



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie



OFFICE DE
L'ENVIRONNEMENT
DE LA CORSE



DOCUMENT PUBLIC

Salinisation des nappes alluviales côtières

Analyse du phénomène dans l'estuaire de la Solenzara (Corse)

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 97-D-721

décembre 1997
R 39792



Mots clés : Hydrogéologie, Nappe alluviale, Nappe côtière, Estuaire, Biseau salé, Rentrant salé, Corse, Solenzara.

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

BRGM (1997) - Salinisation des nappes alluviales côtières. Analyse du phénomène dans l'estuaire de la Solenzara (Corse). Rap. BRGM R 39792, 71 p., 6 ann.

© BRGM, 1997, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En Corse, les nappes alluviales côtières sont nombreuses, bien individualisées et de faibles extensions. Elles assurent néanmoins une grande part des prélèvements en eau et représentent une ressource importante pour l'île. La surexploitation saisonnière de cette ressource entraîne fréquemment des problèmes d'invasion des eaux douces de la nappe par le milieu marin.

Dans les zones d'estuaire, en effet, les nappes d'accompagnement des fleuves sont très souvent confrontées à deux phénomènes pouvant dégrader la qualité des eaux : le **biseau salé** et le **rentrant salé**.

Le but de l'étude est d'essayer de déterminer l'influence relative des deux phénomènes dans la dégradation des qualités de l'eau d'une nappe alluviale côtière. La prépondérance pouvant être observée de l'un ou l'autre événement peut en effet conduire à recommander des actions correctrices de nature différente.

A la demande de la DIREN, Service des Eaux et des Milieux Aquatiques, le choix du secteur retenu pour l'étude s'est porté sur l'estuaire de la Solenzara qui présente une dégradation sensible de la qualité des eaux de sa nappe d'accompagnement.

Les données recueillies ont permis de mettre en évidence le rôle que peut jouer le rentrant salé dans l'aggravation du processus de salinisation d'une nappe d'estuaire. L'étude a ainsi permis de définir les mesures de prévention à mettre en oeuvre pour retarder autant que possible l'invasion de l'estuaire par les eaux salées et les mesures d'alerte à mettre en oeuvre pour protéger la ressource.

Un rappel des notions de base concernant les biseaux salés est également annexé.

Cette étude a été réalisée dans le cadre des missions de Service public du BRGM, en collaboration avec la DIREN, Services des Eaux et des Milieux Aquatiques. Elle a été cofinancée par l'Office de l'Environnement de la Corse.

Sommaire

1. Objectifs de l'étude	7
2. Situation, cadre géologique et hydrogéologique	9
3. Acquisition des données	11
3.1. Profil de conductivité	11
3.2. Investigations géophysiques.....	12
4. Analyse des résultats	13
4.1. Mesures de conductivité.....	13
4.2. Sondages électriques	13
Conclusion et recommandations	15

Liste des annexes

Ann. 1 - Carte de situation.....	17
Ann. 2 - Profil de salinité de la ligne d'eau	21
Ann. 3 - Carte des interfaces de salinité.....	27
Ann. 4 - Positionnement des ouvrages de contrôle	31
Ann. 5 - Interprétation des sondages électriques.....	35
Ann. 6 - Biseaux salés - rappel des notions de base.....	51



1. Objectifs de l'étude

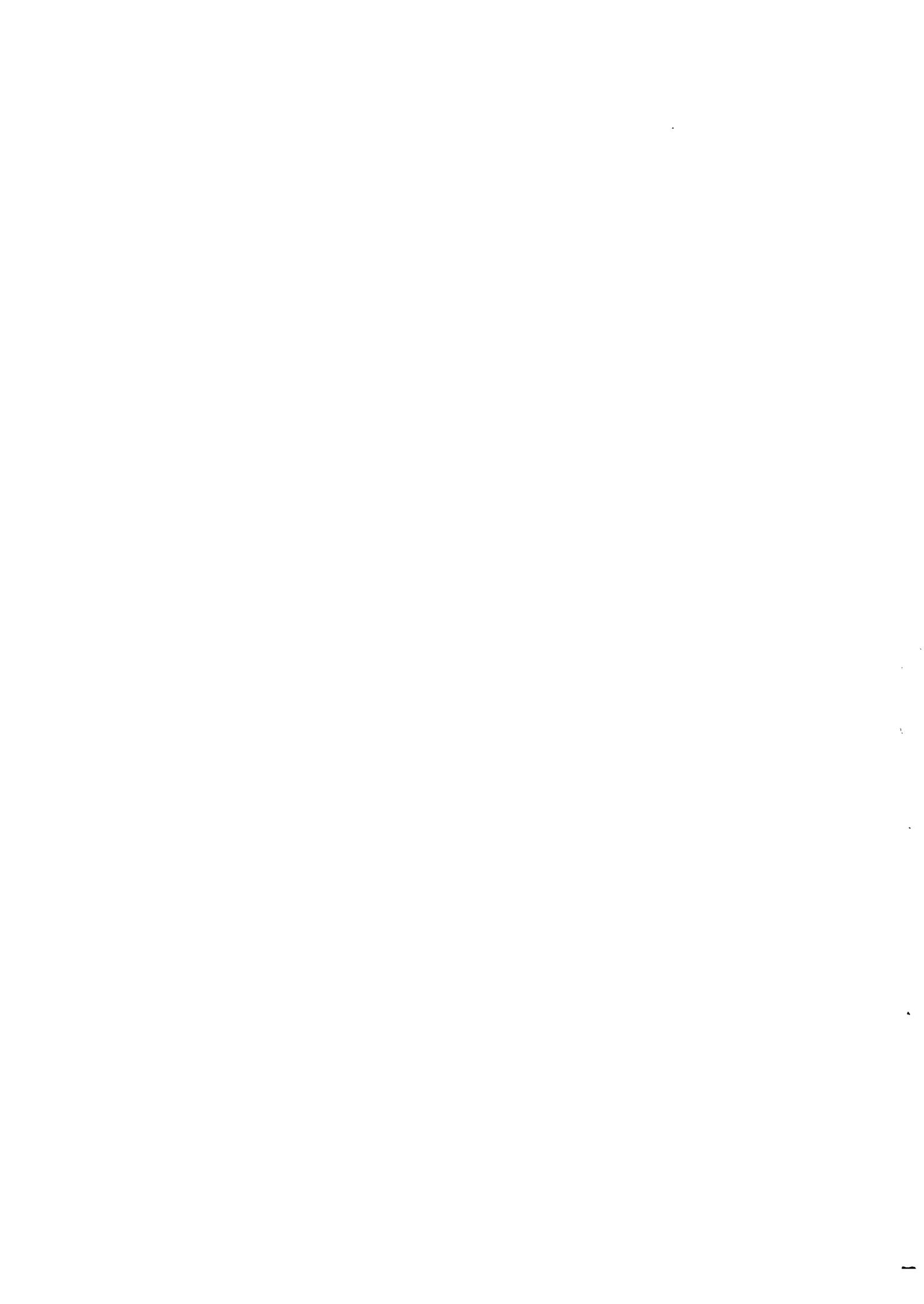
En Corse, les nappes alluviales côtières sont nombreuses, bien individualisées et de faibles extensions. Elles assurent néanmoins une grande part des prélèvements en eau et représentent une ressource importante dans les secteurs côtiers. La surexploitation saisonnière de cette ressource, souvent limitée, entraîne fréquemment des problèmes de pollution et d'invasion des eaux douces de la nappe par le milieu marin.

Dans les zones littorales, en effet, l'eau douce des nappes d'accompagnement des fleuves arrive en contact avec l'eau salée d'origine marine qui envahit les formations du sous-sol côtier. L'équilibre hydrostatique, qui résulte du contact des eaux de densité différente, forme un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, communément appelé le **biseau salé**.

L'exploitation des nappes littorales influe considérablement sur la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce/eau salée. Mais d'autres phénomènes peuvent également dégrader la qualité des eaux de la nappe par augmentation de la salinité. C'est le cas des estuaires en périodes de basses eaux dont le cours peut être envahi par la mer à l'occasion des inversions d'écoulement liées aux marées, à l'invasion par les tempêtes, ou à la stagnation des eaux dans les estuaires. C'est le phénomène dit du **rentrant salé**, qui facilite et aggrave la salinisation de la nappe d'accompagnement.

Le but de la présente étude est d'essayer de déterminer l'influence relative des deux phénomènes dans la dégradation des qualités de l'eau d'une nappe alluviale. La prépondérance pouvant être observée de l'un ou l'autre événement peut en effet conduire à recommander des actions correctrices différentes.

A la demande de la DIREN, Service des Eaux et des Milieux Aquatiques, le choix du secteur retenu pour l'étude s'est porté sur l'estuaire de la Solenzara qui présente une dégradation sensible de la qualité des eaux de sa nappe d'accompagnement.



2. Situation, cadre géologique et hydrogéologique

La rivière Solenzara issue du massif de Bavella se jette dans la mer Tyrrhénienne après un parcours d'une vingtaine de kilomètres.

Son régime torrentiel est caractérisé par une vallée très étroite et dépourvue de sédiments. Seul, son cours inférieur présente un remplissage alluvial d'extension très limitée (200 m de large sur une longueur de 1 200 m) à son arrivée dans la plaine côtière.

Ces alluvions récentes de bas de vallée (alluvions sub-actuelles du lit mineur) sont le siège d'une nappe d'accompagnement en liaison avec le fleuve. Les basses et moyennes terrasses perchées et d'extension très limitées sont quant à elles séparées de la rivière par des affleurements du substratum et ne participent pas à la nappe.

Les formations alluviales sont constituées d'éléments sablo-graveleux grossiers. Elles reposent directement sur un substratum gréseux d'âge éocène. Leur épaisseur est comprise entre 10 et 25 mètres.

Elles sont la seule ressource en eau souterraine de la région et contribuent pour l'essentiel à l'alimentation en eau potable de la ville de Solenzara. Trois ouvrages de captage exploitent cette nappe. Ils sont alignés le long de la rive droite du cours d'eau, à l'amont de l'ancien pont du chemin de fer. Le forage médian, enfoui sous les alluvions, n'a pu être repéré.

En l'absence de tout support cartographique précis depuis les bouleversements provoqués par la crue de 1991, il a été choisi de travailler sur un agrandissement photographique réalisé à l'échelle du 1/5 000ème à partir d'un cliché de la mission aérienne IGN de juillet 1996.

3. Acquisition des données

L'acquisition des données s'est déroulée sur le terrain du 14 au 24 octobre 1997. Elle s'est appuyée sur une méthodologie classique basée sur des mesures de conductivité le long de la ligne d'eau, ainsi que sur la mise en oeuvre d'investigations géophysiques par sondages électriques.

3.1. PROFIL DE CONDUCTIVITE

Une campagne de conductivité des eaux de surface de la Solenzara a été effectuée le 14 octobre en période d'étiage. A cette date, le débit moyen total relevé à la station de mesure de Canniciu était de 258 l/s. Le débit d'écoulement superficiel libre non infiltré de la Solenzara au niveau du site a été estimé ce même jour, quant à lui, à une valeur comprise entre 100 et 200 l/s.

Seize points de mesure ont été réalisés sur le secteur de l'étude, depuis 500 m à l'amont de la R.N. 198 jusqu'à l'embouchure du fleuve, soit sur 1,2 km environ.

Les résultats sont exprimés en gramme d'équivalent NaCl par litre d'eau. Ils montrent (cf. ann. 2) de toute évidence une remontée des eaux salées dans l'estuaire jusqu'à hauteur de la RN 198.

Trois plages de minéralisation peuvent être observées :

- le secteur amont, depuis le début des formations alluviales jusqu'au seuil situé à la verticale du pont de la route nationale, est exempt de toute contamination et présente des concentrations de 0,1 g/l en moyenne ;
- le secteur médian, développé sur 250 m environ à l'aval du pont présente des teneurs comprises entre 0,5 et 0,7 g/l. Ce segment dont l'origine précise se situe à hauteur du seuil artificiel mis en place en juillet 1997 pour la protection des ouvrages de captage, se prolonge jusqu'à la confluence du fossé qui borde l'accès du camping ;
- le secteur aval est caractérisé par une augmentation brutale des teneurs en équivalent NaCl comprises entre 11,2 g/l à hauteur de la confluence du fossé et 14,4 g/l en bordure de la dune fermant l'estuaire (pour 42 g/l côté mer).

On notera qu'à la date des mesures, le grau était ensablé, interdisant de ce fait, tout échange direct entre la mer et le fleuve.

3.2. INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES

Afin de préciser la position du biseau salé en profondeur, une campagne de sondages électriques a été effectuée. Elle a consisté en la mise en oeuvre de 14 sondages électriques de type quadripôle d'une longueur de ligne d'émission comprise entre 40 et 120 m.

Les interprétations (abaques Schumberger et logiciel Sondèle) fournies en annexe permettent de déterminer l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. En l'absence de profil vertical de salinité de référence, elles ne fournissent toutefois pas les valeurs de la salinisation observée.

4. Analyse des résultats

4.1. MESURES DE CONDUCTIVITE

L'analyse du profil de salinité des eaux exprimé en g/l équivalent NaCl le long du fleuve (cf. ann. 2) montre nettement l'influence du phénomène de "rentrant salé" et permet de partager en trois secteurs différents la zone de l'étude. De l'aval vers l'amont :

- une zone fortement envahie par la mer qui s'étend dans l'estuaire sur 400 m depuis la dune côtière ;
- puis une zone de mélange eau douce-eau salée qui s'étend ensuite sur 250 m jusqu'au seuil artificiel mis en place en juillet 1997 au niveau du pont ;
- enfin une zone vierge de toute salinité à l'amont du seuil.

On constate sur le profil que le seuil fait visiblement barrage à une avancée encore plus importante des eaux superficielles salées dans la Solenzara. Il évite au mélange de se propager plus en amont dans le fleuve, et protège ainsi la ressource exploitée d'un envahissement direct en période de basses eaux.

4.2. SONDAGES ELECTRIQUES

L'interprétation des sondages électriques permet de préciser la géométrie des dépôts alluviaux et l'interface eau douce-eau salée, lorsque celui-ci est présent.

L'analyse des diagrammes montre la succession de 2 à 3 horizons distincts :

- les alluvions dénoyées ;
- les alluvions en eau, qu'elle soit douce ou salée ;
- le substratum, quand il n'est pas masqué par de trop fortes conductivités.

Les difficultés de mise en oeuvre (longueurs de ligne, canalisations) ne nous ont pas permis d'appréhender l'ensemble de cette succession sur tous les dispositifs. Néanmoins, la présence d'eau salée, lorsqu'elle existe, a été facilement décelée.

La carte d'iso-profondeur des niveaux salés (cf. ann. 3), que permet de tracer ces sondages électriques, met en évidence l'avancée de l'intrusion des eaux salées dans l'estuaire. Elle permet également de visualiser un effet de pénétration en "doigt de gant" le long du fleuve, effet très probablement induit par le rentrant salé et qui aggrave le phénomène de salinisation. Elle montre enfin le rôle de barrière hydraulique joué par la terrasse en rive gauche.



Conclusion et recommandations

L'étude de l'estuaire de la Solenzara a permis de mettre en évidence le rôle important que joue le phénomène de rentrant salé dans la salinisation d'une nappe alluviale d'estuaire. Le biseau salé reste évidemment le processus principal de cette salinisation, mais le rentrant salé aggrave le phénomène au moment même où il est le plus critique, c'est-à-dire à une période où la ressource est minimale et les besoins de prélèvement les plus forts. Le biseau salé, pénétrant déjà profondément à l'intérieur de la nappe, est alors renforcé par l'invasion d'eau saumâtre superficielle.

La mise en place d'un seuil provisoire sur la Solenzara, au niveau du pont, a visiblement permis de protéger les captages pendant la période d'étiage. On notera en particulier qu'il a évité l'accélération du processus de salinisation qui se développait dans l'axe du fleuve. Il n'a pas empêché, néanmoins, l'invasion progressive des terrains alluviaux par le biseau salé consécutive à la surexploitation de la nappe alluviale par pompage.

Le volume de l'aquifère étant restreint et figé, il apparaît donc impératif d'optimiser au mieux les moyens à mettre en oeuvre pour réduire les effets des deux phénomènes observés et conserver un "volume utile" d'eau douce aussi important que possible :

- le **rentrant salé** doit être prioritairement combattu. Il faut tout d'abord pérenniser le seuil au niveau du pont (c'est la zone la plus étroite) en créant un ouvrage définitif dont le rôle sera de sécuriser les puits de captage situés à l'amont. Ainsi cet ouvrage agira quelles que soient les conditions d'écoulement dans le fleuve et dans son estuaire. En période de basses-eaux, un seuil provisoire complémentaire pourra facilement être créé à l'aval, par exemple au niveau du resserrement de la terrasse. Le matériau existe sur place, les accès sont aisés. Ce deuxième ouvrage aura pour but de réduire autant que possible la zone de mélange observée en période de basses-eaux et donc de limiter les effets du rentrant salé pendant la période critique de l'étiage ;
- le **biseau salé** devra être surveillé et combattu par les moyens classiquement utilisés en hydrogéologie. La surveillance sera réalisée au moyen de deux piézomètres d'observations.

Le premier, à l'aval du pont, déclenchera des mesures de prévention : vérification de l'efficacité des seuils de protection du rentrant salé, réduction du débit de prélèvement dans la nappe à un niveau compatible avec le débit de la Solenzara, et éventuellement augmentation de la fréquence des contrôles sur le deuxième piézomètre et sur les forages.

Le deuxième piézomètre, situé à l'amont du seuil permanent, entre le pont et les puits de captage, sera un piézomètre d'alerte. Une augmentation de la salinité détectée dans ce piézomètre pourra déclencher une réduction encore plus sévère, voire un arrêt total des prélèvements.

Le **débit d'exhaure** des deux puits de captage devra être maintenu à un niveau compatible avec celui de la Solenzara. C'est surtout vrai en période de basses-eaux, dès que l'alerte préventive sera donnée par le piézomètre le plus aval. On recommandera alors d'exploiter les captages en évitant de dépasser le débit d'étiage observé sur le fleuve. Des mesures continues de débit sont effectuées par la DIREN sur le cours de la Solenzara, à Canniciu, dans une zone où le fleuve s'écoule directement sur le substratum (voir les données fournies pour les mois d'octobre et de novembre en annexe 2). Cette station pourrait donc servir de référence pour déterminer un débit moyen de prélèvement à ne pas dépasser sur les captages.

ANNEXE 1

Carte de situation

CARTE DE SITUATION

	Limite des alluvions
	Sondages électriques
	Puits de captage
	Seuil artificiel





ANNEXE 2

Profil de salinité de la ligne d'eau



Débit moyen journalier de la SOLENZARA

Station de Canniciu - Octobre 1997

Gestionnaire : DIREN Corse

Exprimé en litre par seconde

Date	Débit (l/s)	Date	Débit (l/s)
01/10/97	196	17/10/97	249
02/10/97	200	18/10/97	246
03/10/97	203	19/10/97	243
04/10/97	203	20/10/97	240
05/10/97	203	21/10/97	237
06/10/97	2870	22/10/97	302
07/10/97	980	23/10/97	303
08/10/97	481	24/10/97	348
09/10/97	398	25/10/97	357
10/10/97	372	26/10/97	328
11/10/97	324	27/10/97	302
12/10/97	282	28/10/97	3280
13/10/97	261	29/10/97	6150
14/10/97	258	30/10/97	2860
15/10/97	255	31/10/97	2250
16/10/97	252		

Débit moyen mensuel du mois d'octobre : 820 l/s
Débit moyen journalier maximum du mois : 6 150 l/s
Débit maximum instantané du mois : 13 100 l/s

Débit moyen journalier de la SOLENZARA
Station de Canniciu - Novembre 1997
Gestionnaire : DIREN Corse
Exprimé en litre par seconde

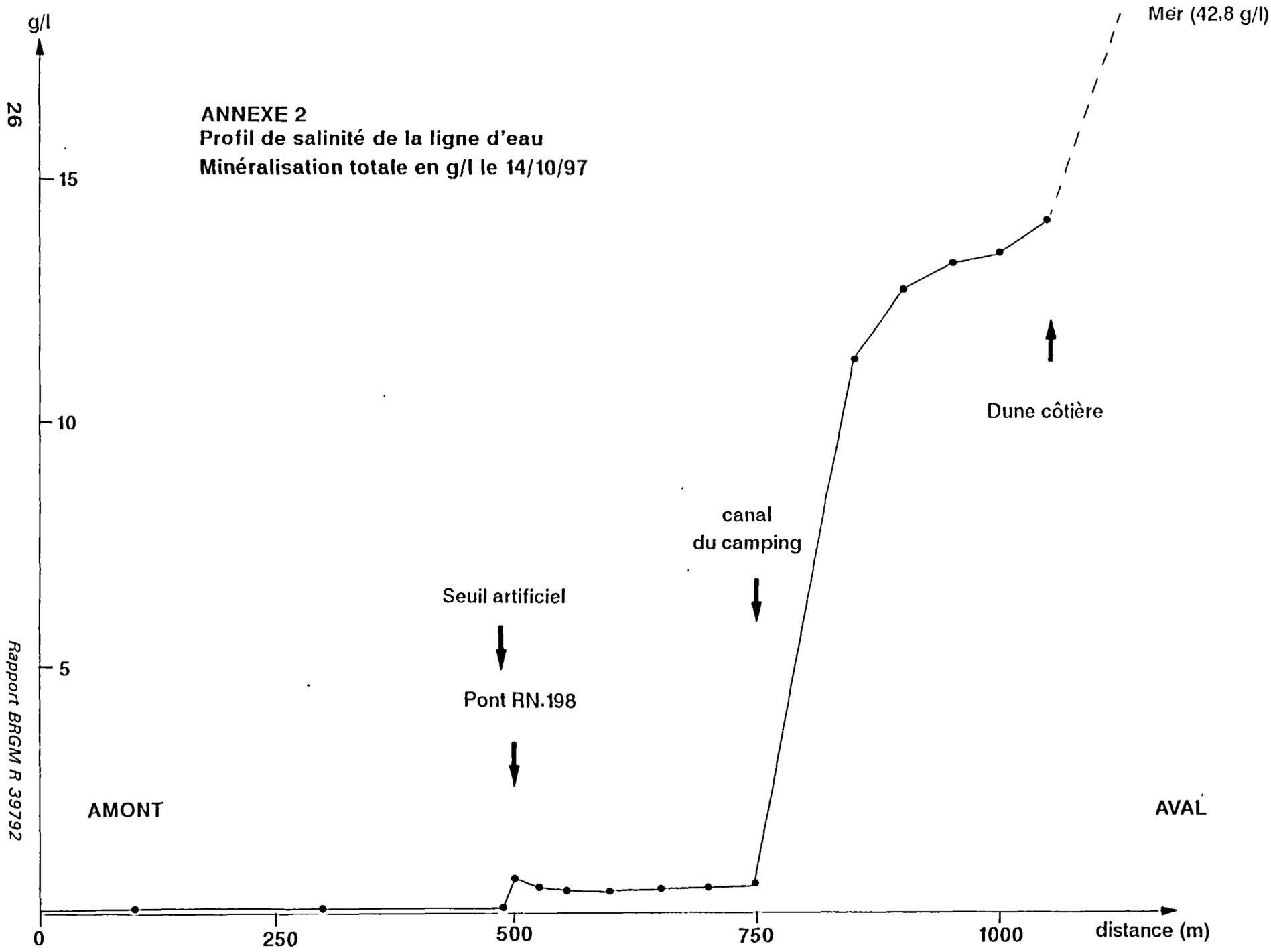
Date	Débit (l/s)	Date	Débit (l/s)
01/11/97	1340	17/11/97	800
02/11/97	800	18/11/97	700
03/11/97	655	19/11/97	1120
04/11/97	555	20/11/97	6100
05/11/97	530	21/11/97	4060
06/11/97	510	22/11/97	12400
07/11/97	1090	23/11/97	14900
08/11/97	910	24/11/97	6850
09/11/97	6400	25/11/97	4260
10/11/97	5700	26/11/97	4870
11/11/97	2300	27/11/97	35000
12/11/97	12000	28/11/97	11700
13/11/97	6750	29/11/97	7450
14/11/97	3250	30/11/97	6400
15/11/97	1720		
16/11/97	1070		

Débit moyen mensuel du mois de novembre : 5 400 l/s
Débit moyen journalier maximum du mois : 35 000 l/s
Débit maximum instantané du mois : 80 500 l/s

Salinité de la SOLENZARA (14/10/1997)

Minéralisation totale exprimée en mg/l équivalent NaCl

N° Prélèvement	Temp. °C Eau	Conduct. μ S à 25°C	Minéralisation mg/l	Observations
1	17,8	119	101,49	Amont, débit fleuve Q ~ 150 l/s
2	17,4	120	102,34	En face ruine (amont seuil)
3	17,6	118,3	100,9	Seuil niveau levée
4	17,9	1070	730,47	Sous le pont (10 m aval seuil)
5	17,6	890	573,45	à + 25 m aval du pont
6	17,8	800	515,46	à + 50 m
7	17,5	756	487,10	à + 100 m
8	17,4	815	525,10	à + 150 m
9	17	803	517,39	à + 200 m
10	17,1	930	634	à + 250 m
11	17,9	14700	11251	Rive gauche à hauteur canal
12	17,7	16600	12705	+ 50 m aval du canal
13	17,6	17300	13241	+ 100 m
14	17,5	17600	13470	+ 150 m
15	17,3	18500	14159	Bordure intérieure dune côtière
16	20,4	56000	42861	Mer



Salinisation des nappes alluviales côtières - Estuaire de la Solenzara (Corse)

ANNEXE 3

Carte des interfaces de salinité

CARTE DES INTERFACES DE SALINITE

5

Courbe d'iso-profondeur du biseau salé

1 g/l 1

Salinisation des eaux de surface



ANNEXE 4

Positionnement des ouvrages de contrôle

POSITIONNEMENT DES OUVRAGES DE CONTROLE



Piézomètres



Seuil définitif

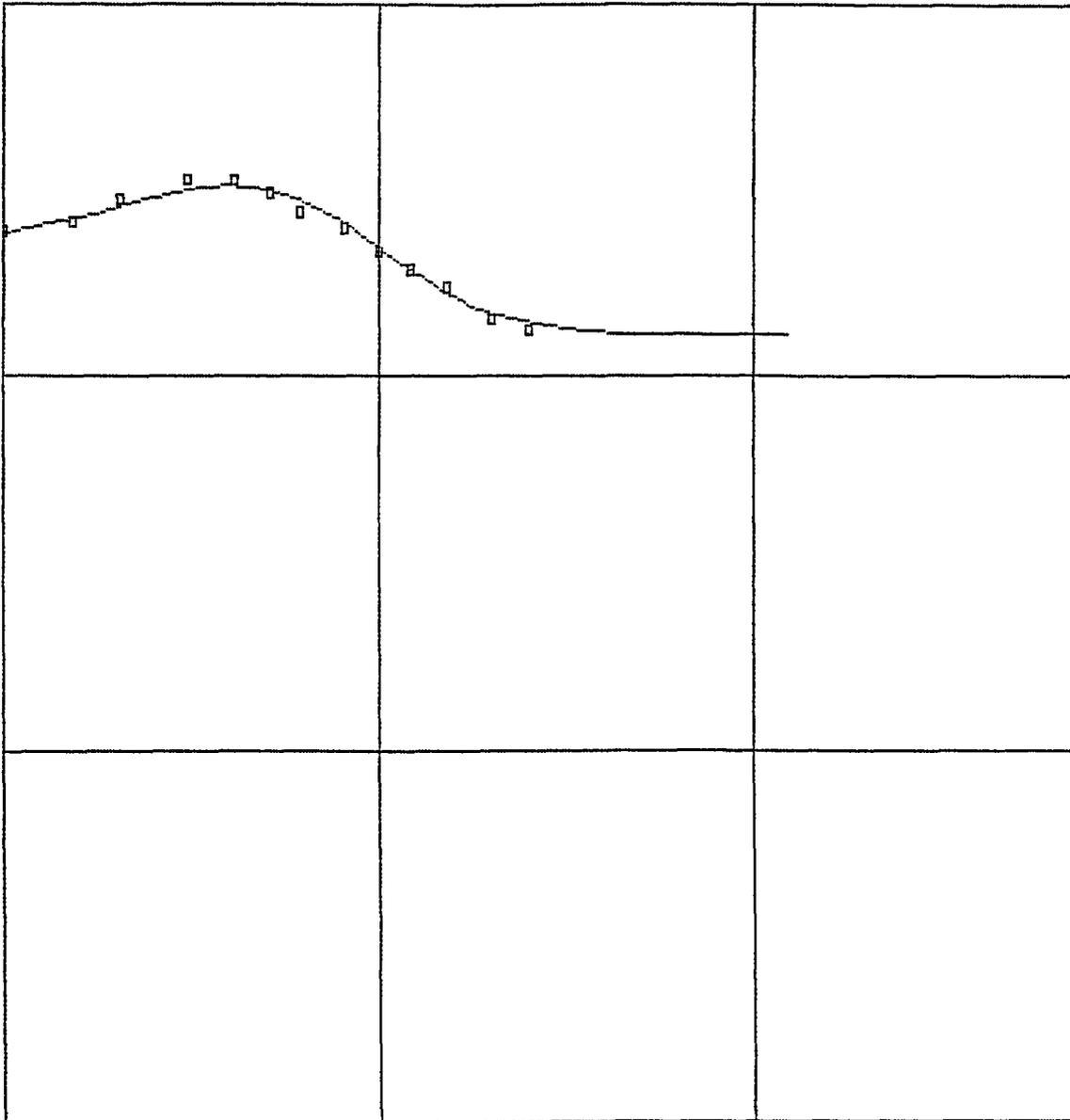


Seuil provisoire



ANNEXE 5

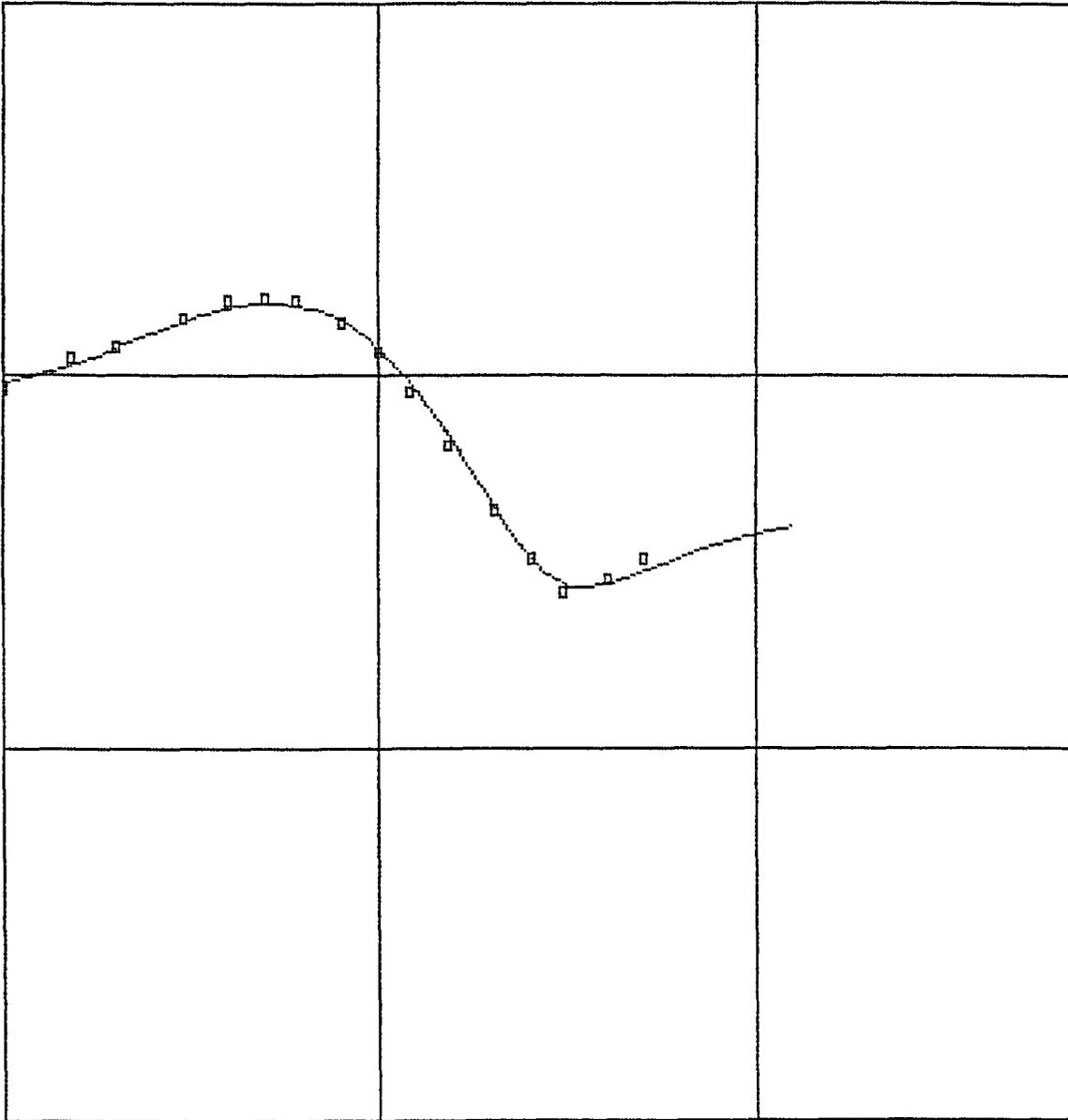
Interprétation des sondages électriques



SOLENZARA

S.E. :1

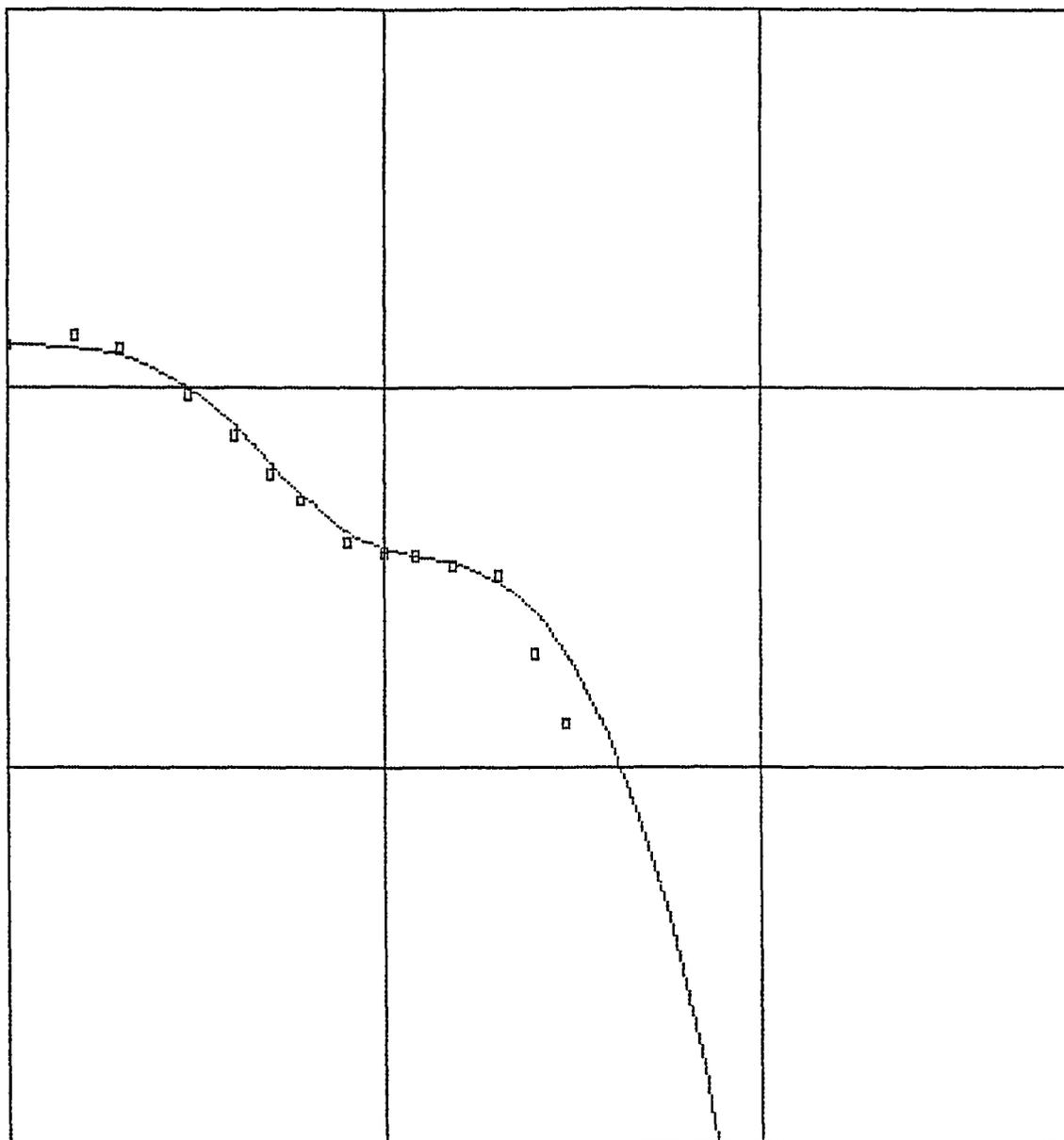
couche	résistivité	épaisseur
1	230.00	1.00
2	520.00	2.00
3	130.00	10.00



SOLENZARA

S.E. :2

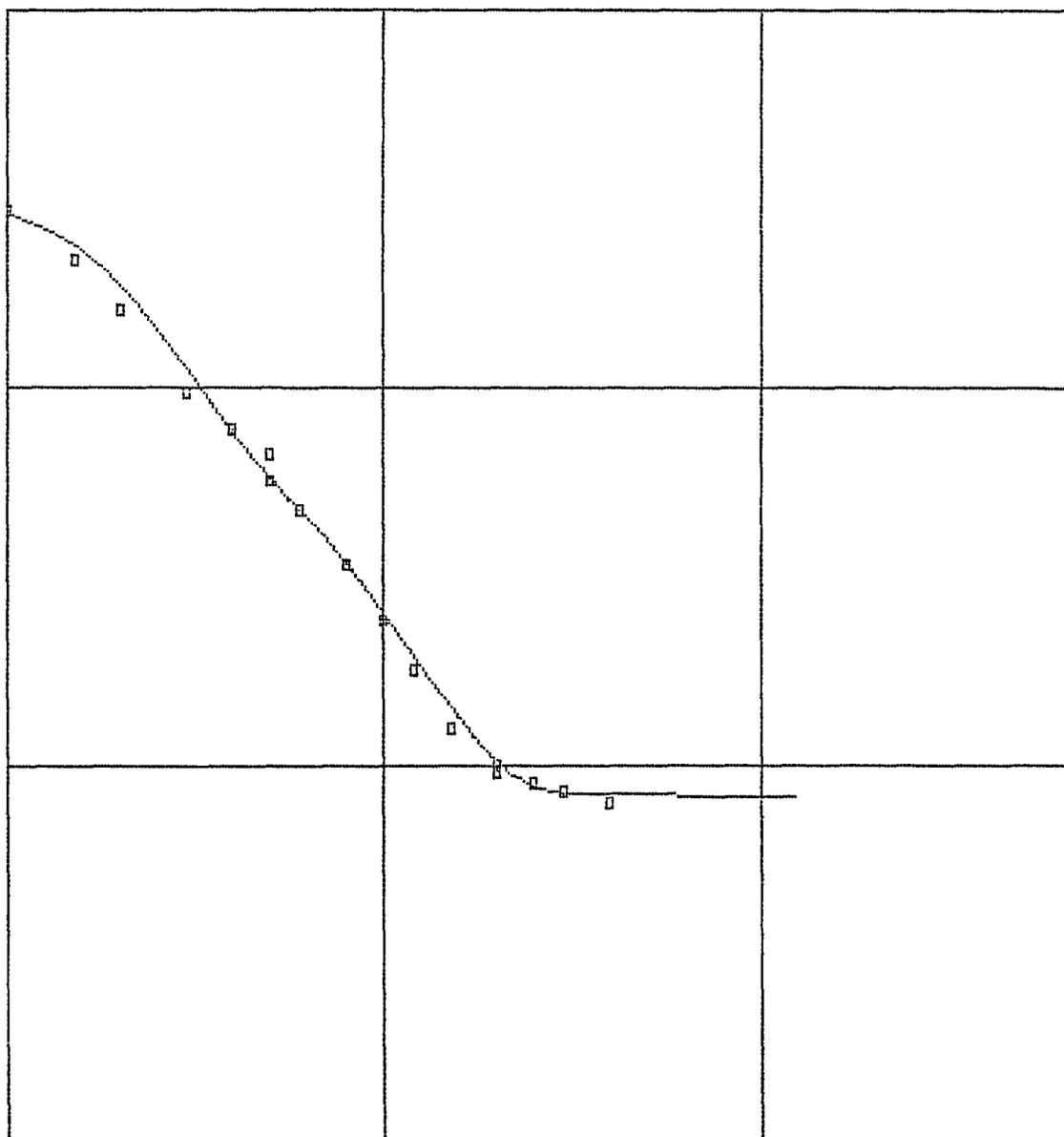
couche	résistivité	épaisseur
1	900.00	1.10
2	2800.00	3.20
3	140.00	11.00
4	250.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :3

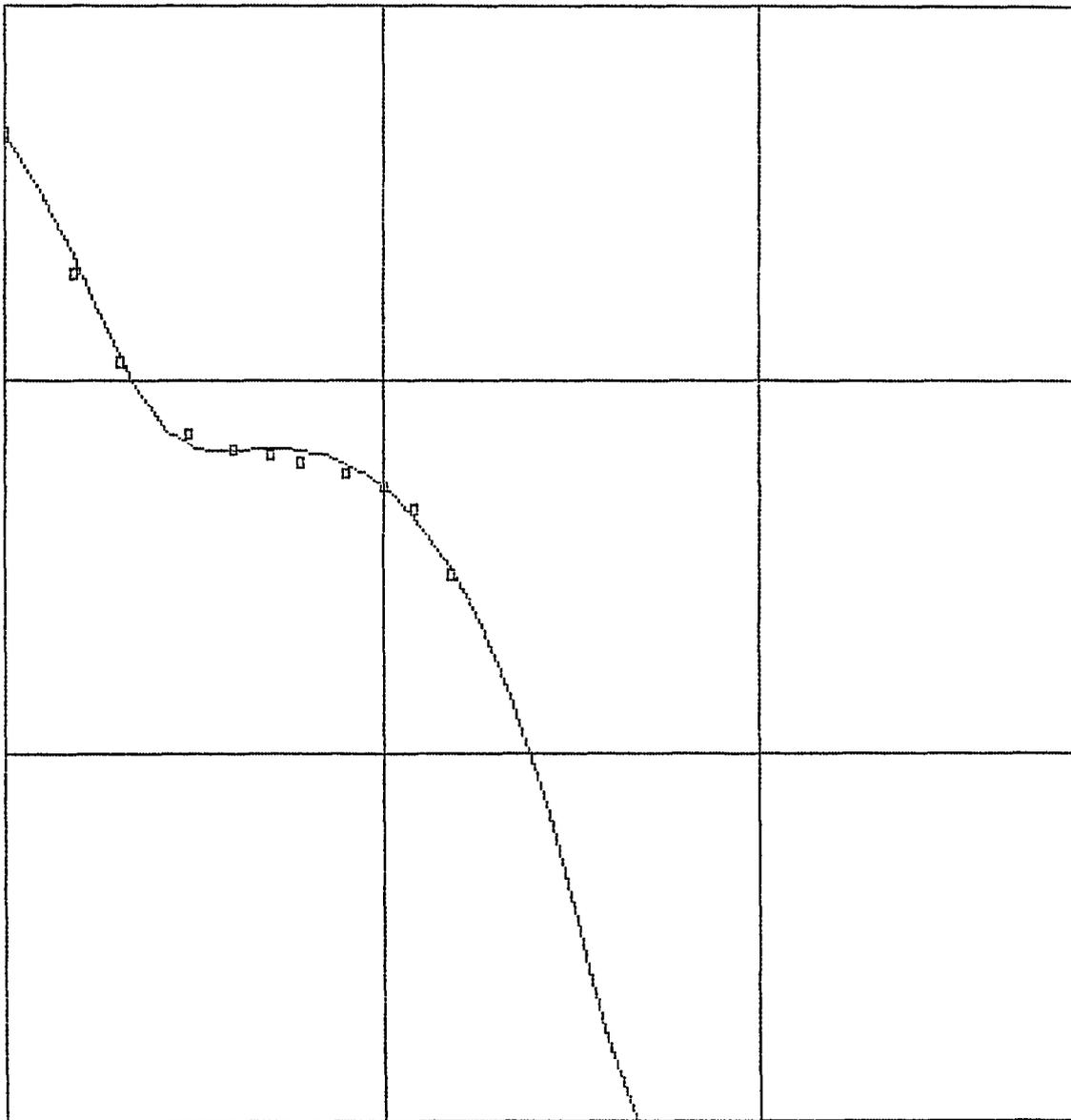
couche	résistivité	épaisseur
1	1300.00	1.00
2	2000.00	0.70
3	180.00	1.50
4	450.00	12.00
5	0.10	0.00



SOLENZARA

S.E. :4

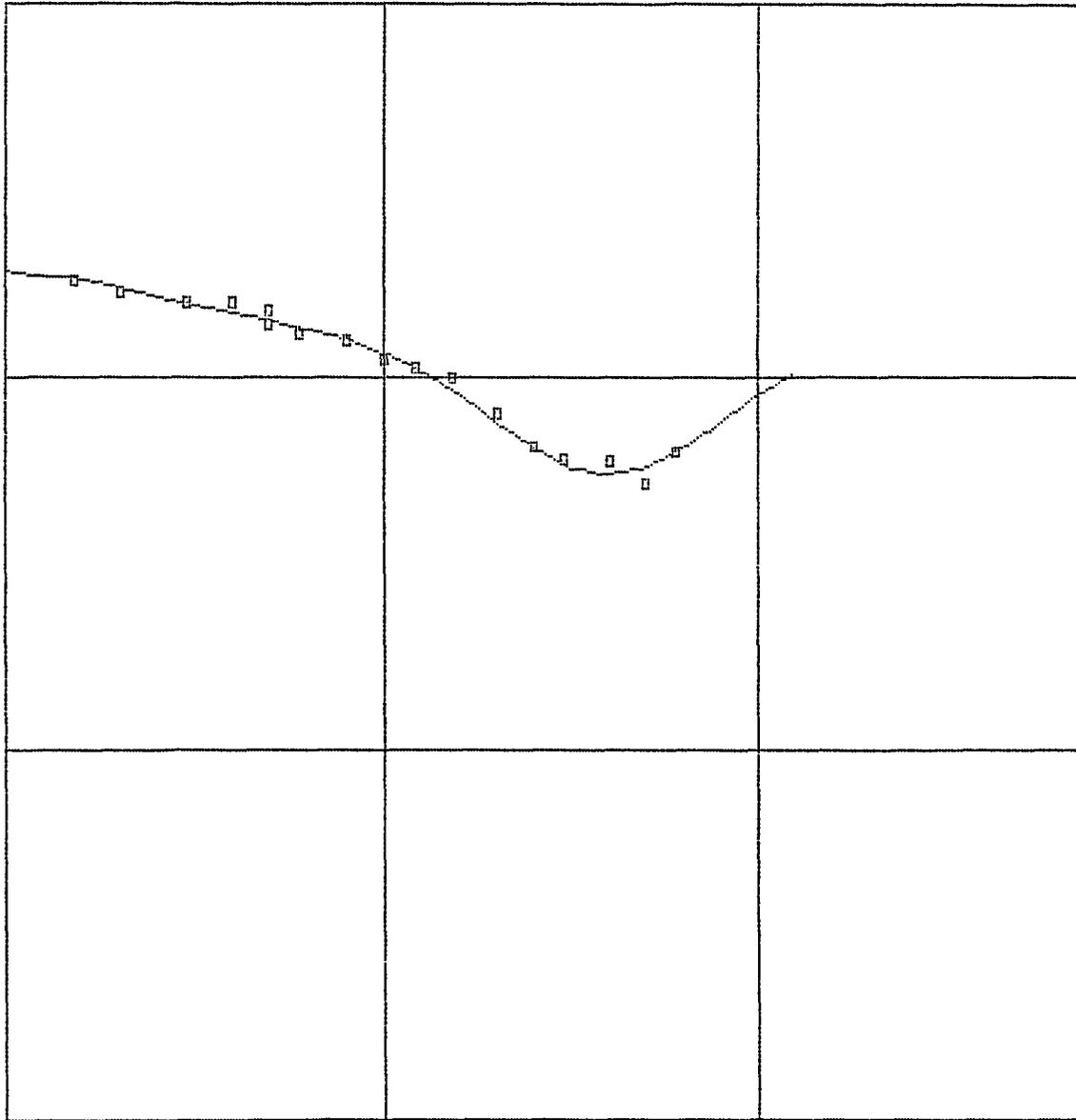
couche	résistivité	épaisseur
1	330.00	1.00
2	55.00	3.80
3	8.00	15.00



SOLENZARA

S.E. :5

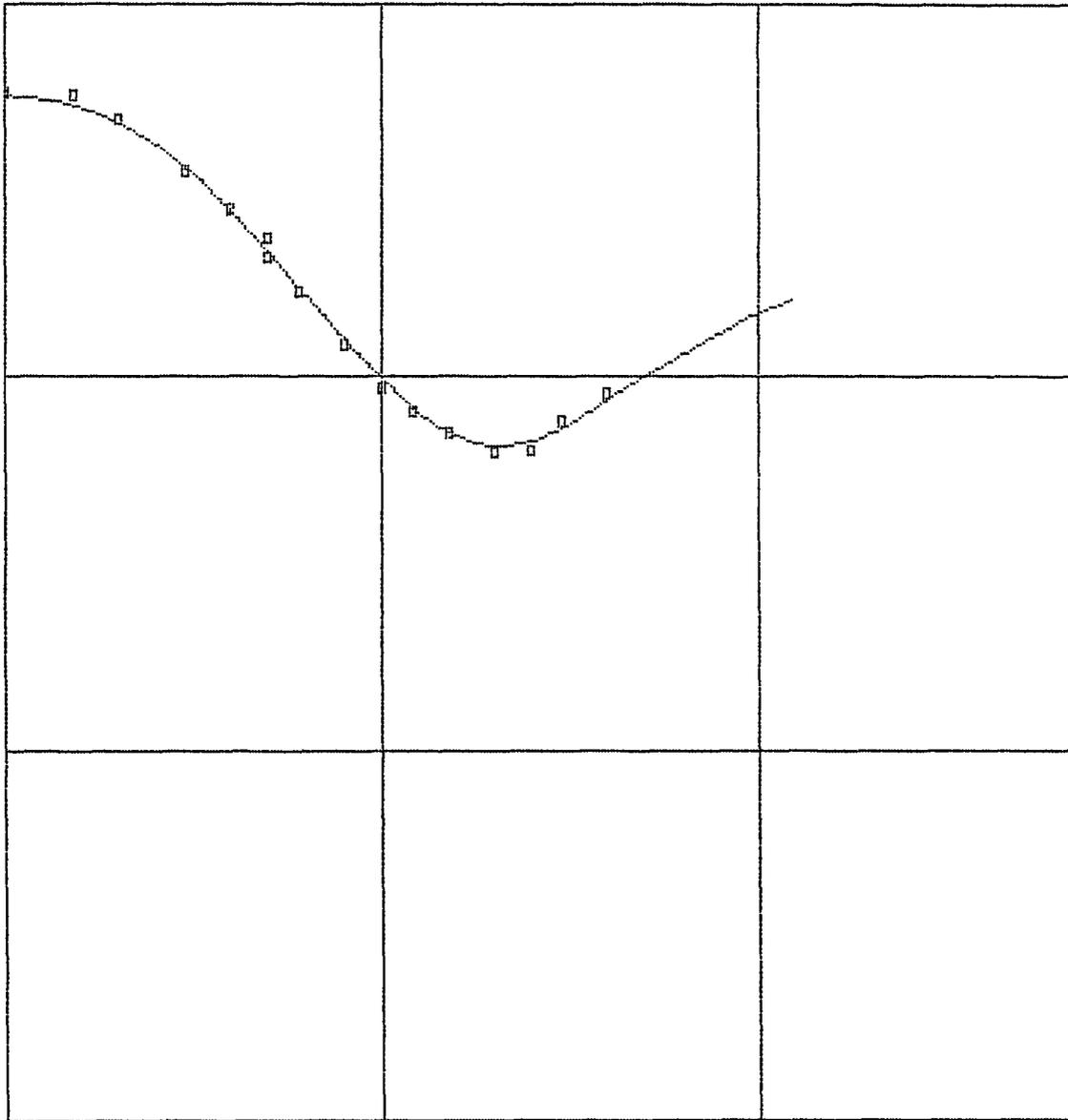
couche	résistivité	épaisseur
1	950.00	0.50
2	50.00	1.20
3	80.00	5.50
4	0.10	0.00



SOLENZARA

S.E. :6

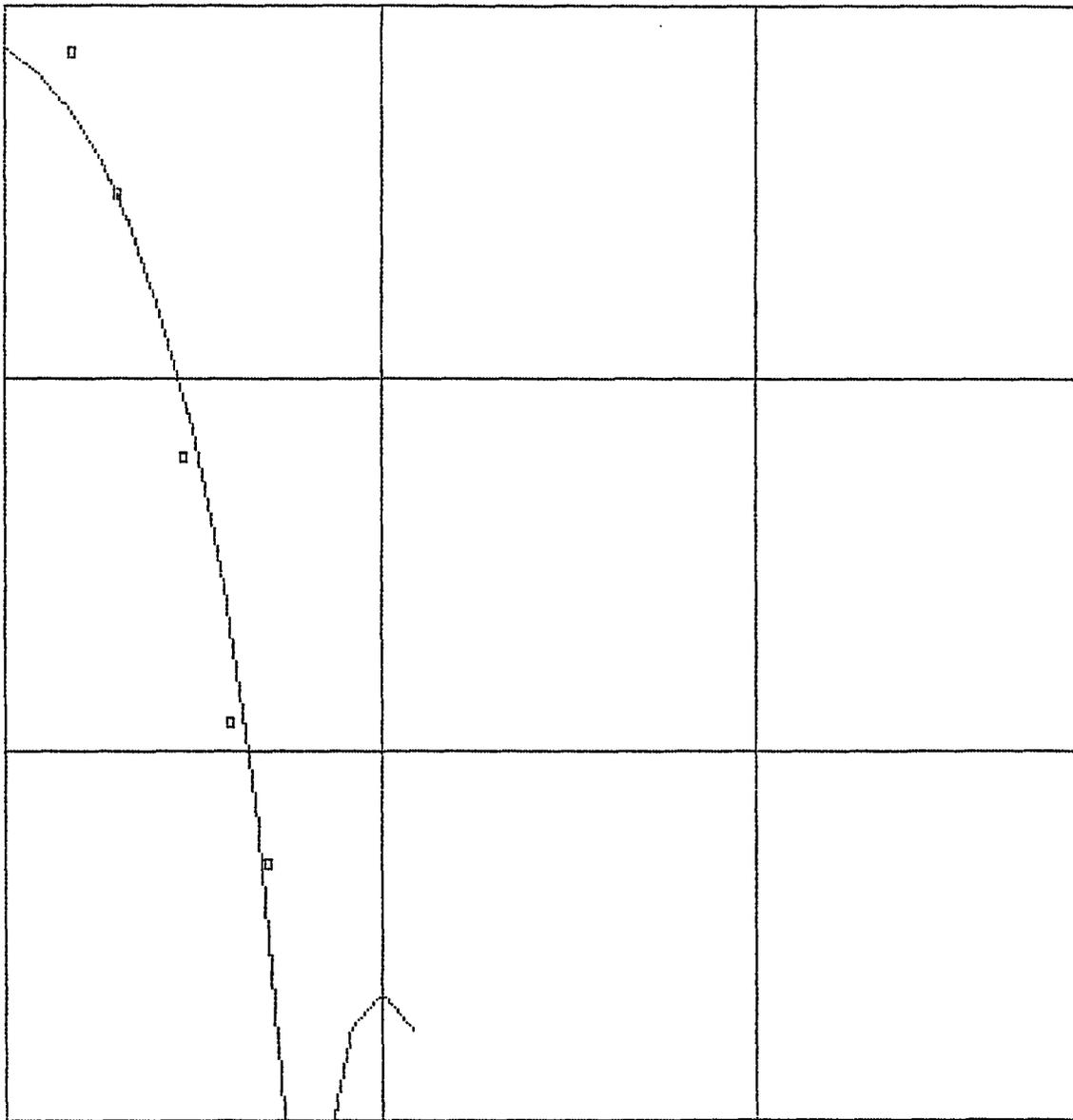
couche	résistivité	épaisseur
1	200.00	1.00
2	140.00	5.00
3	80.00	6.00
4	30.00	20.00
5	250.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :7

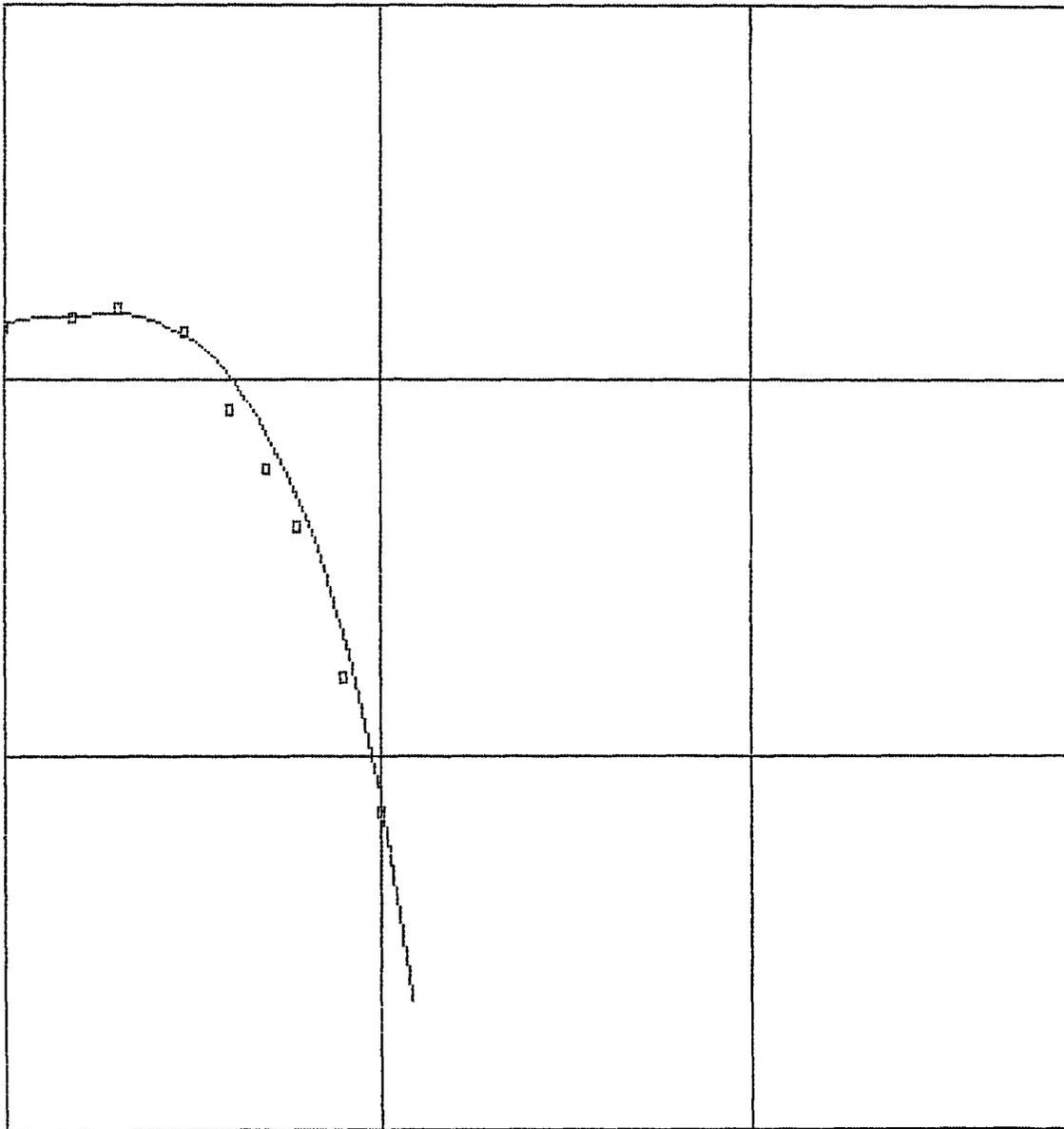
couche	résistivité	épaisseur
1	600.00	1.50
2	150.00	3.50
3	45.00	14.00
4	250.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :8

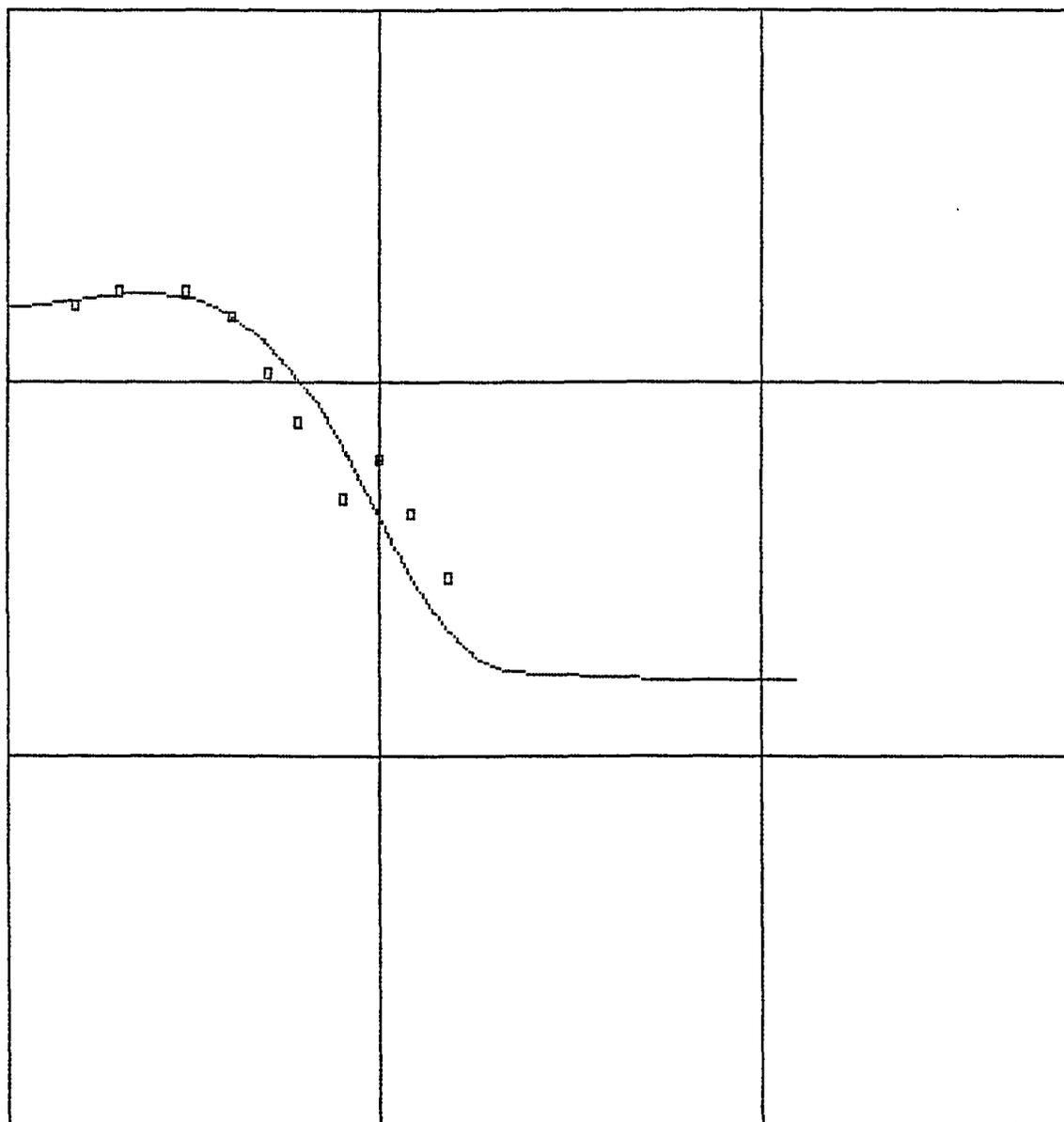
couche	résistivité	épaisseur
1	1000.00	0.85
2	1.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :9

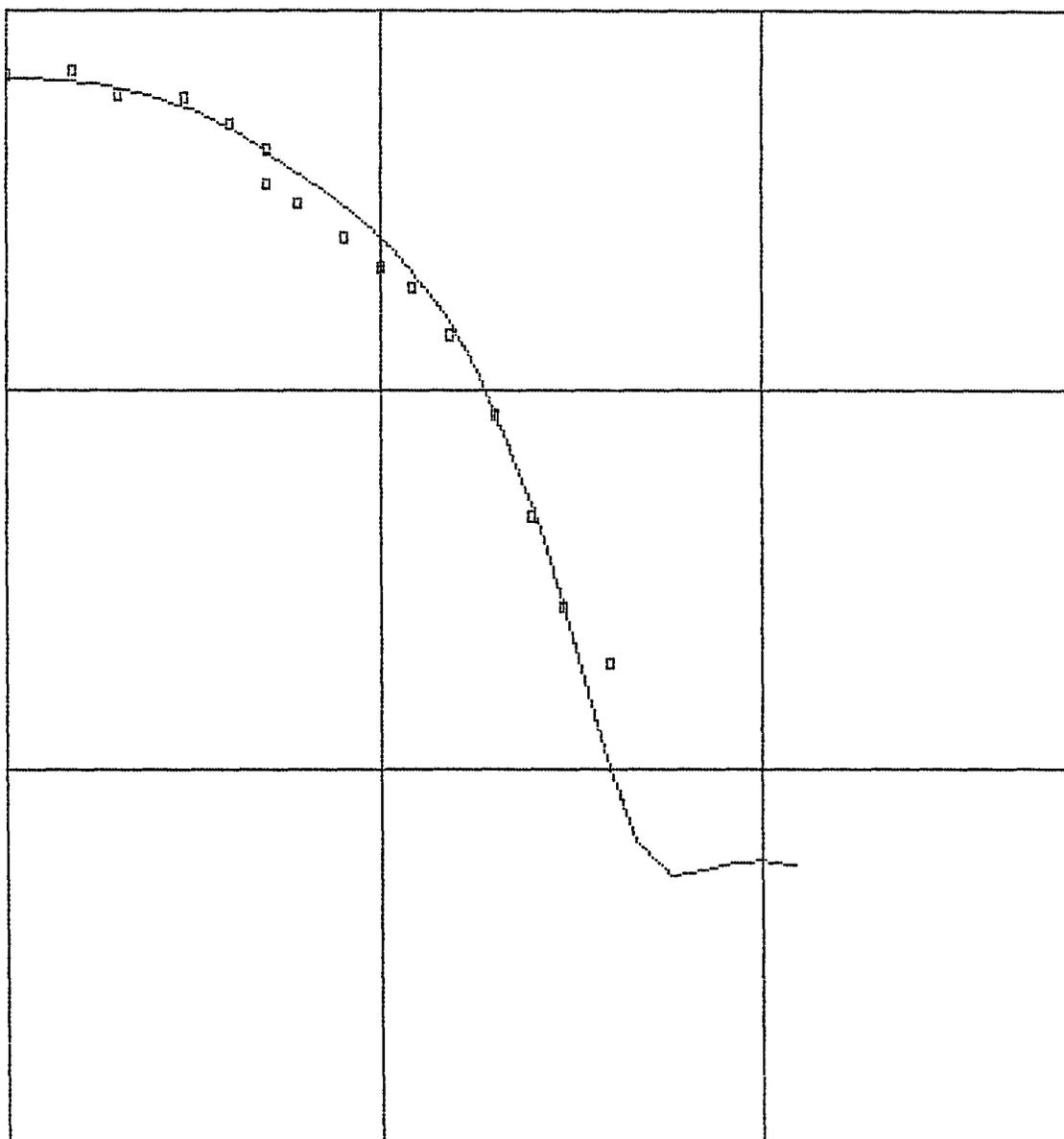
couche	résistivité	épaisseur
1	1350.00	0.90
2	3500.00	0.80
3	1.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :10

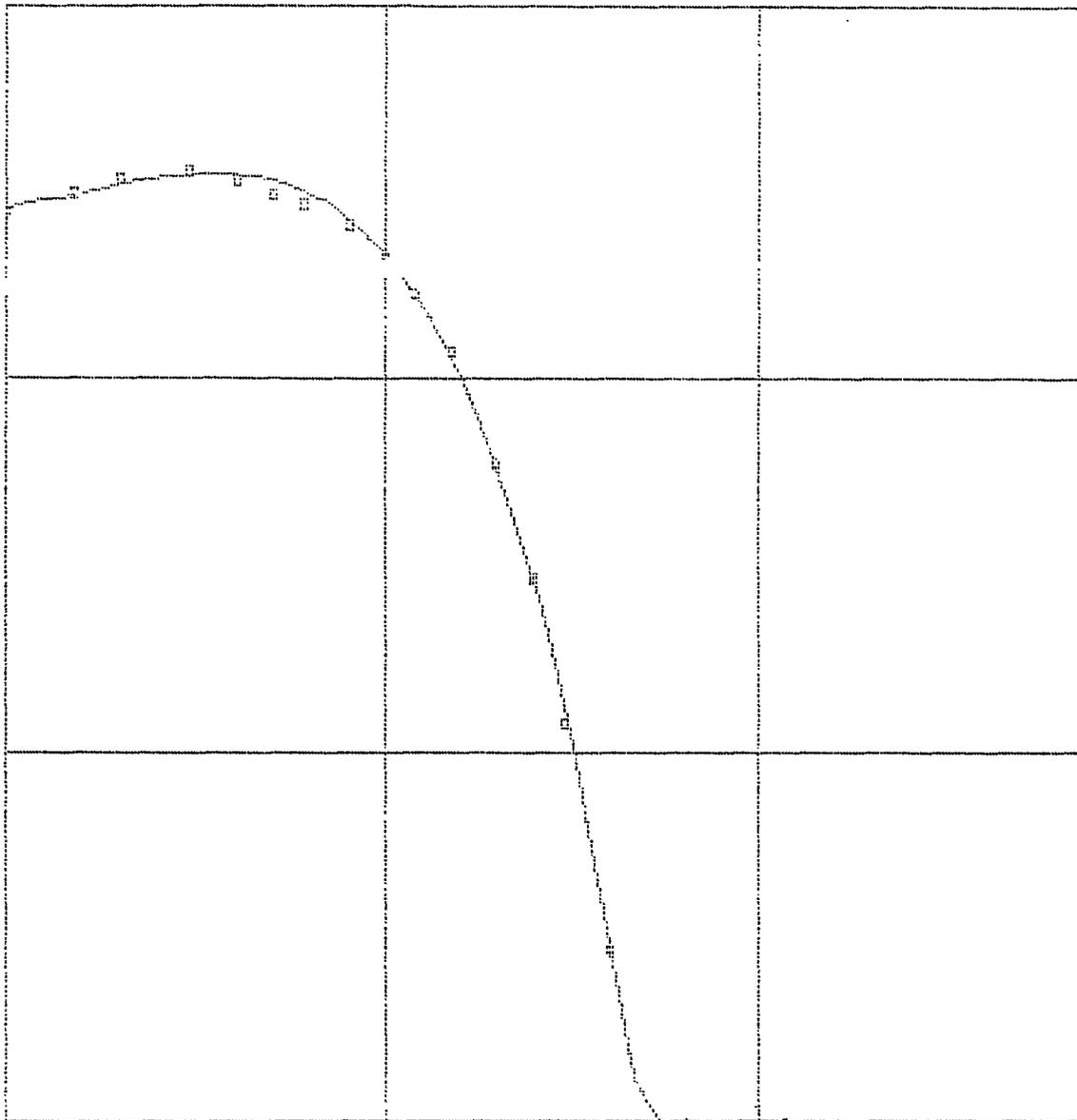
couche	résistivité	épaisseur
1	1500.00	0.80
2	2500.00	1.80
3	160.00	5.00



SOLENZARA

S.E. :11

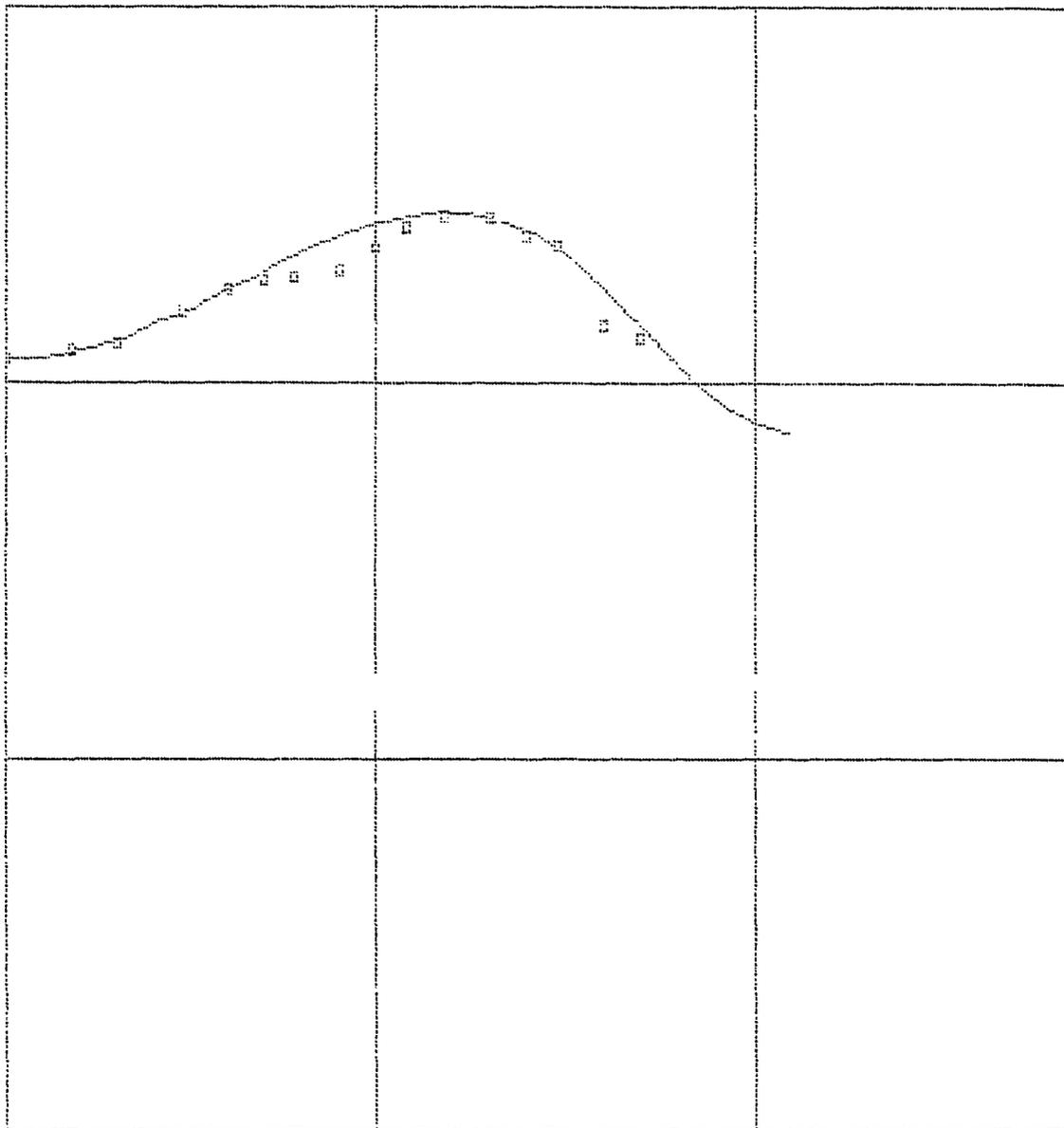
couche	résistivité	épaisseur
1	680.00	2.00
2	280.00	7.00
3	5.00	0.00



ZARA

S.E. :12

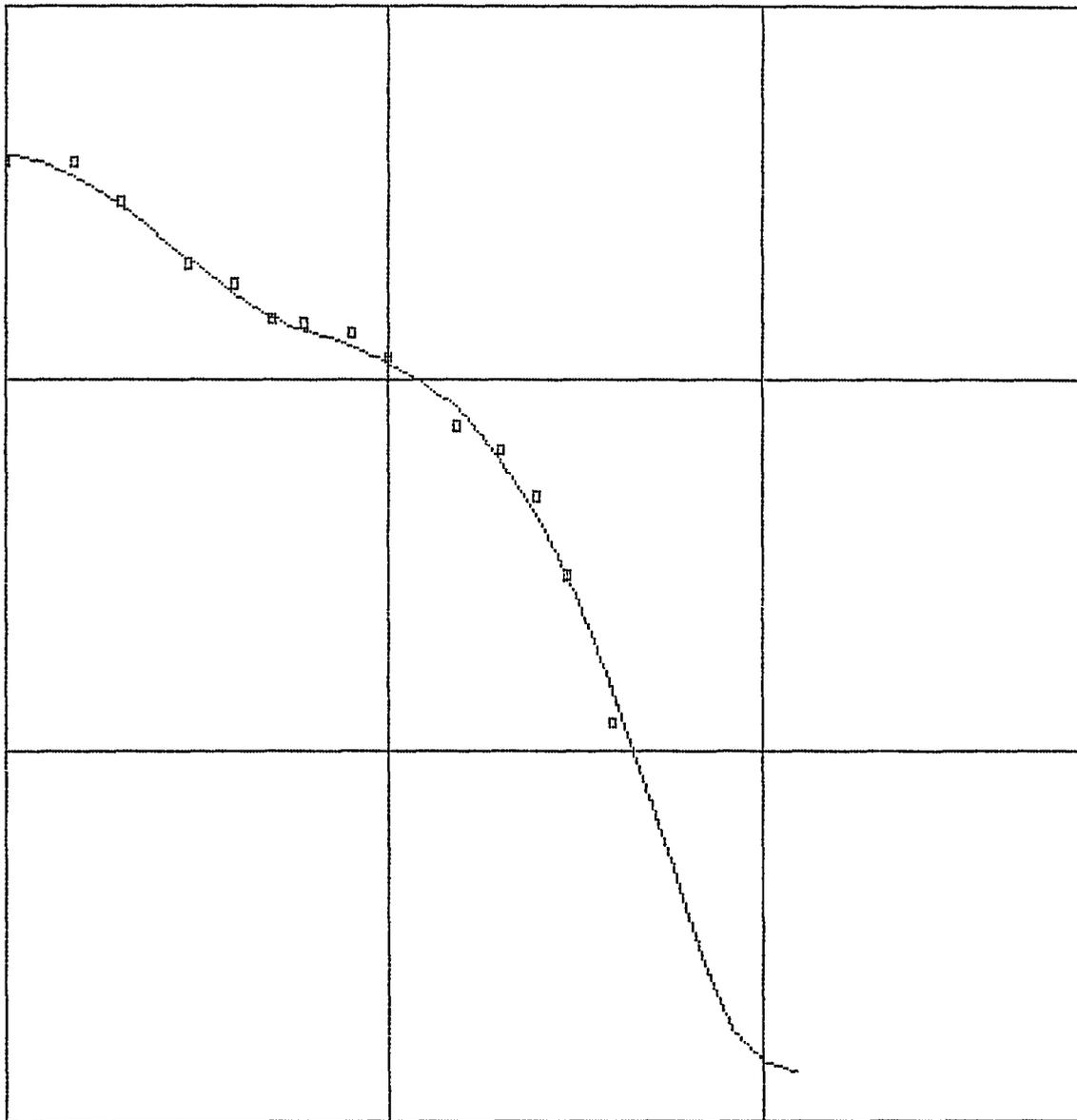
couche	résistivité	épaisseur
1	270.00	0.80
2	450.00	2.80
3	150.00	5.50
4	1.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :13

couche	résistivité	épaisseur
1	110.00	1.00
2	150.00	1.10
3	440.00	1.70
4	400.00	10.00
5	70.00	0.00



SOLENZARA

S.E. :14

couche	résistivité	épaisseur
1	450.00	1.00
2	130.00	8.00
3	28.00	12.00
4	1.00	0.00

ANNEXE 6

Biseaux salés

Rappel des notions de base

**Extraits du rapport BRGM R 38847
"Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés"**

1. RAPPEL DES NOTIONS DE BASE

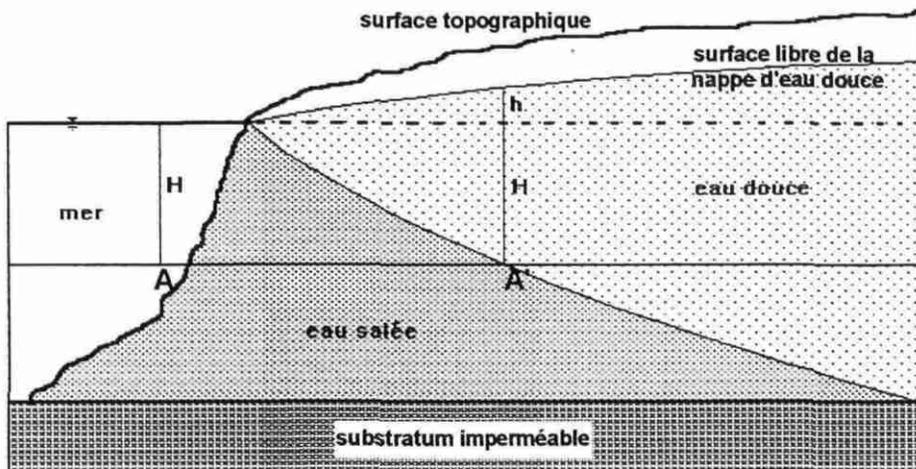
1.1. APPROCHE HYDROSTATIQUE

Principe de Ghyben-Herzberg

La formulation de ce principe, énoncé à la fin du siècle dernier, repose sur l'équation d'équilibre hydrostatique entre l'eau douce et l'eau de mer.

L'eau douce et l'eau salée sont considérées comme deux fluides non miscibles, ce qui n'est évidemment qu'une approximation. Dans ce cas leur contact est supposé être représenté par une interface nette.

Considérons une coupe schématique perpendiculaire au littoral (figure ci-dessous) :



Sur une horizontale AA', l'égalité des pressions de l'eau salée et de l'eau douce s'écrit :

$$H \times d_s = (H + h) \times d$$

d_s étant la masse volumique de l'eau salée, d la masse volumique de l'eau douce, h la hauteur d'eau douce au dessus du niveau de la mer en un point A'.

si d est égal à 1, on a :

$$H (d_s - 1) = h \text{ et } H = h / (d_s - 1)$$

La masse volumique de l'eau de mer est fonction de la salinité.

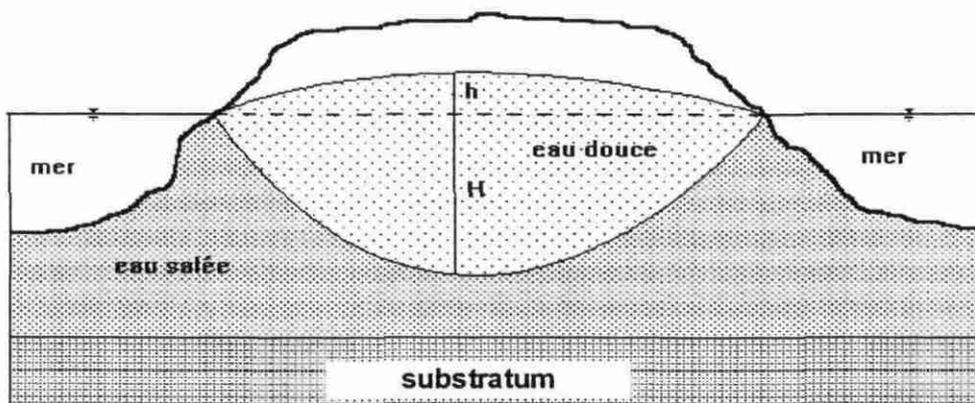
A une concentration équivalente de NaCl de 36 g/l (qui représente à peu près la moyenne de salinité des mers et océans) elle est égale à 1,025.

Pour cette valeur on a donc $H = h / 0,025 = 40 h$

En un point quelconque de la nappe, l'interface eau douce/eau salée se situe donc sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation de la nappe au dessus du niveau de la mer.

Pour une eau de mer moins salée ce rapport augmente.

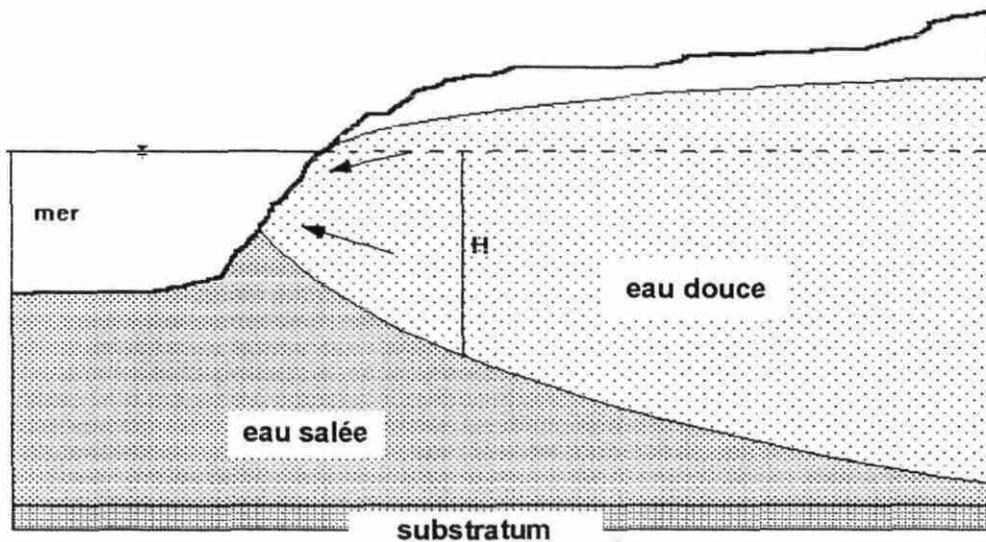
Ce schéma est évidemment applicable au cas des îles, la nappe d'eau douce formant alors une lentille complète suivant le schéma ci-dessous :



1.2. APPROCHE HYDRODYNAMIQUE DE HUBBERT

Le schéma de Ghijben-Herzberg n'est valable qu'en première approximation. Il ne tient pas compte en effet de l'écoulement de la nappe à la mer qu'implique nécessairement la décroissance des charges vers celle-ci.

Le modèle de Hubbert apporte une légère modification à ce schéma :



L'eau douce et l'eau salée sont également considérées comme non miscibles.

Si on considère en tout point le potentiel de l'eau douce :

$$\Phi_d = -d_d g z_d + p_d$$

et le potentiel de l'eau salée :

$$\Phi_s = -d_s g z_s + p_s$$

d_d étant la masse volumique de l'eau douce

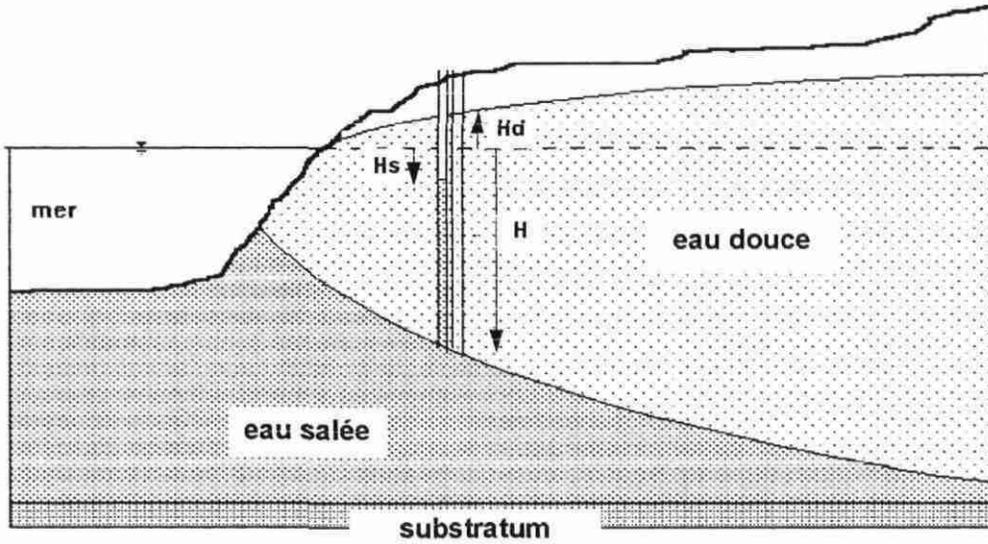
et d_s étant celle de l'eau salée

En un point de l'interface on a $z_d = z_s = H$

et $p_d = p_s$

on a donc $\Phi_d - \Phi_s = -(d_d - d_s)g H$

$$\text{et } H = \frac{\Phi_d - \Phi_s}{g (d_s - d_d)}$$



or $\Phi_d = -d_d g z_d + p_d = d_d g H_d$
 et $\Phi_s = -d_s g z_s + p_s = d_s g H_s$

H_d et H_s représentant respectivement, au point de l'interface, la charge d'eau douce et la charge d'eau salée par rapport au niveau de la mer (charges que l'on observerait respectivement dans deux piézomètres crépinés au niveau de l'interface, le premier rempli d'eau douce et le second d'eau salée).

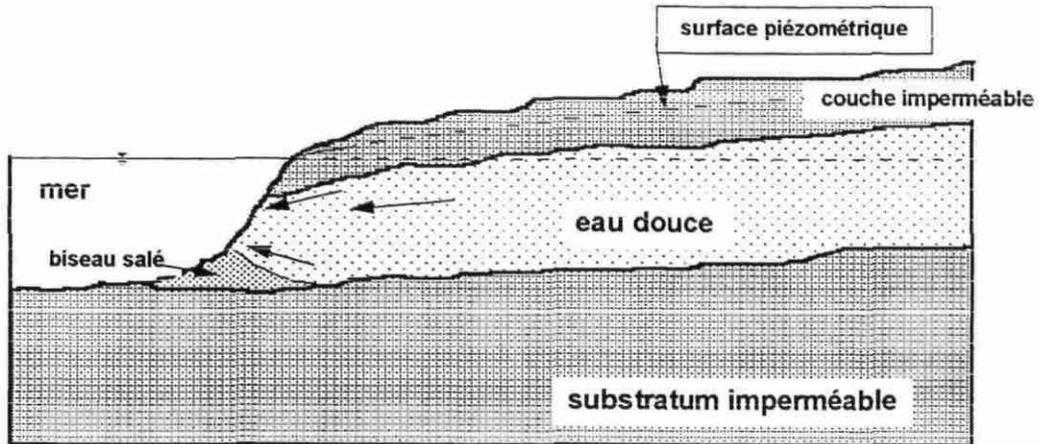
On a donc également $\frac{\Phi_d - \Phi_s}{g} = H_d d_d - H_s d_s$

et $H = \frac{H_d d_d - H_s d_s}{d_s - d_d}$

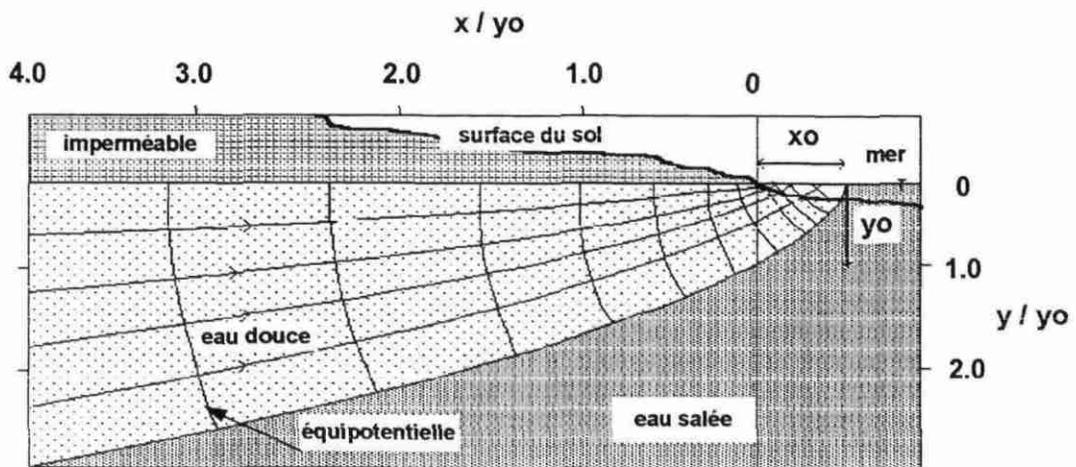
Si l'on considère que $H_s = 0$ (c'est à dire qu'il n'y a pas de perte de charge dans l'eau salée) et en prenant $d_d = 1$ on retrouve la formule de Ghijben-Herzberg.

1.3. LE MODELE DE GLOVER

Pour une nappe littorale captive le schéma devient le suivant :



GLOVER (1959) a établi l'équation de l'interface pour un cas particulier du schéma ci-dessus, à savoir un écoulement d'eau douce en contact avec un front salé et limité par un toit imperméable horizontal :



À partir de l'expression d'un potentiel de vitesse $\Phi = \frac{d_s - d_d}{d_d} K h$ et de l'utilisation de variables complexes on en déduit l'équation de l'interface :

$$y^2 = \frac{2Qx}{K \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)} + \frac{Q^2}{K^2 \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)^2}$$

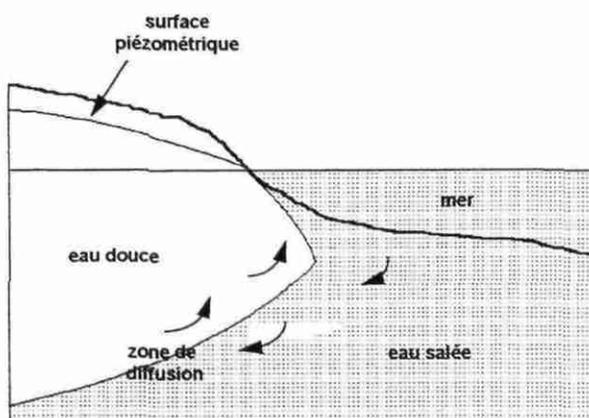
la longueur (distance à la cote) de l'exutoire en mer de l'eau douce est alors :

$$x_0 = - \frac{Q}{2K \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)}$$

Q est le débit de la nappe par unité de largeur
et K le coefficient de perméabilité

1.4. HYPOTHESE DE COOPER

Les schémas précédents considèrent l'immiscibilité de l'eau douce et de l'eau salée, de même que l'état statique de l'eau salée. Cooper, en 1959, a considéré que les deux fluides étaient miscibles, qu'il existait par conséquent une zone de diffusion vers laquelle l'eau de mer circulait et de laquelle elle retournait, diluée, à la mer. Le schéma ci-dessous illustre ce phénomène:



La présence de cette zone de dispersion a été vérifiée sur de nombreux exemples de terrain, dont en particulier près de Miami en Floride (Cooper), près de La Haye aux Pays-Bas (Luszczynski), dans la région d'El Arish sur la côte méditerranéenne du Sinaï (Research Institute for Water Resources), dans la nappe de la Crau dans le secteur de Fos-sur-mer (Y. Vuillaume), etc.

1.5. APPROCHE HYDRODYNAMIQUE DE LUSCZYNSKI

La théorie de Luszczynski tient compte également de la possibilité de mélange de l'eau douce et de l'eau salée et donc de la présence d'une zone de transition à salinité progressivement variable entre la salinité de l'eau douce et la salinité de l'eau de mer.

Luszczynski fait intervenir trois notions différentes de charges d'eau en un point, qui seraient mesurées dans des piézomètres et cela par rapport au niveau moyen de la mer :

- la charge d'eau ponctuelle :

c'est le niveau d'une colonne d'eau de densité équivalente à celle de l'eau présente en ce point et équilibrant la pression en ce point.

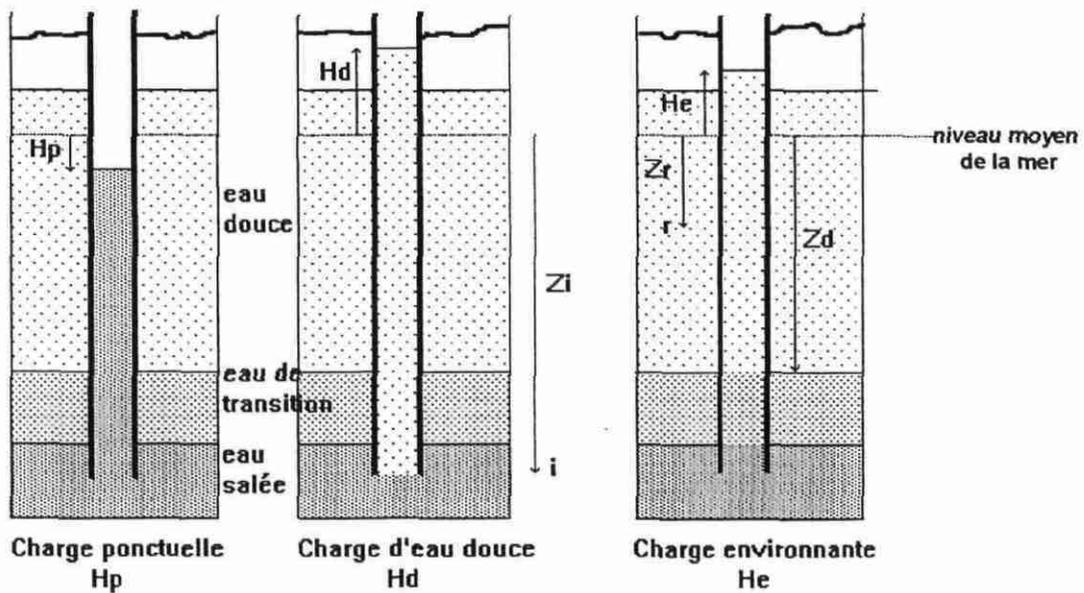
- la charge d'eau douce :

c'est le niveau d'une colonne d'eau douce équilibrant la pression en ce point.

- la charge d'eau réelle environnante :

c'est le niveau d'une colonne d'eau dans laquelle la répartition verticale de la densité (donc de la salinité) serait identique à celle de l'eau contenue dans le terrain environnant et équilibrant la pression en ce point.

Ces trois notions différentes de charges ou niveaux piézométriques sont représentées dans les graphiques ci-dessous :



La pression au point i peut s'écrire :

$$P_i = \rho_i g(H_p - Z_i)$$

$$P_i = \rho_d g(H_d - Z_i)$$

$$P_i = \rho_d g(He - Z_r) + \rho_s g(Z_r - Z_i)$$

avec :

ρ_i = masse volumique de l'eau au point i

ρ_d = masse volumique de l'eau douce

ρ_s = masse volumique moyenne de l'eau entre r et i, r étant un point quelconque de cote Zr dans l'eau douce .

En égalant la première et la troisième équation on obtient :

$$\rho_i (Hp - Zi) = \rho_a (He - Zr) + \rho_s (Zr - Zi)$$

ou encore :

$$\rho_d H_e = \rho_i Hp - Zi(\rho_i - \rho_a) - Zr(\rho_a - \rho_d)$$

Si on applique deux fois cette relation en considérant successivement un point dans l'eau douce (indice 1) et un point dans l'eau salée (indice 2), et en choisissant Zr égal à Zd, cote de l'interface de l'eau douce avec l'eau de transition on obtient :

$$\rho_1 He_1 = \rho_1 Hp_1$$

et

$$\rho_1 He_2 = \rho_2 Hp_2 - Z_2(\rho_2 - \rho_s) - Z_d(\rho_s - \rho_1)$$

en posant $h = He_1 - He_2$ qui représente le gradient vertical de charge entre les points 1 et 2, on obtient par soustraction des deux équations :

$$\rho_1 h = \rho_1 Hp_1 - \rho_2 Hp_2 + Z_2(\rho_2 - \rho_s) + Z_d(\rho_s - \rho_1)$$

ce qui donne pour la cote de l'interface eau douce-eau de transition :

$$Z_d = \frac{1}{\rho_s - \rho_1} [\rho_2 Hp_2 - \rho_1 Hp_1 + \rho_1 h - Z_2(\rho_2 - \rho_s)]$$

2. INFLUENCE DU CONTEXTE LOCAL

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE GENERAL

Les différents schémas théoriques rappelés au chapitre 1 se réfèrent tous à des cas simples qui bien souvent n'existent pas tels quels dans la réalité ou ne sont valables qu'en première approximation et/ou sur une portion limitée de la zone concernée par les problèmes d'intrusion d'eau salée.

Ces différents schémas sont en effet dans bien des cas profondément modifiés par :

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

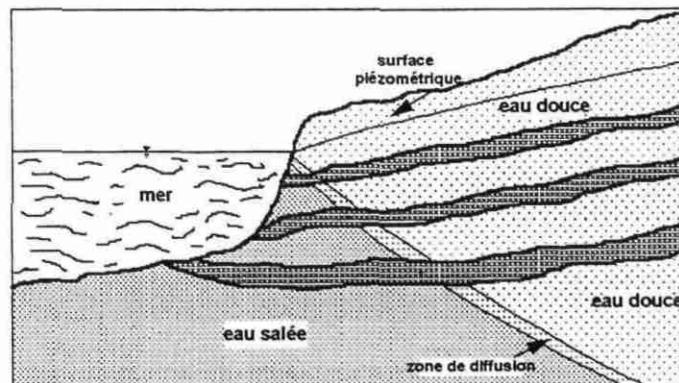
Ces différents contextes et phénomènes, qui par surcroît coexistent souvent, peuvent provoquer de très fortes discontinuités dans la forme et l'extension de l'intrusion de l'eau salée.

2.2. CAS PARTICULIERS

2.2.1. LES AQUIFERES MULTICOUCHES

Les réservoirs littoraux, comme tous les autres, peuvent être constitués de plusieurs couches aquifères (faisant partie ou non de la même unité stratigraphique) séparées l'une de l'autre par des formations imperméables (ou très peu perméables). On parle dans ce cas d'aquifère ou de système aquifère multicouche.

Si les différentes couches sont toutes en communication directe avec l'eau de mer, si elles ont des paramètres hydrodynamiques relativement homogènes et si la variation verticale du potentiel hydraulique reste très faible d'une couche à l'autre, on peut concevoir que l'interface se prolongera sensiblement de manière régulière d'une couche à l'autre comme représenté sur la figure ci-dessous :

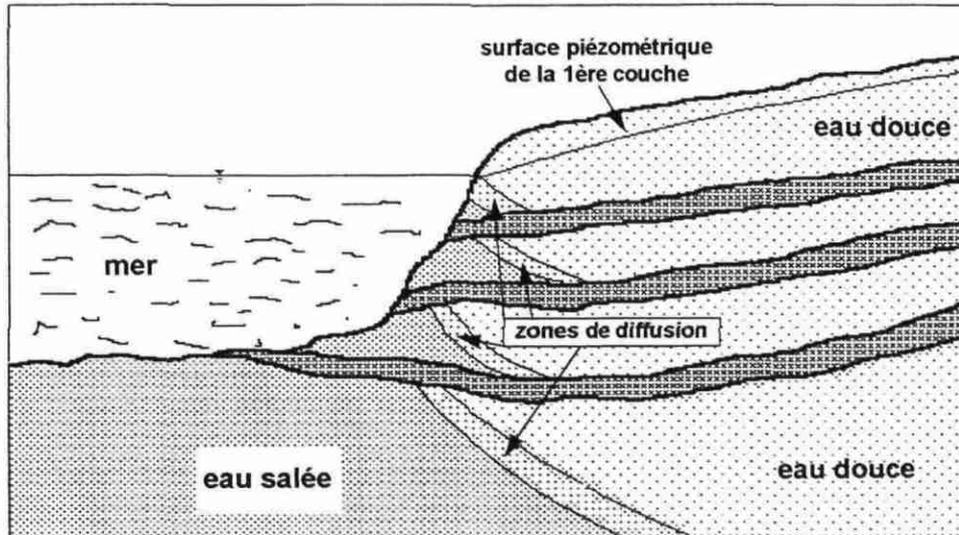


Ce cas reste cependant assez rare dans la réalité, les potentiels hydrauliques (ou niveaux piézométriques) des différentes couches étant en général assez ou très différents.

En effet les couches aquifères situées sous des formations imperméables sont très fréquemment en charge et ont alors, en un même point, un potentiel hydraulique, supérieur à celui de la ou des couches supérieures.

Chacune des couches peut ainsi avoir une relation et une connexion hydraulique particulière avec les eaux salées marines, et posséder alors son interface propre, c'est à dire plus ou moins pénétrant vers l'intérieur des terres, ou comportant encore une zone de diffusion plus ou moins épaisse.

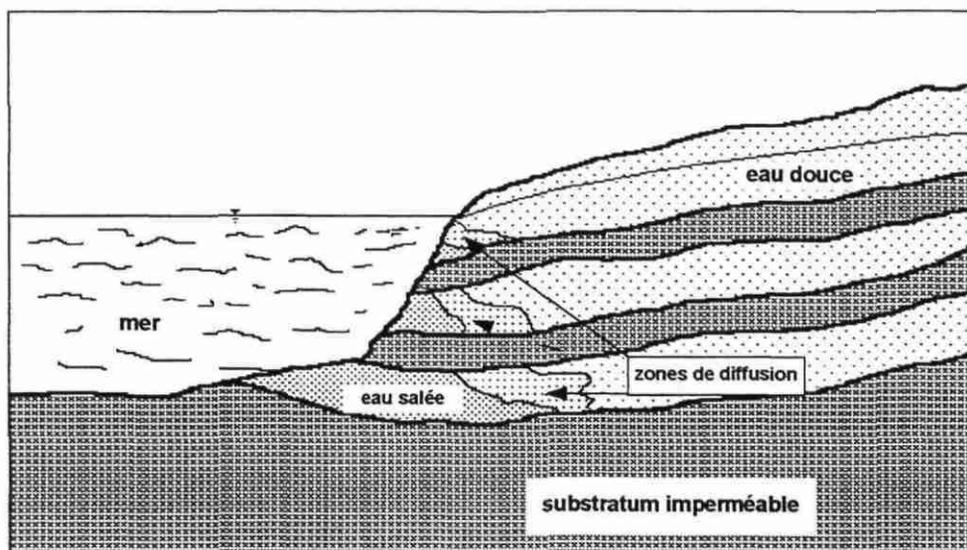
Le schéma ci-dessous illustre cette possibilité :



Le schéma ci-dessus correspond à un aquifère multicouche avec les hypothèses suivantes :

- les potentiels hydrauliques des différentes couches sont croissants avec la profondeur des couches, ce qui a pour effet de repousser les interfaces respectifs (plus exactement les zones de diffusion) vers la mer.
- pour une même couche les paramètres hydrodynamiques (perméabilité et coefficient d'emmagasinement) sont homogènes, ce qui conduit à une géométrie régulière des zones de diffusion.
- par contre les paramètres hydrodynamiques sont différents d'une couche à l'autre, ce qui conduit à des épaisseurs différentes pour les zones de diffusion. Sur ce schéma, par exemple, la couche superficielle aurait la perméabilité la plus forte, ce qui provoque l'extension de la zone de diffusion.

Si en plus de ces hypothèses on suppose (et c'est très souvent le cas dans la réalité) qu'il existe une forte hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques à l'intérieur des couches on conçoit aisément que le schéma précédent puisse être modifié d'une infinité de manières, dont le schéma ci-dessous ne serait qu'un exemple :



2.2.2. LES AQUIFERES LITTORAUX KARSTIQUES

(avec la collaboration de Michel Bakalowicz)

Les aquifères karstiques sont principalement des formations carbonatées dans lesquelles l'infiltration et la circulation de l'eau se font à la faveur d'un assemblage de formes de surface et souterraines particulières (lapiaz, dolines, avens, fractures ouvertes, drains, galeries, siphons, grottes, etc.), toutes ces formes résultant elles mêmes de la dissolution des carbonates par l'eau qui les parcourt . Cet assemblage de formes évolue relativement rapidement dans le temps (à l'échelle des milliers d'années) et s'organise pour évacuer les eaux souterraines par un exutoire qui tend à être unique (Bakalowicz, 1993).

Les mécanismes responsables de la constitution d'un karst (Mangin, 1978; Bakalowicz, 1986) relèvent de deux ensembles de processus :

- les processus chimiques de dissolution de la roche (eau en tant que solvant),
- le moteur fournissant l'énergie nécessaire au transport et à l'évacuation du soluté (eau en tant qu'agent de transport).

Les processus chimiques de dissolution de la roche sont de trois types :

- acidité liée au CO₂ d'origine :
 - atmosphérique (surtout dans le passé, car actuellement les teneurs sont trop faibles)
 - pédologique (par infiltration)
 - profonde (métamorphisme, volcanisme, dégazage du manteau)
- acidité liée aux acides minéraux : acide sulfurique et surtout H₂S
- corrosion par mélange des eaux : notamment avec les eaux marines ou saumâtres, ceci s'accompagnant, pour des proportions bien définies du mélange, d'un phénomène de dolomitisation.

Les moteurs responsables de l'écoulement sont :

- la gravité, dans la totalité des cas,

mais peuvent intervenir également :

- le gradient chimique,
- le gradient thermique,
- l'effet de gaz lift, par dégazage dû à une baisse de pression, ce phénomène se limitant donc aux zones voisines des émergences.

Les formations aquifères karstiques se caractérisent ainsi, par :

- leur discontinuité spatiale,
- de fortes concentrations localisées des eaux,
- des débits élevés dans les axes de drainage et aux exutoires (sources),

- des écoulements rapides.

Lorsque les formations aquifères karstiques sont littorales, on conçoit aisément que leurs relations hydrauliques avec les eaux salées marines peuvent être très particulières et fonction des structures spécifiques et locales du karst. Le karst est fréquemment constitué d'unités hydrauliques indépendantes les unes des autres, drainées par un réseau de conduits hiérarchisés écoulant les eaux souterraines vers la source.

Du fait de la rapidité de mise en place du réseau de drainage, les aquifères karstiques "enregistrent" aisément les variations de niveau de base (variations du niveau marin, surrection ou enfoncement des reliefs).

En régions littorales, il en résulte fréquemment l'émergence sous-marine d'un drainage adapté à un niveau marin plus bas, mais toujours fonctionnel du fait des charges hydrauliques régnant dans l'aquifère. Dans cette situation, il se crée des circulations d'eau douce à un niveau inférieur à celui de la mer : tel est le cas de la source de Port Miou, dans les calanques marseillaises. Du fait des densités très différentes de l'eau du karst et de l'eau de mer, l'écoulement d'eau douce à des vitesses parfois rapides peut provoquer une entrée d'eau salée dans l'aquifère.

L'eau de mer peut s'engouffrer aussi **totalem**ent dans certaines cavités karstiques, le mélange avec l'eau douce se faisant alors plus vers l'intérieur des terres et parfois dans d'autres cavités ou galeries en connexion.

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

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

Il en résulte que les effets d'exploitation de puits en zones karstiques littorales sont en général imprévisibles : certains pompages sont sans effet alors que d'autres provoquent des intrusions profondes.

Enfin, parmi les processus de karstification reconnus, le mélange d'eau douce et d'eau salée est, pour des proportions bien définies, sous-saturé vis-à-vis de la calcite. Parfois aussi ce mélange

provoque une dolomitisation de la roche calcaire. Ainsi, l'intrusion d'eau salée dans un aquifère karstique fonctionnel est responsable d'une karstification spéciale qui modifie l'organisation karstique originelle.

Les aquifères karstiques littoraux ont tous été dans le passé plus ou moins soumis à des intrusions générales d'eau salée dues à des transgressions marines. La mise en place du karst se fait sous l'influence des gradients chimiques, du mélange des eaux et de la gravité. Ce type de karst semble se caractériser par la création d'un réseau de vides obliques de faible épaisseur, d'extension régionale et recoupant indifféremment les vides karstiques préexistants. Les cavités préexistantes sont également retouchées d'auréoles de dolomitisation. Ce type de karst a été étudié en Floride (Back et Hanshaw, 1970), aux Bermudes (Palmer et al., 1977), aux Bahamas (Stringfield et Legrand, 1971) en Yougoslavie (Mijatovic, 1977) et surtout dans la région de Bari en Italie (Cotecchia, 1974, 1981; Tadolini et Tulipano, 1981). Son existence est connue dans la plupart des régions côtières, dont le littoral de la Méditerranée (Bakalowicz, 1993)

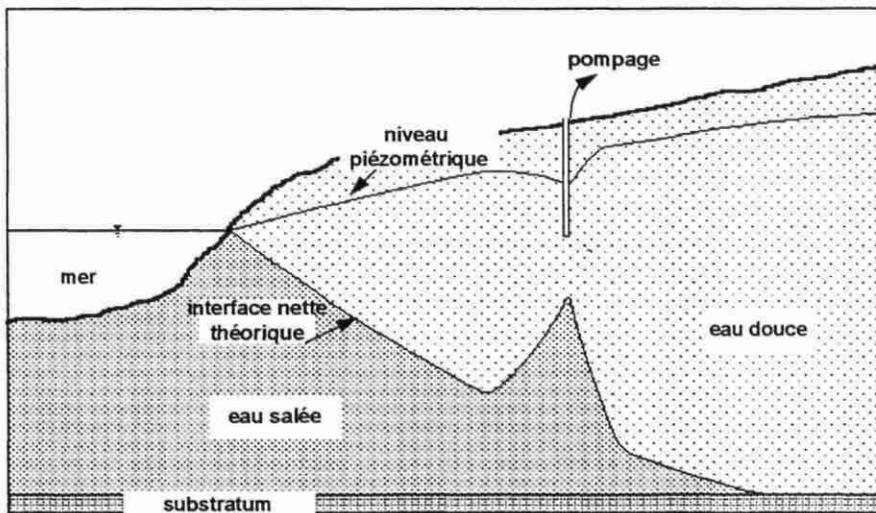
Le fonctionnement de ces aquifères karstiques littoraux est encore mal connu, aussi leur mise en valeur pose encore de très nombreux problèmes

2.3 INFLUENCE DE L'EXPLOITATION DES NAPPES SUR LE BISEAU SALE

Mis à part le cas des aquifères karstiques, nous continuerons, par commodité, de parler de biseau salé, tout en gardant à l'esprit qu'il s'agit plus généralement de la zone envahie par l'eau marine, quelque soit sa forme, et qui comprend la zone de transition à salinité variable.

La profondeur et la forme du biseau salé est fonction des niveaux piézométriques de la nappe, en particulier des niveaux piézométriques dans l'eau douce. Les prélèvements par pompes effectués dans cette nappe influent donc également sur le biseau salé

En se référant tout d'abord au schéma théorique de Ghijben - Herzberg, l'effet d'un pompage sur le biseau salé peut être représenté en première approximation par le schéma ci-dessous :



Un rabattement de 1 m provoqué par le pompage se traduit, sur la même verticale, par une remontée de l'interface net théorique de 40 m, cela en considérant une densité de 1,025 pour l'eau de mer (cf. paragraphe 1.1.).

Si le régime **permanent** est établi, l'interface est donc stabilisé en première approximation suivant ce schéma. Le **cône d'appel** provoqué par le pompage est donc l'**image**, agrandie 40 fois, du **cône de dépression** par rapport au niveau de la mer

Si le pompage induit un régime **transitoire**, la remontée de l'interface sera également en régime transitoire avec un certain **déphasage** (retard) sur la baisse du niveau dans le puits.

Nous avons vu en outre que pour se rapprocher de la réalité il faut remplacer cet interface net théorique par une zone de transition à salinité progressivement variable.

Le pompage (par augmentation des gradients hydrauliques) aura également pour effet d'accroître l'épaisseur de la zone de transition

Evidemment lorsque la nappe est exploitée par plusieurs puits, les effets de chaque puits se superposeront.

Si l'on considère le régime permanent, lorsque le niveau dans un puits est à la cote du niveau de la mer, l'interface théorique coïncide donc avec ce niveau et le puits pompe de l'eau de mer. Il en est de même lorsque le niveau dans le puits est au dessus du niveau de la mer, mais que l'interface d'équilibre correspondant arrive au niveau de la base du puits.

Si l'on tient compte en plus de la présence de la zone de transition, comme c'est le cas dans la réalité, un puits peut donc commencer à pomper de l'eau de cette zone (eau plus ou moins saumâtre) bien avant que son niveau dynamique atteigne le niveau de la mer.

Inversement, un pompage peut momentanément, et dans une certaine mesure, rabattre le niveau de la nappe au dessous du niveau de la mer, à condition que la remontée de l'interface, ou plutôt du sommet de la zone de transition, n'ait pas le temps d'atteindre la base du puits. Il est à noter cependant que, même après l'arrêt de ce pompage excessif et temporaire, l'interface continuera à remonter pendant un certain temps par le jeu du déphasage dû au régime transitoire. Par ailleurs, la réduction du pompage, et le retour au niveau "normal" de sécurité de la nappe, ne sera pas accompagné d'une redescende inverse du niveau de l'interface. La zone envahie par l'eau saumâtre diminuera en salinité, mais gardera très longtemps une salinité supérieure à celle qu'elle avait avant l'augmentation du pompage.

Cette pratique, qui est à proscrire, a donc pour effet d'accroître encore l'épaisseur de la zone de transition. Il est en outre très difficile de calculer avec précision quel rabattement excessif on peut se permettre, et pendant combien de temps. Cela implique en effet une connaissance très précise des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère dans les trois dimensions, ce qui est très rarement le cas.

En résumé, les pompes d'exploitation d'une nappe littorale ont pour effet d'attirer vers la surface, et donc vers l'intérieur des terres, le biseau salé et la zone de transition à eau saumâtre. Dans la réalité cette intrusion pourra se manifester de plusieurs manières différentes, en ampleur et en localisation, selon la géométrie, la structure et la lithologie des formations aquifères concernées.

2.4. INFLUENCE DU BISEAU SALE SUR L'EXPLOITATION DES NAPPES

De manière générale la présence du biseau salé marin dans les nappes d'eau souterraines littorales limitent les possibilités d'exploitation de celles-ci.

Le nombre de pompages et leurs débits doivent être maintenus en dessous de certains seuils de manière à prévenir une intrusion trop forte des eaux saumâtres et salées dans la nappe d'eau douce, et d'assurer aux eaux prélevées la pérennité de la qualité requise.

Les sites de nouveaux forages d'exploitation devront être choisis afin de minimiser l'avancée du front salé. Les pompages en cours et reconnus comme dangereux devront être stoppés et l'utilisation des ouvrages correspondants en tant que piézomètres pourra être utile à la surveillance de la nappe.

Une **surveillance continue** de la nappe est absolument indispensable pour éviter la dégradation de la qualité des eaux prélevées. Il faut en effet largement **anticiper** sur l'évolution du biseau salé. Lorsque la salinité de l'eau commence à augmenter dans un forage, il est en général déjà trop tard. Le phénomène va probablement empirer et, même après l'arrêt du pompage, le retour à la situation normale risque fort d'être très long, sans parler même dans certains cas de quasi irréversibilité du phénomène.

La nécessité de cette anticipation implique l'existence ou la mise en place d'un dispositif de surveillance et d'alerte en aval des pompages.

La modélisation numérique des aquifères littoraux avec prise en compte du comportement du biseau salé peut permettre une optimisation de leur exploitation. Ce type de modélisation très délicate implique évidemment une très bonne connaissance de la structure géométrique de l'aquifère et de ses paramètres hydrodynamiques (perméabilité et coefficient d'emmagasinement).