.....	30
4.2.2. Recharge artificielle par drains (berges filtrantes).....	31
4.2.3. Recharge artificielle par bassins d'infiltration .....	32
4.2.4. Barrière hydraulique en bordure du littoral .....	33
4.3. DIMENSIONNEMENT ET CHIFFRAGE SOMMAIRES DES SOLUTIONS .....	33
4.3.1. De la réorganisation optimale des prélèvements A.E.P. ....	33
4.3.2. De la recharge artificielle par drains.....	34
4.3.3. De la recharge artificielle par bassins d'infiltration.....	34
4.3.4. De la barrière hydraulique en bordure du littoral .....	35
4.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CHAQUE SOLUTION .....	35
4.4.1. Réorganisation optimale des prélèvements.....	35
4.4.2. Recharge artificielle par drains.....	35
4.4.3. Recharge artificielle par bassins d'infiltration (prise d'eau au Gapeau).....	36
4.4.4. Barrière hydraulique en bordure du littoral .....	36
4.5. PROPOSITION POUR ASSURER LA PROTECTION .....	37

**ANNEXE A : CADRE GENERAL DU BASSIN VERSANT DU GAPEAU**

**ANNEXE B : HISTORIQUES DES DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION**

**ANNEXE C : SUBSTRATUM DU MODELE MATHEMATIQUE**

**ANNEXE D : CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT**

**ANNEXE E : CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE**

**ANNEXE F : CALAGE DU MODELE HYDRODISPERSIF**

**ANNEXE G : RESULTATS DES SIMULATIONS D'AMENAGEMENTS**

**ANNEXE H : DOCUMENTS CONSULTES**

## LISTES DES FIGURES ET DES PHOTOS

- Figure 1 :** Plan de situation de la zone modélisée.
- Figure 2 :** Profils géologiques nord - sud et est - ouest de la basse vallée du Gapeau.
- Figure 3 :** Implantation des points de mesure sur la basse plaine du Gapeau (juin 1994).
- Figure 4 :** Carte piézométrique (6 au 12 juin 1994).
- Figure 5 :** Carte des conductivités et des teneurs en chlorures (6 au 12 juin 1994).
- Figure 6 :** Relation conductivité - teneur en chlorures des eaux de la nappe.
- Figure 7 :** Etat des berges du Gapeau en juin 1994.
- Figure 8 :** Profils en long du Gapeau.
- Figure 9 :** Valeurs des paramètres hydrauliques des eaux superficielles.
- Figure 10 :** Implantation des aménagements simulés.
- Photo 1 :** Le barrage anti - sel du Gapeau.
- Photo 2 :** Le barrage anti - sel du Roubaud.
- Photo 3 :** Etat des berges du Gapeau au niveau de la déviation de la RN 98.
- Photo 4 :** Etat des berges du Gapeau en aval du barrage anti-sel.
- Figure A1 :** Géologie du bassin versant du Gapeau.
- Figure B1 :** Implantation des piézomètres de contrôle du calage du modèle.
- Figure B2 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 119 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B3 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 121 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B4 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 128 - Janvier 1989 à juin 1994.

- Figure B5 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 182 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B6 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 50 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B7 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 60 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B8 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 231 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B9 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 81 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B10 :** Historique des prélèvements A.E.P. - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B11 :** Estimation des pompages agricoles - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B12 :** Pluviométrie mensuelle à Hyères Palyvestre - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B13 :** Pluie utile mensuelle à Hyères - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B14 :** Historique des débits et des niveaux du Gapeau - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure C1 :** Carte des points connus du substratum par géophysique ou par forages.
- Figure C2 :** Carte du substratum de la zone modélisée.
- Figure D1 :** Piézométrie calculée pour l'état d'octobre 1966.
- Figure D2 :** Piézométrie calculée pour l'état de mai 1979.
- Figure D3 :** Piézométrie calculée pour l'état de mars 1989.
- Figure D4 :** Piézométrie calculée pour l'état de juin 1994.
- Figure D5 :** Carte de la répartition des perméabilités sur la zone modélisée.
- Figure D6 :** Bilan des débits pour l'état de mai 1979.
- Figure D7 :** Bilan des débits pour l'état de mars 1989.
- Figure D8 :** Bilan des débits pour l'état de juin 1994.

**Sous-Direction  
de la Planification, des Etudes  
et des Milieux Aquatiques**

**DOCUMENTATION**

**☎ 04.72.71.26.83 ou 84 - Fax 04.72.71.26.02**

Laurent CADILHAC

**BORDEREAU DE**

**TRANSMISSION**

**PRET**

Lyon, le 26/3/98

DESIGNATION DES PIECES	NOMBRE	OBSERVATIONS
D 20842	1	En prêt pour 1 mois  Agence de l'Eau RMC Liliane BORNAND Documentaliste Tél. 04 72 71 26 83 

- Figure E1 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 119.
- Figure E2 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 121.
- Figure E3 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 128.
- Figure E4 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 182.
- Figure E5 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 50.
- Figure E6 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 60.
- Figure E7 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 231.
- Figure E8 :** Calage en transitoire avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8 % - Piézomètre 81.
- Figure E9 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 119.
- Figure E10 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 121.
- Figure E11 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 128.
- Figure E12 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 182.
- Figure E13 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 50.
- Figure E14 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 60.
- Figure E15 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 231.
- Figure E16 :** Test de sensibilité au coefficient d'emmagasinement - Piézomètre 81.
- Figure F1 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 119.
- Figure F2 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 121.
- Figure F3 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 128.
- Figure F4 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 182.

- Figure F5 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 50.
- Figure F6 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 60.
- Figure F7 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 231.
- Figure F8 :** Résultat de la simulation hydrodispersive au piézomètre 81.
- Figure G1 :** Piézométrie calculée en régime permanent avec des prélèvements de 18 000 m<sup>3</sup>/j - Conditions hydrogéologiques de mars 1989.
- Figure G2 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une recharge par drains de 60 l/s (7 mois) puis 0 l/s (5 mois).
- Figure G3 :** Evolution des niveaux sur les piézomètres de contrôle avec une recharge par drains de 60 l/s (7 mois) puis 30 l/s (5 mois).
- Figure G4 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une recharge par drains de 60 l/s (7 mois) puis barrière hydraulique à 20 l/s (5 mois).
- Figure G5 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une recharge par drains de 60 l/s (7 mois) puis 30 l/s (5 mois).
- Figure G6 :** Evolution des niveaux sur les piézomètres de contrôle avec une recharge par bassins d'infiltration à Moulin Premier de 125 l/s (7 mois) puis 25 l/s (5 mois).
- Figure G7 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une recharge par bassins d'infiltration de 125 l/s (7 mois) puis 25 l/s (5 mois).
- Figure G8 :** Evolution sur l'année hydrologique des débits échangés entre le Gapeau et la nappe avec une recharge par bassins d'infiltration de 125 l/s puis 25 l/s.
- Figure G9 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une barrière hydraulique de 20 l/s 10 mois sur 12 (décembre à septembre).
- Figure G10 :** Evolution des niveaux sur les piézomètres de contrôle avec une recharge par bassins d'infiltration de 125 l/s (7 mois) puis barrière hydraulique à 20 l/s (5 mois).
- Figure G11 :** Piézométrie obtenue en fin d'année hydrologique (septembre) avec une recharge par bassins d'infiltration de 125 l/s (7 mois) puis barrière hydraulique à 20 l/s (5 mois).

## AVANT PROPOS - DEFINITION DU PROBLEME

La Compagnie Générale des Eaux exploite, pour le compte de la ville d'Hyères (83), deux champs captants implantés dans l'aquifère alluvial de la vallée du bas Gapeau :

- la station du Père Eternel (construite en 1907) : constituée de 2 puits principaux et de 4 puits secondaires, peu profonds,
- la station du Golf Hôtel (construite entre 1961 et 1967) comportant 7 forages dont 6 en exploitation, implantés le long de la RN 98, à laquelle s'ajoute le forage isolé du Lycée ; les 6 puits principaux disposent d'une capacité de pompage de 200 m<sup>3</sup>/h.

Pendant de nombreuses décennies, l'eau prélevée a présenté une qualité constante qui en faisait une ressource particulièrement appropriée à l'alimentation en eau potable. Cette ressource était également sollicitée dans la plupart des exploitations agricoles de la basse vallée pour irriguer les cultures.

Dans les années 1948 à 1968, la ressource fut considérée comme abondante et d'un accès facile. Cependant, l'augmentation des débits prélevés (accroissement de la population sédentaire et estivale et sollicitations accrues des agriculteurs et des maraîchers) a entraîné une invasion de la zone littorale par des eaux saumâtres.

De telles alertes eurent lieu à plusieurs reprises, en particulier consécutivement à des épisodes peu pluvieux (années 1965, 1967, 1970, 1975), et ont nécessité :

- En 1969, l'installation d'un barrage escamotable rehaussant le seuil anti-sel existant sur le Gapeau, complété en 1979 par un ouvrage similaire sur le Roubaud ; sous l'effet de ces ouvrages, la zone contaminée par le sel restait limitée aux embouchures du Gapeau et du Roubaud ainsi qu'à la zone littorale.
- A la même période, un contrôle de la nappe s'organisait sous la forme d'un réseau de surveillance piézométrique permettant de contrôler l'état du niveau de la nappe et les évolutions des concentrations en chlorures.
- Enfin, la ville d'Hyères se voyait contrainte, par arrêté préfectoral (31 juillet 1969), à la limitation de ses pompages, ce qui devait se traduire par l'achat d'eau en provenance d'un Syndicat voisin pour compenser le déficit.

Par arrêté préfectoral, le débit soutiré par le concessionnaire est limité à :

- **20 000 m<sup>3</sup>/j tant que le barrage anti-sel sur le Gapeau déverse :**
  - 8 000 m<sup>3</sup>/j au Père Eternel,
  - 12 000 m<sup>3</sup>/j au Golf Hôtel ;
  
- **15 000 m<sup>3</sup>/j lorsque le barrage anti-sel est non déversant :**
  - 6 000 m<sup>3</sup>/j au Père Eternel,
  - 9 000 m<sup>3</sup>/j au Golf Hôtel.

En 1989, les concentrations en chlorures, stables depuis de nombreuses années à environ 30 mg/l, commencent à croître rapidement à la station de pompage du Père Eternel. Cette progression se poursuit au cours des années 1990 et 1991 pour se stabiliser à un niveau moyen de 800 mg/l.

Cette stabilisation apparente n'est que la conséquence de la diminution des volumes pompés pour l'alimentation en eau potable, qui varient désormais entre 0 et 1 500 m<sup>3</sup>/j au Père Eternel, et l'abandon progressif des pompages agricoles au profit de l'irrigation à partir du réseau mis en place par la Société du Canal de Provence.

Pendant cette période (1989 à 1991) d'années exceptionnellement sèches, les prélèvements du Golf Hôtel ont dû être sérieusement réduits en période estivale (4 à 5 000 m<sup>3</sup>/j). Le déficit journalier de plus de 15 000 m<sup>3</sup>/j, en période estivale, a été compensé par des achats d'eau importants aux syndicats voisins.

Ces événements ont confirmé la fragilité de l'aquifère exploité et la nécessité de disposer d'outils permettant de connaître et maîtriser son évolution afin de sauvegarder la ressource en eau de la Ville.

La présente étude vise cet objectif général dans lequel le programme distingue deux volets :

- la construction, mise au point et mise à disposition à l'exploitant d'un outil de gestion informatique de la nappe basé sur un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains ;
  
- la définition des protections et des aménagements à mettre en place en vue d'améliorer les possibilités de prélèvements dans cet aquifère, ceci en tenant compte des critères géologiques, hydrogéologiques et fonciers.

Le second point a nécessité également l'utilisation du modèle mathématique de la nappe pour dimensionner ces aménagements, simuler leurs effets et déterminer l'opportunité de leur mise en oeuvre en fonction de leur impact prévisible.

## 1. CADRE GENERAL DU SITE ETUDIE

### 1.1. Cadre physique (cf. figure 1)

La plaine d'Hyères, zone basse en bordure de la mer (altitude comprise entre 1 et 8 NGF), correspond à l'extrémité aval de la basse vallée du Gapeau. Elle est entourée de reliefs marqués :

- à l'est et au nord - est : les contreforts du Massif des Maures ; des marais salants (salins d'Hyères) achèvent, au sud - est, la fermeture du site ;
- à l'ouest : le chaînon des Maurettes, séparé de la chaîne des Maures par l'entaille du Gapeau ;
- au sud - ouest : le Mont des Oiseaux ;
- au sud : les salins des Pesquiers (tombolo de Giens) et la mer Méditerranée.

Ce secteur, pratiquement fermé, communique :

- au nord, entre le Massif des Maures et celui des Maurettes, avec la vallée étroite et encaissée du Gapeau ;
- à l'ouest, entre le massif des Maurettes et le Mont des Oiseaux, par une vallée plus large (seuil d'Hyères qui correspond probablement au passage d'un ancien cours du Gapeau) avec la plaine de la Garde et de la Crau.

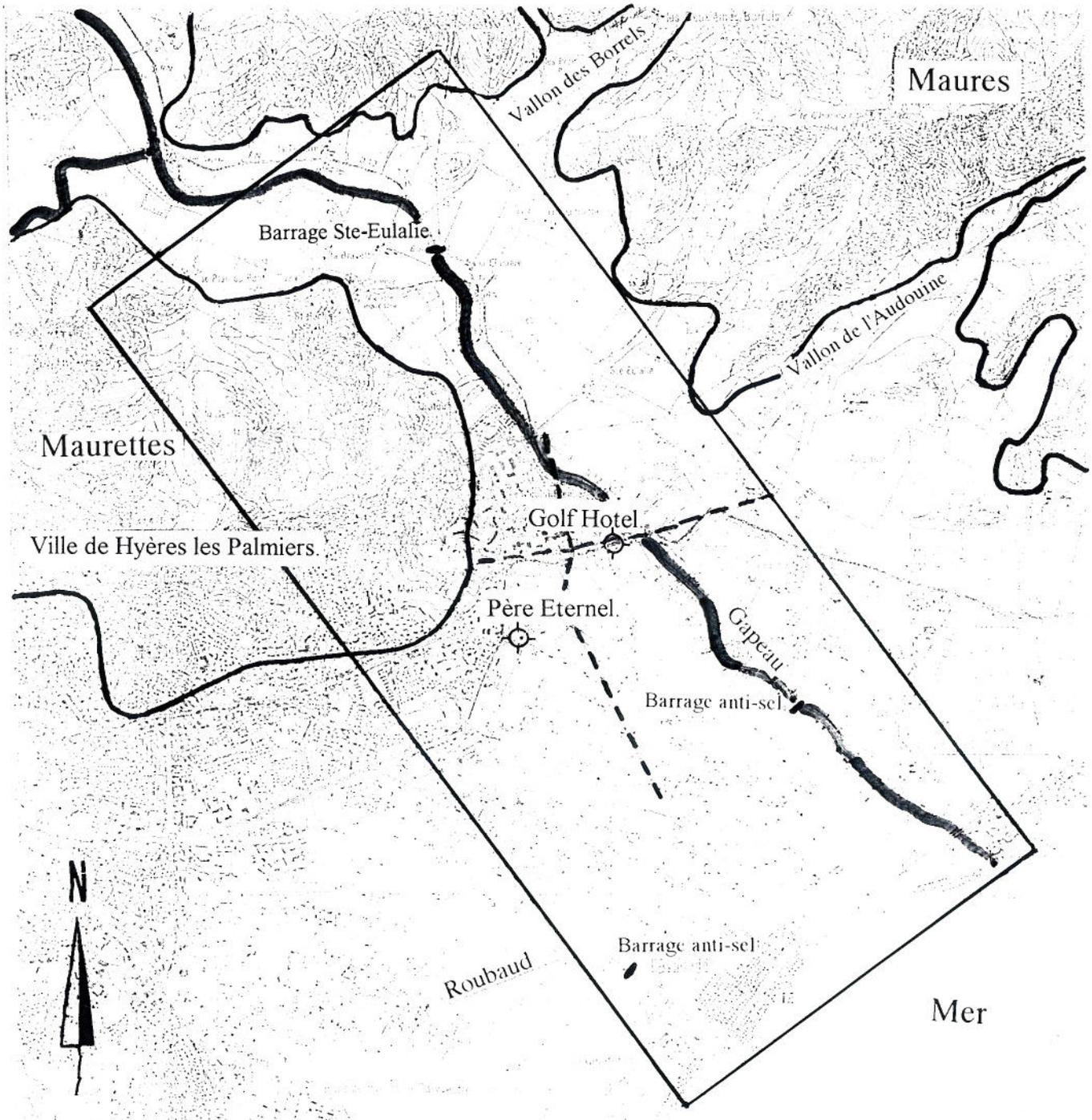
### 1.2. Climatologie

Le climat est méditerranéen, influencé par une zone de basses pressions. Les vents dominants du nord - ouest sont desséchants (Mistral) et les fréquents vents du sud - est sont humides et doux.

L'ensemble du régime pluviométrique du bassin versant du Gapeau est caractérisé par les données des stations de Collobrières, Cuers, Gonfaron et Hyères.

Station météorologique	Années d'observation	Précipitation moyenne annuelle
Cuers	1931 à 1960	755 mm
Gonfaron	1950 à 1960	955 mm
Collobrières	1950 à 1960	707 mm
Hyères Palyvestre	1958 à 1984	754 mm

FIG. 1 : PLAN DE SITUATION DE LA ZONE MODELISEE.



Limite de la zone modélisée.



Pompage de la Ville d'Hyères



Limite des massifs



Profils réalisés par Gouvernet Cl. (Cf. planche 2)



Les précipitations moyennes annuelles, de l'ensemble du bassin versant du Gapeau (moyenne pondérée des quatre pluviométries), sont de 780 mm / an et se répartissent en deux périodes (novembre et de mars à mai) séparés par des intervalles plus secs.

Pour la zone étudiée, les données pluviométriques utilisées seront celles de la station de Hyères Palyvestre et du pluviomètre de la Compagnie Générale des Eaux (usine du Père Eternel).

Notons que les pluviométries à Hyères, depuis 1989, sont déficitaires : 300 mm en 1989, 534 mm en 1990, 399 mm en 1991, 558 mm en 1992 et 594 mm en 1993. Celles de 1994 sera très probablement excédentaire.

## 1.3. Hydrologie

### 1.3.1. Le Gapeau

Le Gapeau prend officiellement sa source à Signes. C'est une rivière méditerranéenne aux crues violentes et aux débits d'étiage très faibles.

Dans la basse plaine, les mesures de débit du Gapeau se font sur la retenue de Sainte Eulalie (cote seuil : 9,53 NGF) .

Cette station, implantée à l'amont immédiat du barrage de dérivation de Sainte Eulalie (cf. figure 1), commande un bassin versant de 517 km<sup>2</sup> d'une altitude moyenne de 395 NGF. Elle est gérée, depuis 1961, par la DIREN (anciennement S.R.A.E.).

Les principales caractéristiques hydrologiques du Gapeau sont à la station de Sainte Eulalie :

- **débit moyen annuel** : 4,10 m<sup>3</sup>/s, on dispose généralement de 1 m<sup>3</sup>/s pendant au moins 6 mois dans l'année ;
- **débit de référence** (débit moyen mensuel sec de récurrence cinq ans) : 0,19 m<sup>3</sup>/s ;
- **débit minimum absolu** : sec (par exemple du 15/07 au 10/09/1979 et du 16/07 au 16/09/1973) ;
- généralement débit inférieur à 1 m<sup>3</sup>/s en juillet, août et septembre ;
- débit maximum observé : 258 m<sup>3</sup>/s.

### 1.3.2. Le barrage anti-sel sur le Gapeau (cf. photo 1)

Il a été réalisé en 1969 afin de limiter les avancées salines dans la nappe alluviale.

Ce barrage mobile est constitué par un "boudin" en Néoprène gonflé d'eau qui, d'une manière automatique par un jeu de vannes maintient le plan d'eau à la cote 1,70 NGF pour un débit presque nul ; les augmentations de débit élevant le plan d'eau mettent en jeu un système de flotteur qui assure la vidange partielle du boudin abaissant ainsi le seuil, afin que la ligne d'eau ne dépasse pas 1,90 NGF. Il est géré par la Société du Canal de Provence.

L'effet du barrage anti-sel s'est amoindri ces dernières années, par le colmatage des berges du Gapeau ; le débit transitant du plan d'eau vers la nappe ayant fortement diminué. Le volume de la retenue est d'environ 30 000 m<sup>3</sup>.

A titre d'exemple, nous donnons dans le tableau ci-dessous le nombre de jours de non déversement du barrage anti-sel pour les dernières années.

Année	Débit moyen annuel du Gapeau à Ste Eulalie en m <sup>3</sup> /s	Nombre de jours de non déversement du barrage anti-sel
1988	3,76 m <sup>3</sup> /s	35 (25/08 au 29/09)
1989	0,68 m <sup>3</sup> /s	120 (19/06 au 17/10)
1990	1,15 m <sup>3</sup> /s	98 (21/06 au 27/09)
1991	1,87 m <sup>3</sup> /s	34 (28/07 au 25/09)
1992	1,16 m <sup>3</sup> /s	0
1993	2,43 m <sup>3</sup> /s	14 (16/08 au 30/08)

### 1.3.3. Les autres cours d'eau

Le réseau hydrographique de la basse plaine du Gapeau est également constitué par 2 cours d'eau :

- Le Roubaud qui correspond sans doute à un ancien cours du Gapeau. Il ne dispose pas de station de jaugeage<sup>2</sup>. De plus, il doit être alimenté par les eaux de ruissellement de la ville de Hyères. Son embouchure est maintenant aménagée en port de plaisance remontant presque jusqu'au barrage anti-sel.
- La Ritorte est un ruisseau se jetant dans la mer au niveau de l'Ayguade. Il prend sa source sur le massif des Maurettes au droit du cimetière de la Ritorte. Son débit n'est pas connu, mais il doit dépendre étroitement de la pluviométrie.

Le Roubaud est équipé d'un barrage anti-sel depuis 1978-79 (lame métallique de 0.10 m de hauteur) qui s'efface, en crue, grâce à un système mécanique (cf. photo 2).

<sup>2</sup>

Des mesures effectuées entre novembre 1966 et avril 1967 donnent un débit voisin de 50 l/s.

PHOTO 1 : LE BARRAGE ANTI-SEL DU GAPEAU

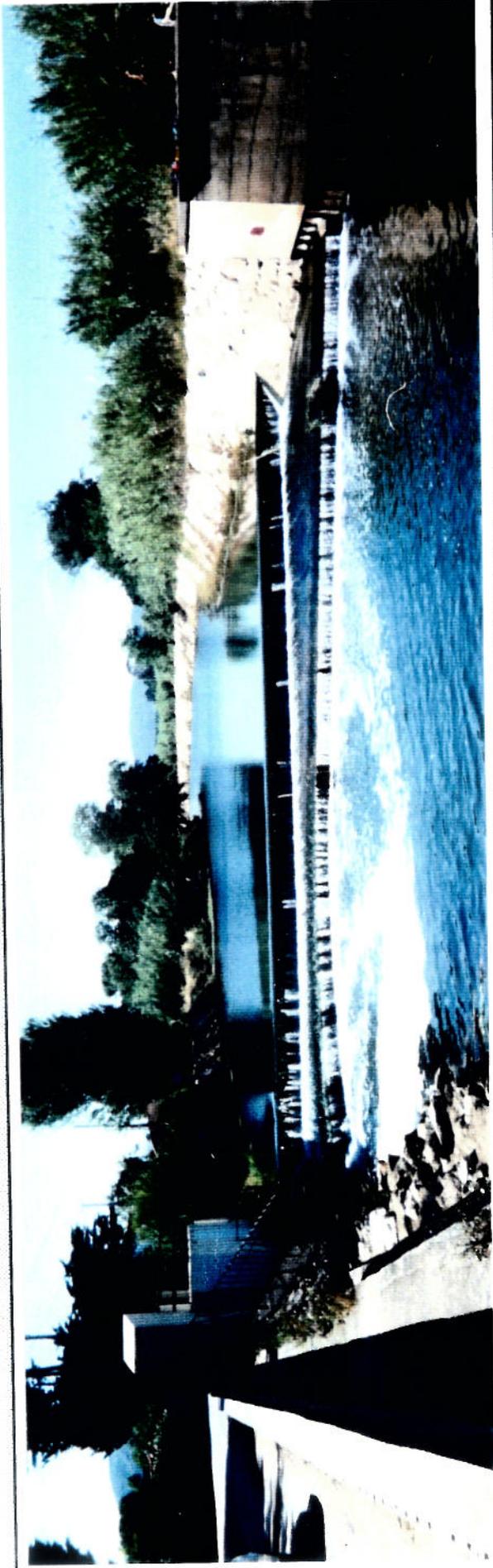


PHOTO 2 : LE BARRAGE ANTI-SEL DU ROUBAUD



## 1.4. Cadre géologique (cf. figure 2)

### 1.4.1. Les massifs entourant la plaine alluviale

Le faciès géologique dominant de la région est l'ensemble des séries cristallophyliennes métamorphiques du massif des Maures et des Maurettes.

Ces terrains sont fortement affectés d'une fracturation est - ouest liée à l'orogénèse hercynienne relayée à la fin du Carbonifère par une phase de distension générant des fossés d'effondrement nord est - sud ouest.

Le hachage de ces terrains par les failles est - ouest s'explique par le rejeu des accidents hercyniens au cours de l'orogénèse provençale.

Toutefois par le jeu de grands accidents, subsistent au fond des principaux vallons des lambeaux de l'ancienne couverture gréseuse d'âge permien avec quelques passages évaporitiques, qui affleurent au niveau du Mont des Oiseaux.

### 1.4.2. La plaine alluviale du Gapeau

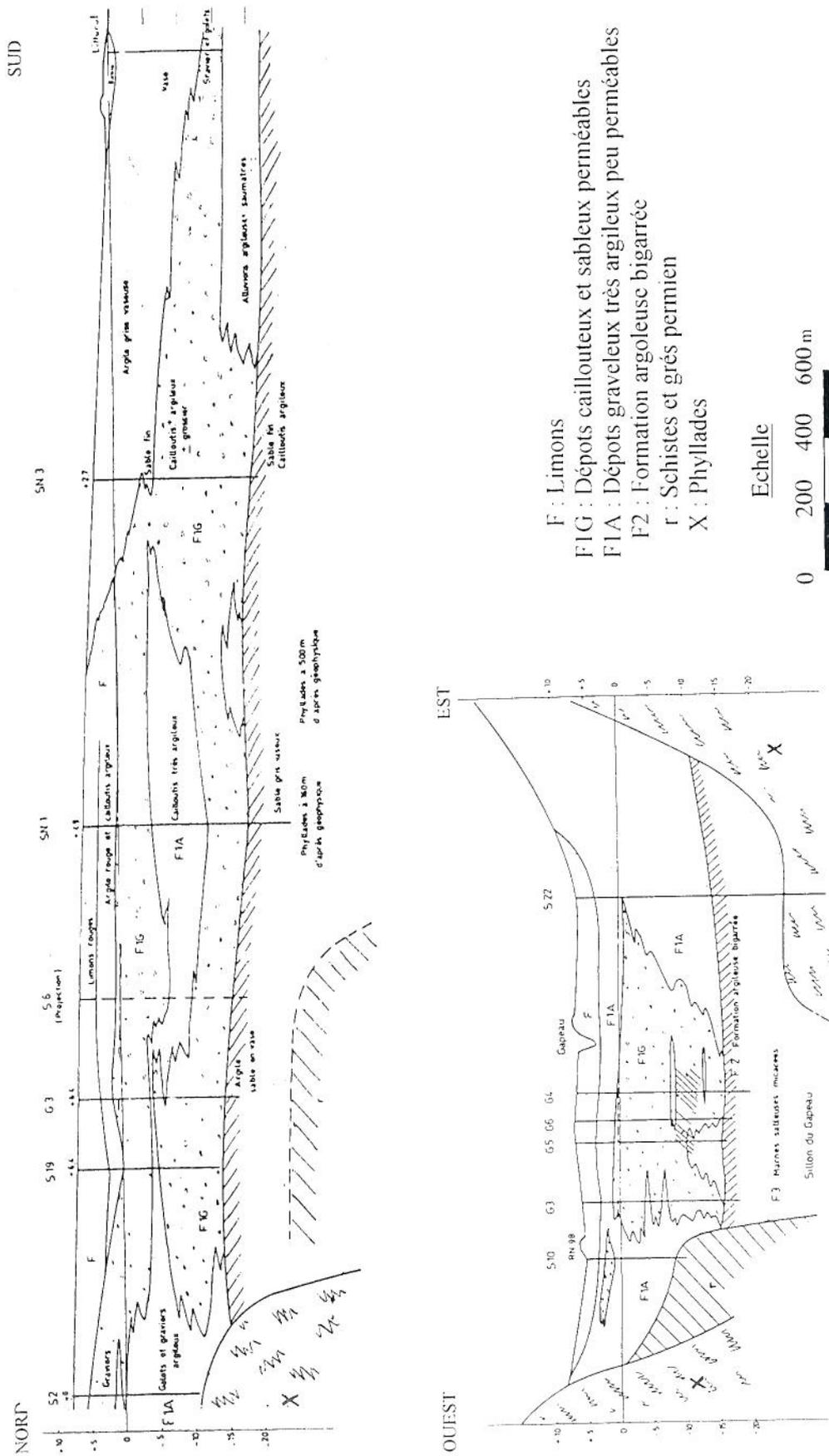
Elle est constituée :

- dans sa partie supérieure par un épandage *d'alluvions würmiennes* caractérisées par :
  - des dépôts fluviatiles du Gapeau, constitués d'horizons très variables de graviers, sables, sables argileux et argiles, dont l'épaisseur varie de 5 à 25 m ;
  - une géométrie très complexe liée en grande partie par la présence de sillons, correspondants à d'anciens cours du Gapeau, remplis essentiellement par des sables argileux et vases marines (comblement correspondant à la transgression flandrienne) et engendrant un modelé du substratum très variable ;
  - un substratum constitué de schistes dans la partie amont et de pélites et grès permien dans la partie aval ; la profondeur de ce substratum semble dépasser 100 m à proximité du littoral avec une remontée abrupte de celui-ci vers l'est et plus douce vers l'ouest ;
  - un passage à des faciès plus limoneux et moins perméables au voisinage de la zone côtière ;

cette formation fluviatile würmienne représente l'essentiel de l'aquifère de la plaine alluviale ;

- dans les zones en bordures : reliefs de basses terrasses alluviales (alluvions plus anciennes) constituées de limons à éléments de quartz et de phyllades.

**FIG. 2 : PROFILS GEOLOGIQUES NORD-SUD ET EST-OUEST DE LA BASSE VALLEE DU GAPEAU.**



## 1.5. Cadre hydrogéologique

### 1.5.1. Hydrogéologie des massifs entourant la plaine alluviale

Les roches métamorphiques, constituant les versants de la plaine alluviale, sont peu perméables et donc peu aquifères.

Il est possible que les parties profondes de certains systèmes de failles soient le siège de circulations d'eau non négligeables.

### 1.5.2. Hydrogéologie générale de la plaine alluviale du Gapeau

Cet aquifère alluvial représente la ressource la plus intéressante de la région. Il se présente sous la forme d'une gouttière s'écoulant du nord vers le sud dont l'exutoire naturel est la mer.

Dans ces formations alluviales très hétérogènes, les passées caillouteuses constituent le principal terrain aquifère. Elles se comportent globalement en nappe homogène.

Au voisinage du littoral, des sables fins argileux ou vaseux envahissent la partie supérieure de la formation. Ils tendent à rendre la nappe captive vers l'aval.

Le réservoir de la nappe est peu important et ne permet pas un stockage important.

En période d'étiage sévère, la nappe peut présenter (cas de « l'incident de 1989 ») une charge trop faible pour empêcher l'entrée des eaux marines au sein des alluvions.

### 1.5.3. Alimentation de la nappe alluviale

Les entrées totales d'eau dans la nappe alluviale seraient de l'ordre de 400 l/s. Ces différentes alimentations, aux limites de la plaine alluviale, sont :

- le débit transitant dans le *couloir alluvial du Gapeau* qui est estimé entre 50 à 150 l/s avec en moyenne 80 l/s au droit du Plan du Pont ;
- les *apports du Gapeau vers la nappe alluviale* qui varient de 100 à 300 l/s (fonction des prélèvements et du débit du Gapeau), en moyenne 150 l/s ;
- les *apports des coteaux* (Maures et Maurettes), sur la base d'une pluie efficace de 2 l/s/km<sup>2</sup>, estimés entre 40 et 70 l/s et en moyenne à 50 l/s ;
- la *pluie utile*, entre 10 et 100 mm par an, représentant pour l'ensemble de la plaine (environ 10 km<sup>2</sup>) un débit compris entre 4 et 40 l/s.

#### 1.5.4. Piézométrie - Gradient - Fluctuations saisonnières

La piézométrie de la nappe alluviale est :

- régit par le niveau du Gapeau en amont de la RN 98 ;
- dépendante des pompages en aval de la RN 98 :
  - lorsque la nappe est surexploitée, en été, on constate un affaissement de la surface piézométrique en dessous de la cote 0 NGF,
  - tandis que dès que l'alimentation de la nappe est suffisante, la piézométrie reprend l'état plus naturel d'une nappe drainée par le Gapeau et la mer.

Les gradients piézométriques sont :

- de l'ordre de deux pour mille en amont de la RN 98 ;
- dépendant de la dépression piézométrique en aval de la RN 98 ; généralement, ils sont compris entre 0,2 (cône important des pompages) et 1 (faible cône) pour mille au voisinage du littoral.

Les fluctuations saisonnières, dans la basse plaine alluviale, sont directement liées aux sollicitations de la nappe : hautes eaux au printemps et basses eaux en été. Les variations piézométriques annuelles sont de l'ordre de 1 à 2 m au voisinage des ouvrages de pompage ; le niveau piézométrique au droit des ouvrages de captage pouvant varier de + 3 à - 3 NGF.

#### 1.5.5. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale

Les transmissivités mesurées sont de l'ordre de :

- $10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s au niveau du Plan du Pont et de Moulin Premier (Golf Hôtel),
- $1,5 \cdot 10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s dans la zone centrale de Notre Dame du Plan,
- $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s au voisinage du littoral,
- $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s sur le restant de la plaine alluviale.

Le coefficient d'emménagement, quant à lui, serait compris entre 5 et 10 %.

Le temps de séjour moyen de l'eau dans la nappe est voisin de 3 ans ; les vitesses de circulation étant de l'ordre du 1 m/j.

### 1.5.6. Exploitation de la nappe alluviale

La nappe alluviale est essentiellement exploitée dans la basse plaine d'Hyères. Les principaux prélèvements sont :

- ❑ les **exploitations de la ville d'Hyères**, alimentation en eau potable de la ville, assurées par 2 groupes de forages :
  - le **Père Eternel** prélevant au débit moyen de 5 000 m<sup>3</sup>/j,
  - le site du **Golf Hôtel** dont les débits d'exploitation sont en moyenne de 13 000 m<sup>3</sup>/j (minimum : 11 000 m<sup>3</sup>/j, maximum : 17 000 m<sup>3</sup>/j) ;
- ❑ **des pompages agricoles** dont une estimation sommaire réalisée en 1972 (R. COVA, « Rôle d'un stockage d'eau d'hiver par barrage sur la régularisation de la nappe du bas Gapeau ») donne 250 l/s, dont le tiers retournerait à la nappe, nécessaire à l'irrigation pendant les mois de pointe. Ceci indiquerait que pendant les mois d'étiage :
  - avant toute irrigation par le Canal de Provence (avant 1988), **les pompages** représentaient, sur l'ensemble de la plaine alluviale, entre 150 et 200 l/s ;
  - après l'irrigation totale par le Canal de Provence (depuis 1993), **les apports** de l'irrigation à l'ensemble de la nappe se situeraient entre 75 et 100 l/s.

## 1.6. Hydrogéochimie

L'analyse géochimique permet de mettre en évidence le mélange des eaux :

- de la vallée du Réal Martin et des coteaux, eaux peu minéralisées issues de terrains métamorphiques ;
- de la vallée du Gapeau, eaux très minéralisées en calcium et magnésium.

Cependant, en certains points (Vallons des Borrels et de l'Audouine), c'est à dire au niveau des accidents affectant le massif des Maures, on note une augmentation de la minéralisation avec importance des chlorures et des sulfates. Celle-ci serait due à la présence de terrains d'origines différentes pincés au niveau de ces failles (gypse du Trias notamment).

Ces apports expliquent des minéralisations plus importantes dans le couloir alluvial que dans le Gapeau (cf. paragraphe 2.1.2.).

Dans la zone littorale, les eaux présentent des teneurs en sels importantes liées à la pénétration d'eau de mer (littoral et estuaires) et à des phénomènes de concentration en sel par évaporation (nappe affleurant ou proche du sol) ou du fait d'arrosages avec des eaux salées.

## 2. RECUEIL DE DONNEES

Cette phase préalable à la construction du modèle mathématique comporte :

- l'exécution d'un levé piézométrique général et synchrone sur l'ensemble des points existants avec mesure in situ de la conductivité et de la température de l'eau ;
- des observations sommaires de terrain portant sur l'occupation des sols, la présence de pompages incontrôlés et l'aménagement des berges des cours d'eau ;
- le rassemblement de données existantes : mesures piézométriques et de salinité, prélèvements A.E.P., pluviométrie, débits et niveaux des cours d'eau.

### 2.1. Levé piézométrique et de salinité synchrone

Il a été réalisé dans la semaine du 6 au 12 juin 1994.

Les 80 points de mesures<sup>3</sup> (puits et forages), reportés sur la figure 3, ont été recensés à partir de l'inventaire Géomidi de 1979 et d'une enquête de terrain. Les cotes repères des nouveaux points répertoriés ont été estimées à partir de la carte I.G.N. au 1/25 000.

#### 2.1.1. Piézométrie de la nappe alluviale (cf. figure 4)

L'état piézométrique observé amène plusieurs commentaires :

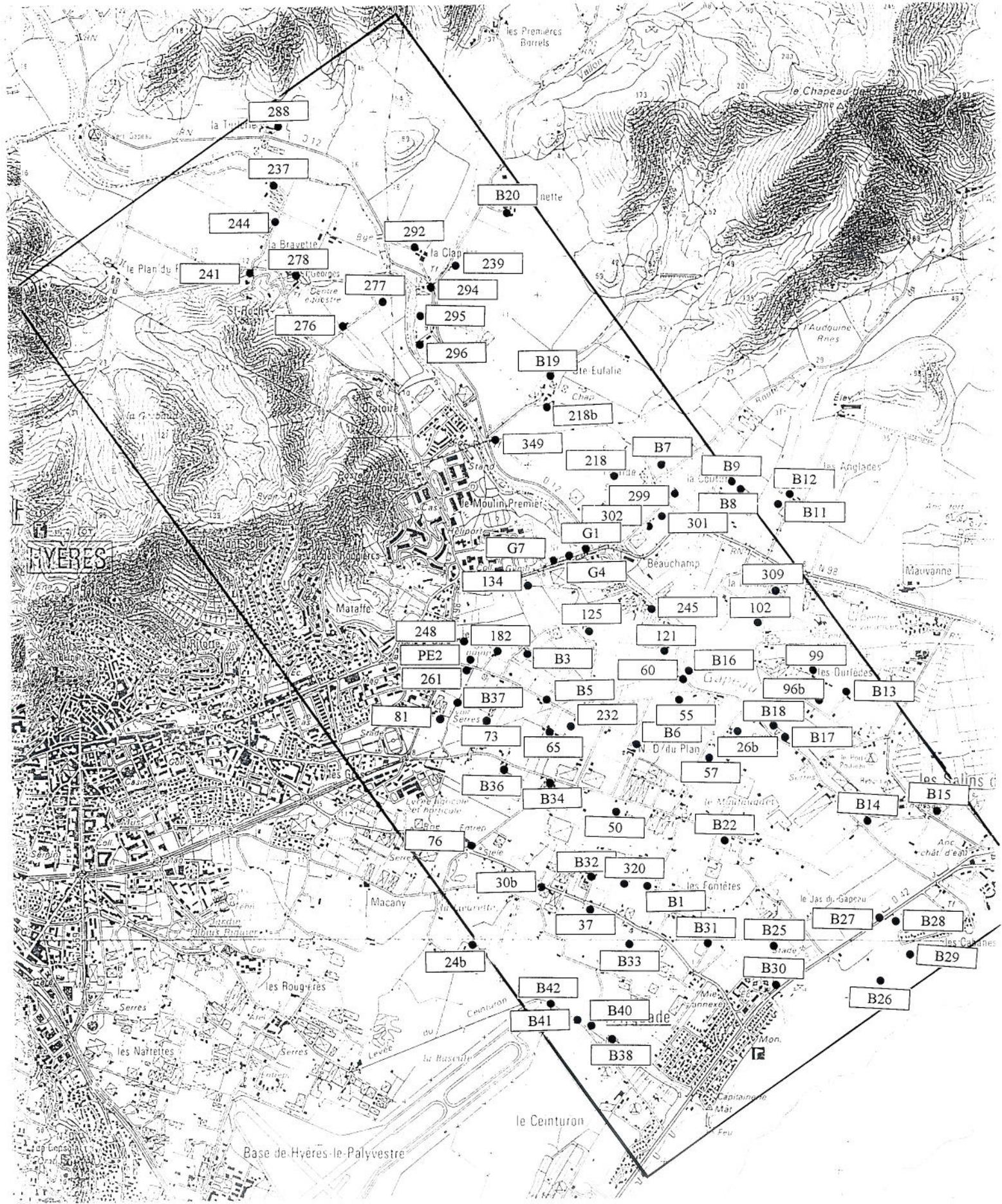
- le niveau de la nappe n'est que peu déprimé et toujours supérieur à 0 NGF (année pluviométrique excédentaire) et un dôme est présent entre la dépression créée par les pompages de la Ville et le littoral ;
- le gradient piézométrique est nettement plus important dans le couloir du Gapeau entre Maures et Maurettes que dans la basse plaine d'Hyères ;
- les apports des coteaux, notamment en provenance des Maures, sont bien visibles sur la piézométrie (cotes piézométriques plus hautes en bordure des coteaux que dans le couloir alluvial) ;
- certains points de mesures sont aberrants (cotes repères erronées ?), en particulier : au voisinage de la ferme de Sainte Eulalie et au nord des Fontêtes (600 m au nord de l'Ayguade).

La piézométrie de juin 1994 (cf. figure 4) a été tracée sans tenir compte de ces points de mesures aberrants.

<sup>3</sup>

Sur les 120 points visités, une quarantaine n'existaient plus ou n'étaient pas accessibles.

**FIG. 3 : IMPLANTATION DES POINTS DE MESURE SUR LA BASSE PLAINES DU GAPEAU (JUN 1994).**



B20 Points BURGEAP (juin 1994)  
123 Points Géomidi (1979).



*SR*  
**HYERES**  
Les Palmiers

203/010  
HYERES, le *08/02/1995*



**BORDEREAU D' ENVOI**

SERVICES TECHNIQUES  
Centre Technique Municipal

12, avenue Joseph Cizis  
Boite Postale 709  
83412 HYERES CEDEX  
Tél: 94 35 90 00 - Fax: 94 65 64 33

DESTINATAIRE

*M. COMBES*  
*Agence de l'Eau*

*275/DD/126*

N°	Désignation des pièces	Nb	Observations			
	<i> Selon notre conversation téléphonique de ce jour, veuillez trouver ci-joint 1 rapport complet concernant le modèle de gestion de la nappe alluviale du Bas Gapeau</i>	<i>1</i>	<table border="1"><tr><td>COU...</td></tr><tr><td>15 FEV. 1995</td></tr><tr><td>Agence de l'Eau RMC</td></tr></table> <i>Pour Information</i>	COU...	15 FEV. 1995	Agence de l'Eau RMC
COU...						
15 FEV. 1995						
Agence de l'Eau RMC						

*Sincères Salutations*

L'Ingénieur en Chef  
Directeur du  
Centre Technique Municipal

*po*  
  
E. ROVIRA

*D. DEDIER*

### 2.1.2. Mesures de la conductivité de l'eau (cf. figure 5)

Les mesures de conductivité ont été réalisées sur chaque point piézométrique. Le réseau de mesure a été complété par des mesures sur les eaux de surface : Gapeau en plusieurs points, Roubaud en amont et aval du barrage anti-sel, canal de collature des salins d'Hyères, les petites estuaires du littoral et la mer.

La carte des conductivités<sup>4</sup> montre :

- l'efficacité du barrage anti-sel sur le Gapeau (conductivité : 12 200 en aval et 880  $\mu\text{S/cm}$  dans la retenue en amont) ;
- une conductivité anormalement importante (9 300  $\mu\text{S/cm}$  : mesure du 7 juin 1994) juste en amont du barrage anti-sel sur le Roubaud alors que les mesures réalisées par les services techniques de la Ville, notamment en octobre et novembre 1994, ont montrées le bon fonctionnement de cet ouvrage ;
- des apports minéralisés en provenance des Maures (conductivités supérieures à 2 000  $\mu\text{S/cm}$ ) ;
- une relation étroite entre le Gapeau et la nappe alluviale en amont de la RN 98, les conductivités des puits proche du Gapeau sont très voisines de celle du fleuve (entre 800 et 900  $\mu\text{S/cm}$ ) ;
- des points aberrants dans la basse plaine, au voisinage du littoral, notamment aux points « B33 » (500 m au nord nord ouest de l'Ayguade) et « 57 » (300 m à l'ouest du barrage anti-sel sur le Gapeau) où les conductivités observées sont nettement inférieures à celles des points voisins.

Les mesures de conductivités ont été couplées avec des prélèvements d'eau afin d'analyser, sur une vingtaine de points, la teneur en chlorures. Les résultats mettent en évidence une corrélation entre conductivité et chlorures :

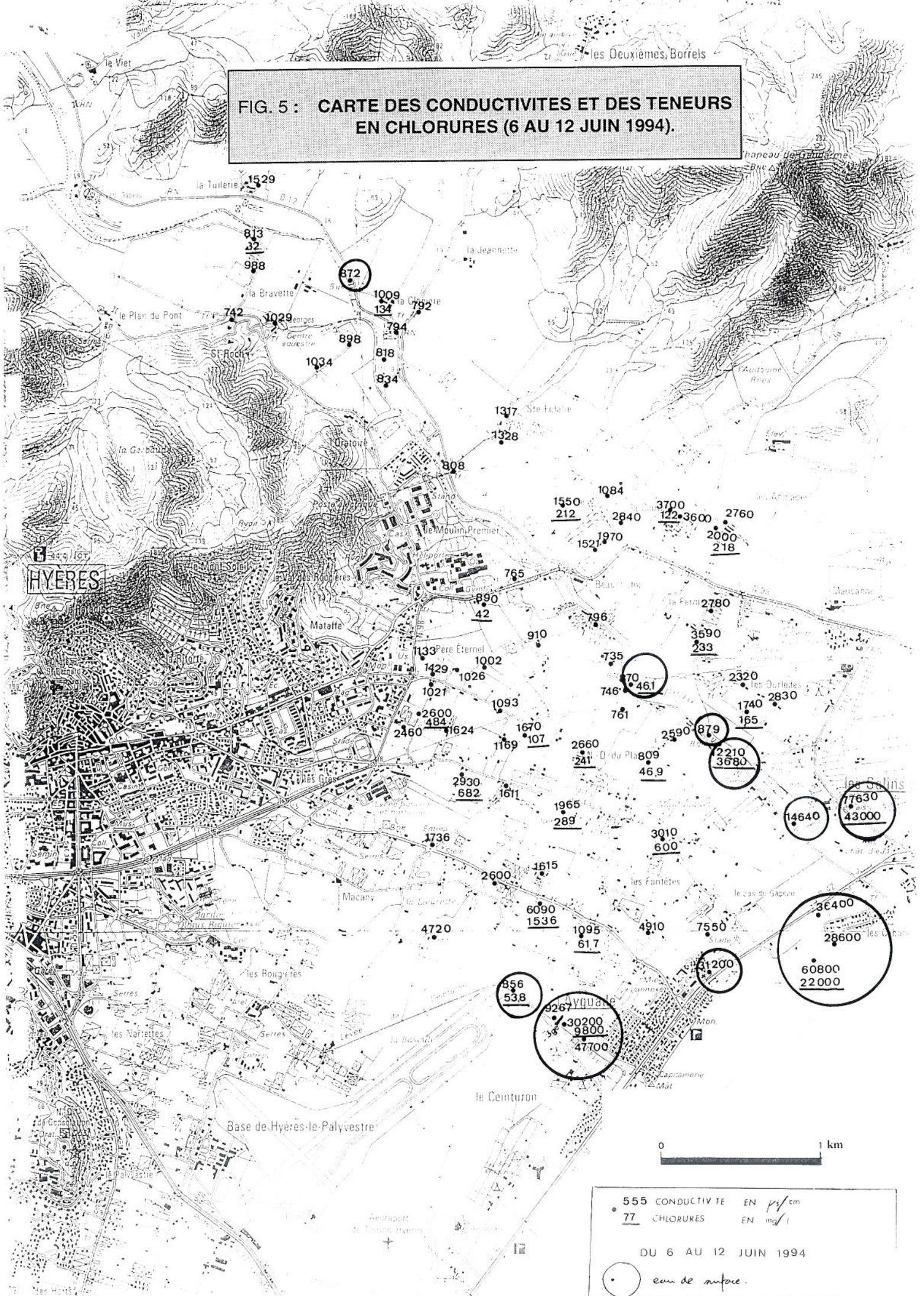
- pour *l'eau de mer* et les estuaires du Gapeau et du Roubaud, la relation est :  
conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ ) = 3 300 + 2,63 \* chlorures (mg/l) ;
- pour *les eaux de nappe*, la corrélation est (cf. figure 6) :  
conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ ) = 635 + 5,75 \* chlorures (mg/l)<sup>5</sup>.

**Note importante :** Dans la suite du document la salinité sera toujours exprimée en conductivité. En effet, ce paramètre est le seul à avoir été mesuré systématiquement dans les études antérieures.

<sup>4</sup> Les mesures de température réalisées aux points de mesure donnent : température constante et de l'ordre de 15 °C dans la nappe, 20 °C sur les cours d'eau et environ 23 °C sur la retenue du Gapeau.

<sup>5</sup> Cette relation présente une pente plus forte que pour l'eau de mer. Ceci peut s'expliquer par une minéralisation différente des eaux de nappe (apports de chlorures et sulfates par les coteaux) par rapport à l'eau de mer.

**FIG. 5 : CARTE DES CONDUCTIVITES ET DES TENEURS EN CHLORURES (6 AU 12 JUIN 1994).**



**HYERES**

555 CONDUCTIVITE EN  $\mu S/cm$   
 77 CHLORURES EN  $mg/l$   
 DU 6 AU 12 JUIN 1994  
 ○ cm de surface

### 2.1.3. Profils verticaux de conductivité

La plupart des puits visités (profondeur : 4 à 5 m) lors du levé piézométrique présentant une hauteur d'eau faible<sup>6</sup> (généralement voisine de 2 m), des profils verticaux de conductivités n'ont pu être réalisés que sur une trentaine de points.

Pour ces puits, les profils réalisés donnent des valeurs de conductivités constantes sur toute la hauteur mouillée, hormis pour les points donnés ci-après.

	<b>P.E. 2</b>	<b>B9</b>	<b>102</b>	<b>299</b>	<b>288</b>
<b>Localisation</b>	Station du Père Eternel	La Couture Rive gauche Gapeau	Centre équestre Rive gauche Gapeau	L'Icarde Rive gauche Gapeau	La Tuilerie Amont Ste Eulalie
<b>NS en NGF</b>	-0,40 NGF	14,10 NGF	1,08 NGF	7,10 NGF	7,54 NGF
<b>NS sous le sol</b>	6,50 m	1,70 m	3,30 m	2,65 m	10,46 m
<b>Conductivité à la surface de l'eau</b>	1 175	2 210	3 190	2 240	1 430
<b>Conductivité à 2 m sous l'eau</b>	1 302	2 210	3 430	2 490	1 529
<b>Conductivité à 4 m sous l'eau</b>	1 412	2 260	3 600	2 840	842
<b>Conductivité à 6 m sous l'eau</b>	1 429	3 700	-	-	-

Les conductivités sont exprimées en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Une interprétation sommaire de ces profils :

- confirmerait les venues d'eau minéralisées en provenance des Maures (points « B9 », « 102 » et « 299 » présentant des conductivités supérieures à celle du Gapeau) ;
- indiquerait un fonctionnement particulier au point « 288 » : alimentation en surface des Maures et circulation en profondeur de la nappe alluviale.

## 2.2. Enquêtes sur le terrain

### 2.2.1. Occupation actuelle des sols

Depuis l'enquête menée en 1977, dans le cadre de la définition des périmètres de protection des captages du Père Eternel et du Golf Hôtel, les évolutions du mode d'occupation du sol sont :

- urbanisation accrue sur le secteur de Moulin Premier (rive droite du Gapeau) ;
- abandon de quelques exploitations agricoles.

<sup>6</sup>

De nombreux puits sont approfondis par des pointes de faible diamètre ne permettant pas le passage de la sonde de conductivité.

Globalement, au sud de la RN 98 et en rive gauche du Gapeau, la plaine a gardée sa vocation agricole (sur environ 1 000 hectares). Les principales activités agricoles sont :

- vignobles en rive gauche du Gapeau ;
- maraîchages au sud de la RN 98 et en rive droite avec les particularités suivantes :
  - vergers dans le secteur de l'Ayguade,
  - nombreuses serres au niveau de Notre Dame du Plan (pépinières et fleurs) ;
- fleurs et céréales en amont du barrage de Sainte Eulalie et en rive droite du Gapeau.

Sur la zone étudiée, on rencontre 2 modes d'irrigations :

- ❶ **irrigation à la raie** (irrigation de surface exigeante en eau) qui consiste à laisser s'écouler l'eau dans des rigoles ;
- ❷ **irrigation par aspersion** pour laquelle l'eau est apportée sur toute la surface sous forme de pluie plus ou moins fine par projection de jets d'eau, fixes ou rotatifs.

L'irrigation par aspersion, contrairement à l'irrigation à la raie, n'engendre que peu de pertes par ruissellement ou par infiltration vers la nappe.

### 2.2.2. Autres pompages que les pompages de la Ville d'Hyères

Depuis 1993, la quasi totalité des pompages agricoles ont été abandonnés au profit d'une irrigation à partir du réseau du Canal de Provence. Notons néanmoins, que lors de notre enquête :

- de nombreux particuliers ont déclaré utiliser leur puits pour un usage domestique (très faibles prélèvements) ;
- un agriculteur indiquait toujours utiliser son puits pour l'irrigation.

Le débit prélevé, en juin 1994, à la nappe alluviale à des fins agricoles peut être considéré comme nul.

Les autres pompages recensés sur la plaine alluviale sont :

- pompage au débit de 30 m<sup>3</sup>/h par drain, en bordure immédiate du Gapeau, pour l'irrigation du golf d'Hyères en rive gauche (peu d'influence sur la nappe) ;
- 3 forages, prélevant chacun au maximum 30 m<sup>3</sup>/h, pour irriguer du cresson sur la zone de la Bravette ;

- 2 forages de la ville : pour les espaces verts (200 m à l'ouest de Notre Dame du Plan à côté du point « 232 » de la figure 3) et pour les pépinières municipales (point « B32 » de la figure 3, entre Notre Dame du Plan et l'Ayguade) ; les débits d'exhaure ne sont pas connus et il semblerait, d'après les renseignements recueillis auprès de la mairie, que ces forages aient été abandonnés au profit du Canal de Provence.

### **2.2.3. Etat actuel des berges du Gapeau et du Roubaud (cf. figure 7)**

#### **Le Gapeau (cf. photos 3 et 4)**

Les aménagements des berges du Gapeau, afin de protéger les riverains des crues, se sont déroulés principalement en 2 phases principales : l'une de 1974 à 76 et l'autre en 1978 :

- de l'embouchure du fleuve jusqu'à l'aval du barrage anti-sel, les berges ont été pourvues de palplanches, d'enrochements bétonnés et de murs bétonnés ;
- du barrage anti-sel au pont de la RN 98, c'est l'enrochement des berges qui prédomine ;
- en amont de la RN 98, les berges n'ont pas subi de transformation excepté quelques tronçons où l'on observe la mise en place de blocs de pierre.

En 1992, le Canal de Provence a construit des berges filtrantes au niveau de la RN 98 pour faciliter la réalimentation de la nappe. Elles se seraient très vite colmatées.

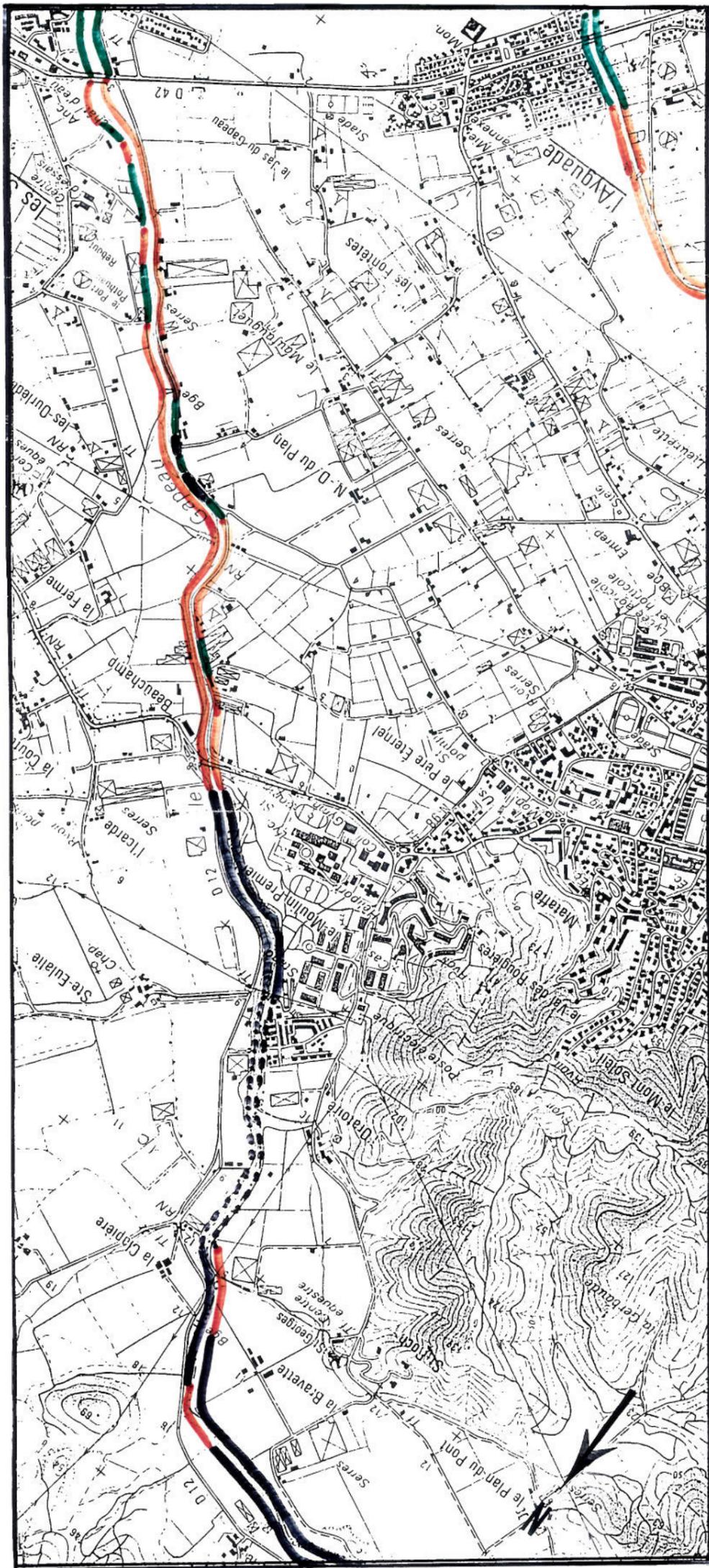
Le colmatage résulterait d'un apport important en matières fines dues à une érosion plus forte des massifs ; conséquence des grands incendies (notamment en 85 et 86) subit par le massif des Maures. Il serait accentué par des prolifération d'algues au niveau de la retenue en amont du barrage anti-sel.

#### **Le Roubaud**

A la fin des années 70, le Roubaud a été recalibré : les berges ont été bétonnées dans l'agglomération hyéroise et laissées en terre sur la partie côtière.

Dans les années 80, avec l'aménagement du port de plaisance à l'Ayguade, les berges ont été enrochées du littoral jusqu'à environ 300 m en amont du barrage anti-sel.

FIG. 7 : ETAT DES BERGES DU GAPEAU EN JUIN 1994.



Terre.

Enrochement.

Palplanches ou mur bétonné.

Enrochement surmonté d'un mur bétonné.

Berges non observées (en terre d'après les riverains).

0 1 km

**PHOTO 3 : ETAT DES BERGES DU GAPEAU**  
*Au niveau de la déviation de la R.N.98*



**PHOTO 4 : ETAT DES BERGES DU GAPEAU**  
*En aval du barrage anti-sel*



## 2.3. Historiques des données nécessaires à la modélisation

Ces historiques ont été établis à partir des archives et des études antérieures, et notamment d'après les nombreux suivis réalisés par la DIREN et HydroGéomidi.

Ils ont été établis sur la période de *mars 1989 à juin 1994* pour les raisons suivantes :

- cette période englobe la principale invasion saline constatée, depuis la réalisation des barrages anti-sel, entre 1989 et 1991 (période de déficit pluviométrique) ;
- les variations aussi bien des prélèvements A.E.P. et agricoles que de l'alimentation de la nappe sont importantes et marquées ;
- de nombreuses données, tant piézométriques que de salinité, sont disponibles sur cette plage de temps.

### 2.3.1. Historiques de la piézométrie et de conductivité

Le modèle mathématique, pour être valide, doit être calé en régime permanent sur plusieurs états piézométriques correspondants à différentes situations tant pour l'alimentation de la nappe que dans les relations eaux de surface - nappe (colmatage, ligne d'eau, ...).

Sur les différents états existants, nous en avons retenus quatre :

- octobre 1966**, avant la mise en place des barrages anti-sel, présentant :
  - un étiage de la nappe marqué par la présence d'un dôme piézométrique entre les captages et le littoral empêchant les intrusions salines,
  - des invasions salines nettes au niveau des estuaires du Roubaud et du Gapeau ;
- mai 1979**, état intermédiaire, pour les relations rivière - nappe (colmatage des berges du Gapeau), entre les années 60 et l'incident de 1989 caractérisé :
  - par des hautes eaux de la nappe présentant un dôme entre captages et mer,
  - par une salinité limitée au voisinage du littoral et à proximité des estuaires du Gapeau et du Roubaud jusqu'aux barrages anti-sel ;
- mars 1989**, état de la nappe au moment de l'invasion saline vers la station du Père Eternel (début de la phase de calage en régime transitoire) :
  - fort étiage de la nappe avec disparition du dôme entre les captages et la mer,
  - forte avancée de la salinité sur l'axe Ayguade → Père Eternel ;
- juin 1994** : état actuel de la nappe après une année pluvieuse et disparition des prélèvements agricoles (voir commentaires de cet état au paragraphe 2.1.1.).

Le calage du modèle en régime transitoire (hydrodynamique et hydrodispersif) a été réalisé, pour les raisons invoquées ci-dessus, sur la période de mars 1989 à juin 1994.

Pour suivre les évolutions dans le temps de la piézométrie et de la conductivité, nous avons choisis 8 points de mesures représentatifs de la basse plaine alluviale et pour lesquels les relevés ont été les plus réguliers (cf. implantation de ces points en annexe B). Les graphes d'évolution de ces 8 points sont donnés en annexe B.

### **2.3.2. Historique de prélèvements A.E.P.**

Il a été établi à partir des données de la Compagnie Générale des Eaux.

Le graphe d'évolution des prélèvements, reporté en annexe B, confirme (cf. « Avant propos ») les très faibles débits pompés au Père Eternel entre mai 1990 et avril 1993.

### **2.3.3. Historique de prélèvements agricoles**

De par leur nature incontrôlée, l'estimation de l'évolution des pompages agricoles est difficile et délicate.

En se basant sur :

- les hypothèses énoncées au paragraphe 1.5.6. : besoin total des agriculteurs, sur l'ensemble de la basse plaine alluviale et pendant les mois de pointe, de l'ordre 250 l/s dont un tiers retournerait à la nappe ;
- un raccordement progressif des agriculteurs au Canal de Provence entre 1988 et 1993 ;
- des besoins en eau, pour l'irrigation, forts de mai à septembre et très faibles le restant de l'année ;

on peut estimer sommairement l'évolution des pompages agricoles (déduits du retour à la nappe) de mars 1989 à juin 1993. Les valeurs estimées (données en annexe B) varient de 120 l/s, été 1989, à 0 l/s, à partir de l'automne 1992.

### **2.3.4. Historique de pluviométrie**

Les données pluviométriques mensuelles de la station d'Hyères Palyvestre, ainsi que la pluie utile mensuelle résultante pour une réserve facilement utilisable (RFU) de 80 mm, sont portées sous forme de graphique et de tableau en annexe B.

Sur la période mars 1989 à juin 1994, la pluie utile mensuelle est nulle (hormis les mois de : novembre et décembre 1990, octobre 1992, novembre 1993, janvier et février 1994) et confirme le déficit pluviométrique et d'alimentation de la nappe alluviale des années 1989 à 1991.

### 2.3.5. Historique de niveau et de débit des cours d'eau

#### Le Gapeau

Les débits mensuels du Gapeau sont ceux mesurés par la DIREN au barrage de Sainte Eulalie (cf. annexe B). Les profils en long, du fil d'eau (avant et après la mise en place du barrage anti-sel) et du fond du fleuve, sont reportés en figure 8.

Nous ne possédons aucune donnée sur la température du Gapeau alors que ce paramètre a une influence primordiale sur les échanges entre le fleuve et la nappe.

Le coefficient de passage des berges et du fond de rivière (équivalent à une transmissivité) est le rapport de la perméabilité de la couche colmatée sur son épaisseur. Or, le coefficient de perméabilité (au sens de Darcy) est fonction de la viscosité du fluide qui varie sensiblement avec la température. De ce fait, les variations de température de l'eau engendrent des variations non négligeables de la perméabilité : elle est réduite de 40 % si la température de l'eau passe de 25 à 5 °C<sup>7</sup>.

Nous avons estimé, d'après les mesures réalisées en juin 1994 (cf. supra) et des données de fleuves côtiers méditerranéens, les variations de la température de l'eau du Gapeau entre 8 et 24 °C.

#### Les autres cours d'eau

Pour les autres cours d'eau de la plaine alluviale (Roubaud et Ritorte), nous ne disposons que de peu de données :

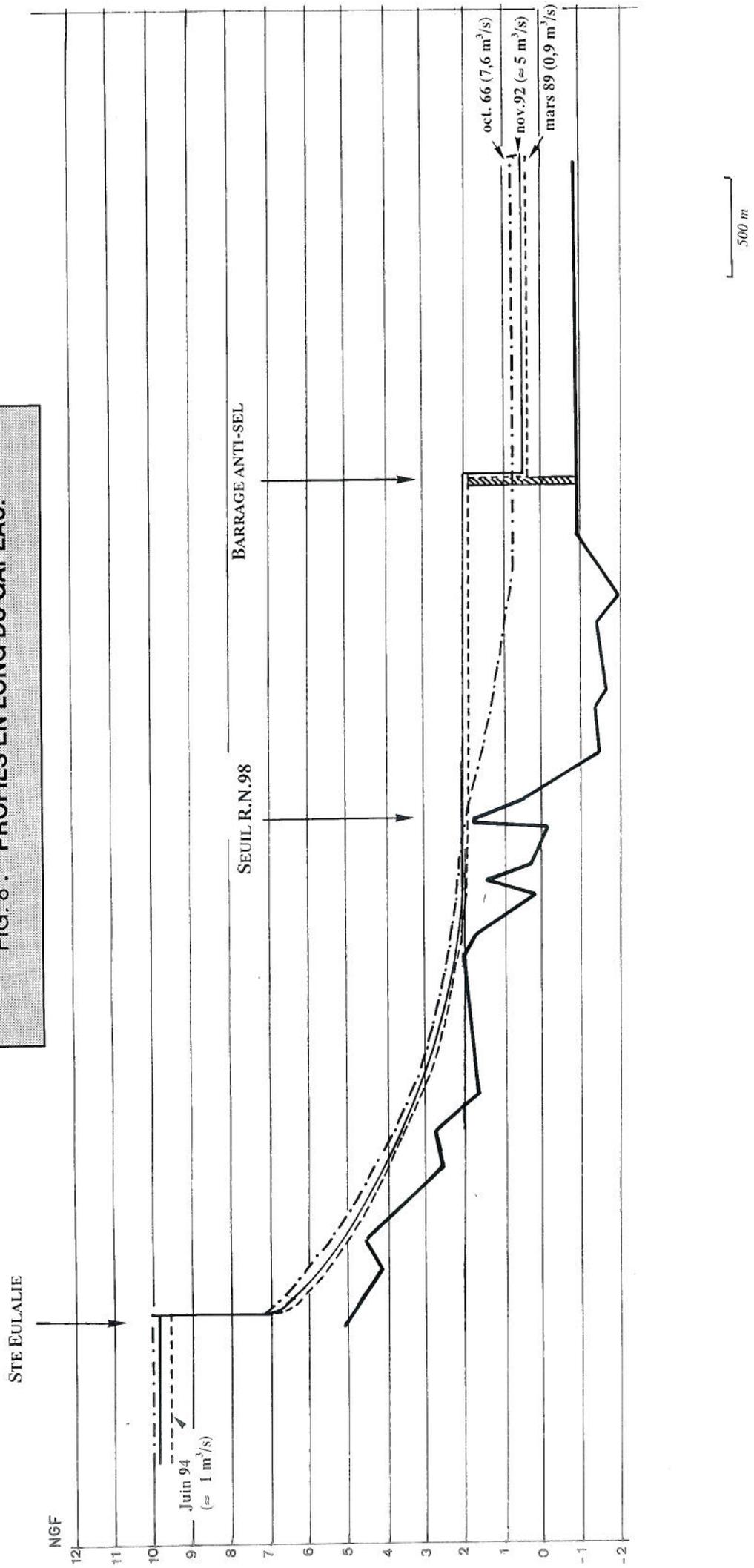
- le niveau du fil d'eau :
  - sur le Roubaud, est voisin du niveau de la mer jusqu'au barrage anti-sel, puis en amont il est proche du terrain naturel,
  - sur la Ritorte, qui est située au dessus du niveau de la mer, il a été estimé à partir de l'altitude du terrain naturel ;
- le débit :
  - du Roubaud a été estimé entre 50 et 60 l/s (identique aux valeurs de 1966-67) en juin 94,
  - de la Ritorte n'est pas connu, mais il est probablement inférieur à 10 l/s en étiage.

Dans le cadre de la modélisation, nous serons amené à considérer les niveaux et débits de ces cours d'eau comme constants dans le temps.

<sup>7</sup>

*Ce phénomène physique est sans grande conséquence dans la nappe elle-même où la température de l'eau varie annuellement que de quelques degrés.*

FIG. 8: PROFILS EN LONG DU GAPEAU.



## 3. MODELISATION MATHÉMATIQUE

La modélisation de la nappe alluviale du Gapeau s'appuie sur l'ensemble de modèles mathématiques développés par Burgéap, sous le nom de Mosaic, pour la simulation des écoulements souterrains et des transferts de masse (salinité par exemple).

Ces modèles sont conçus pour comprendre le fonctionnement des systèmes aquifères, expliquer les événements observés. Ils permettent également d'apporter une aide à la gestion des ressources en eau souterraine.

### 3.1. Présentation générale du modèle mathématique

#### 3.1.1. Généralités

Les écoulements souterrains, libres ou captifs, sont régis par des lois classiques de la mécanique des fluides en milieu poreux. La définition d'un modèle numérique, basé sur ces lois traduites sous forme mathématique, consiste à relier la variable piézométrique aux caractéristiques hydrodynamiques et géométriques de la nappe.

De plus, les modèles Mosaic prennent en compte les écoulements hydrauliques souterrains en relation avec les eaux de surface (plan d'eau, rivière, drain, ...) représentées par le Gapeau, la Ritorte, le Roubaud, les salins et la mer dans le cas de la nappe du bas Gapeau.

Des modules de calcul de transfert de masse permettent, par la suite, de modéliser des cheminements de produits dissous (polluants ou sel). Les phénomènes physiques de transport intégrés dans le modèle sont :

- la **convection**, entraînement du produit selon les lignes de courant par le mouvement propre de l'eau, et à la même vitesse que celle-ci ;
- la **diffusion moléculaire et la dispersion cinématique**, étalement progressif des éléments transportés par rapport au mouvement moyen de la convection<sup>8</sup>.

Des phénomènes plus complexes, **comme l'adsorption et la biodégradation**, non pris en compte dans les modèles Mosaic (représentation mathématique difficile), retardent le transfert en retenant ou en éliminant une partie du produit contaminant.

<sup>8</sup>

*Le phénomène de diffusion moléculaire est lié au gradient de concentration, la résultante est un transfert de particules des zones à concentration élevée vers les zones à concentration faible.*

*La dispersion résulte de l'hétérogénéité des vitesses dans le milieu qui entraîne une propagation plus rapide des éléments transportés dans l'axe des pores (dispersivité longitudinale) et un étalement de la propagation des éléments par rapport à la direction principale de l'écoulement (dispersivité transversale).*

### 3.1.2. Cas de la nappe alluviale du bas Gapeau

Pour ce cas, le modèle doit satisfaire plusieurs impératifs :

- impératif lié à la mise à disposition de l'outil, c'est à dire utilisable sur un micro - ordinateur avec des temps de calcul « raisonnables », ce qui limite en fait les mailles de calcul à 5 ou 6 000 mailles ;
- impératif lié à la prise en compte de la salinité de l'eau, les faibles concentrations dans la nappe n'occasionnant pas de différence de densité significative, il apparaît plus opportun de traiter ce phénomène par la modélisation d'un transfert de masse d'un produit soluble que par un modèle diphasique beaucoup plus lourd à utiliser.

Par ailleurs, en accord avec les indications portées dans le cahier des charges, la connaissance acquise sur cette nappe nous permet de réaliser un modèle de *nappe libre et monocouche* ; les différenciations verticales de niveaux aquifères n'ayant pas une extension suffisante pour justifier une discrétisation verticale particulière.

## 3.2. Construction du modèle mathématique

La nappe de la basse vallée du Gapeau a été modélisée par un parallélépipède, orienté nord nord ouest - sud sud est, de 6,25 km de long et 2,80 km de large (cf. figure 1). Cette surface a été subdivisée en 7 000 mailles, dont environ 5 500 mailles de calcul, à section carrée de 50 m de coté.

### 3.2.1. Substratum du modèle (cf. annexe C)

La construction du modèle nécessite la connaissance de la topographie du substratum de la nappe alluviale. Celle-ci est estimée à partir :

- des nombreuses études géophysiques réalisées en 1949, 1967, 1990 et 1992 sur plusieurs sites (Plan du Pont, Bravette, Oratoire, Passerelle, Moulin Premier, Ourlèdes, Lieurette et Maufauguet) ;
- des coupes de forages et sondages permettant de situer avec plus de précision la cote du substratum.

Le substratum hydraulique imposé au modèle ne correspond pas au substratum géologique de la nappe alluviale. En effet, les coupes de forages mettent en évidence des couches argileuses quasi imperméables juste au dessus du substratum géologique rocheux. De ce fait, le sommet des couches argileuses a été choisi pour représenter le substratum hydraulique du modèle.

### 3.2.2. Conditions de débits imposés

Les conditions imposées aux limites du modèle sont (cf. paragraphe 1.5.3.) :

- à l'est, l'apport total du massif des Maures est considéré comme imperméable, non réparti uniformément<sup>9</sup>, est compris entre 30 et 55 l/s<sup>10</sup> ; la fermeture au sud, de cette limite est, est caractérisée par une limite à flux nul ;
- à l'ouest, le massif des Maurettes possède également une nappe de versant qui alimente la nappe alluviale à des débits compris entre 10 et 15 l/s ; la limite sud - ouest étant caractérisée par des flux nuls ;
- au sud, la mer modélisée en plan d'eau en relation avec la nappe alluviale ;
- au nord, débit associé à la nappe du Gapeau, dans le couloir entre Maures et Maurettes, estimé entre 50 et 150 l/s ;

auxquelles s'ajoute la pluie utile.

Sur la base de ces données, les débits d'alimentation et de pompages imposés se traduisent pour les quatre états piézométriques à caler, en régime permanent, par :

	Octobre 1966	Mai 1979	Mars 1989	Juin 1994
<b>ALIMENTATION</b>				
<b>Amont Gapeau</b>	80 l/s	130 l/s	65 l/s	110 l/s
<b>Maures</b>	35 l/s	45 l/s	30 l/s	40 l/s
<b>Maurettes</b>	10 l/s	15 l/s	10 l/s	13 l/s
<b>Pluie utile annuelle</b>	6 l/s (15 mm)	12 l/s (30 mm)	4 l/s (10 mm)	10 l/s (25 mm)
<b>POMPAGES</b>				
<b>Père Eternel</b>	73 l/s	67 l/s	64 l/s	26,5 l/s
<b>Golf Hôtel</b>	30 l/s	111 l/s	100 l/s	68,5 l/s
<b>Pompages agricoles</b>	60 l/s	27 l/s	65 l/s	0 l/s
<b>Autres pompages</b>	0 l/s	28 l/s	33 l/s	18 l/s

### 3.2.3. Les niveaux d'eau des eaux superficielles

Ceux du cours d'eau ont été établis à partir des données décrites au paragraphe 2.3.5. (voir figure 8) ; le profil de la ligne d'eau du Gapeau de juin 1994 étant aussi appliqué pour le calage en régime permanent de mai 1979.

Le niveau imposé à la mer (et aux salins) est son niveau moyen : 0,16 NGF.

<sup>9</sup> Car la plupart du débit proviendrait des petites vallées que compte le massif.

<sup>10</sup> Les débits d'alimentation, aux limites du modèle, varient dans le temps car ils sont dépendants des conditions climatiques et seule une fourchette de valeurs permet de les caractériser globalement.

### 3.3. Calage hydrodynamique du modèle en régime permanent

#### 3.3.1. Etats de référence

Le calage du modèle en permanent a été réalisé sur les quatre états piézométriques énoncés au paragraphe 2.3.1. (octobre 1966, mai 1979, mars 1989 et juin 1994).

Notons, que les seuls paramètres variants entre les quatre états sont :

- les niveaux et les coefficients de passage des eaux de surface,
- les débits aux limites du modèle (amont Gapeau, coteaux et pluie utile) ;

dont seulement le coefficient de passage est à caler pour chaque état ; les autres paramètres étant connus par ailleurs (cf. supra).

#### 3.3.2. Paramètres à caler

Le calage du modèle est une phase fondamentale de la mise au point du modèle. En effet, les prévisions que fournira le modèle, et donc les décisions que l'on sera amené à prendre, dépendent étroitement du soin apporté au calage initial. Or, divers jeux de paramètres peuvent conduire à un même calage "mathématique" apparent, dont certains mettent en jeu des valeurs de paramètres incohérentes avec la réalité physique.

Les paramètres à caler, afin de restituer au mieux les états piézométriques, sont :

- les **perméabilités**, dont la répartition devra être la même pour chaque état de référence ;
- les **coefficients de passage** entre les eaux superficielles et la nappe, dont les valeurs pourront évoluer en fonction du colmatage des berges ; ce dernier paramètre étant le plus difficile à estimer.

#### 3.3.3. Résultats des calages (cf. annexe D)

Le calage du modèle en régime permanent a été obtenu par ajustement de la répartition des perméabilités et des coefficients de passage eaux de surface - nappe. La restitution des quatre états piézométriques de référence a nécessité de nombreux calculs.

Les piézométries restituées (données en annexe D) sont fidèles à plus ou moins 0,20 m hormis pour la piézométrie d'octobre 1966. Pour cet état piézométrique, le cône calculé au voisinage du Père Eternel est nettement plus important que celui mesuré. Cette différence peut s'expliquer par la mauvaise connaissance des débits imposés au modèle (débits pompés en particulier).

### Zones de perméabilité (voir figure de répartition en annexe D)

L'ajustement du jeu de perméabilités, constant pour les quatre états de référence, montre :

- une zone de forte perméabilité ( $6 \cdot 10^{-3}$  m/s) au niveau de Notre Dame du Plan ;
- une partie moins perméable à l'est ( $5 \cdot 10^{-4}$  m/s) correspondant au glacis de piémont ;
- une zone de faible perméabilité en bordure du littoral, liée à la présence d'alluvions plus limoneuses.

### Relations entre les eaux superficielles et la nappe

Les valeurs des coefficients de passage, pour le calage du juin 1994, sont données en figure 9. Cet ajustement permet d'estimer la relation actuelle entre Gapeau et nappe :

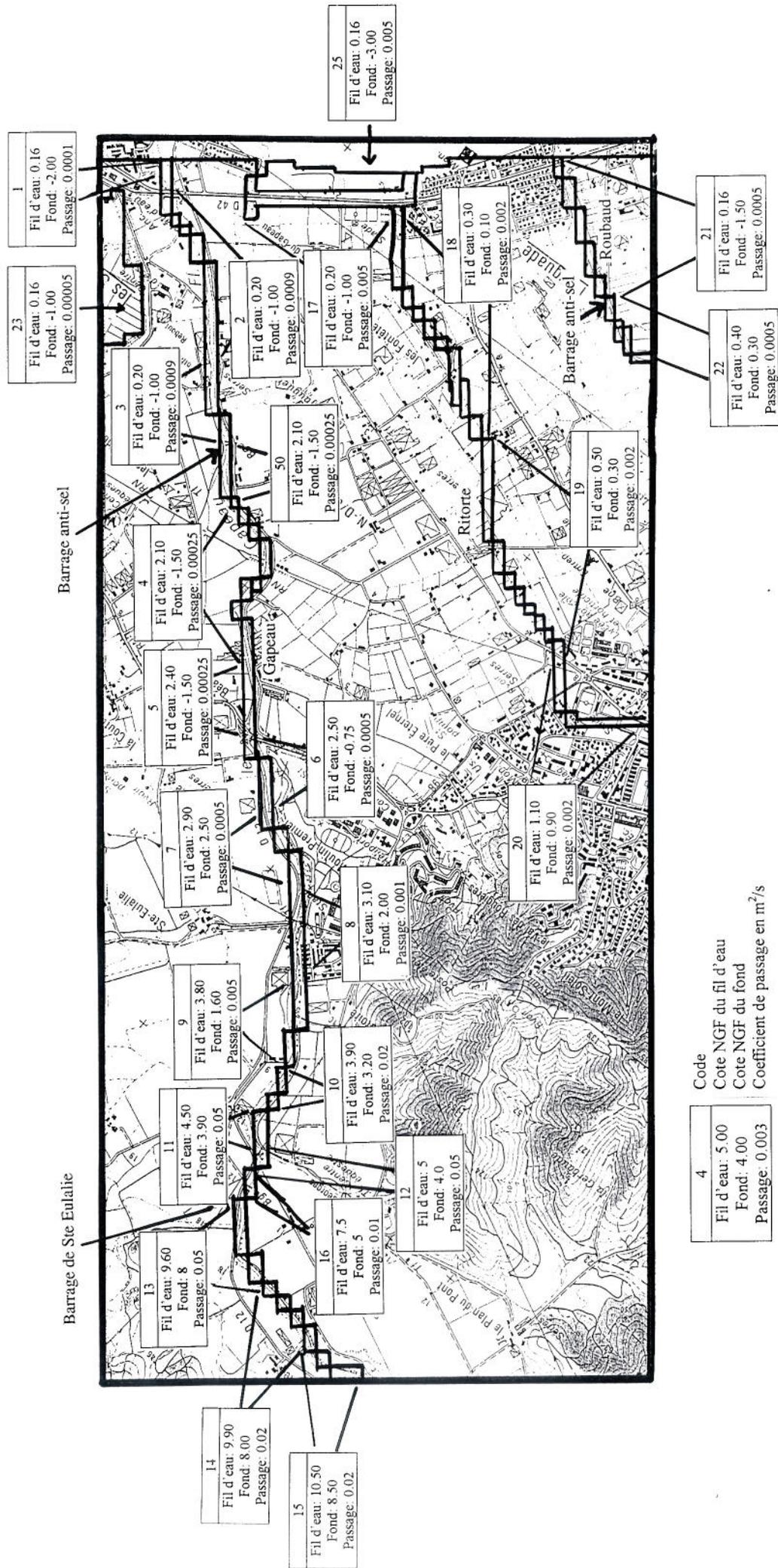
- le coefficient de passage augmente d'aval en amont (rapport de 100 entre l'estuaire et l'amont du barrage de Sainte Eulalie) ;
- en amont immédiat des retenues, barrage anti-sel et seuil de Sainte Eulalie, on constate une diminution du passage liée à l'accumulation de fines ;
- le fleuve est « colmaté ou très colmaté » en aval de Moulin Premier (codes inférieurs à 8) ; ce colmatage étant en grande partie artificiel et lié aux aménagements successifs des berges.

Les différents calages réalisés permettent, de plus, d'estimer sommairement l'évolution du colmatage des berges du Gapeau entre 1966 et 1994 :

- en amont de Moulin Premier et en aval du barrage anti-sel, on ne constate aucune évolution dans le temps du colmatage ;
- par contre entre le barrage anti-sel et Moulin Premier, il semble avoir évolué de la manière suivante :
  - doublement du colmatage, de 1966 à 1979 (mise en place du barrage anti-sel en 1968) entre le barrage anti-sel et la RN 98 ;
  - de 1979 à 1989, augmentation d'environ 50 % entre le barrage anti-sel et la RN 98 et évolution importante (colmatage multiplié par 5) entre la RN 98 et Moulin Premier ;
  - de 1989 à 1994, doublement du colmatage entre le barrage et Moulin Premier hormis pour la zone en aval de la RN 98 (code 5) qui reste stable.

Pour les autres eaux superficielles (Ritorte, Roubaud, salins et mer), dont l'influence est moins importante, le coefficient de passage est resté constant dans le temps.

**FIG. 9: VALEURS DES PARAMETRES HYDRAULIQUES  
DES EAUX SUPERFICIELLES.**



### Bilans des débits (voir figures en annexe D)

Outre la restitution de piézométries calculées proches des états de référence, le calage du modèle consiste, aussi, en l'établissement de bilans hydrauliques équilibrés ce qui permet de quantifier les débits d'échanges. Ces bilans sont schématisés sur les piézométries données en annexe D et restent fidèles aux conditions aux limites préalablement établies.

Notons que les débits échangés en amont du barrage de Sainte Eulalie ne sont pas reportés (sur les cartes en annexe D et ci-après), car comme la nappe alluviale est fortement drainée en aval du barrage leur influence sur la basse plaine d'Hyères est quasi nulle.

Les bilans des débits calculés, c'est à dire échangés entre eaux superficielles et la nappe, peuvent être résumés de la manière suivante<sup>11</sup> :

	Mai 1979	Mars 1989	Juin 1994
<b>Débit transitant dans la nappe en amont de Moulin Premier</b>	60 l/s	135 l/s	90 l/s
<b>Débits échangés avec le GAPEAU</b>			
<b>De Moulin Premier à la RN 98</b>	+ 74 l/s	+ 17 l/s	+ 7 l/s
<b>De la RN 98 au barrage anti-sel</b>	+ 70 l/s	+ 40 l/s	+ 8 l/s
<b>Du barrage anti-sel à la mer</b>	- 8 l/s	≈ 0 l/s	- 5 l/s
<b>Débits échangés avec ROUBAUD</b>	- 8 l/s	+ 23 l/s	- 12 l/s
<b>Débits échangés avec RITORTE</b>	≈ 0 l/s	≈ 0 l/s	- 0,5 l/s
<b>Débits échangés avec SALINS</b>	- 1 l/s	≈ 0 l/s	-0,5 l/s
<b>Débits échangés avec la MER</b>	- 12 l/s	-2 l/s	-10 l/s

*Débit négatif : drainage des eaux superficielles ; débit positif : alimentation.*

Ces bilans montrent que :

- les débits d'alimentation du Gapeau vers la nappe diminuent, du fait de la diminution des coefficients de passage, dans le temps ;
- le Roubaud, situé en extrême aval de la plaine alluviale, draine généralement la nappe hormis pendant la situation piézométrique critique de mars 1989 ;
- il existe toujours un débit sortant à la mer ; celui-ci étant très faible en mars 1989.

<sup>11</sup>

*Le bilan des débits d'octobre 1966 n'est pas reporté ici, car son calcul est imprécis.*

### 3.4. Calage hydrodynamique du modèle en régime transitoire (cf. annexe E)

#### 3.4.1. Eléments de calage

Le calage du modèle en régime transitoire a pour but de reproduire au mieux les suivis piézométriques réalisés en divers points de la plaine de *mars 89 à juin 94* ; la piézométrie de départ du calage étant celle du régime permanent du mois de mars 1989.

La période de calage présente des circonstances « favorables » (parce qu'engendrant des perturbations nettes) pour le calage du modèle en transitoire, à savoir : période de sécheresse de 1989 à 1991, période humide en 1992 et 1993, intrusion saline jusqu'au pompage du Père Eternel de 1989 à 1992.

#### 3.4.2. Paramètres imposés

Les évolutions mensuelles des conditions aux limites, débits imposés et coefficients de passage ont déjà été évoquées, à savoir :

- niveau du Gapeau au paragraphe 2.3.5.,
- coefficient de passage au paragraphe 3.3.3.<sup>12</sup>,
- pluie utile<sup>13</sup> et apports des coteaux (apports indexés sur la pluie utile) au paragraphe 2.3.4.,
- prélèvements A.E.P. (paragraphe 2.3.2) et agricoles (paragraphe 2.3.3.)

#### 3.4.3. Paramètre à caler

Le calage du modèle en régime transitoire est nécessaire pour déterminer le *coefficient d'emménagement* de l'aquifère, paramètre dont la connaissance est indispensable pour étudier ultérieurement les transferts de chlorures (modèle hydrodispersif) et les effets d'une alimentation hivernale de la nappe (simulations d'aménagement).

#### 3.4.4. Résultats du calage

Les restitutions obtenues pour différentes valeurs d'emménagement, homogène sur l'ensemble du modèle, sont portés en annexe E. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un coefficient d'emménagement de 8 %.

Les valeurs calculées sont relativement fidèles aux observations de terrain avec quelques imprécisions, notamment pour les valeurs extrêmes, liées probablement à la mauvaise connaissance de l'évolution des pompages agricoles.

<sup>12</sup> La diminution du passage du Gapeau sera restituée artificiellement en diminuant la température du fleuve (cf. paragraphe 2.3.5).

<sup>13</sup> A la pluie utile estimée s'ajoute les apports liés à l'irrigation que nous avons estimés à 8 mm /mois de mai à septembre et à 3 mm / mois d'octobre à avril.

### 3.5. Calage hydrodispersif du modèle en régime transitoire

#### 3.5.1. Eléments de calage

Le modèle hydrodynamique a été complété par un module de « transfert de masse » permettant l'étude de la propagation d'un produit dissous : le sel.

Son calage a été réalisé sur la même période, que le calage du régime transitoire hydrodynamique (mars 1989 à juin 1994) ; période qui présente une avancée (1989 à 1992) puis un recul (1993 et 1994) de la salinité dans la basse plaine.

#### 3.5.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites spécifiques au transfert de masse sont les concentrations (des conductivités dans notre cas) que l'on va imposer :

- à une ou plusieurs mailles du modèle dans le cas d'une limite à concentration imposée (pollution accidentelle, coteaux, ...);
- aux eaux de surface, qui par leur relation hydraulique avec la nappe, engendreront des intrusions de produit dissous.

Les teneurs en chlorures, exprimées en conductivités, imposées pour le calage du modèle ont été les suivantes :

- 1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour l'alimentation en provenance des Maures ;
- pour le Gapeau, 850  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en amont du barrage anti-sel et de 10 000 à 60 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en aval ;
- pour le Roubaud, de 1 000 à 10 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en amont du barrage anti-sel et de 30 000 à 60 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en aval ;
- 60 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les eaux de mer et des salins.

#### 3.5.3. Paramètres à caler

Le calage consiste à ajuster au mieux les évolutions de la conductivité en faisant varier les paramètres suivants :

- dispersivité longitudinale (équation de dispersion),
- dispersivité transversale (équation de dispersion),
- porosité cinématique (équations de dispersion et de diffusion moléculaire).

Pour ces différents paramètres, nous ne disposons d'aucune mesure sur le terrain, ils seront estimés essentiellement à partir de données bibliographiques.

### 3.5.4. Résultats du calage (cf. annexe F)

Les valeurs de dispersivité longitudinale, dans un milieu alluvial grossier, sont généralement comprises entre 1 et 15 m ; un test de sensibilité réalisé dans cette fourchette de valeurs n'a montré que de faibles variations. La valeur retenue est la valeur moyenne de 10 m.

La dispersivité transversale est généralement issue du ratio classique « dispersivité longitudinale / dispersivité transversale » égal à 10, soit dans notre cas une valeur de 1 m.

La porosité cinématique (volume d'eau qui s'écoule dans les alluvions saturées), dans un milieu grossier et perméable, est légèrement inférieure au coefficient d'emménagement ou porosité de drainage (volume d'eau que l'on peut extraire par drainage dans des alluvions saturées) ; la différence correspond à la capacité de rétention (essentiellement pour des alluvions grossières, pores non connectés ou en « culs de sac »), qui dans notre cas est de l'ordre de 2 à 5 %.

La porosité de drainage (ou emménagement d'emménagement) ayant été estimée par calage voisine de 8 %, nous retiendrons une valeur de 5 % pour la porosité cinématique.

Les valeurs restituées par le modèle ne sont pas globalement satisfaisantes. Les raisons de la non concordance entre valeurs mesurées et observées peuvent être diverses :

- non représentativité des valeurs mesurées liée à des effets de surface ou au contexte géologique (lentilles argileuses par exemple) ;
- valeurs mesurées anormalement importantes à cause de phénomènes de concentration en sel par évaporation ou lessivage par des eaux salées ;
- historique de pénétrations salines sur plus de 30 ans que la modélisation n'a pas pris en compte pour l'état de départ de la simulation hydrodispersive ;
- répartition homogène, sur l'ensemble du modèle, des paramètres hydrodispersifs alors que le milieu naturel présente des hétérogénéités certaines.

Ces résultats sont aussi étroitement liés à la mauvaise connaissance des paramètres hydrodispersifs de la nappe alluviale.

Ces coefficients, dispersivités (longitudinale et transversale) et porosité cinématique, devraient être reconnus par des traçages en nappe réalisés en différents points de l'aquifère.

### 3.6. Tests de sensibilité

Les tests de sensibilité du modèle pour différents paramètres, qui régissent les écoulements, sont destinés à traduire l'incertitude sur la connaissance de ces paramètres en erreur induite sur la piézométrie et sur les bilans calculés.

Ils sont indispensable pour faire évoluer le modèle mathématique en outil de gestion car ils permettent de fournir le niveau de confiance et la marge de manoeuvre dont disposera l'exploitant face aux prévisions du modèle.

Deux types de test ont été sélectionné :

- ceux liés aux *débits imposés* dont les plus importants sont :
  - les débits imposés à la limite amont du modèle dans le couloir alluvial,
  - les pompages agricoles situés essentiellement entre les captages et la mer ;
- les *paramètres hydrodynamiques* les plus influents sur la piézométrie et les bilans de débits :
  - le coefficient d'emménagement,
  - les coefficients de passage Gapeau - nappe alluviale.

#### 3.6.1. Tests liés aux débits imposés

##### Débits imposés à la limite amont du modèle

Comme cela a déjà été évoqué au paragraphe 3.3.3., la sensibilité de ce débit d'alimentation est *quasi nulle* pour les écoulements dans la basse plaine d'Hyères.

En effet, pour des débits imposés à l'amont variant entre 30 et 150 l/s, nous n'avons observé aucune variation des débits transitants dans la nappe alluviale 300 m en aval du barrage de Sainte Eulalie ; les débits amont étant drainés à aval immédiat du barrage.

##### Pompages agricoles

Ce test de sensibilité est particulièrement intéressant car ces pompages étaient incontrôlés et de ce fait mal connus. Il a porté sur des débits globaux compris entre 15 et 60 l/s. Les résultats mettent en évidence une *sensibilité importante* :

- dans la plaine alluviale, quand les débits passent de 15 à 60 l/s, la piézométrie baisse de 0,30 m ce qui pourrait, suivant les cas, favoriser ou défavoriser le développement d'intrusion saline ;
- pour les mêmes variations de débit, le fonctionnement hydraulique de la Ritorte et du Roubaud s'inverse : ils passent du drainage à l'alimentation de la nappe.

### 3.6.2. Tests liés aux paramètres hydrodynamiques

#### Les coefficients de passage Gapeau - Nappe

A partir des valeurs retenues dans le calage en régime permanent de juin 1994, le coefficient de passage a été modulé de plus et moins 20%.

Les enseignements de ces tests de sensibilité sont :

- on n'observe pas de changement notable sur la piézométrie de la nappe ;
- les débits échangés entre le fleuve et la nappe varient (coefficient de passage variant de plus ou moins 20 % par rapport à la référence) dans les proportions suivantes :
  - de l'ordre de 12 à 17 % quand les débits en jeu sont faibles : du littoral jusqu'à Moulin Premier,
  - de 1 à 7 % pour des débits importants : de Moulin Premier à la limite amont du modèle.

Globalement, une variation du coefficient de passage de 20 % modifie l'alimentation globale du Gapeau vers la nappe alluviale (état de juin 1994) d'environ 5 %.

Il est fort probable que dans une situation piézométrique plus défavorable, la variation du débit total échangé soit plus importante. En théorie dans les cas extrêmes (décrochement total de la piézométrie par rapport au fond du fleuve), elle doit être proportionnelle à la variation du coefficient de passage.

Nous avons vérifié, de plus, l'incidence des variations de la cote du fil d'eau du Gapeau. Une variation du fil d'eau de 0,50 m entraîne une différence d'alimentation équivalente à celle observée avec la modulation du coefficient de passage de 20 %.

Ces résultats montrent que les paramètres liés aux relations eaux superficielles avec la nappe sont *sensibles* sur les conditions d'alimentation induite de la nappe.

#### Le coefficient d'emmagasinement

Ce coefficient, comme le montre les graphes donnés en annexe E, est *très peu sensible* sur les prévisions de l'évolution de l'aquifère en régime transitoire.

Pour les valeurs testées (5, 10 et 15 %), les variations piézométriques calculées n'excèdent pas 0,05 m.

## 4. PROTECTION DE LA RESSOURCE : SIMULATIONS

### 4.1. Propositions d'aménagements

Un modèle mathématique est un outil servant essentiellement à la prévision grâce à des simulations de scénarios de gestion :

- de l'exploitation d'états futurs de la nappe ;
- d'aménagements destinés à protéger ou à renforcer la ressource.

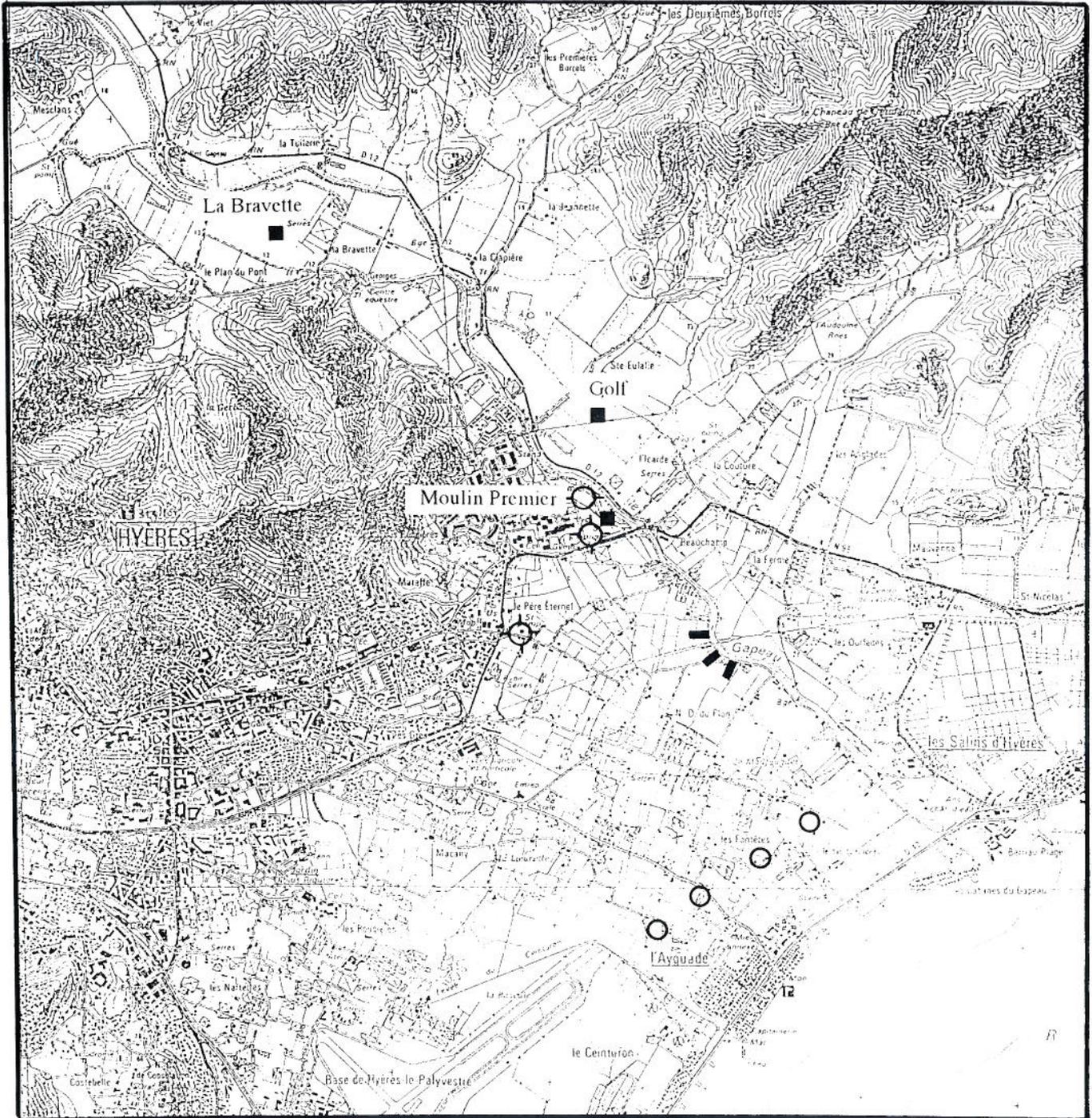
Les propositions d'aménagements à tester doivent prendre en compte :

- les projets déjà envisagés par le Maître d'Ouvrage et l'exploitant :
  - réalisation de nouveaux captages au Moulin Premier,
  - création de berges filtrantes par drains sur le Gapeau,
  - recharge artificielle de la nappe alluviale par bassins d'infiltration ;
- les contraintes foncières limitant l'implantation de certains ouvrages, bassins d'infiltration en particulier ;
- les faibles débits d'étiage du Gapeau qui peuvent être contraignants dans la faisabilité de certains projets (recharge artificielle par drains et bassins d'infiltration).

A la suite d'une réunion de travail en présence des parties concernées, il a été décidé de simuler quatre aménagements (cf. figure 10) :

- ① **réorganisation optimale** des prélèvements A.E.P. entre les stations de pompages du Père Eternel, du Golf Hôtel et les nouveaux forages de Moulin Premier ;
- ② **recharge artificielle de la nappe par drains** foncés à partir des berges du Gapeau au droit de la déviation de RN 98 ;
- ③ **recharge artificielle de la nappe par bassins d'infiltration** dont l'implantation sera testée sur 3 sites :
  - la Bravette (amont du barrage de Sainte Eulalie),
  - le site du golf d'Hyères en rive gauche du Gapeau,
  - le terrain communal disponible en rive droite du Gapeau juste au nord de la RN 98 (site de Moulin Premier) ;
- ④ création d'une **barrière hydraulique**, par pompages, dans la partie aval de la nappe alluviale entre les captages A.E.P. existants et la mer.

**FIG.10 : IMPLANTATION DES AMENAGEMENTS SIMULES.**



- Captages de la ville.
- Barrière hydraulique.
- Drains.
- Captage de Moulin Premier.
- Bassins d'infiltration.

1000 m

## 4.2. Simulations des aménagements proposés

### 4.2.0. Conditions communes à toutes les simulations

Toutes les simulations ont été effectuées dans des conditions les plus contraignantes pour la ressource en eau souterraine<sup>14</sup> :

- imposition de l'exploitation maximale autorisée par l'arrêté préfectoral de 1969, soit un débit de 20 000 m<sup>3</sup>/j (232 l/s) :
  - 8 000 m<sup>3</sup>/j, soit 93 l/s, pour la station du Père Eternel,
  - 12 000 m<sup>3</sup>/j (139 l/s) pour le Golf Hôtel ;
- conditions hydrologiques et hydrogéologiques d'été sévère :
  - état de mars 1989 pour les simulations en régime permanent,
  - calquées sur les observations de 1989 à 1991 pour les simulations en régime transitoire dont la durée sera de 365 jours (année hydrologique débutant au mois d'octobre).

### 4.2.1. Réorganisation optimale des prélèvements A.E.P.

Différents scénarios ont été testés afin d'orienter l'exploitant vers une meilleure gestion des ouvrages existants.

Ils ont été réalisés uniquement en régime permanent (conditions de mars 1989). Les principaux enseignements en sont :

- le débit exploitable maximum est de l'ordre *205 l/s soit 18 000 m<sup>3</sup>/j* ;
- les pompages du Golf Hôtel et de Moulin Premier, se trouvant dans la même dépression piézométrique, peuvent être considérés comme un seul point de sollicitation de la nappe : nous avons défini un débit global pour ces deux sites dont la répartition est indifférente ;
- la meilleure répartition des prélèvements est la suivante (voir piézométrie correspondante en annexe G) :
  - *entre 35 et 45 l/s*, soit de 3 000 à 4 000 m<sup>3</sup>/j, pour la station du Père Eternel ;
  - *entre 160 et 170 l/s* (14 à 15 000 m<sup>3</sup>/j) pour le groupe Golf Hôtel - Moulin Premier pour lesquels la répartition pourra s'effectuer suivant les souhaits du Maître d'Ouvrage et de l'exploitant.

<sup>14</sup>

Dans le cadre de ces simulations, nous n'avons pas tenu compte des pompages agricoles car on peut considérer que ceux-ci sont actuellement quasi nuls et qu'ils n'évolueront plus dans l'avenir.

#### 4.2.2. Recharge artificielle par drains (berges filtrantes)

Cette simulation vise à étudier l'effet d'une recharge de la nappe dans la partie aval de celle-ci, entre les captages A.E.P. et le littoral ; cette recharge ayant pour but la création d'un dôme piézométrique empêchant l'intrusion d'eaux saumâtres.

Les débits d'alimentation imposés ont été limité à des valeurs compatibles avec ceux pouvant être fourni par le Gapeau, notamment en période d'étiage :

- 100 l/s, durant la période d'octobre à d'avril, débit correspondant au dixième du débit minimum du Gapeau sur cette plage de temps (cf. paragraphe 1.3.1.),
- 20 l/s pendant les 5 mois les plus secs (mai à septembre) afin de ne prélever au Gapeau que le dixième de son débit de référence à Sainte Eulalie.

Pour des années exceptionnellement sèches ces débits ne pourront pas être fournis par le fleuve.

Remarquons de plus que du fait de l'alimentation induite du Gapeau vers la nappe, les débits disponibles au droit des drains sont plus faibles que ceux mesurés au barrage de Sainte Eulalie.

Les résultats des différents scénarios testés montrent que :

- un débit d'alimentation de 60 l/s (5 200 m<sup>3</sup>/j) est suffisant hors période sèche (octobre à avril) pour maintenir un dôme piézométrique<sup>15</sup> et recharger la nappe ; un débit plus important ne permettant pas une meilleure recharge de la nappe en vue de la période critique estivale ;
- le débit minimum nécessaire pour maintenir le dôme durant les 5 mois les plus secs est de 30 l/s ; cette valeur étant supérieure à l'hypothèse adoptée comme raisonnable pour une alimentation estivale ;
- le dôme pourrait être maintenu toute l'année si durant les 5 derniers mois secs de l'année hydrologique les pompages du Père Eternel étaient réduits à 58 l/s (5 000 m<sup>3</sup>/j) et cela sans aucun apport des berges filtrantes.

Cette solution d'aménagement n'étant pas totalement satisfaisante, nous avons testé la solution qui consisterait à alimenter la nappe à partir des drains, au débit de 60 l/s pendant 7 mois, puis de mettre en route la barrière hydraulique (cf. infra), au débit de 20 l/s durant les 5 derniers mois. Ce scénario de gestion de la nappe apparaît satisfaisant et permettrait d'éviter une avancée saline dans la nappe alluviale.

<sup>15</sup>

*La stabilisation du dôme est observée après 3 mois d'alimentation par les drains.*

### 4.2.3. Recharge artificielle par bassins d'infiltration

Cet aménagement a deux objectifs : stockage d'eau en vue de la période estivale et création d'une charge piézométrique suffisante dans la basse plaine afin d'éviter les invasions salées.

Les possibilités d'une réalimentation artificielle de la nappe sont conditionnées par :

- la capacité d'infiltration des terrains se trouvant au droit des bassins à créer ;
- l'absence ou la faible reprise par le Gapeau des débits injectés ;
- l'existence d'une ressource capable de fournir l'eau à infiltrer dans les bassins :
  - le Gapeau pourrait fournir un débit de réalimentation à moindre coût, mais il présente des débits d'étiage très faibles voire nuls (cf. supra),
  - eau achetée à la Société du Canal de Provence,
  - retenue collinaire, à créer, stockant de l'eau pendant les périodes pluvieuses.

Pour les trois zones d'infiltration testées, les résultats sont :

- site de la Bravette** : la totalité du débit infiltré est drainée par le Gapeau en aval du barrage de Sainte Eulalie même avec un débit très important ; ce site ne présente donc pas d'intérêt pour protéger ou augmenter la ressource de la Ville ;
- site de Moulin Premier** :
  - les débits à injecter pour protéger la ressource sont de **125 l/s** durant les 7 premiers mois de l'année hydrologique **puis 25 l/s** pendant les 5 derniers mois ;
  - un débit supérieur à 150 l/s pendant les 7 premiers mois n'apporterait pas d'amélioration notable ;
  - la piézométrie se stabilise après 4 mois d'injection ce qui voudrait dire, que dans le cas d'une gestion optimisée de la nappe, les bassins pourraient être mis en route que 4 mois avant la période critique ;
  - si durant l'étiage, on ne dispose pas d'eau pour l'injection, la protection de la ressource pourrait être assurée<sup>16</sup> soit en diminuant les prélèvements du Père Eternel à 5 000 m<sup>3</sup>/j, soit en mettant en activité la barrière hydraulique (cf. infra) au débit de 20 l/s ;
  - des débits injectés, aucun n'est repris par le Gapeau en amont du barrage anti-sel<sup>17</sup> ; par contre, on observe une légère augmentation des débits repris en sortie du modèle (mer et aval du barrage anti-sel) (cf. figure en annexe G) ;
- site du golf d'Hyères** : les résultats sont identiques à ceux obtenus pour le site de Moulin Premier avec toutefois avec une efficacité légèrement meilleure pour celui de Moulin Premier due à la proximité de la recharge par rapport aux pompes.

<sup>16</sup> Afin d'éviter des achats d'eau importants.

<sup>17</sup> On observe par contre une diminution de l'alimentation induite du fleuve vers la nappe.

### **4.3.2. De la recharge artificielle par drains**

#### **Dimensionnement sommaire**

Afin de pouvoir être efficace et fournir 60 l/s (215 m<sup>3</sup>/h), nous proposons de réaliser 3 drains (distances entre chaque drain à définir). Chaque drain, capable d'alimenter la nappe au débit de 70 m<sup>3</sup>/h, devra avoir les caractéristiques suivantes :

- fonçage des drains (côte à déterminer par une étude spécifique) ;
- diamètre intérieur de 200 mm ;
- ouverture 10 % ;
- linéaire de 20 à 25 mètres.

#### **Chiffrage sommaire**

Hormis les études spécifiques préalables, le coût de réalisation de ces trois drains devrait se situer entre 600 et 750 kF H.T.

### **4.3.3. De la recharge artificielle par bassins d'infiltration**

#### **Dimensionnement sommaire**

En se basant sur le débit d'infiltration maximal de 125 l/s soit 450 m<sup>3</sup>/h et avec une prise d'eau au Gapeau, les ouvrages nécessaires à ce projet sont les suivants :

- prise d'eau au Gapeau et canalisation jusqu'au bassin de stockage et décantation ;
- bassin de stockage et de décantation d'une capacité minimale de 20 heures soit environ 9 000 m<sup>3</sup> ;
- alimentation des bassins d'infiltration avec l'eau décantée par cascades (un ouvrage par bassins) ;
- 4 à 6 bassins d'infiltration, de 1 500 ou 2 000 m<sup>2</sup> chacun soit une surface totale d'infiltration de 6 000 m<sup>2</sup>, présentant une vitesse d'infiltration de 2 m/j et réalisés avec une hauteur de sable calibré de 1 mètre.

La réalisation de tel aménagement nécessitera des études préalables et notamment des reconnaissances de sol afin de vérifier la capacité d'infiltration des deux sites : Moulin Premier et golf d'Hyères.

#### **Chiffrage sommaire**

Le coût global d'un tel aménagement, hors études spécifiques, acquisition de terrain et canalisation entre prise d'eau au Gapeau et bassins (distance variant suivant le site), s'élèverait approximativement à 5 000 kF H.T.

#### 4.3.4. De la barrière hydraulique en bordure du littoral

##### Dimensionnement sommaire

Cet aménagement nécessiterait la réalisation de 4 ouvrages de pompes capables de pomper chacun un débit de 20 m<sup>3</sup>/h.

##### Chiffrage sommaire

Un tel aménagement, hors acquisition des terrains d'implantation et des canalisations de rejet des eaux pompées (à la mer, au Roubaud et / ou au Gapeau en aval de leur barrage anti-sel ou autre), coûterait environ 100 à 150 kF H.T.

#### 4.4. Avantages et inconvénients de chaque solution

##### 4.4.1. Réorganisation optimale des prélèvements

Cette solution, qui n'est pas un aménagement, permettrait par le biais du nouveau site de captage du Moulin Premier de disposer d'une ressource en alimentation en eau potable moins vulnérable vis à vis du risque de pollutions accidentelles que le site du Golf Hôtel<sup>18</sup> ; sites qui d'un point de vue purement hydrogéologique présentent les mêmes caractéristiques.

##### 4.4.2. Recharge artificielle par drains

Elle possède les avantages suivants :

- fonctionnement sans apport énergétique et avec des coûts d'exploitation faibles ;
- *efficacité de l'implantation* des drains permettant une protection de la nappe même avec de faibles débits.

Cette solution présente, par contre, plusieurs contraintes et incertitudes :

- l'infiltration ne sera pas maîtrisable et il sera difficile d'estimer le débit infiltré dans la nappe ;
- les drains peuvent se colmater rapidement et de ce fait un fonctionnement en permanence est peu recommandé ;
- en période d'étiage du Gapeau, l'aménagement pourrait ne plus être fonctionnel (débit d'alimentation insuffisant ou / et colmatage des drains).

<sup>18</sup>

*Le site du Golf Hôtel est situé à proximité immédiate de la RN 98 et de ce fait est très vulnérable à des déversements accidents de produits polluants.*

#### 4.4.3. Recharge artificielle par bassins d'infiltration (prise d'eau au Gapeau)

Les sites de Moulin Premier et du golf d'Hyères présentent des caractéristiques a priori favorables à la recharge de nappe :

- ils sont peu éloignés du Gapeau favorisant une réalimentation à partir du fleuve ;
- situés dans les cônes d'appel des forages du Golf Hôtel et de Moulin Premier, ils permettent une réalimentation efficace de la ressource ;
- les terrains sont a priori favorables à l'infiltration des débits annoncés.

Les avantages de cet aménagement consistent en :

- la *maîtrise du débit infiltrable* pendant la période de disponibilité d'eau et donc d'une souplesse d'exploitation ;
- des possibilités d'augmentation des débits exploitables pour l'alimentation en eau potable.

Par contre, cette solution possède les inconvénients :

- d'investissements importants ;
- d'une gestion fine de la ressource ;
- d'une emprise foncière importante des bassins ;
- de la fourniture des débits nécessaires durant la période sèche pour assurer la pérennité de l'aménagement<sup>19</sup>.

#### 4.4.4. Barrière hydraulique en bordure du littoral

Cette solution est la moins onéreuse et la plus simple à mettre en place.

Par contre, elle présente un *risque pour la protection* des captages :

- les pompages vont engendrer une avancée d'eaux saumâtres jusqu'aux forages formant la barrière ;
- la gestion de l'aménagement sera délicate car, si par exemple la dépression piézométrique créée par la barrière s'estompe (arrêt d'un pompage, par exemple), une contamination saline rapide vers les captages est possible.

<sup>19</sup>

Dans ce cas, soit des achats d'eau brute (Canal de Provence par exemple) seraient nécessaires, soit l'infiltration pourrait être maintenu grâce à des eaux stockées dans une retenue.

#### 4.5. Proposition pour assurer la protection

*Aucune des solutions étudiées n'est en mesure à elle seule de garantir la pérennité de la protection de la nappe alluviale avec une exploitation de 20 000 m<sup>3</sup>/j dans une situation d'étiage sévère type 1989 à 1991.*

Dans ces conditions, la protection de la nappe pourrait être assurée par une solution mixte intégrant au mieux les avantages de chacun des 3 aménagements étudiés. Cette solution consiste en :

- pendant la période où le Gapeau présente un débit supérieur à une valeur donnée (1 m<sup>3</sup>/s, par exemple) : recharge de la nappe alluviale par bassins d'infiltration (Moulin Premier ou golf d'Hyères) car cet aménagement est le seul à pouvoir assurer une maîtrise des débits de la recharge de la nappe ;
- quand le débit du Gapeau n'est plus suffisant pour alimenter les bassins d'infiltration mise en service temporaire :
  - des drains tant que leur débit d'alimentation vers la nappe est suffisant pour maintenir le dôme piézométrique entre captages et mer ; le non fonctionnement permanent des drains doit garantir leur efficacité ;
  - de la barrière hydraulique, si l'étiage se prolonge et que la recharge par drains n'est plus suffisante pour assurer la protection.

Cette solution complexe nécessite une gestion très fine de la ressource ; gestion qui ne pourra être assurée qu'avec un modèle mathématique du type de celui qui est en cours de réalisation.

**ANNEXE A**

---

**CADRE GENERAL DU BASSIN VERSANT DU GAPEAU**

## A.1. Cadre physique du bassin versant du Gapeau (cf. figure A1)

Le Gapeau est un fleuve côtier de la région Provençale qui se jette dans la Méditerranée à Hyères.

Son bassin versant a une superficie de 520 km<sup>2</sup> et affecte l'allure générale d'un triangle dont les sommets seraient occupés par Hyères, la Garde Freinet et le massif de la Sainte Baume.

La grande extension est - ouest du bassin fait qu'il couvre simultanément 3 régions nettement différentes :

- à l'est, la partie occidentale des Maures (roches métamorphiques) ;
- au centre, la dépression permienne Mauresque ;
- à l'ouest, une partie des plateaux calcaires de la basse Provence.

## A.2. Hydrologie du bassin versant du Gapeau

La structure essentielle du réseau hydrographique est représentée par 2 rivières qui ne se rejoignent qu'à peu de distance de la mer :

- le *Gapeau* qui draine la majorité des régions calcaires, a une structure simple et ne possède que peu d'affluents notables ;
- le *Réal Martin* qui, au contraire, possède un chevelu dense d'affluents, tant sur les Maures (Rimauret, Réal Collobrier) que sur la dépression permienne et les premiers contreforts des plateaux calcaires.

## A.3. Géologie du bassin versant du Gapeau

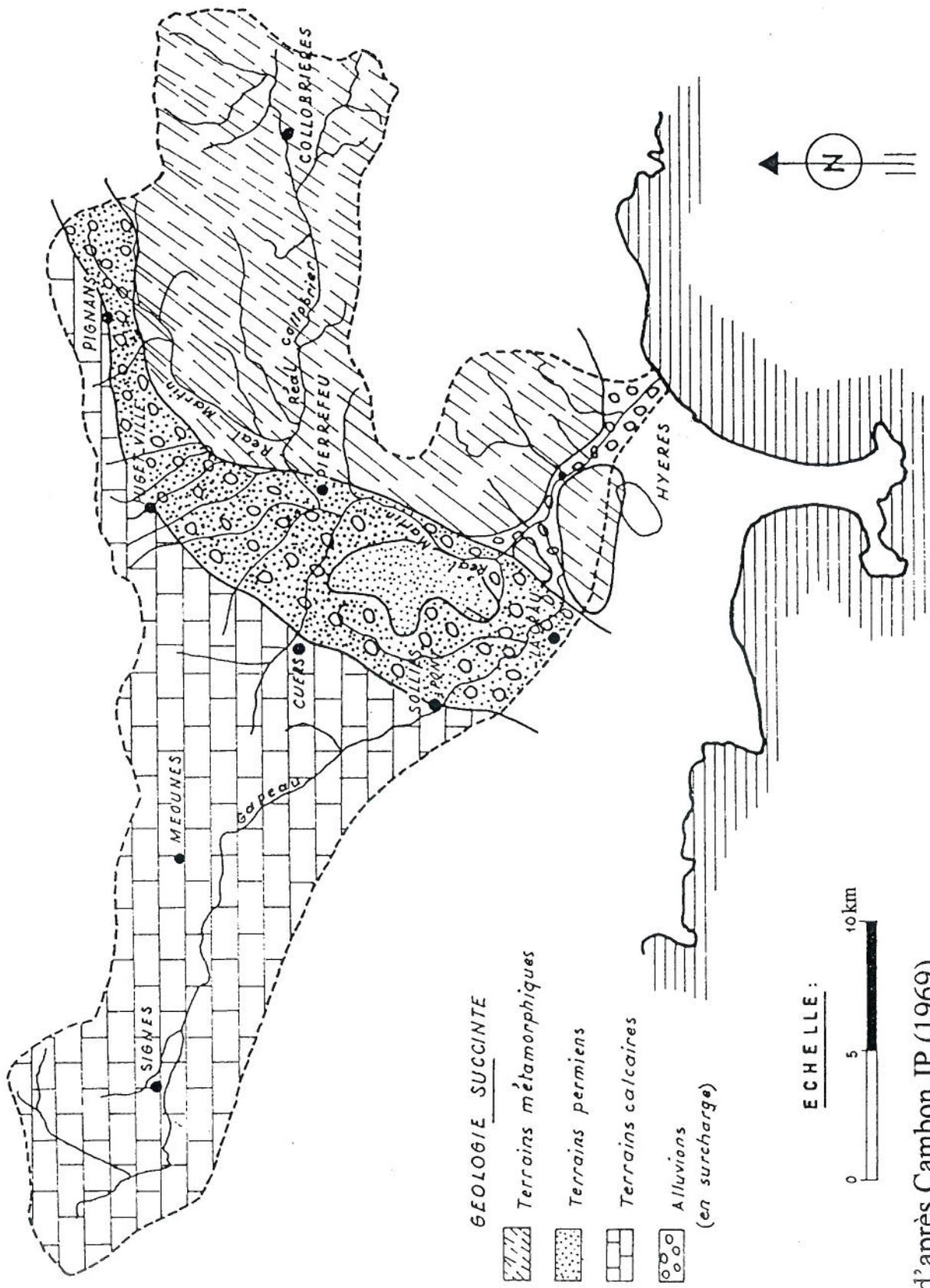
Le bassin versant du Gapeau présente une grande complexité géologique. En effet, outre un vaste affleurement de terrains métamorphiques, la série sédimentaire s'étend, sans lacunes apparentes, du Carbonifère au Sénonien. A cette série s'ajoutent localement des formations tertiaires et quaternaires.

### A.3.1. Les Maures

Seule la partie ouest du massif mauresque est incluse dans le bassin versant.

Il culmine à 779 NGF, au sommet de la Sauvette, et son altitude moyenne avoisine 300 NGF.

**FIG. A1 : GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU GAPEAU.**



**GEOLOGIE SUCCINCTE**

-  Terrains métamorphiques
-  Terrains permians
-  Terrains calcaires
-  Alluvions  
(en surcharge)

**ECHELLE :**  
 0 5 10 km

d'après Cambon JP (1969)

On observe 2 réseaux hydrographiques distincts l'un de l'autre :

- à l'est, convergence du réseau de drainage vers Collobrières ;
- à l'ouest, le réseau hydrographique se traduit par des gouttières établies sur le Permien qui affleure à la faveur des accidents.

### **A.3.2. La dépression permienne**

Cette importante dépression, dont l'altitude moyenne est voisine de 100 NGF, est coupée dans sa partie inférieure par un ensemble de collines :

- les collines de Carqueirane (terrains primaires et secondaires) ;
- les collines des Maurettes et du Mont Redon (terrains métamorphiques) ;
- la colline des Posselons (grès rouges permien) ;
- la colline du Bron (Permien).

Ces collines, qui culminent entre 200 et 300 NGF, dominent une vaste plaine couverte d'alluvions, correspondant au glacis d'érosion recouvert par les cailloutis jurassiques. C'est dans ces formations que se sont encaissés les multiples ruisseaux qui drainent la région.

Au Sud de la Crau, le Gapeau pénètre dans les terrains métamorphiques et abandonne le drainage de la dépression permienne à un petit fleuve côtier : l'Eygoutier.

### **A.3.3. Les régions calcaires**

La morphologie de ces régions est essentiellement due à l'évolution karstique de ces formations.

Le caractère essentiel du réseau dans ces diverses unités est son endoréisme, sans que l'on puisse toutefois déterminer les parts respectives du climat et des écoulements karstiques.

Chaque unité possède ses vallées sèches, qui ne sont fonctionnelles que lors de très fortes averses, et présente à son pied ses exurgences propres.

Il faut donc s'attendre à ce que le bassin superficiel ne corresponde pas avec le bassin souterrain.

## **A.4. Hydrogéologie du bassin versant du Gapeau**

### **A.4.1. Les Maures**

Les roches métamorphiques, constituant ce massif, sont imperméables en profondeur. Elles peuvent être rendues perméables superficiellement par décompression et / ou altération. Des petites sources peuvent exister au contact de niveaux à amphibolites avec des micaschistes.

### **A.4.2. La dépression permienne**

Elle est dans l'ensemble très peu perméable, les argilites qui prédominent sont en effet imperméables.

Cependant des puits sont alimentés par une nappe circulant dans la zone d'altération superficielle ou dans des niveaux gréseux ou conglomératiques intercalés dans les argilites.

### **A.4.3. Les régions calcaires**

Elles présentent des nappes étendues dans des terrains aquifères fissurés et sont à l'origine de l'essentiel des ressources en eau de la région.

Ces massifs calcaires et dolomitiques (massifs de Cuers, de Néoules, d'Agnis, ...) sont généralement karstifiés. De ce fait, les cours d'eau les traversant, notamment le Gapeau, présentent des zones de pertes.

Ils possèdent des sources peu nombreuses, mais localement à gros débits.

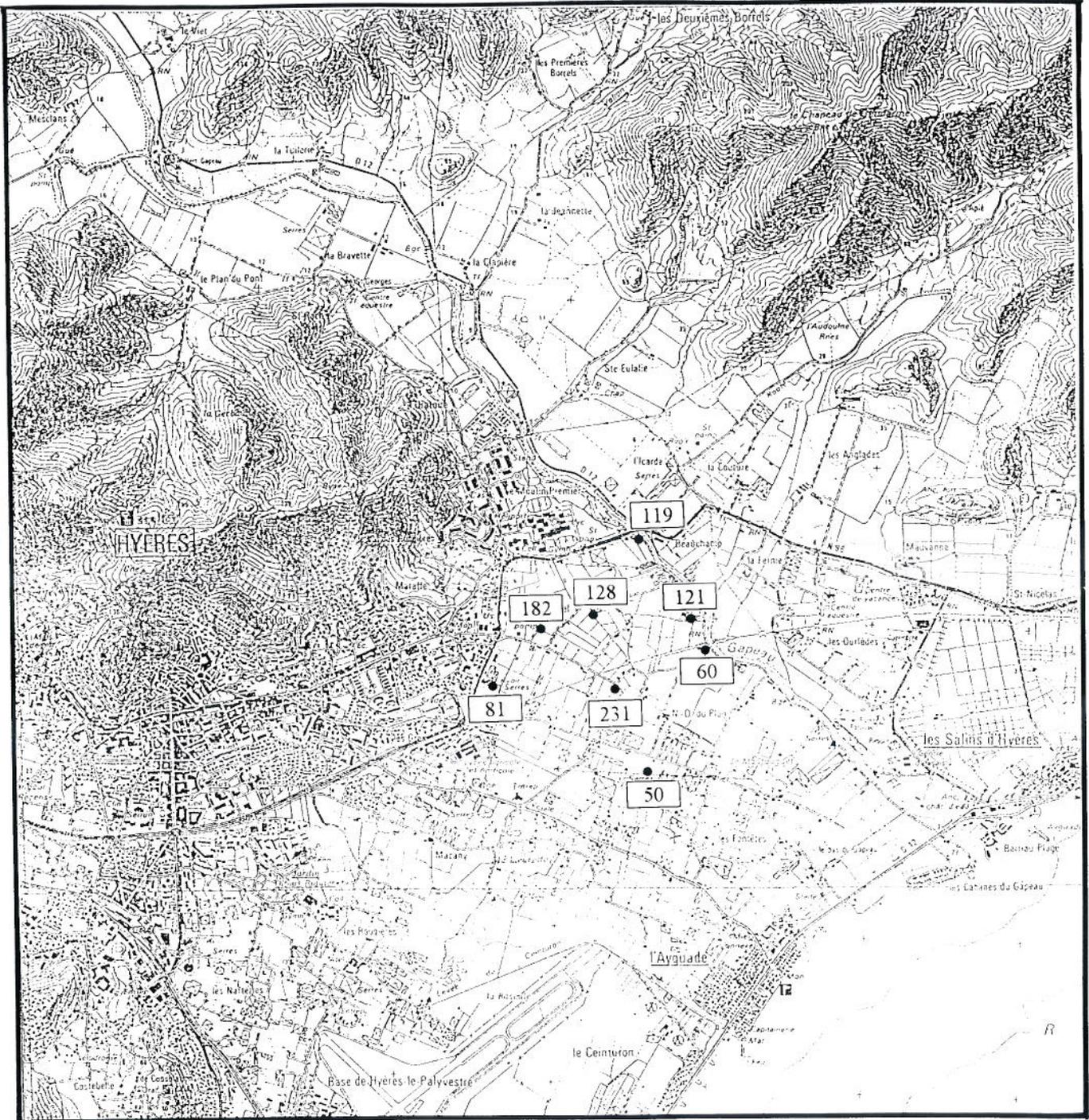
## ANNEXE B

---

### HISTORIQUES DES DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION

- Figure B1 :** Implantation des piézomètres de contrôle du calage du modèle.
- Figure B2 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 119 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B3 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 121 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B4 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 128 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B5 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 182 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B6 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 50 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B7 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 60 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B8 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 231 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B9 :** Suivi piézométrique et de conductivité sur le piézomètre 81 - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B10 :** Historique des prélèvements A.E.P. - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B11 :** Estimation des pompages agricoles - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B12 :** Pluviométrie mensuelle à Hyères Palyvestre - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B13 :** Pluie utile mensuelle à Hyères - Janvier 1989 à juin 1994.
- Figure B14 :** Historique des débits et des niveaux du Gapeau - Janvier 1989 à juin 1994.

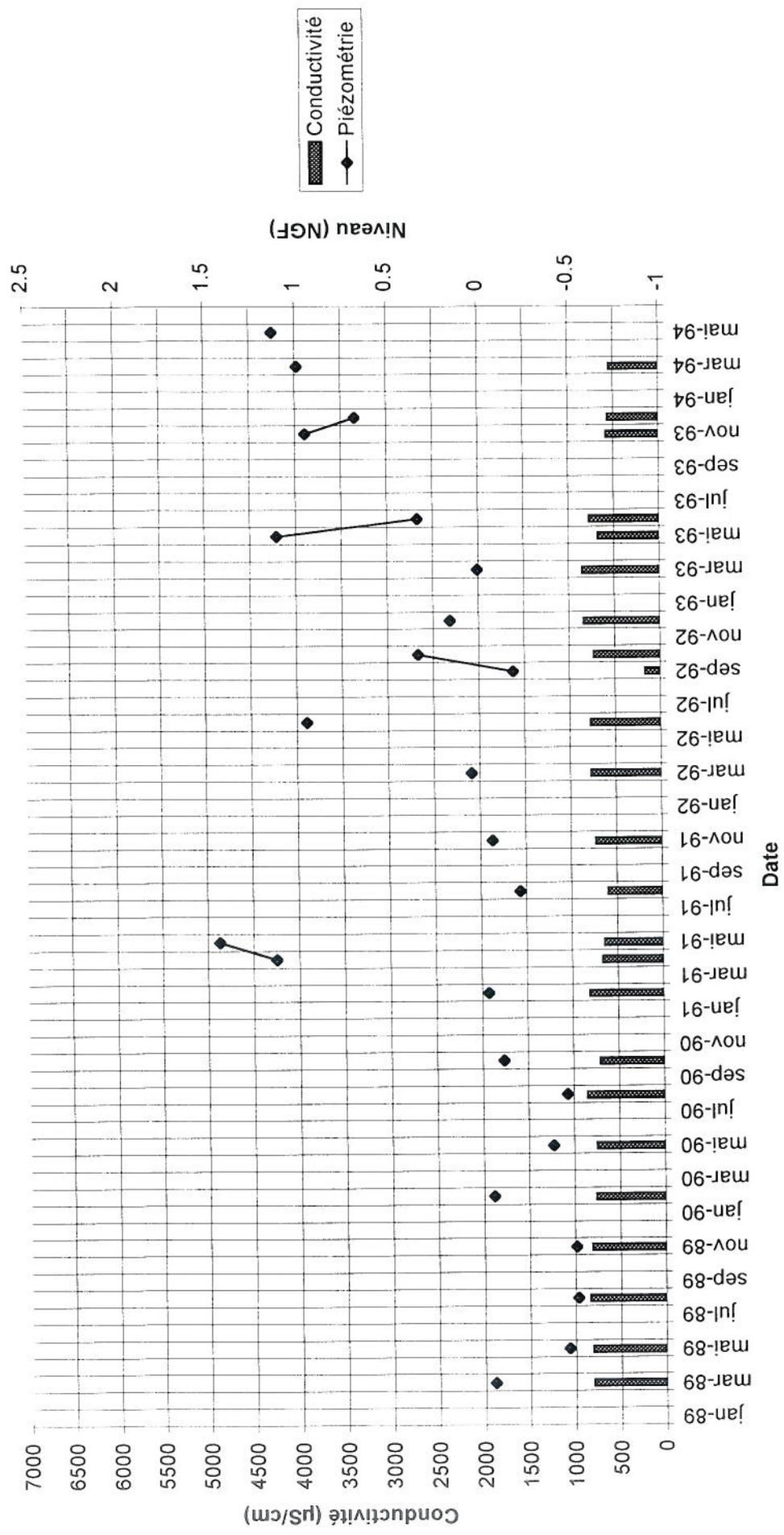
**FIG. B1 : IMPLANTATION DES PIEZOMETRES DE  
CONTROLE DU CALAGE DU MODELE.**



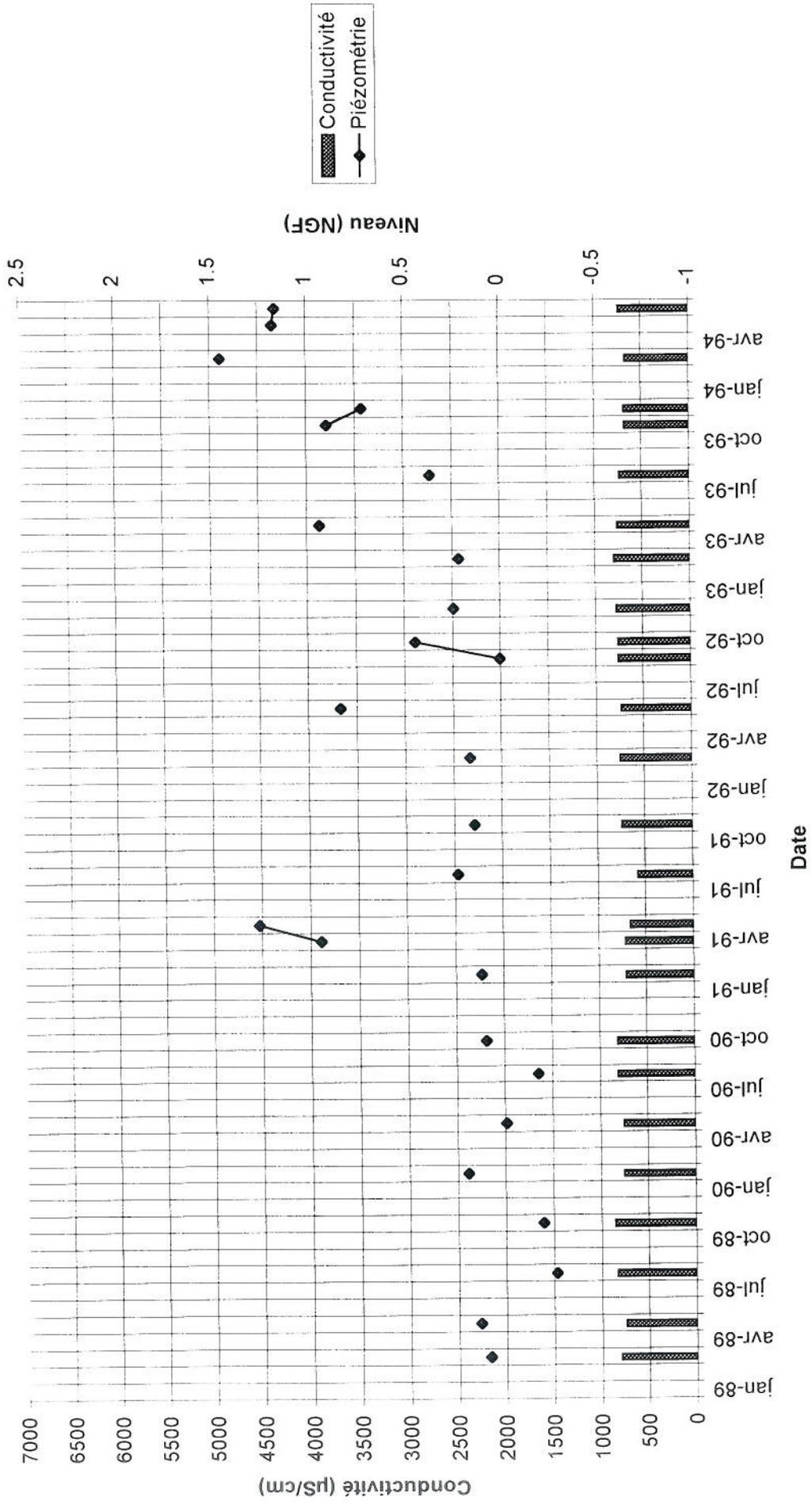
• 119 N° des puits et des piézomètres

1000 m

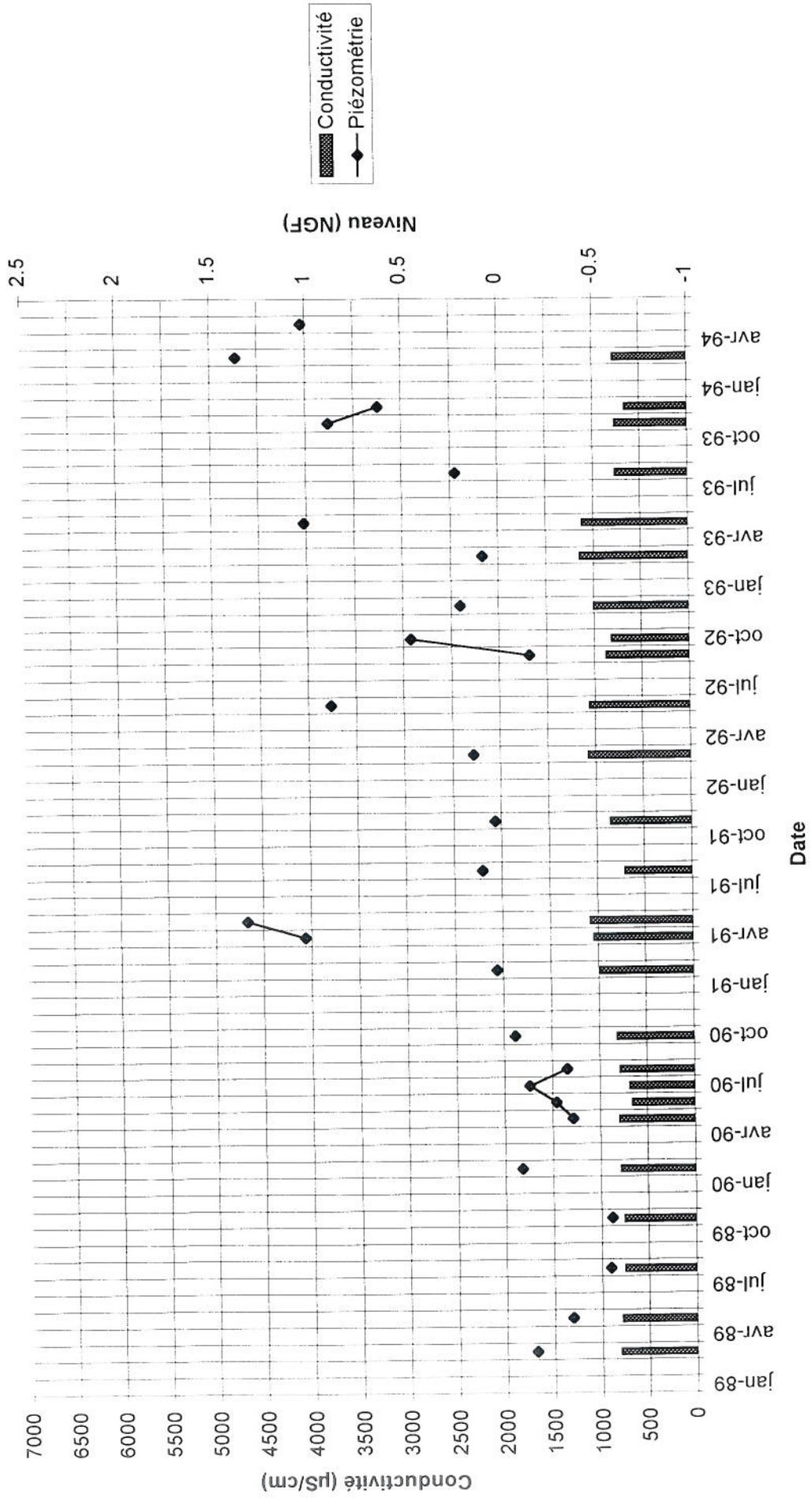
**FIG. B2 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE SUR  
LE PIEZOMETRE 119 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**



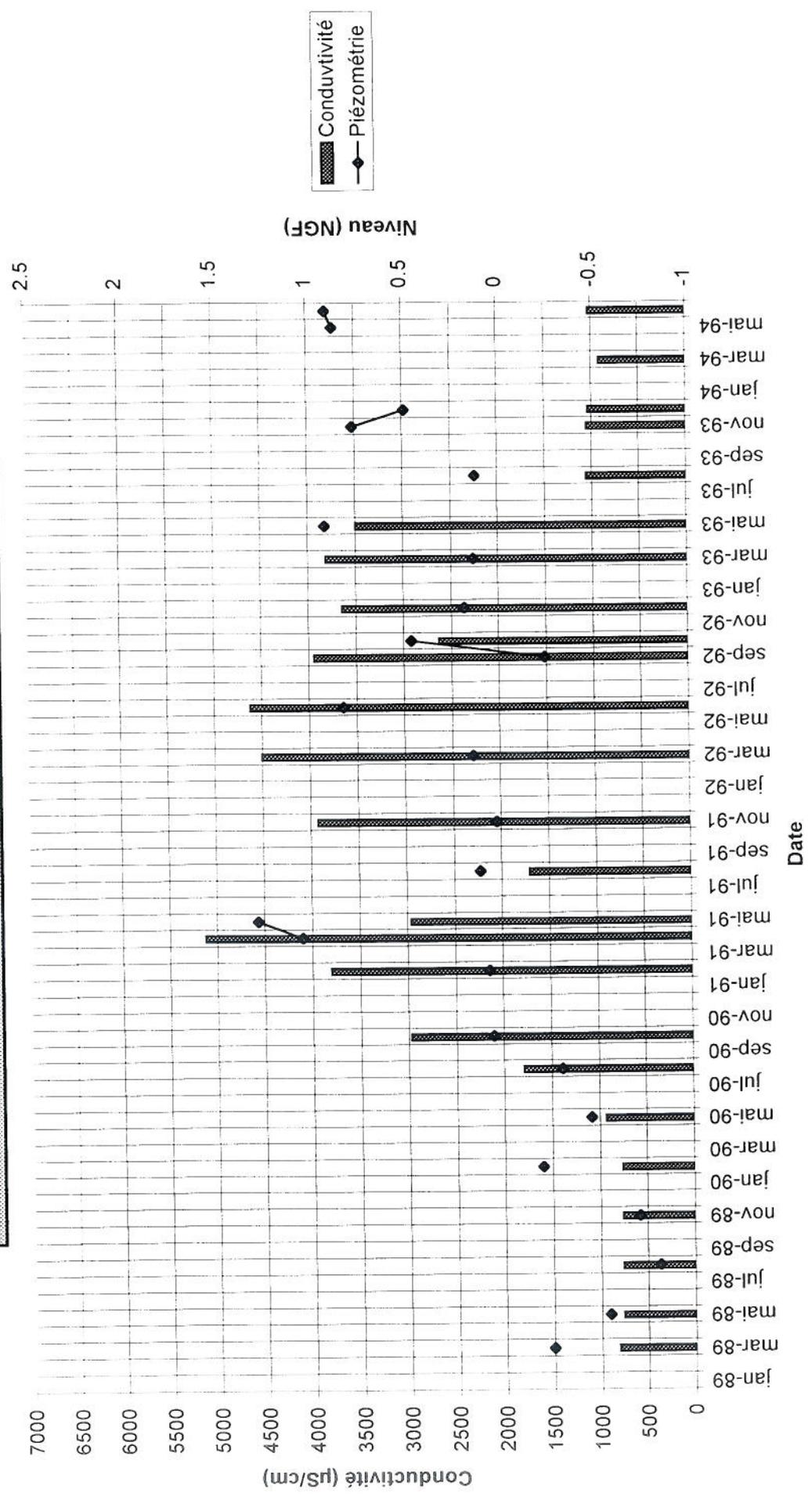
**FIG. B3 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE SUR  
LE PIEZOMETRE 121 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**



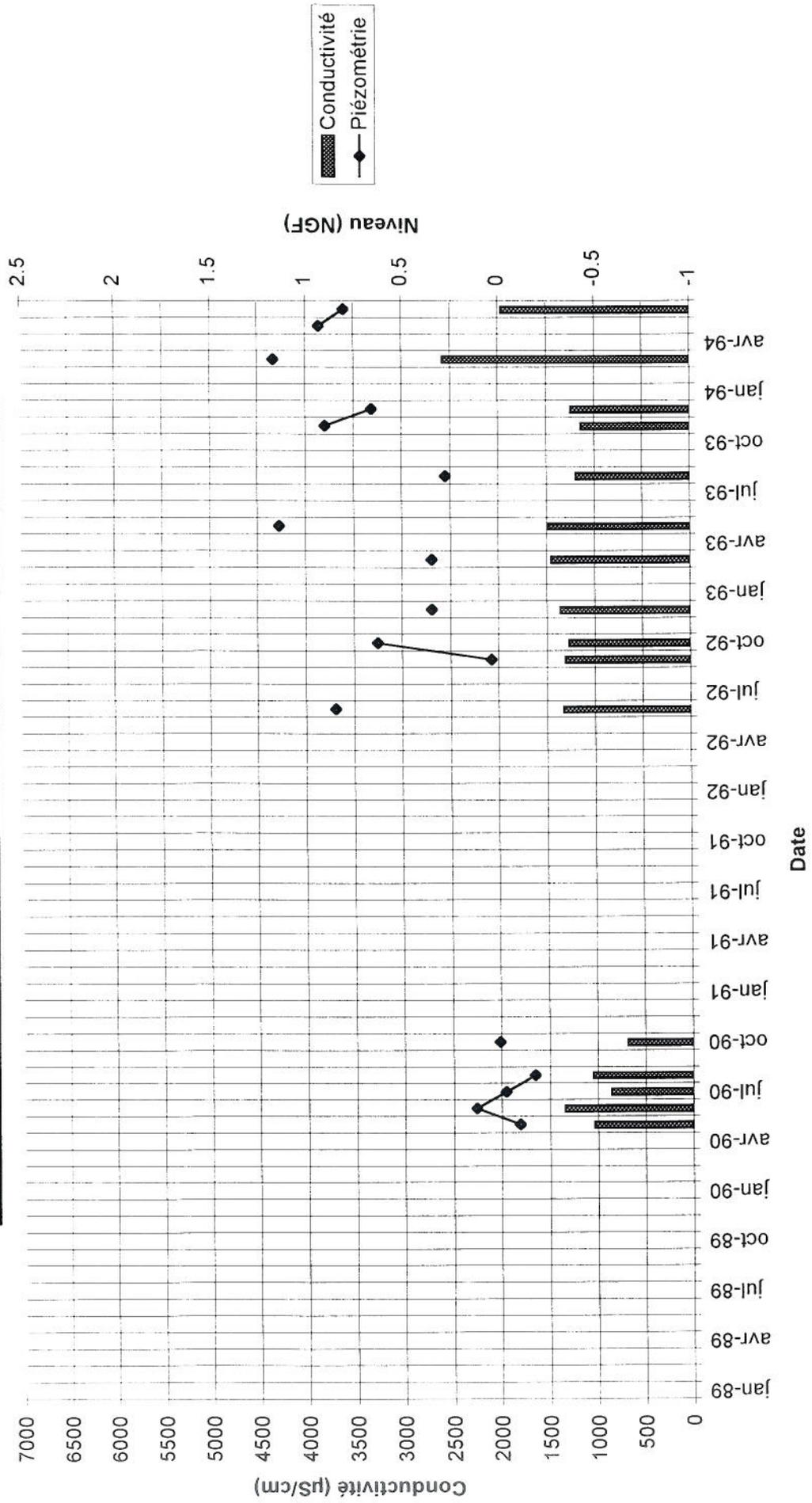
**FIG. B4 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE  
SUR LE PIEZOMETRE 128 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**



**FIG. B5 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE  
SUR LE PIEZOMETRE 182 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**



**FIG. B6 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE  
SUR LE PIEZOMETRE 50 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**



**FIG. B7 : SUIVI PIEZOMETRIQUE ET DE CONDUCTIVITE  
SUR LE PIEZOMETRE 60 - JANVIER 1989 A JUIN 1994.**

