



MICROCHE N°

00201

الجمعية التونسية

MINISTRE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية
وزارة الزراعة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي
تونس

F 1

CADA 0151
0209

RAPPORT DE MISSION

—:—

- 2^e CONGRES INTERNATIONAL SUR LES EAUX SOUTERRAINES. - 2^e1
2^e CONFERENCE INTERNATIONALE SUR LA PLANIFICATION DES EAUX.

—:—

Septembre 1975 à VALENT

BENZALAN Chahbi

RAPPORT DE MISSION

13 JAN 1976

13 JAN 1976

==:555:==

3° CONGRES INTERNATIONAL SUR LES EAUX SOUTERRAINES.

2° CONFERENCE INTERNATIONALE SUR LA PLANIFICATION DES EAUX.

==:555:==

Du 1er au 5 Novembre 1975

à PALERME (Italie)

==:555:==

Fait par : BENSALAH Dabbli.

RAPPORT DE MISSION

—:III:—

- 3^e CONGRES INTERNATIONAL SUR LES EAUX SOUTERRAINES.
2^e CONFERENCE INTERNATIONALE SUR LA PLANIFICATION DES EAUX.

—:III:—

Du 1^{er} au 5 Novembre 1975

—:III:—

Ces 2 manifestations se sont tenues à Palerme du 1^{er} au 5 Novembre, sous l'égide de plusieurs Organismes Internationaux :

- Unesco.
- Association Internationale des Hydrologues A.I.H.
- Association Internationale de la Recherche Hydraulique (A.I.R.H.).
- Institut de gestion des Ressources Hydrauliques E.R.I.C.E.
- ENTE SVILUPPO in Sicilia E.S.A.

Les 3 thèmes principaux abordés au cours du 3^{ème} Congrès sont les suivants :

- 1^{er} Hydrogéologie des Roches Fissurées.
- 2^{er} Problèmes Particuliers en Hydrogéologie.
- 3^{er} Hydrochimie.

Deux thèmes ont fait l'objet de la 2^{ème} Conférence à savoir :

- 1^{er} Pour une nouvelle gestion des Eaux.
- 2^{er} Caractéristiques Naturelles des Ressources Hydrauliques aux fins jurisprudentiels.

Nous allons repasser en revue les sujets traités dans chacun de ces thèmes et dégager un certain nombre de remarques qui nous paraissent intéressantes.

1. 3^e CONGRES INTERNATIONAL :

Thème 1.- L'Hydrogéologie des Roches fissurées :

1er Sujet : Hydrologie des Roches Volcaniques :

Un grand nombre de communications ont été présentées, qui exposent des méthodes d'études des structures Hydrogéologiques et des différents paramètres et équations régissant les écoulements dans les milieux fissurés, en particulier, l'évaluation du coefficient d'infiltration, du taux de ruissellement superficiel etc...

En dehors des tentatives d'adaptation des lois classiques d'écoulement en milieu poreux (loi de Darcy) aux milieux fissurés - Il y a lieu de retenir un modèle hydrogéologique du Vulcanisme éruptif présenté par le Professeur AVIAS de Montpellier :

Partant de quelques constatations simples, AVIAS attribue le caractère éruptif à l'arrivée d'eau salée dans les canaux de remontées du Magma ; voici quelques-unes de ces constatations :

- a) La plupart des volcans de part le monde se trouvent en mer ou à proximité d'eau salée.
- b) Tous les volcans éloignés de la mer ont des coulées de laves mais ne sont pas éruptifs. La thèse selon laquelle l'éruption résulte du dégazage du Magma se trouve en défaut pour tout cet ensemble.

2ème Sujet : Critères d'évaluation des Ressources en eau souterraines des régions Karstiques :

Les différentes communications ont dégagé les particularités des caractéristiques de l'écoulement dans ces milieux.

Remarque :

C'est ainsi qu'on a mis en évidence, pour l'interprétation des essais de pompages effectués en milieux fissurés, l'importance des mesures effectuées dans les toutes premières minutes de l'essai.

Trime 2 : Problèmes hydrogéologiques particuliers :

1er Sujet : Méthodes de captage et d'exploitation :

Des méthodes variées de captage et d'exploitation des nappes aquifères ont fait l'objet de plusieurs communications :

- Puits peu profonds ou à pénétration partielle.
- Forage à pénétration totale.
- Captage par galerie.
- Captage par puits rayonnants.

A signaler un système de captage qui consiste à exploiter la nappe au moyen de plusieurs forages modestes reliés entre eux :

Une pompe unique est utilisée seulement pour assurer l'écoulement qui s'effectue alors selon le principe des vases communicants, amène l'eau dans un grand réservoir dans lequel on peut pomper un débit très important pour l'alimentation en eau par exemple.

2ème Sujet : Protection et réalimentation des Nappes :

C'est dans ce cadre que j'ai pu présenter la communication dont le texte est ci-joint, et qui traite de l'utilisation des modèles mathématiques dans une étude d'alimentation artificielle d'une nappe.

Dans le même cadre une étude présentée par Monsieur Thirriot de Toulouse sur les possibilités d'accumulation du passage d'eau crue, des berges perméables saturées et non saturées, donne des idées intéressantes sur l'étude des crues, en laboratoire.

Thème 2 : Problèmes hydrogéologiques particuliers :

1er Sujet : Méthode de captage et d'exploitation :

Des méthodes variées de captage et d'exploitation des nappes aquifères ont fait l'objet de plusieurs communications :

- Puits peu profonds ou à pénétration partielle.
- Forage à pénétration totale.
- Captage par galerie.
- Captage par puits rayonnants.

A signaler un système de captage qui consiste à exploiter la nappe au moyen de plusieurs forages modestes reliés entre eux :

Une pompe unique est utilisée seulement pour amener l'écoulement qui s'effectue alors selon le principe des vases communicants, amène l'eau dans un grand réservoir dans lequel on peut pomper un débit très important pour l'alimentation en eau par exemple.

2ème Sujet : Protection et réalimentation des Nappes :

C'est dans ce cadre que j'ai pu présenter la communication dont le texte est ci-joint, et qui traite de l'utilisation des Modèles Mathématiques dans une étude d'alimentation artificielle d'une nappe.

Dans le même cadre une étude présentée par Monsieur Thirriot de Toulouse sur les possibilités d'accumulation du passage d'une crue, des berges perméables saturées et non saturées, donne des idées intéressantes sur l'étude des crues, en Laboratoire.

Thème 3 : Hydrochimie :

1er Sujet :

Le rapporteur de ce thème fut le Professeur SCHOELLER de la Faculté des Sciences de Bordeaux ; il a présenté, dans un exposé très complet, 2 aspects intéressants de la question :

1°) L'Hydrochimie comme méthode d'enquête pour déterminer les caractéristiques géochimiques et hydrodynamiques d'un aquifère.

2°) La méthodologie pour la représentation et la corrélation graphique des données hydrochimiques.

2ème Sujet : Les Eaux thermominérales.

Les articles présentés ont abordé tous les aspects de la recherche, captage, exploitation des Eaux minérales et thermales ainsi que leurs caractéristiques et leur formation.

II. 2^e CONFERENCE INTERNATIONALE :

Deux Thèmes :

- Pour une nouvelle gestion des Eaux.
- Caractéristiques naturelles des Ressources hydrauliques aux fins jurisprudentiels.

Au cours des 2 journées consacrées à ces thèmes, plusieurs expériences de planification des Eaux ont été présentées.

Nous reprenons ici les grandes lignes d'une méthodologie de planification appliquée dans une étude prévisionnelle (Projet international effectué en Hongrie).

Toute planification doit présenter certaines caractéristiques :

- 1^o) Elle suppose l'existence de plusieurs solutions - Plusieurs Systèmes résolvent le problème.
- 2^o) Elle doit être pluriobjectives.
- 3^o) Elle doit tenir compte des facteurs humains.

Méthodologie Générale :

Dans toute planification on distingue plusieurs étapes :

1^{re} Etape : Définir le Système Entrée - Sortie.

Entrée : Ensemble des éléments incontrôlables tels la pluviométrie, débit de rivière, population, relations avec les pays limitrophes etc...

Sortie : Ensemble des éléments contrôlables, qualité de l'eau, crue etc...

2^e Etape : Comparaison des différents Systèmes possibles au point de vue performance.

- 3^e Etape : Inventaire des Ressources (techniques, humaines etc...) employées par chacun des systèmes et coûts correspondants.
- 4^e Etape : Résolution des conflits dégagés dans les plans précédents (Trade - Off)
- 5^e Etape : TEST Plan : une fois les ouvrages installés ou réalisés, il faudra un ou plusieurs moyens de contrôle : Institution, Plan, modèle et réseau de surveillance.

Voyons comment cette méthodologie fut appliquée pour aborder un problème de Planification dans une région de l'Europe Centrale ; il s'agit du développement de la plaine Hongroise (semi-aride) située de 4000 à 5000 m d'altitude.

Analyse :

Elle est faite sous l'angle Coût-Efficacité et non coût-bénéfice (cette dernière étant insuffisante car elle peut conduire à des inconsistances).

a) Quels sont les buts du développement ou alternatives à définir, en respectant les six objectifs suivants :

- 1^{er}) Satisfaire la demande en Eau en quantité et en qualité.
- 2^{er}) Protection contre les crues.
- 3^{er}) Disposer des Eaux usées, domestiques et agricoles : recyclage de ces eaux.
- 4^{er}) Utiliser toutes les ressources : terres, eaux, main d'œuvre, plusieurs emplois.
- 5^{er}) Minimiser l'impact ou l'effet sur l'environnement : respecter l'esthétique des sites par exemple.
- 6^{er}) Aboutir à un système flexible et adaptable aux fluctuations inévitables des différents paramètres (demande, site, etc...).

b) Transformation des buts :

On doit transposer ces buts en termes chiffrés (engineering-specification).

Exemple : La 'demande en Eau' est exprimée sous forme de courbe d'évolution des besoins jusqu'à l'horizon 2030 (incertitudes sur l'estimation de la demande).

c) Comment juger les systèmes ? - Définir des critères :

En plus des coûts monétaires (construction - pertes totales)

11 critères de jugement sont retenus :

- 1°) (manque d'eau) : probabilité de manque d'eau.
- 2°) Qualité de l'eau : I du résidu sec, I à O_2 ...
- 3°) Énergie : besoins en énergie pour réaliser le système (facteur de réutilisation).
- 4°) Récréation : Critère qualitatif (exemple : combien on satisfait de touristes en réalisant le système).
- 5°) Protection contre les crues ; exemple : quel type de crues peut-on écarter dans le cadre du système considéré.
- 6°) Utilisation des sols : forêt, fixation des sols (dunes) etc...
- 7°) Main-d'œuvre : Nombre, qualification - Ouvrier...
- 8°) Environnement (Architecture) : L'architecture qu'on donne nécessairement à l'environnement - autant respecter l'esthétique.
- 9°) Coopération internationale : degré d'assistance.
- 10°) Possibilité d'expansion du système en vue d'atteindre la taille économique.
- 11°) Sensibilité du système : réaction au changement des données.

d) Approche (3ème étape) :

- à coût fixe : efficacité maximale.

Il suffit d'optimiser les critères du système retenu.

- à efficacité fixe : Optimiser les coûts.

e) Définition des systèmes alternatifs (4^e étape) :

Faire ressortir toutes les alternatives possibles.

2) TABIEAU RECAPITULATIF VIS A VIS DES DIFFERENTS

CRITERES :

Systeme N°	Coût	Efficacité										
		Critères										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												

Ce tableau doit en fait permettre la réduction du nombre des systèmes viables et envisageables.

Sur l'ensemble des systèmes retenus le choix est fait au vue de la synthèse des graphes dressée au cours de l'application de la méthode FLECTRE (Elément et choix multiple) à l'ensemble des alternatives retenues.

Farmi ces systèmes et en dernier ressort, l'ordre de préférence est naturellement déterminé par les Hommes de décision (Option politique, Sociale ou autres...).

f) TABLEAU RECAPITULATIF VIS A VIS DES DIFFERENTS

CRITERES :

Système N°	Coût	Efficacité										
		Critères										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												

Ce tableau doit en fait permettre la réduction du nombre des systèmes viables et envisageables.

Sur l'ensemble des systèmes retenus le choix est fait au vue de la synthèse des graphes dressés au cours de l'application de la méthode ELECTRE (Elément et choix multiple) à l'ensemble des alternatives retenues.

Parmi ces systèmes et en dernier recours, l'ordre de préférence est naturellement déterminé par les Hommes de décision (Option politique, Sociale ou autres...).

AUTRES MANIFESTATIONS PARTICULIÈRES :

Au cours de ce Congrès et en dehors des séances de travail proprement dites, il y a eu des réunions des différentes associations organisatrices : à l'échelle italienne ou Méditerranéenne ou Internationale, c'est ainsi qu'il y a eu :

- Le 2 Novembre 1975 une réunion du Comité Italien de l'A.I.P.
- Le 3 Novembre 1975 l'élection du bureau exécutif de l'A.I.P.
- Le 4 Novembre 1975 une réunion du CEMEA ou CEMTE. (Comité ou Association Euro Méditerranéenne pour la Planification des Eaux). Cette réunion a précisé le statut de l'association créée en 1973, et conformément à ce statut, désigné les membres de ce comité :

Il est à signaler que les ingénieurs tunisiens (KHOUADJA, ENNASLI et BENELAL Dhabbi (r. i. m.)) ont été désignés comme membres de ce Comité.

Conclusion :

Un très grand nombre de problèmes ont été abordés au cours de ces manifestations ; ce qui met à la disposition des chercheurs et ingénieurs dans le domaine de l'hydrogéologie ou de la Planification des eaux, une documentation très fournie et des méthodes d'investigation expérimentales et très variées (une Bibliographie complète et regroupée par thème sera publiée en fin de rapport).

Tous les participants ont pu avoir la plupart des communications (*) ; le comité d'organisation se chargeant de leur faire parvenir les textes qui n'ont pu être édités avant le congrès.

(*) Chaque congressiste a dû payer sur place une participation de 40.000 liras (dont on lui a livré un reçu) destinée à couvrir en particulier les frais d'édition des différentes communications.

BIBLIOGRAPHIE

--:III:--

Hydrogéologie des Roches fissurées

--:III:--

- 1.- AURELLI A. RUSSARA F : "Hydrogéologie d'El KANTARA"
- 2.- AURELLI A. LENTINI F VEZZANIL : Rapport sur la Structure tectonique et Hydrogéologique de la Sicile orientale. Etude particulière des roches carbonatées et volcaniques.
- 3.- AVIAS : Possibilité d'un Modèle Hydrogéologique du volcanisme Eruptif.
- 4.- CIGNA A : Aspects quantitatifs des phénomènes d'Evapo-transpiration et de condensation dans les roches fissurées.
- 5.- FERNANDOPULLE'D : La minéralisation des Eaux Souterraines en terrains volcaniques : Le cas des Iles des Canaries.
- 6.- FERNANDOPULLE'D : L'application de la loi statistique à l'étude des aquifères volcaniques dans l'île de Grande Canaria.
- 7.- FERRARA V : "Hydrogéologie du Versant oriental de l'ETNA".
- 8.- GOMEZ DE PARLOS, SAINZ DE OJAJ, DOMINGUEZ A. : Répartition de la zone saturée et semi-saturée dans l'île de Grande Canaria.
- 9.- MINEROLA PLAS : Hydrogéologie des terrains Volcaniques.
- 10.- SAINI B. : Analyse théorique de l'écoulement souterrain dans les roches fissurées.
- 11.- DULEMBA J. : Circulation souterraine dans les Zones Karstiques.
- 12.- LOPEZ VERA F, SAINZ CARCIA J. : Evaluation des Ressources hydrauliques dans les régions Karstiques semi-arides.
- 13.- LLAYAS H, CAMACHO LOPEZ : Modèle digital pour l'analyse préliminaire de l'influence des eaux superficielles sur une exploitation intensive des eaux souterraines d'un aquifère Karstique.

AJA 00 209

**ALIMENTATION ARTIFICIELLE PAR PUIITS
POUR LA REGENERATION ET LA CONSERVATION
DE L'AQUIFERE COTIER DE TABOULBA, TUNISIE**

Dr. BENSALAH², M. BESSES²², G. de MARCILY²²²
L. MOULLARD²²²², H. IZBIDI².

RESUME :

Dans le cordon côtier de Taboulba, prisonnier entre la mer et une sabkha salée, la surexploitation des eaux souterraines pendant des siècles et son intensification depuis une trentaine d'années, a entraîné l'abaisssement de la surface de la nappe jusqu'à une altitude bien inférieure à celle de la mer : -30 m par endroits. Il en est résulté une invasion, lente mais sensible, des niveaux aquifères par l'eau de mer.

En 30 ans, la superficie irriguée et exploitée de la plaine s'est ainsi réduite de l'ordre d'un tiers environ. Cette lenteur relative de l'invasion s'explique par la faible perméabilité des sédiments aquifères.

Cette invasion aurait cependant abouti, dans un délai de l'ordre de 10 ans, à l'impossibilité d'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation en raison de l'augmentation de leur salinité.

Le remède envisagé a été l'apport d'eaux superficielles en provenance des déversoirs du barrage du Babiana et leur injection en profondeur dans quelques puits parmi le millier d'ouvrages existants, après un traitement soigneux de l'eau. Plus de 500.000 m³ ont pu être injectés dans l'aquifère. Les essais réalisés ont été simulés sur modèle mathématique, et l'on peut prévoir que la conservation de la nappe serait assurée en y maintenant un apport artificiel de 500.000 m³/an pendant les cinq premières années, puis moins important par la suite, dont l'effet sera une quasi-circulation des gradients provoquant les arrivées d'eau salée et une dilution de l'eau de la nappe par celle plus douce du barrage.

² Direction des Ressources en Eau et en Sol, Tunis.
²² Direction des Ressources en Eau et en Sol, Tunis, et actuellement
Centre d'Informatique Géologique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
²²² Centre d'Informatique Géologique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
²²²² Nations Unies, Tunis, actuellement Nations Unies, Bamako.

Ceci permettra de maintenir à 1.000.000 m³/an les prélèvements avec des dépenses supplémentaires par m³ extrait qui, ramenées au coût de l'cm du barrage du Sebbara, peuvent se chiffrer à :

- 30% du prix de cette eau pour les frais d'injection.
- 60% du prix de cette eau pour le coût de l'eau injectée (2 m³ extraits pour 1 m³ injecté).

L'objet de cette communication est de présenter une expérience d'alimentation artificielle réalisée sur la nappe côtière de Teboukha, en Tunisie.

Après des essais d'injection préliminaires destinés à définir les caractéristiques de l'aquifère, des campagnes saisonnières d'injection en vraie grandeur ont été réalisées. L'exploitation des résultats de ces expériences a été effectuée sur ordinateur.

Elle montre l'intérêt de l'utilisation des modèles mathématiques dans l'interprétation des résultats et surtout la souplesse de cet outil quand il s'agit de simuler un grand nombre d'hypothèses possibles et de prévoir les effets à long terme d'un programme d'alimentation défini à l'avance.

C'est ainsi qu'on a pu, à partir des résultats d'une série d'essais, réaliser le calage, en permanent et en transitoire, d'un modèle mathématique qui a permis, par la suite, de tester des hypothèses d'alimentation artificielle et d'en choisir une, la plus réaliste, pour atteindre les deux objectifs essentiels de cette opération :

- réduire la dépression piézométrique créée par l'exploitation de la nappe, et ainsi ralentir son épuisement par les eaux salées périphériques.
- provoquer une dilution des eaux relativement salées de la nappe par l'eau douce injectée, de manière à accroître les quantités d'eau utilisables.

L'essai de 1973 a permis de confirmer les prévisions du modèle qui a étudié et quantifié les effets d'une alimentation artificielle poursuivie pendant cinq ans (1972 à 1976) ; en effet, l'écart des remontées moyennes calculées par modèle et mesurées est acceptable et se situe, d'une manière généralisée, du côté de la sécurité.

Ceci permettra de maintenir à 1.000.000 m³/an les prélèvements avec des dépenses supplémentaires par m³ extrait qui, ramenées au coût de l'eau du barrage du Lebham, peuvent se chiffrer à :

- 30% du prix de cette eau pour les frais d'injection.
- 50% du prix de cette eau pour le coût de l'eau injectée (2 m³ extraits pour 1 m³ injecté).

L'objet de cette communication est de présenter une expérience d'alimentation artificielle réalisée sur la nappe cotière de Taboulta, en Tunisie.

Après des essais d'injection préliminaires destinés à définir les caractéristiques de l'aquifère, des campagnes saisonnières d'injection en vraie grandeur ont été réalisées. L'exploitation des résultats de ces expériences a été effectuée sur ordinateur.

Elle montre l'intérêt de l'utilisation des modèles mathématiques dans l'interprétation des résultats et surtout la souplesse de cet outil quand il s'agit de simuler un grand nombre d'hypothèses possibles et de prévoir les effets à long terme d'un programme d'alimentation défini à l'avance.

C'est ainsi qu'on a pu, à partir des résultats d'une série d'essais, réaliser le calage, en permanent et en transitoire, d'un modèle mathématique qui a permis, par la suite, de tester des hypothèses d'alimentation artificielle et d'en choisir une, la plus réaliste, pour atteindre les deux objectifs essentiels de cette opération :

- réduire la dépression piézométrique créée par l'exploitation de la nappe, et ainsi ralentir son invasion par les eaux salées périphériques.
- provoquer une dilution des eaux relativement salées de la nappe par l'eau douce injectée, de manière à accroître les quantités d'eau utilisables.

L'essai de 1973 a permis de confirmer les prévisions du modèle qui a étudié et quantifié les effets d'une alimentation artificielle poursuivie pendant cinq ans (1972 à 1976) ; en effet, l'écart des remontées moyennes calculées par mille et mesurées est acceptable et se situe, d'une manière généralisée, du côté de la sécurité.

SITUATION GENERALE :

Limitée au Nord par la Méditerranée et au Sud par le lac salé (sabbha) de Moknine (dont le niveau oscille entre -6 et -9 m au-dessus de celui de la mer), la région de Taboulba couvre une superficie de 35 Km² environ.

Sur plus de 1000 puits inventoriés, 250 sont actuellement productifs, dont 30 équipés de pompes, permettant l'exploitation de 1.100.000 m³/an et l'irrigation d'environ 200 hectares.

Cet ensemble est pratiquement concentré dans la zone centrale où les eaux possèdent la meilleure qualité. De ce fait, il s'y est créé une dépression importante de la surface piézométrique.

GEOLOGIE :

La nappe phréatique de Taboulba circule dans des terrains d'âge pliocène reposant sur de puissantes formations tertiaires.

Une croûte calcaire s'étend en surface avec une épaisseur variant de 1 à 16 m.

L'aquifère est constitué par des couches et des lentilles de sables fins intercalées entre des lits d'argiles et d'argiles sableuses.

Un banc d'argile épais et continu constitue pratiquement le substratum du niveau aquifère.

EAUX SOUTERRAINES :

L'évolution de la nappe entre 1940 et 1971 fait apparaître un abaissement maximal dans la partie centrale où la surface piézométrique passe de la cote -15 m en 1940 à -30 m en 1971.

Une évolution parallèle de la chimie a pu être mise en évidence. La zone des eaux à moins de 4 g/l a diminué considérablement de superficie, attestant de l'invasion de la nappe par les eaux salées en provenance de la mer. En raison de la faible perméabilité des terrains, cette avancée est très lente mais on peut prévoir que l'invasion serait quasiment totale dans une dizaine d'années si les pompages étaient maintenus au rythme actuel.

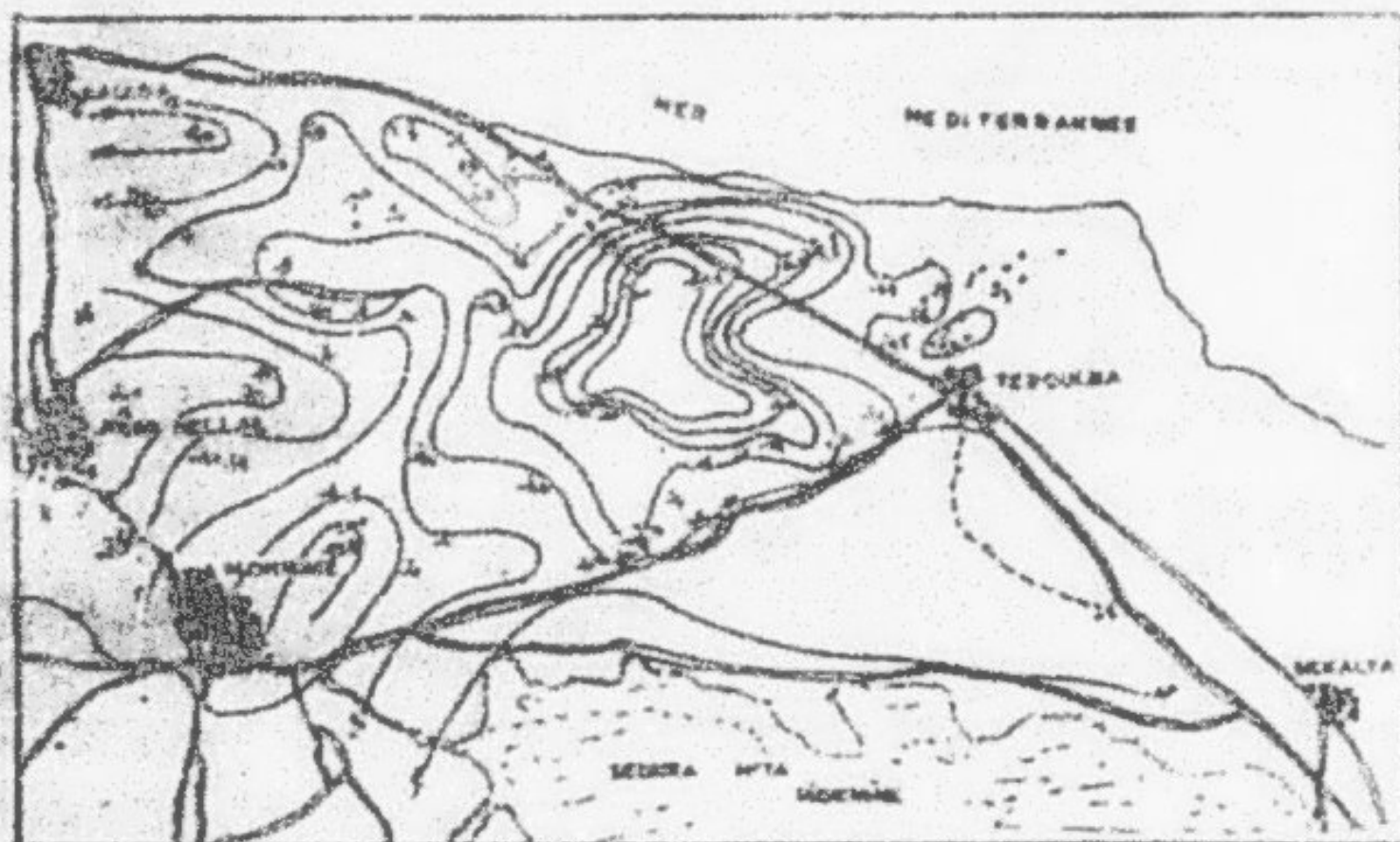


FIG.1 - Carte piézométrique de la nappe en avril 1971

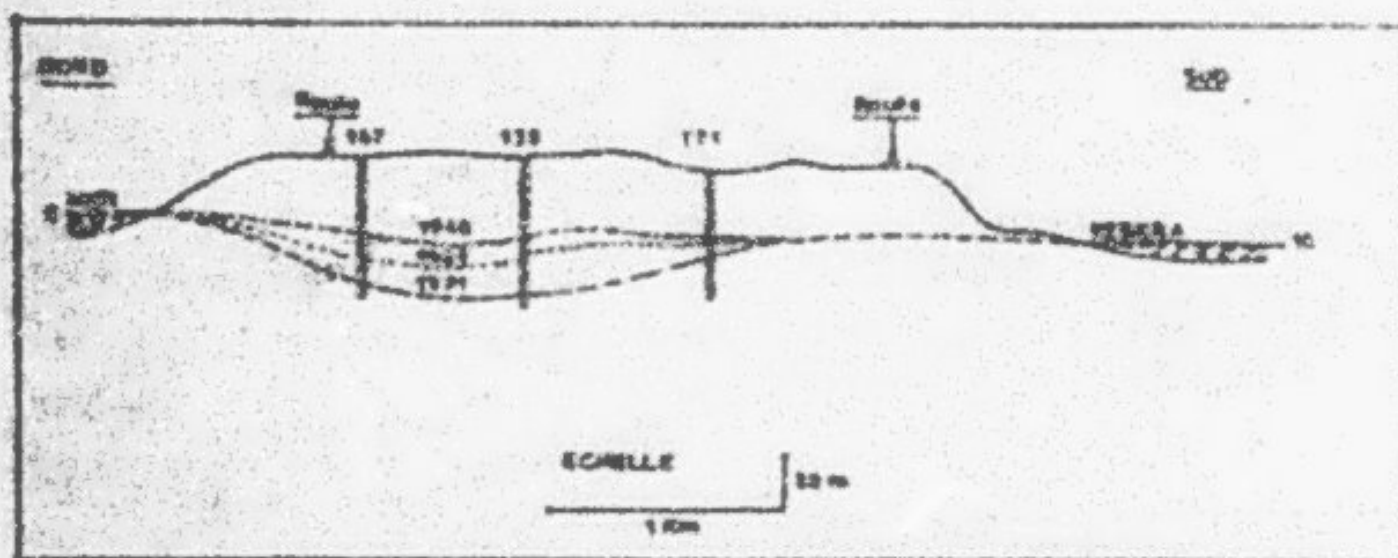


FIG.2 - Profil montrant l'évolution de la surface piézométrique

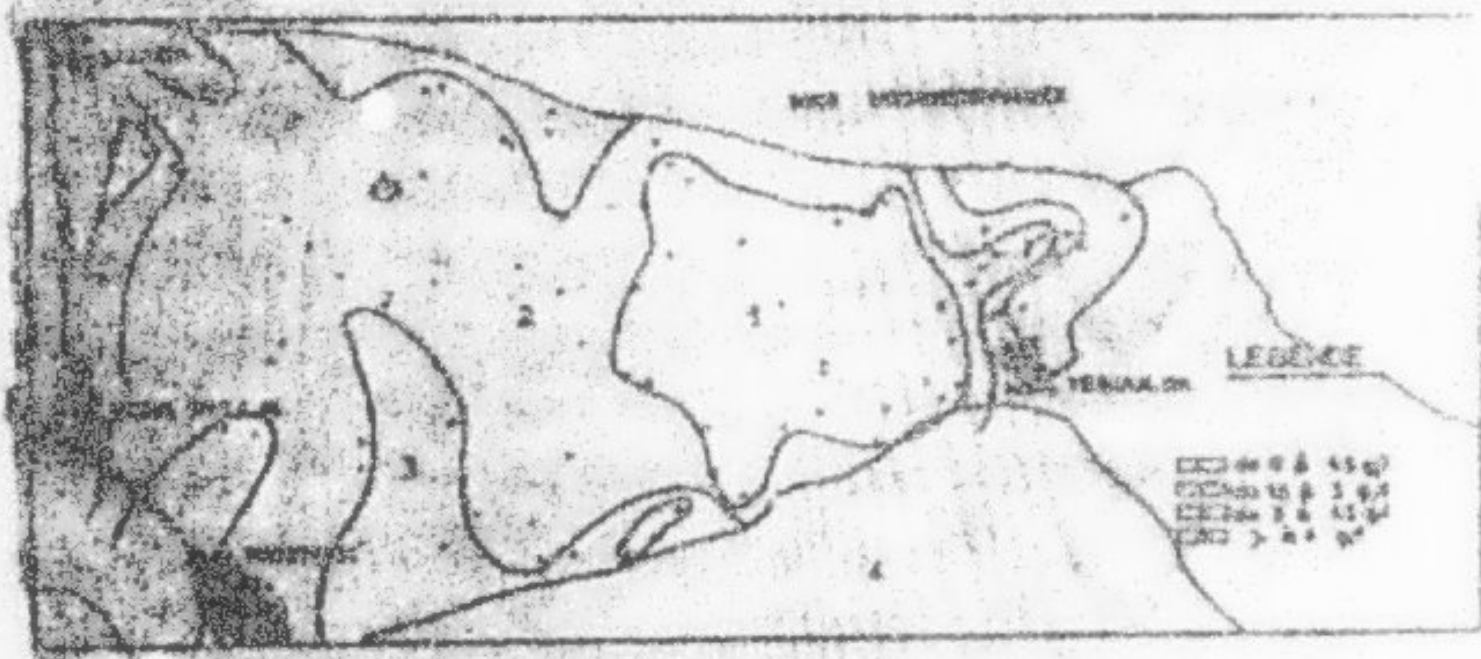


FIG. 3 - Carte des salinités des eaux souterraines en 1940

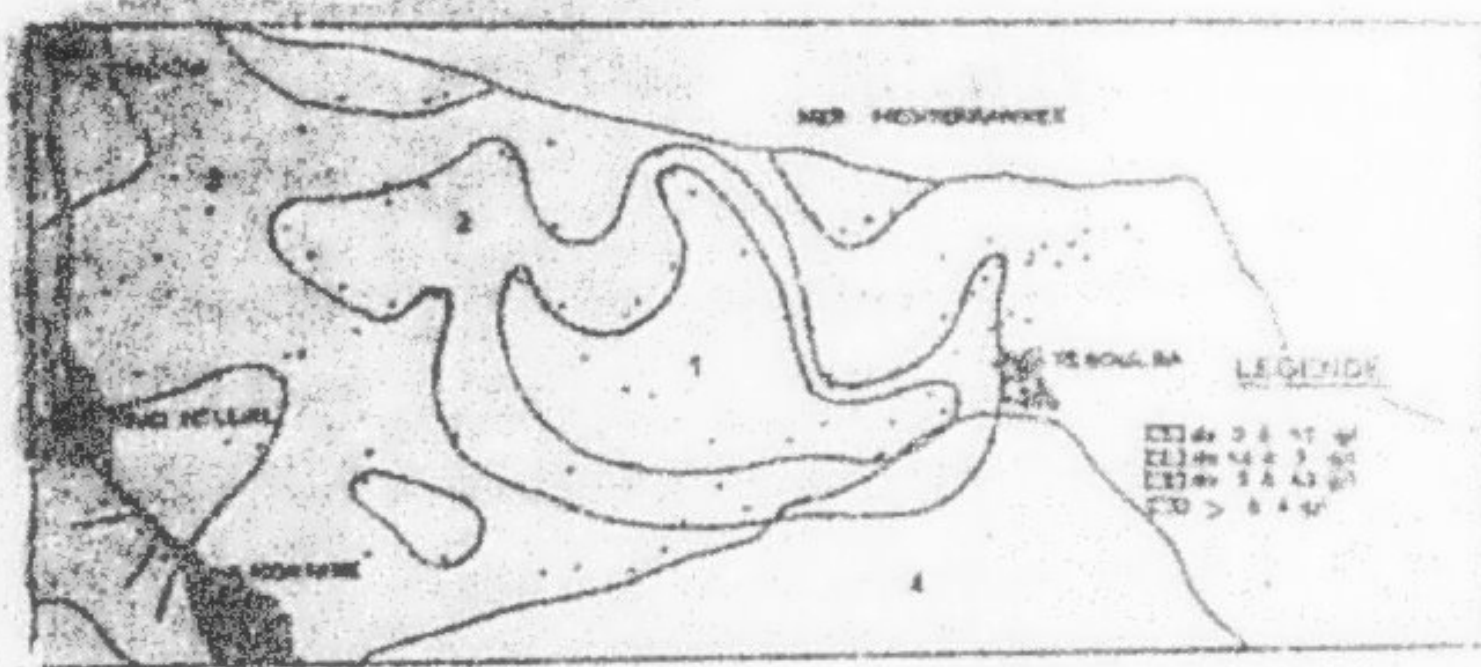


FIG. 4 - Carte des salinités en 1971
(avant injection)

Cette évolution s'explique par les faits suivants :

L'unique alimentation de la nappe est constituée par l'infiltration des eaux de pluie sur des terrains à croûte calcaire peu perméables. Le coefficient d'infiltration retenu lors du calage du modèle mathématique est de 5%, ce qui correspond pour une pluviométrie de 375 mm à une alimentation de $550.000 \text{ m}^3/\text{an}$.

Par ailleurs, les exutoires de la nappe sont essentiellement représentés par l'exploitation estimée à $1.100.000 \text{ m}^3/\text{an}$.

Le déficit annuel, qui est de 550.000 m^3 , suffit pour justifier l'épuisement de la nappe et l'arrivée des eaux salées qui viennent compenser (partiellement) cet épuisement.

ALIMENTATION ARTIFICIELLE :

L'alimentation artificielle a donc été envisagée comme un moyen de lutte contre l'invasion des eaux salées et, aussi, comme le stockage, dans la dépression de la nappe, des eaux excédentaires provenant du barrage du Kebhena.

En cas de succès, cette action entraînerait également une augmentation des réserves d'eau utilisables par dilution des eaux de la nappe.

DESCRIPTION DES ESSAIS :

Les essais effectués sont au nombre de trois :

Un essai préliminaire fut destiné à déterminer la capacité d'absorption des puits et à estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.

Un deuxième essai, de longue durée, interprété par modèle mathématique a permis la simulation d'un programme d'alimentation étalé sur cinq années.

Un troisième essai, réalisé après l'étude, a permis de vérifier, à posteriori, les résultats et conclusions des modèles.

1) Essai préliminaire : 16 Février au 2 Mars 1971 :

Il s'est effectué sur deux puits d'injection (n° 462, 464), et six puits d'observation.

Les débits d'injection se sont rapidement stabilisés à :

- 6 l/s dans le puits n° 464.

- 25 l/s dans le puits n° 462.

permettant l'injection de 34.500 m³ pour toute la période.

Pour chaque ouvrage, le débit était mesuré avec un compteur contrôlé par une vanne, l'eau injectée étant envoyée sous le niveau hydrostatique par un tube de 3".

Les deux injections ont eu des effets indépendants, ou du moins, est-ce l'hypothèse retenue dans l'interprétation de cet essai.

On a, par ailleurs, supposé dans cette interprétation que la transmissivité ne variait pas au cours de l'essai ; voyant quoi, l'interprétation fut basée sur la méthode de Theis.

2) Essai de longue durée : du 4 Février au 21 Juin 1972 :

Dans cet essai, on a réalisé l'injection dans la partie centrale, surexploitée, de la nappe. Les installations sont calculées pour un débit total de 60 à 80 l/s. La même technique a été reprise pour injecter ces débits dans quatre puits (n° 118, 124, 125 et 171), totalisant un volume injecté de 186.000 m.

Le modèle CALTES :

Le programme CALTES permet la restitution automatique de T et S à partir des mesures effectuées sur un piézomètre, en nappe captive.

Moyennant certaines approximations, ce modèle a été utilisé pour déterminer les caractéristiques T et S de la nappe, pour simuler l'essai et enfin pour prévoir la piézométrie de la nappe sous l'effet d'une alimentation artificielle programmée sur cinq ans.

Les valeurs moyennes de T et S sont les suivantes :

$$T = 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$S = 3,5 \cdot 10^{-2}$$

et les valeurs extrêmes :

$$\begin{array}{ll} T_{\max} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)} & T_{\min} = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)} \\ S_{\max} = 10 \cdot 10^{-2} & S_{\min} = 1 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

Toutefois, la trop grande schématisation adoptée dans CALTES laisse une marge d'incertitude élevée lorsque ce programme est utilisé en prévision. En particulier, dans ce modèle, on considère la transmissivité homogène sur tout le champ et constante dans le temps. De plus, l'aquifère est considéré illimité.

On a donc décidé d'utiliser un second modèle qui élimine au moins ces deux sources d'erreurs et représente de plus près la réalité.

Le modèle SIMONE :

C'est un modèle en différences finies et à maillage régulier qui a permis de représenter les limites de l'aquifère et de faire varier la transmissivité avec l'épaisseur maillée. Il comporte 261 nœuds, de 375 m de côté dont 40 sont à potentiel imposé.

Conditions aux limites :

Limites Nord et Sud (mer et sabkha) : limites à potentiel imposé, 0 m au Nord et -9 m au Sud.

Limites Est et Ouest : elles suivent le tracé des lignes de courant de l'écoulement en 1971 ; ce sont des limites à flux nul.

Verticalement : Le banc d'argile à -90 m a été considéré comme le substratum imperméable de la nappe, ce qui a permis de faire varier la transmissivité avec l'épaisseur maillée.

Enfin, il n'a pas été tenu compte des variations de densité de l'eau, et par conséquent, on a négligé les phénomènes de diffusion et de dispersion en raisonnant en fluide unique homogène.

Pour caler ce modèle, on a utilisé deux types de données :

- l'état piézométrique en 1971 avant l'essai préliminaire,
- les résultats de l'essai d'injection de 1972.

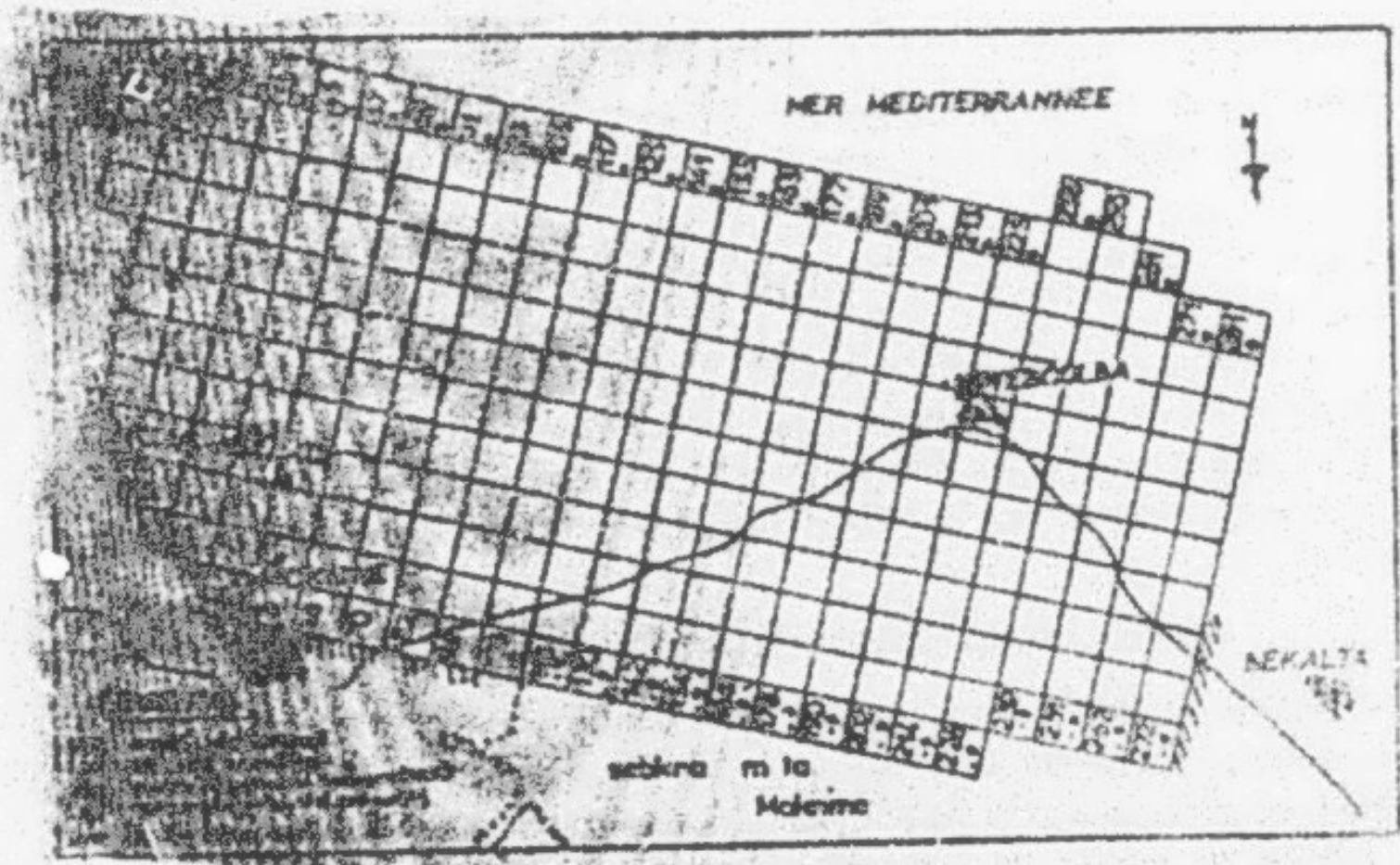


FIG. 5 - Maillage du modèle de simulation

a) Calage en permanent :

Six passages ont été effectués et ont permis en particulier, de retenir la valeur de 5% pour le coefficient d'infiltration et de montrer l'homogénéité des transmissivités.

b) Calage en transitoire :

Un premier calage s'est proposé la restitution des observations faites au cours de la recharge 1972.

La simulation a été réalisée en implicite et la restitution des résultats observés au cours de l'essai 1973 a été satisfaisante.

On a donc pu utiliser le modèle SIMONE pour tester des hypothèses d'alimentation artificielle.

Vérification par l'essai de 1973 :

Le calage du modèle transitoire a pu être vérifié a posteriori par la simulation de l'essai de réalimentation de 1973 qui a duré du 11 décembre 1972 au 15 Juin 1973, injectant 360.000 m³ dans 10 puits voisins de la dépression.

Simulation d'une réalimentation pendant cinq ans :

On a décidé de tester sur le modèle SIMONE, ainsi calé, une hypothèse de réalimentation qui, sans ramener la dépression à la cote zéro (ce qui nécessiterait l'injection de 7.000.000 m³), se propose de ralentir l'invasion par les eaux salées et d'augmenter sensiblement les réserves utilisables de la nappe tout en restant compatible avec les possibilités d'équipement en puits d'injection.

Un volume de 500.000 m³/an a donc été retenu, réparti sur 10 puits d'injection à raison de 5,2 l/s pendant quatre mois de chacune des cinq années prévues (1972 à 1976).

On constate une remontée maximale, au bout de cinq ans, de l'ordre de 25 m. La remontée diffuse assez peu : à 5 km à l'Est, elle n'est que d'un mètre environ ; les limites mer et saïbha sont cependant atteintes et leur introduction était donc nécessaire.

La nappe se trouve en moyenne à -10 m sur une assez grande étendue ; on remarque toutefois quelques points à -15 m et un point à -25,20 m situés dans des zones où l'injection n'avait pas lieu.

Il semble donc qu'il faudra si possible répartir les 15 puits d'injection réels au droit de la dépression centrale, et de toute manière à l'intérieur de la courbe -15 m observée à l'heure actuelle.

La dépression n'est pas comblée par ces 2,5 millions de m³ injectée, comme on pourrait s'y attendre. Cependant, cette réussite sera très bénéfique à double titre :

- en diminuant par 2 environ les gradients entre la mer, la sablière et la zone de prélèvement, on double la durée de vie de la nappe en ralentissant l'intrusion d'eau salée.

- par dilution de l'eau, on augmente encore la durée de vie de la nappe même si celle-ci se sale progressivement.

Si l'on attribue à la zone d'eau douce centrale une largeur maximale de 1 à 3 km (carte de salinité de 1971, zone d'eau de 1,5 g/l) et que l'on conserve la vitesse d'avance du front calculée avec les gradients actuels, soit 40 m/an, l'espérance maximale de vie de la nappe de Taboulba est de vingt ans avec renouvellement continu de la zone où l'eau pompée passera progressivement de 4 g/l, puis 6 g/l avec une avance plus rapide que les 40 m/an. On peut donc très approximativement chiffrer à dix ans l'espérance moyenne de vie de la nappe de Taboulba si rien n'est fait.

Mais si 500.000 m³/an sont injectés dans la nappe pendant cinq ans, puis que le niveau de la dépression soit maintenu ensuite entre -10 et -15 mce qui impliquerait en moyenne l'injection de 250.000 à 300.000 m³/an et si les pompes sont maintenues au rythme actuel de 1.000.000 m³/an dans la zone inventoriée :

- la diminution des gradients peut porter de dix à vingt ans l'espérance moyenne de vie de l'aquifère,

- la dilution de l'eau de 3 g/l par l'eau douce injectée, en doublant la zone d'eau utilisable, double encore cette durée.

CONCLUSION :

Ceci étant, il apparaît qu'une injection de $500.000 \text{ m}^3/\text{an}$ pendant cinq ans, réalisée en utilisant une quarantaine de puits d'un peu plus de 3 l/sec pendant quatre mois par an, permettrait de remonter le niveau de la nappe entre les cotes -10 et -15 m.

Pour maintenir la nappe à ce niveau, il faudrait ensuite y injecter en moyenne environ la moitié de ce débit.

Cette alimentation artificielle devrait permettre de maintenir le niveau des prélèvements actuels ($1.000.000 \text{ m}^3/\text{an}$) pour une durée relativement longue (plus de 30 ans).

Elle permettrait, en particulier, de bénéficier de la capacité de stockage que constitue le réservoir souterrain en y injectant l'eau du barrage de Mchana, quand celle-ci est disponible en hiver ; une année sur deux par exemple.

Il faudrait approximativement doubler ce programme de réalimentation pour assurer la survie définitive de l'aquifère; Ceci serait obtenu s'il était possible d'augmenter le débit injectable par puits en traitant d'une manière complète les eaux brutes injectées.

Mais, en l'absence de toute alimentation artificielle, on peut avancer que la zone d'eau douce se réduira progressivement d'un tiers en un tiers et qu'elle devrait pratiquement disparaître dans un avenir de l'ordre de dix ans.

REFERENCE :

La présente note résume les principaux points développés dans le rapport interne effectué pour la région de Teboulba dans le cadre du projet TUN 59-538, réalisé par le PNUD avec la collaboration du gouvernement tunisien.

FIN

24

VUES