



SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL



UNE CONSCIENCE DE BASSIN

MODELE MATHEMATIQUE

SYNTHESE

Octobre 2002

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
I - CARACTERISATION DU SYSTEME AQUIFERE ET MODELE CONCEPTUEL	4
A. Les Concepts et les limites	4
B. Caractérisation Géologique	5
C. Caractérisation Hydrologique	8
D. Caractérisation Hydrodynamique	9
II - ELABORATION DU MODELE MATHEMATIQUE	13
A. Construction du modèle	13
B. Calage du modèle	15
III - REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES	18
A. Définition et réalisation des simulations exploratoires	18
B. Miniaturisation du modèle pour l'investigation du réservoir	23
C. Réalisation des simulations prévisionnelles	26
IV - CONCLUSIONS	36

INTRODUCTION

1970-2000, trente ans après la mise en œuvre, en Algérie et Tunisie, du projet d'Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional et depuis l'impulsion donnée à l'investigation des eaux souterraines en Libye au cours des années 70, deux indicateurs permettent de mesurer le chemin parcouru par l'hydrogéologie saharienne :

- le nombre de points d'eau inventoriés sur les principaux aquifères est passé de 2000 à plus de 7000,
- les prélèvements par forages de 450 Millions de m³/an à 2,2 Milliards de m³/an.

En termes d'éléments de connaissance du système aquifère, l'explosion d'informations et de spéculations accumulées au cours des trente dernières années, qui a accompagné le développement socio-économique et hydraulique des régions sahariennes, apparaît au moins aussi intense et importante que celle réalisée au cours des trente années qui précédèrent, et qui avait trouvé sa justification dans la profusion des reconnaissances ayant accompagné la découverte du pétrole saharien.

De ce fait, l'exigence du projet SASS, en termes de recherche et d'analyse de l'information acquise, de mise en forme de cette information, de synthèses géologiques et hydrogéologiques complémentaires, d'imagination et de mise en place d'une modélisation conceptuelle des systèmes aquifères fidèle et moderne, permet de mesurer l'ampleur du **challenge** que représente ce nouveau projet.

L'effort d'analyse de données et de documents, la capacité de synthèse hydrogéologique subséquente et la force de proposition nécessaire à l'élaboration d'un modèle représentatif, rénové et durable, doivent se situer à la mesure de ce défi.

Deux principaux sous-systèmes composent le Système Aquifère du Sahara Septentrional : la nappe du Continental Intercalaire (C.I) et la nappe du Complexe Terminal (C.T). Sur chacune de ces deux nappes s'exercent des contraintes qui limitent la faculté d'exploiter leur potentiel. Ces contraintes sont certes d'ordre économique d'abord, mais les risques environnementaux liés à l'exploitation et à la vulnérabilité des nappes sahariennes du fait de leur niveau de développement constituent aujourd'hui les contraintes les plus déterminantes.

Le problème se complique par l'existence de trois pays partageant la même ressource et le même souci de se développer, mais pas forcément la même vision à priori quant à l'avenir des nappes sahariennes. Ceci n'est pas moins vrai lorsque plusieurs utilisateurs partagent une nappe très sollicitée : dans la mesure où l'ignorance des effets libère les comportements et que **l'information mutuelle renforce la solidarité** -ceci est certes vrai pour les individus comme pour les Etats- **on peut concevoir le Modèle comme un puissant outil éducatif, et un instrument de dialogue et de médiation objectif.**

Le rapport final du Modèle rend compte de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet SASS, entre Janvier 2000 et Juin 2002, pour l'élaboration du modèle mathématique du Système Aquifère du Sahara Septentrional.

Ce document a été précédé par un certain nombre de rapports intermédiaires dont il est rendu compte. Parmi ces documents intermédiaires figure également le rapport du Comité d'Evaluation du Modèle. Il s'agit de :

- Elaboration du modèle conceptuel, Août 2000 ;

- Rapport sur le choix du logiciel, Juin 2000 ;
- Construction et ajustement du modèle de simulation, Mai 2001 ;
- Deuxième phase d'ajustement du modèle. Révision de l'exutoire tunisien de la nappe du Continental Intercalaire, Octobre 2001 ;
- Définition et réalisation des simulations exploratoires , Novembre 2001 ;
- Avis du Comité Scientifique d'Évaluation sur le modèle du SASS, Janvier 2002 ;
- Reprise du Modèle dans le Bassin Oriental. Intégration des nouvelles données acquises en Libye, Mai 2002 ;
- Résultats des Simulations Prévisionnelles. Recherche de scénarios d'exploitation des aquifères, Mai 2002.

Le présent document est organisé en trois parties :

- une première partie intitulée : Caractérisation du système aquifère et Modèle Conceptuel, qui comporte notamment la caractérisation géologique, hydrologique et hydrodynamique du bassin ;
- une deuxième partie intitulée : Elaboration du Modèle Mathématique, qui décrit les étapes de la construction et du calage du modèle en régime permanent et transitoire ;
- une troisième partie dédiée à la Réalisation des Simulations Prévisionnelles. Cette partie développe successivement : la définition et la réalisation des simulations exploratoires, la construction d'un modèle miniature du SASS pour l'investigation du réservoir, la définition et la réalisation des simulations prévisionnelles.

I - CARACTERISATION DU SYSTEME AQUIFERE ET MODELE CONCEPTUEL

A - Les Concepts et les limites

1 - La mise en œuvre du Modèle Conceptuel consiste à :

- élaborer un schéma hydrogéologique sous forme d'une succession de couches perméables et semi-perméables ;
- pour chacune des couches perméables retenues, établir la répartition spatiale des :
 - niveaux piezométriques, au moins à une date donnée,
 - Transmissivités ou perméabilités,
 - côtes du toit et du substratum,
 - zones d'apport et de drainage avec une estimation préliminaire des échanges de flux,
 - échanges potentiels de flux avec les couches adjacentes ;
- Pour chaque couche perméable, identifier, analyser et mettre en forme les séries historiques de niveaux, de prélèvements, de salinités ; et établir la répartition spatiale des coefficients d'emmagasinement. La première étape de l'analyse du Système Aquifère du Sahara Septentrional comporte une caractérisation en trois volets :
 - Géologique ;
 - Hydrologique ;
 - Hydrodynamique.

2 - L'observation des affleurements permet de définir le Continental Intercalaire comme l'ensemble continental compris entre les plissements hercyniens, qui ont chassé la mer de la plateforme saharienne, et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement les formations continentales gréso-argileuses du Crétacé inférieur, auxquels on associe des sédiments marins ou lagunaires, post-paléozoïques et anté-cénomaniens.

Cette définition du Continental Intercalaire, qui constitue la formation aquifère la plus étendue de la région, détermine les limites attribuées à la zone d'étude du Système Aquifère du Sahara Septentrional.

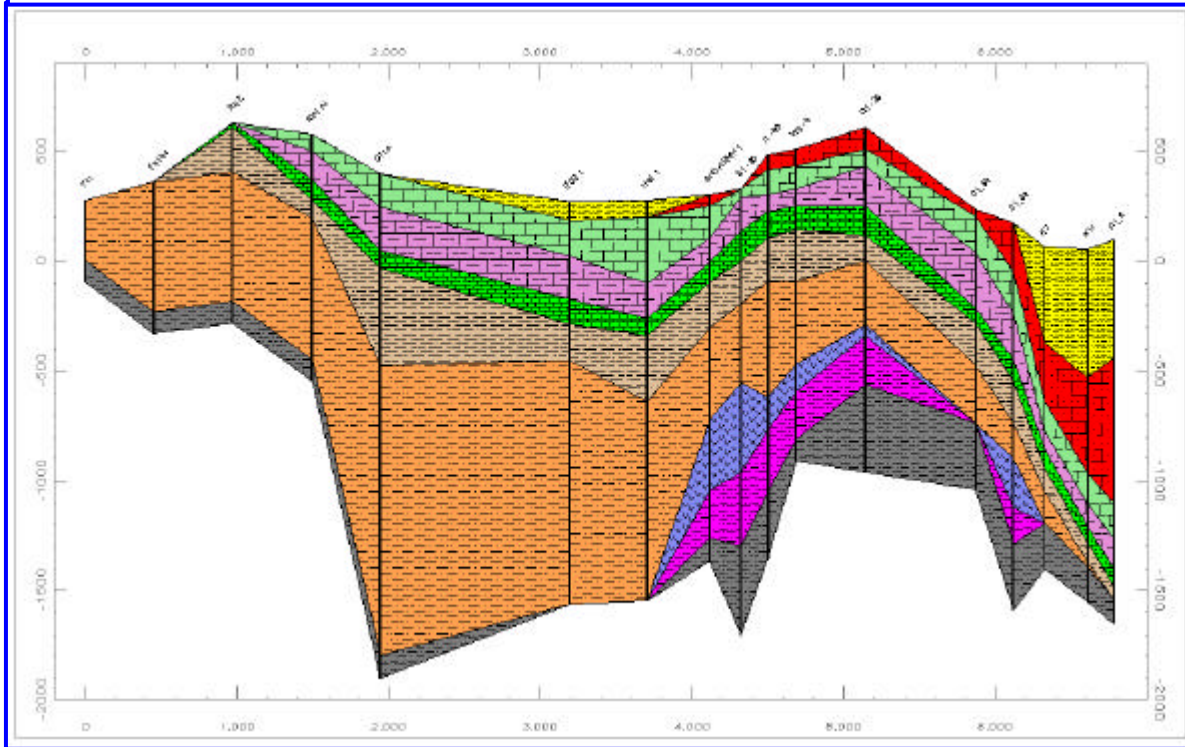
Ces limites sont : l'Atlas Saharien au Nord-Ouest ; les affleurements Paléozoïques de l'Ougarta à l'Ouest, des Tassilis et du Dj. Hassaoua au Sud, la limite à eau saumâtre à l'Est du graben de Hun, les affleurements du CI sur le Dj. Nefussa et le Dahar au NE, enfin l'accident sud Atlasique au Nord, relayé vers le golfe de Gabès par la faille d'EL Hamma.

B - Caractérisation Géologique

3 - Classiquement, le « **Continental terminal** » désigne les formations continentales, sableuses et argileuses, du MioPliocène. Mais la nappe du Continental Terminal est en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe, la nappe du « **Complexe Terminal** ». Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et MioPliocène sont évidentes sur l'ensemble du Bassin, à l'exception de la région des Chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable vient s'intercaler. La

nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du Sénonien lagunaire, cependant, ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du MioPliocène sur la bordure du bassin.

Fig.1 : Coupe méridionale W-E à travers le SASS, des Foggaras d'Adrar au Graben de Hun



4 - Le Modèle Conceptuel résulte d'une succession de simplifications ayant comme origine le découpage stratigraphique reconnu aux affleurements géologiques et recoupé en profondeur sur les logs de forages. Le résultat de ces investigations permet de déceler clairement la structure générale du SASS en trois bassins :

- le bassin occidental dominé par le Grand Erg Occidental et le secteur des foggaras,
- le bassin central, le plus étendu en superficie et en profondeur, celui qui présente les plus grandes épaisseurs d'aquifères et dont les ressources sont partagées par les trois pays, limité à l'ouest par la dorsale du M'zab et à l'est par le plateau de la Hamadah el Hamra ,
- le bassin oriental caractérisé par l'effondrement du graben de Hun et l'accumulation des sédimentations tertiaires.

5 - Grâce à l'échelle stratigraphique, qui assure la concordance des temps et les correspondances dans l'espace et grâce à l'ensemble des coupes lithostratigraphiques effectuées, il a été possible de conjuguer ensemble Algérie, Tunisie et Libye. L'objectif étant d'aboutir à la construction d'un ensemble cohérent au plan hydrogéologique, il était nécessaire au préalable, de pouvoir, d'abord dans la terminologie adoptée dans chacun des pays, rattacher les formations lithostratigraphiques reconnues à l'échelle stratigraphique universelle, ensuite de traduire ces formations en termes purement lithologiques pour apprécier leurs degrés de perméabilité, puis enfin de traduire les formations lithologiques obtenues en termes de formations aquifères ou d'aquitards et aquicludes.

Fig.2 : Aquifères et Aquitards du SASS

Unité stratigraphique		Aquifères & Aquitards		
		ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Plioquaternaire	Mio-Pliocène	2ème nappe des sables	Toit Imperméable	aquifère local
Miocène		semiperméable		semiperméable
Aquitainien		1ère nappe des SABLES	Nappe des SABLES du Djerid	aquifère
Oligocène		semiperméable		aquifère local
Eocène Moyen		Semi perméable	Semi perméable	aquifère médiocre
Eocène Inférieur		Nappe des CALCAIRES	aquifère non reconnu	
Paléocène			Semi perméable	
Senonien Sup	Maestrichtien	Nappe des CALCAIRES	Nappe des Calcaires Sup de Nefzaoua	Upper Cretaceous- Paleocene : MIZDA Aquifer
	Campanien		Semi perméable	
	Santonien			
Senonien Inférieur		Imperméable	Nappe Calcaires Inf/Nefzaoua	semiperméable
			Semi perméable	
Turonien		Nappe du TURONIEN	Nappe du TURONIEN	HALUT Aquifer
Cénomanién		Imperméable	Imperméable	imperméable
Albien		Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE	Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE	Jurassic - Lower Cretaceous : KIKLAH Aquifer
Aptien				
Barremien				
Néocomien				
Malm	Kimmeridgien	Nappe du Jurassique	semi-perméable	
	Oxfordien			
Dogger	Bathonien		Nappe du JURASSIQUE	
Lias		Toit imperméable	Imperméable	imperméable
Keuper				
Muschelkalk				
Bundstandstein		Nappe salée du Trias	Nappe du TRIAS	Trias : AZIZIA Aquifer

6 - Si l'on exclut les aquifères à eau salée du Trias, du Jurassique et du Néocomien en Algérie, les nappes du Trias et du Jurassique en Tunisie, généralement salées, ainsi que la nappe du Trias gréseux Libyen (renfermant de l'eau douce, mais relativement bien isolée du reste des systèmes aquifères), on se trouve, sur la base de critères purement litho stratigraphiques, en présence de quatre grands systèmes aquifères superposés, certes d'inégale importance, et dont on perçoit clairement l'organisation verticale et les connexions régionales. On distingue de bas en haut :

- La nappe du Continental Intercalaire en Algérie-Tunisie, passant en Libye à la formation Kiklah-Aquifer qui inclut Jurassique et Crétacé inférieur ;
- La nappe du Turonien en Algérie-Tunisie, passant en Libye à la formation Nalut-Aquifer. ;
- La nappe des calcaires en Algérie [Sénonien carbonaté+Eocène carbonaté], passant en Tunisie à la nappe des calcaires [inférieurs et supérieurs] de Nefzaoua, équivalent en Libye du Mizdah-Aquifer ;
- La nappe des sables du Mio-Pliocène en Algérie, passant en Tunisie à la nappe des sables pontiens du Djerid, ayant pour équivalent en Libye les deux nappes respectivement de l'Aquitainien et du PlioQuaternaire.

7 - Un degré de simplification supplémentaire permet de parvenir à l'élaboration du schéma du Multicouche Saharien : si l'on regroupe comme cela se fait classiquement la nappe des calcaires du Crétacé supérieur, celle de l'Eocène carbonaté, et la nappe des sables du MioPliocène (resp. Mizdah et PlioQuaternaire), le multicouche du SASS va se présenter

sous la forme de trois systèmes aquifères superposés, séparés par (ou communiquant à travers) des formations semiperméables ; soit :

- La Nappe du Continental Intercalaire – Kiklah ;
- La Nappe du Turonien – Nalut ;
- La Nappe du Complexe Terminal – Mizdah.

Fig.3 : Schéma du Multicouche Saharien

SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE DU SAHARA SEPTENTRIONAL		
ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Toit Imperméable		
Nappe des Sables	Nappe des Sables du Djerid	Sables et Calcaires Miocène Inf.
NAPPE du COMPLEXE TERMINAL - Upper Cretaceous		
Nappe des Calcaires	Nappe des Calcaires Nefzaoua	Upper Cretaceous Mizdah
Semi perméable		
Nappe du Turonien - Nalut Aquifer		
Semi perméable		
NAPPE du CONTINENTAL INTERCALAIRE - KIKLAH Aquifer		
Crétacé inf. Jurassique Trias	Crétacé inf. Jurassique Sup.	Crétacé inf. Jurassique Sup.
Substratum imperméable ou semi perméable		
Paléozoïque	Jurassique inf. Trias	Carbonifère
		Cambro-Ordovicien

C - Caractérisation Hydrologique

8 - Par interpolation de la carte pluviométrique en courbes isohyètes établie par DUBIEF (1953), on peut disposer d'une surface représentant la lame d'eau moyenne (moyenne des 25 années 1926-1950) en tout point du domaine du SASS. Ce calcul permet de définir la lame d'eau moyenne, égale à 51 mm. Pour une surface totale de 1.050.000 Km², le volume des Ressources Pluviales « moyennes » du SASS s'établit à **52 Milliards de m³/an.**

9 – La validité de la formule de FERSI (1979) pour l'estimation du Ruissellement moyen annuel a été vérifiée sur deux bassins-versants de l'Atlas Saharien : les Oueds Segguer et Namous. L'application de cette formule à l'ensemble des bassins-versants du SASS fournit les estimations suivantes du ruissellement moyen :

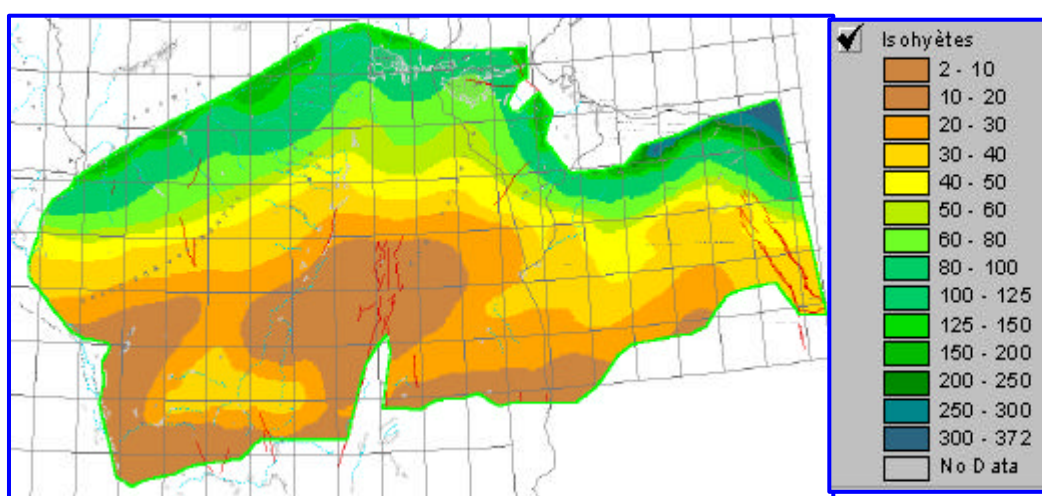
- Atlas Saharien: **450Mm³/an** ;
- Dahar : **45Mm³/an** ;
- Aurès-Gafsa : **300Mm³/an** ;
- Mzab-Mya : **140Mm³/an.**

On peut donc estimer que le ruissellement inter-annuel moyen sur l'ensemble du SASS serait de l'ordre de **1 Milliard m³/an.**

10 - Disposant des précipitations moyennes en tout point, d'une cartographie des affleurements géologiques, d'une première évaluation des quantités ruisselées, on peut élaborer une première estimation de la recharge des nappes avec ses deux volets :

- l'infiltration des crues d'oueds,
- l'infiltration directe des précipitations.
- Sur l'infiltration des crues dans les lits d'oueds en zones arides, il existe peu de références ; les travaux sur l'infiltration des crues des Oueds Zeroud et Merguellil dans la plaine de Kairouan indiquent, toutes proportions gardées, des volumes infiltrés représentant **30% des apports totaux** en ruissellement. Par analogie, l'ensemble des infiltrations de crues sur le domaine du SASS pourrait se situer autour de **300 Millions de m³/an**.

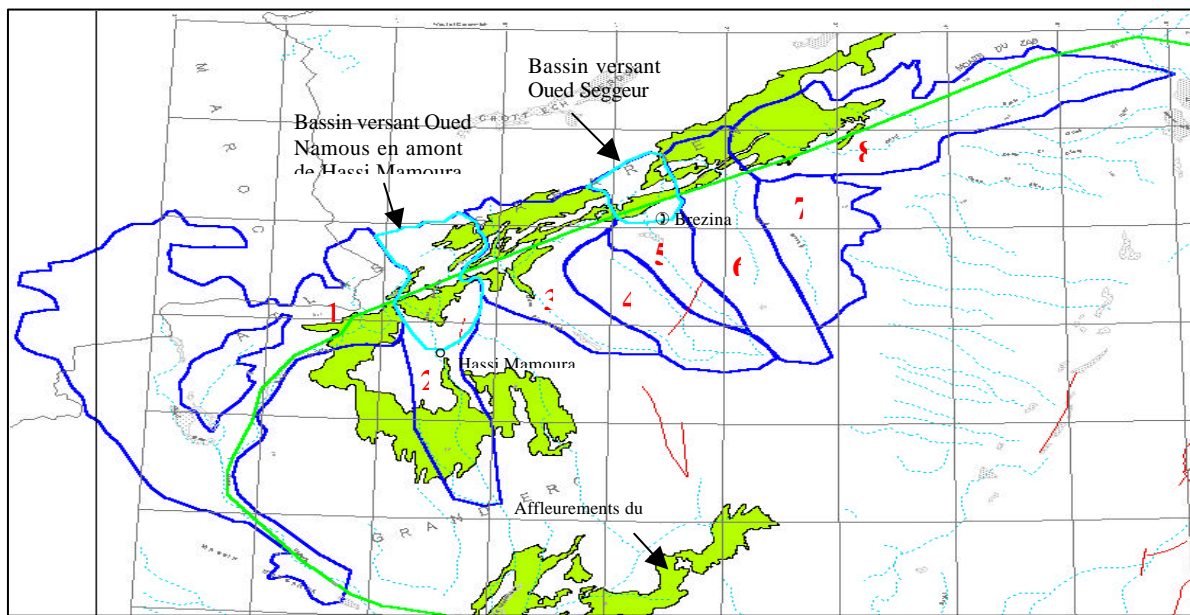
Fig. 4 : Carte de isohyètes du SASS en mm/an



11 - L'extension des affleurements « utiles » situés sur les régions où la nappe est libre , et qui contribuent à l'alimentation des nappes , respectivement du CI et du CT par infiltration directe , et la carte des précipitations moyennes fournissent les indications suivantes :

- les affleurements perméables utiles recouvrent près de **60%** de la surface totale du domaine du SASS ;
- la « ressource pluviale » de ces affleurements représente **30 Milliards de m³/an** en moyenne interannuelle ;
- lorsqu'on fait varier de **1% à 10%** le coefficient d'Infiltration des précipitations, les volumes infiltrés dans le SASS varient entre **0,3 et 3 Milliards m³/an** ;
- si l'on considère que l'ensemble des estimations de recharge du SASS publiées à ce jour tournent autour de **1 Milliard m³/an** [répartis à 2/3 pour le CT et 1/3 pour le CI], cela représenterait un coefficient d'infiltration directe des précipitations de l'ordre de **2%** si l'on tient compte des apports par infiltration des crues d'oueds.

Fig. 5 : les Bassins-Versants Sud de l'Atlas Saharien



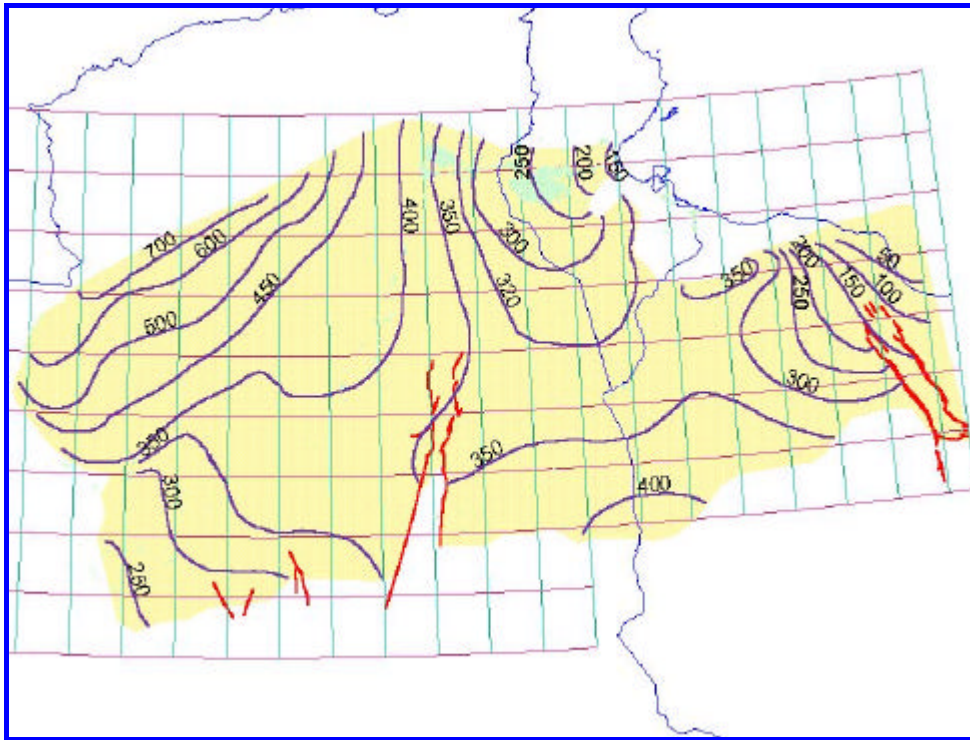
D - Caractérisation Hydrodynamique

12 - La représentation Cartographique des écoulements constitue le premier niveau de la modélisation hydrodynamique, qui implique qu'aient été arrêtées les idées concernant les origines, les directions et les devenir de ces écoulements.

Une telle carte n'avait pas encore été dressée sur tout le territoire du SASS, mais des représentations portant sur des parties du territoire existaient bien, chacune apportant sa part au progrès des connaissances.

Dans le cadre du projet, il a été nécessaire de construire une carte piezométrique qui tienne compte des contributions précédentes, de manière à présenter un schéma d'écoulements cohérent sur l'ensemble du bassin. Cette carte définit les écoulements respectifs de la nappe du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal à l'état « **naturel** », peu ou pas influencé par les pompages.

Fig. 6 : Piezometrie initiale de référence pour le Continental Intercalaire SASS, 2002



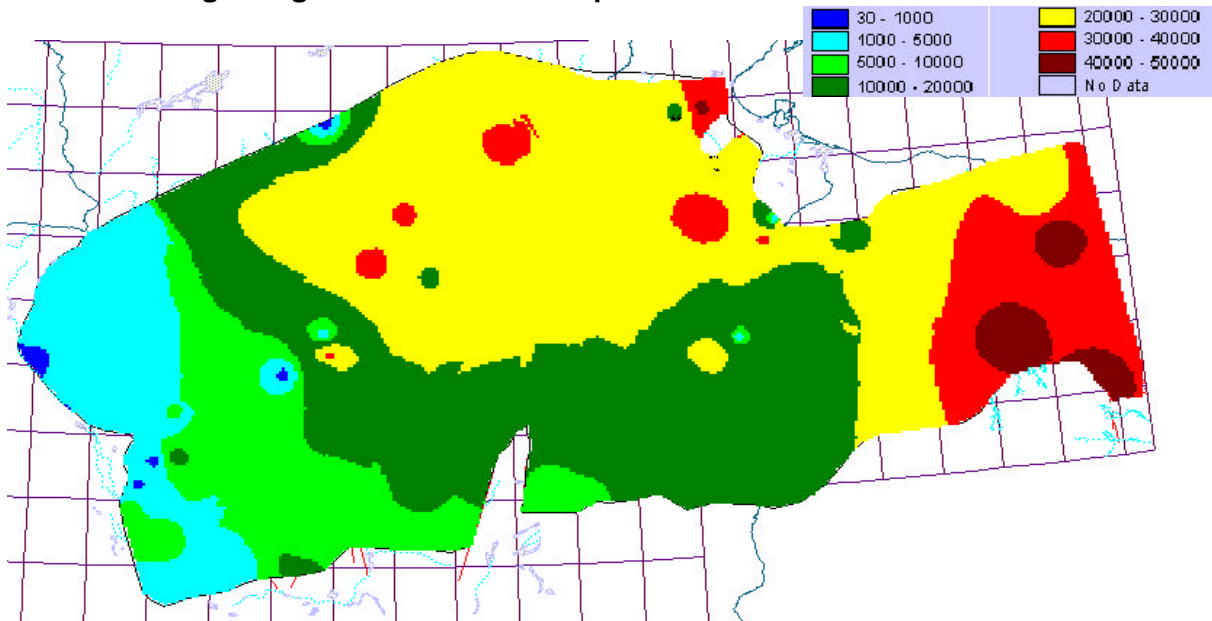
13 - Les données isotopiques concernant l'activité en carbone 14 de la nappe du CI ont été rassemblées, ainsi que les ages correspondants. Les ages les plus élevés sont de **45500 ans** ; ils correspondent à des forages proches de l'exutoire Tunisien, ou encore situés dans la partie méridionale du Graben de Hun.

Les eaux datées les plus jeunes ont **25 ans** ; elles se situent en première analyse dans les zones de recharge manifeste : le Dahar, l'Atlas Saharien, le Grand Erg Occidental. Sur l'ensemble de l'échantillon, l'âge moyen est égal à **18.000 ans**.

La carte des ages rend bien compte à la fois du gisement géologique de l'aquifère, et de son comportement hydrodynamique. En effet, et bien qu'il soit difficile de faire correspondre l'âge hydrodynamique des eaux avec leur âge radiométrique, on retrouve clairement l'organisation du SASS selon les trois Bassins géologiques et hydrodynamiques :

- Dans le Bassin Central, les eaux sont toutes anciennes, et les ages évoluent de la périphérie vers le Golfe de Gabès, indiquant bien une convergence des écoulements en direction de l'Exutoire Tunisien ;
- Dans le Bassin Occidental, les eaux sont toutes jeunes. Tout au long de leur parcours, les eaux du Continental Intercalaire continuent de se renouveler ;
- Dans le Bassin Oriental, les eaux sont anciennes. Mais Paradoxalement, les valeurs les plus fortes se trouvent à l'amont de l'écoulement, à la limite Sud là où Kiklah se trouve directement en contact avec les eaux du Paléozoïque du Djebel Hassaouna. Si l'on admet que ces dernières appartiennent bien à la catégorie des « eaux fossiles », l'anomalie des ages s'explique parfaitement : le CI est ici « rechargé », non pas par des eaux actuelles mais par les eaux anciennes du Cambro-Ordovicien.

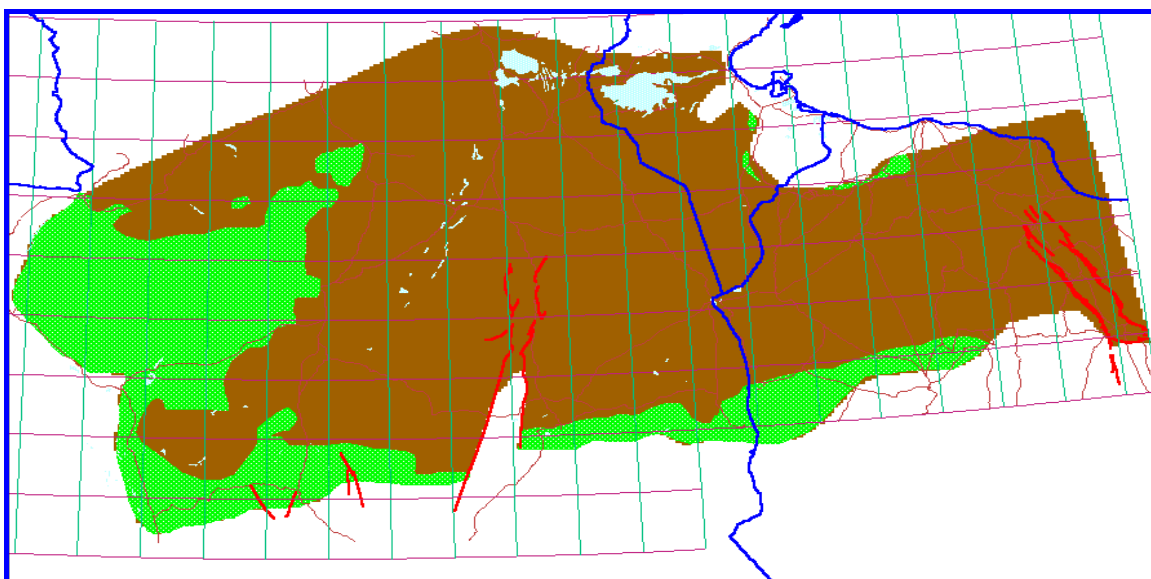
Fig.7 : Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14



14 - Sur l'ensemble du Continental Intercalaire, les valeurs de Transmissivités recueillies par le projet sont au nombre de **140**. Elles sont de **302** pour le Complexe Terminal. Les Transmissivités du CI admettent pour Moyenne **20.E-3 m²/s** ; celle du CT est égale à **16.E-03 m²/s**. La répartition spatiale des Transmissivités peut servir de repère pour le calage du Modèle en régime permanent. Par ailleurs et pour aider à la conception du Modèle, la carte d'extension de la zone à surface libre a été établie. Elle est obtenue en tout point par différence entre la cote du toit de la formation et la cote du Niveau Piezométrique de référence, respectivement pour le CI et le CT.

Ces délimitations forment un premier indicateur pour l'affectation des coefficients d'emménagement de nappe libre lors du calage du modèle en régime transitoire.

Fig.8 : Extension (en vert) de la Zone à surface libre du Continental Intercalaire

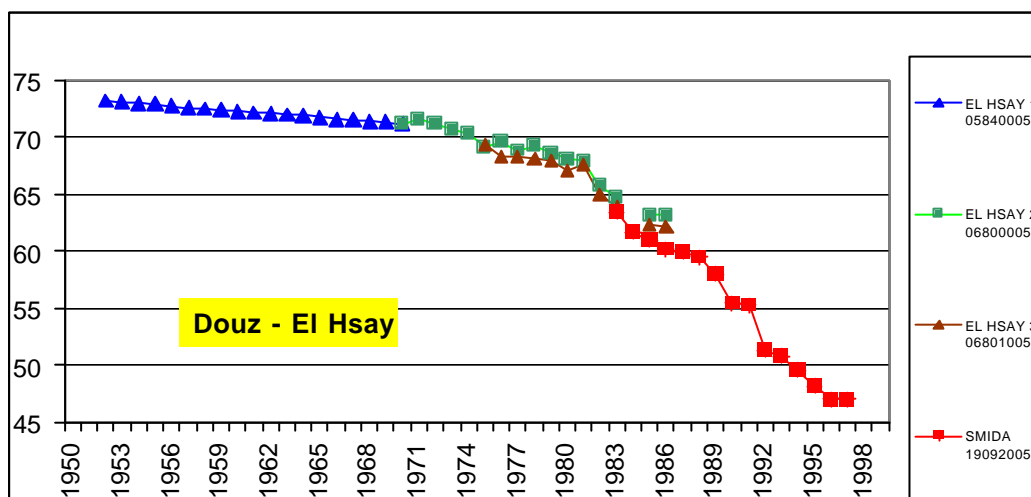


15 - Les évolutions Piézométriques les plus significatives du CI sont regroupées par secteur géographique homogène et représentatif : Tamerna pour le bassin artésien à fortes pressions au sol, Kef N°27 pour les zones proches de la surface libre, Chott Fedjej pour la proximité de l'Exutoire Tunisien, le Djerid pour de très forts rabattements, le bassin de Ghadamès et le graben.

Au CT, la présentation des courbes d'évolution piézométriques se fait également par regroupements géographiques homogènes. Au CT Tunisie, on est confronté à une situation peu commune : une multitude de forages observés, un très grand nombre de mesures, mais peu de séries suffisamment longues pour autoriser une interprétation en connaissance de cause de l'évolution du système aquifère sur une période aussi longue, 50 ans, que celle qu'il serait légitime d'investiguer.

Etant donnée la profusion des informations disponibles, il a été tenté, pour faciliter le calage transitoire des modèles, d'établir, pour chaque groupe géographique, une série-type, ou « courbe de synthèse », par agrégation des mesures disponibles sur l'ensemble du groupe.

Fig. 9 : Groupe de puits-témoins pour la reconstitution des séries piezométriques



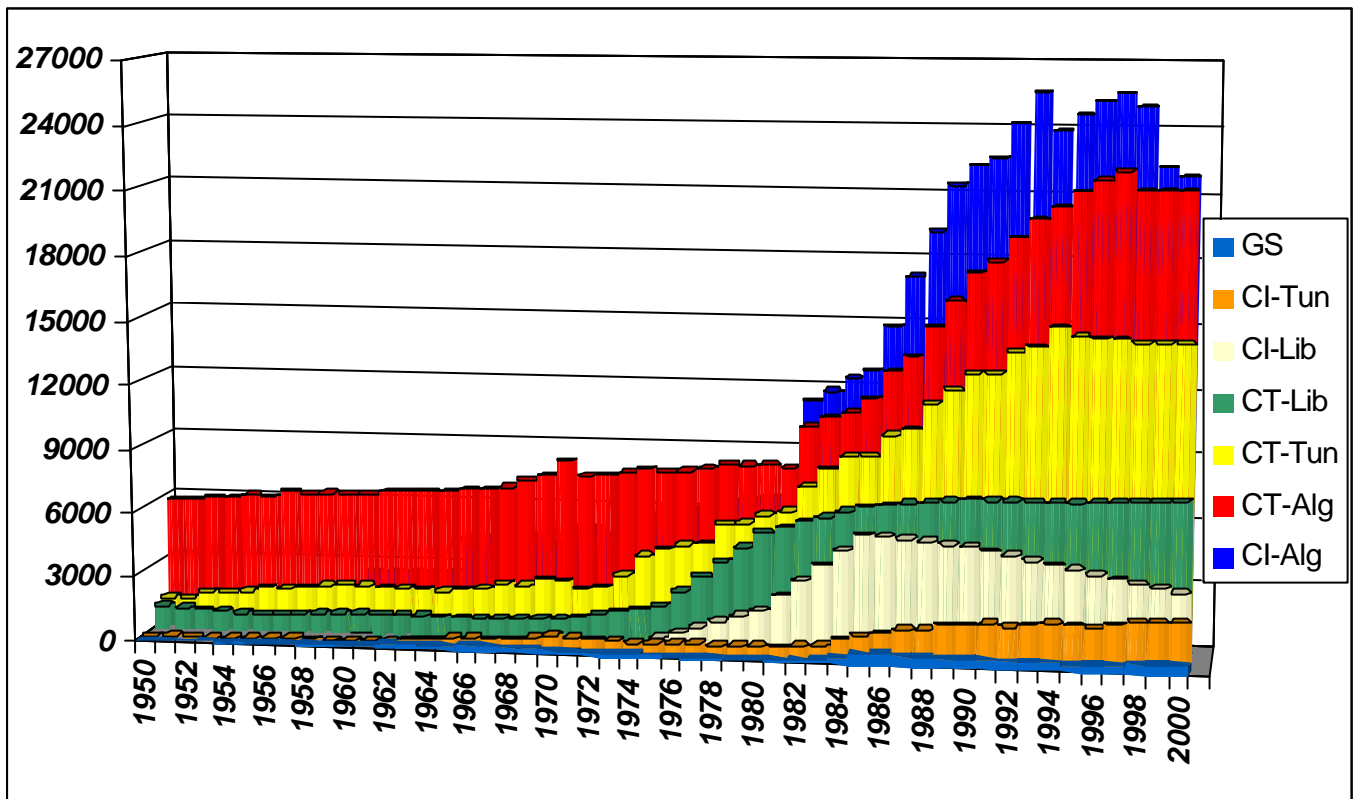
16 – La reconstitution des historiques de Prélèvements se présente avec quelque difficulté . Quelques ordres de grandeur permettront de mesurer l'ampleur de la tâche :

- On estime à **1200** le nombre de Forages au Continental Intercalaire ayant été, d'une manière permanente ou temporaire, en pompage au cours de la période 1950-2000 ;
- Ce nombre passe à **2000** Forages au Complexe Terminal pour la même période ;
- Il faut à cela ajouter les Sources de Tunisie, de Libye et les Foggaras d'Adrar, le tout représentant environ **un millier de points d'eau**.

Lorsqu'on connaît la grande difficulté qu'il y a à évaluer avec précision les débits de prélèvements sur une nappe comportant plusieurs milliers de puits et la démultiplication de ces difficultés lorsqu'il s'agit de reconstituer l'évolution de ces débits au cours du temps, on doit s'attendre à rencontrer un certain nombre de difficultés, en raison notamment de la diversité des méthodes de comptage selon les pays et de leur évolution dans le temps. L'évolution des prélèvements par forages indique un peu partout des tendances de stabilisation au cours des années 50, 60 et 70, puis une très brusque **accélération au cours des années 80**, quel que soit le pays ou l'aquifère et enfin quelquefois une tendance à la récession vers la fin des années 90. Mais ce dernier phénomène peut n'être qu'un artéfact,

peut-être dû en Algérie à l'arrêt des grands inventaires en 94-98, et en Libye à l'attribution d'un poids trop important à la mise en service des adductions du GMRP.

Fig. 10: Evolution des Prélèvements sur forages, par aquifère¹ et pays



II - ELABORATION DU MODELE MATHEMATIQUE

A - CONSTRUCTION du MODELE

17 - Pour à la fois valoriser les énormes quantités d'informations et d'idées acquises, l'expertise accumulée et assurer une harmonieuse conjugaison des visions hydrogéologiques dans les trois pays, la conception générale du modèle doit répondre à deux préoccupations majeures, en apparence contradictoires mais en réalité complémentaires :

- Demeurer dans la filiation générale des principales études réalisées, notamment celles de l'ERESS, GEOMATH et GEFLI, pour intégrer l'expertise du système accumulée au cours des trente dernières années et ainsi contribuer au progrès des connaissances acquises. Cette filiation implique l'adaptation et la mise en cohérence régionale des principales options relatives à : la distribution générale des Transmissivités et des emmagasinelements ; l'allure générale et la répartition des écoulements au plan régional ; la nature et la position des conditions aux limites, notamment des aires de recharge et d'exutoires ; le respect des ordres de grandeur des différents termes du Bilan ;

¹ l'aquifère des Grès Supérieurs [GS sur la légende] est présenté plus loin, dans la partie «construction du modèle».

- **Abandonner la dualité CI vs CT** adoptée par l'ERESS, au profit d'une représentation Multicouche dont l'élaboration du « **Modèle Conceptuel** » a bien montré qu'elle était la seule à pouvoir fédérer les trois hydrogéologies en présence et notamment Algérie-Tunisie avec Libye.

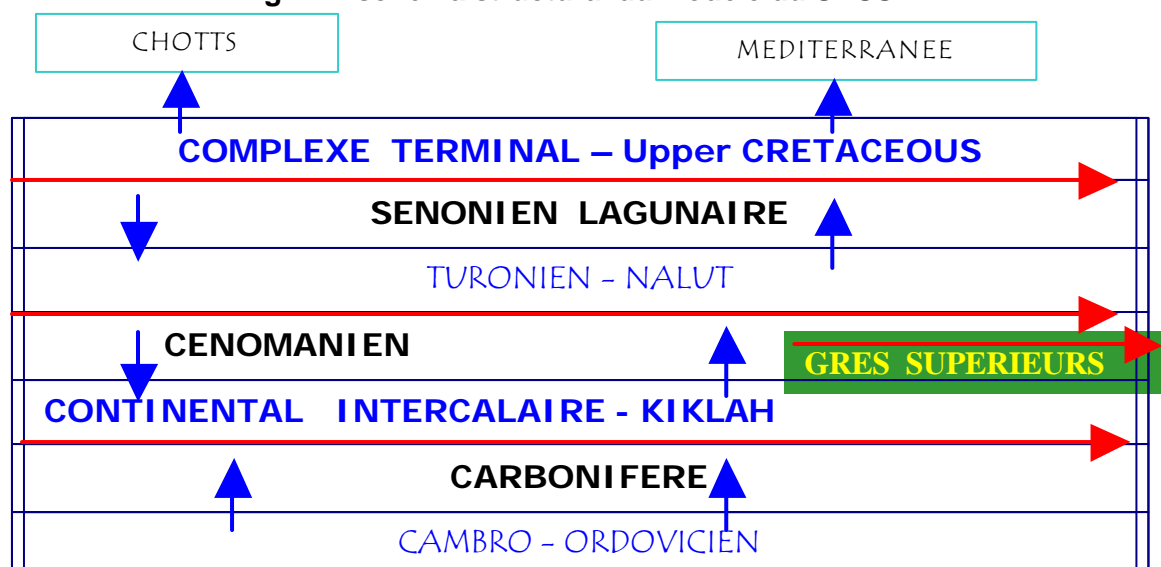
18 - La structure adoptée au terme de l'élaboration du Modèle Conceptuel comprend quatre couches aquifères séparées par trois aquitards : Les deux principales couches aquifères sont le **COMPLEXE TERMINAL** (Sables du Mio-Pliocène, Calcaires Eocènes et Sénonien Carbonaté) et le **CONTINENTAL INTERCALAIRE**. Le **Turonien** est représenté en Algérie et en Tunisie aussi bien pour assurer l'unité et le suivi du cycle hydrologique, qu'en raison de sa capacité, dans le secteur de Hassi Messaoud essentiellement, à constituer une source éventuelle de contamination sur le long terme. En Libye, il constitue un aquifère de bonne qualité sur la moitié Nord du Bassin. Quant au **Cambro-Ordovicien** (COD), il est introduit sous forme d'une couche de mailles à potentiel imposé. Sa représentation doit aider à déterminer les flux qu'il peut apporter au Continental Intercalaire en régime d'équilibre ; apports qu'il est susceptible de reprendre après la mise en exploitation des champs captants du Dj Hassaouna.

19 - Au terme de la première phase d'ajustement du modèle, est clairement apparue la nécessité d'une révision de la structure même du modèle dans le Sud tunisien. La mise en forme des données lithostratigraphiques recueillies a permis la constitution d'une Base de Données Géologiques spécifique du sud tunisien portant sur les cinq provinces géologiques de la région. Des corrélations interprovinces établies résulte une échelle « **Hydro-Stratigraphique** » comportant six entités aquifères présentes sur tout ou partie de la région. Mais la représentation du CI en Tunisie se limite à une structure Bicouche comprenant :

- le CONTINENTAL INTERCALAIRE sensu-stricto, constitué au sud par le Wealdien surmonté de l'Albien et au Nord par le regroupement de la formation Kbar el Haj avec les Gres du Chott et les Gres à Bois ;
- les **GRES SUPERIEURS** dont la singularité se justifie par un comportement piezometrique atypique dans l'espace et dans le temps en apparence sans relation avec le Continental Intercalaire.

Le nouveau schéma structural du Modèle du SASS comprend une couche aquifère supplémentaire : l'aquifère des Grès Supérieurs. Par ailleurs, la nouvelle délimitation du CI dans la région de Gabès comporte une importante lacune correspondant au **Mole du Melaab**, d'où l'aquifère est considéré définitivement absent.

Fig. 11 : schéma structural du Modèle du SASS



20 - La grille du Modèle décrit un maillage carré de **12,5x12,5 Km**, représentant pour le Complexe Terminal **4295 mailles**, pour le Turonien **4295 mailles**, pour les Grès Supérieurs **109 mailles**, pour le Continental Intercalaire **6639 mailles**, pour le Cambro-Ordovicien **1185 mailles** ; **Soit un total de 16523 Mailles** représentant une superficie développée de près de 2580000 Km². Le Modèle du SASS est un quasi-tridimensionnel fondé sur l'hypothèse du Multicouche : écoulements parallèles aux couches (horizontaux) dans les aquifères et perpendiculaires aux couches (verticaux) dans les aquitards.

21 - Le Logiciel de simulation devait notamment garantir que le modèle du SASS pût être facilement transportable entre les trois pays, ce qui impliquait une implantation sur PC et un système d'exploitation Windows. Le meilleur outil aujourd'hui disponible et remplissant ces conditions est le logiciel PMWIN et notamment sa version **PM5**, qui utilise le code Modflow de l'U.S.G.S et qui permet la modélisation des transferts d'eau dans un système aquifère multicouche par la méthode des différences finies. L'introduction des données s'effectue maille par maille, ce qui occasionne certains inconvénients au niveau de la saisie des historiques des prélèvements lorsque, précisément comme c'est le cas du SASS, ces historiques sont très longs et affectés non à des mailles mais à des forages.

Le projet a dû développer un programme d'interfaçage entre la base de données et le pré-processeur de PM5. Ce logiciel comporte également d'autres modules de calcul : transport de soluté, tracé de lignes de courant, interpolateurs...

22 - Les paramètres hydrauliques d'initialisation du calage comportent notamment les Transmissivités. Celles-ci résultent :

- Des deux modèles monocouches du C.T et du C.I (ERESS) ;
- Du modèle multicouche de GEOMATH ;
- Du modèle du CI algéro-tunisien (BRL-Ecole des Mines) ;
- Des trois modèles monocouches représentant respectivement les nappes de Mizda, Nalut et Kiklah, réalisés GEFLI.

Ce niveau d'information est enrichi par les Transmissivités récoltées au cours du projet SASS, par la prise en compte des variations de faciès, ainsi que les essais de pompage par SONATRACH dans le Turonien. Par ailleurs, la cartographie des épaisseurs des formations semi perméables et des gradients hydrauliques verticaux à travers ces couches permet d'obtenir une première estimation des perméabilités verticales.

B - CALAGE du MODELE

23 - Classiquement, **le protocole de calage** d'un modèle est d'abord conduit en **régime permanent**, de sorte à assurer la cohérence des données concernant les conditions aux limites, la piézométrie et les Transmissivités. Pour ce faire, il faut définir un état permanent de référence : c'est celui de l'année 1950.

La seconde phase du calage du modèle consiste à vérifier son **fonctionnement en régime transitoire**, où l'on s'assure de la répartition spatiale des coefficients d'emmagasinement.

En réalité, dans le cas du SASS, une procédure de calage plus large a été mise en œuvre : en sus du calage des paramètres, pour lequel les transmissivités ont également été ajustées au cours du calage en transitoire, ce sont dans certains cas des éléments réputés sûrs qui ont dû être remis en cause au cours du calage : il en a été ainsi de l'évolution des débits de prélèvements, de la forme définitive de certaines limites du modèle et de la structure même

du système aquifère. La complexité géologique du système et la difficulté d'acquisition de données précises sur les prélèvements actuels et les niveaux piézométriques ont nécessité de procéder à plusieurs révisions du modèle.

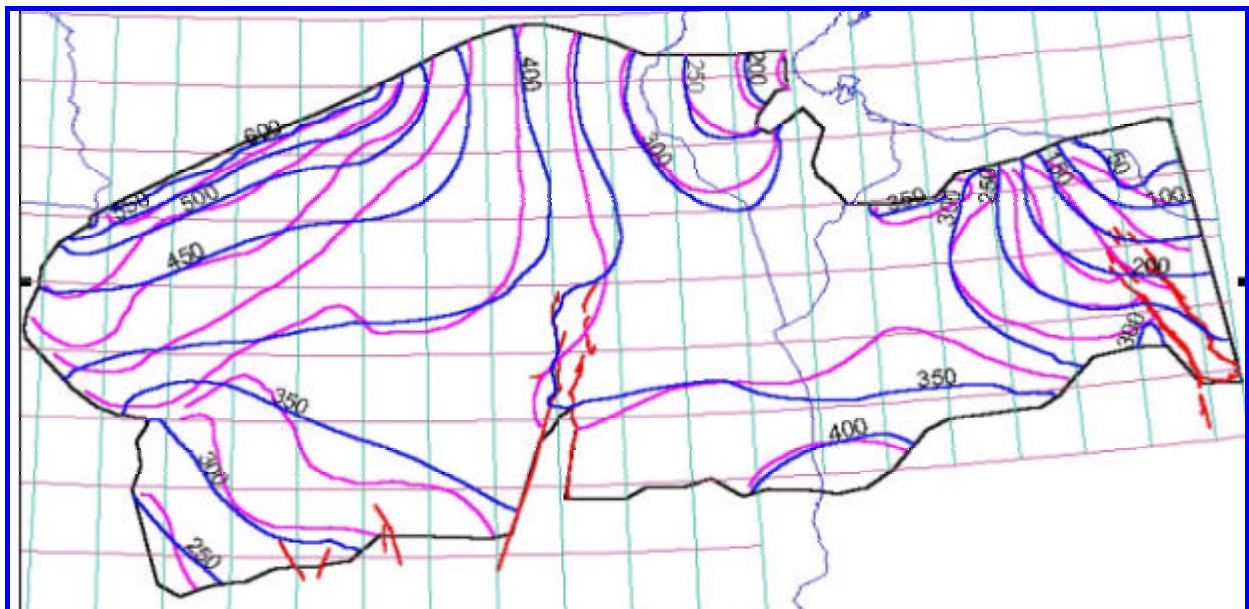
Après une première version du modèle, dénommée « **Modèle de Tripoli** », les révisions les plus importantes ont été :

- La révision des historiques de prélèvements en Algérie ;
- La révision de l'Exutoire Tunisien de la nappe du CI ;
- La reprise du modèle dans le Bassin Oriental.

24 - Pour évaluer la capacité du Modèle à reproduire au mieux l'état piézométrique régional de référence, la distribution des différences de niveau piézométrique **[Calculé-Observé]** constitue un **bon indicateur de « fidélité régionalisée »** du modèle par rapport à la réalité-terrain : **70%** de la superficie d'aquifère aussi bien CI que CT présentent des **écarts inférieurs à 25m**.

La superposition des courbes isopiézométriques calculées et observées permet également de se faire une idée de la capacité du modèle à «**épouser**» les formes des courbes dessinées. A ce titre, ces courbes peuvent être considérées comme le **critère de référence prioritaire** : elles traduisent **l'aptitude du modèle à épouser le point de vue de l'hydrogéologue**.

Fig.12: CI – Régime Permanent – Courbes piézométriques calculées (bleu) et courbes de référence (mauve)



25 - Outre la répartition des Transmissivités horizontales et verticales, l'un des principaux résultats du calage en permanent est le Bilan du multicouche saharien, dont les termes prédominants sont :

- **l'évaporation** des eaux du CT dans les chotts et sebkhas algéro-tunisiens, égale à **8.7m³/s**,
- **le débit de l'exutoire tunisien** : **3.1 m³/s**,

- **le débit des foggaras : 3.6m³/s,**
- **les sources** de Tunisie au CT et de Ain Tawargha au CI, respectivement à **2 m³/s et 2 m³/s,**
- **L'alimentation par infiltration,** respectivement de l'ordre de **18. m³/s et 10. m³/s** pour le CT et le CI, cette dernière provenant pour l'essentiel (80%) de l'Atlas saharien.

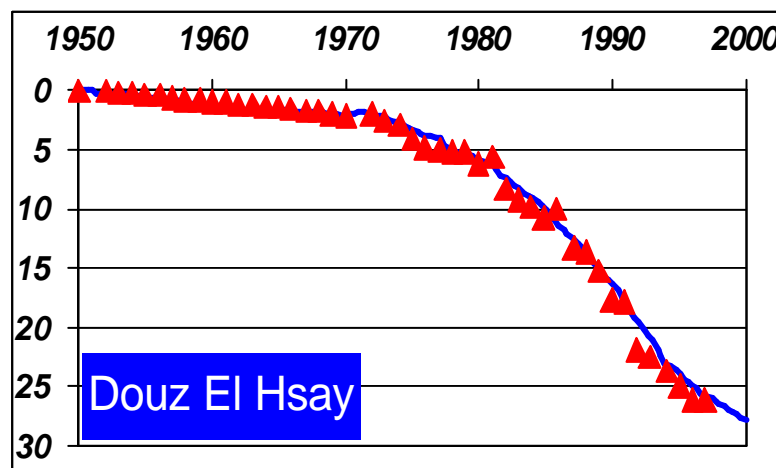
26 - En régime transitoire, la période de référence du calage va de **1950 à 2000**. Les critères du calage sont les bonnes restitutions :

- d'abord des séries de niveaux historiques de référence,
- ensuite des séries de débits mesurés aux exutoires : Sources du Djerid et Nefzaoua, Ain Tawargha et Kaam, débits des foggaras. Les résultats du calage sont la répartition des coefficients d'emménagement, les cartes piézométriques **2000** et de rabattements **1950-2000**, le bilan du SASS 2000.

27 - Les importants rabattements calculés (et observés) en **2000** pourraient induire des modifications importantes du régime hydrodynamique des systèmes aquifères par rapport à la situation connue en régime d'équilibre et ce, notamment pour ce qui concerne le Complexe Terminal, et plus précisément pour ce qui est des échanges entre le CT et les Chotts algéro-tunisiens.

L'examen de la carte piézométrique 2000 du CT indique que les lignes principales de l'écoulement sont conservées, en direction des chotts algériens et tunisiens et du golfe de Sirte. Néanmoins, l'écoulement est très fortement marqué par les pompages du Djérid, de la Nefzaoua et de la vallée de l'oued Rhir. Etant donné qu'un rabattement excessif dans ce secteur, peut engendrer une éventuelle inversion des écoulements, on doit comparer la piézométrie calculée en **2000** à la cote des chotts. On constate une **évolution très nette entre 1950 et 2000** : en Tunisie, toute la **Nefzaoua** et le Djerid, où la nappe était franchement artésienne en 1950, présentent aujourd'hui, sous l'effet de **rabattements généralisés** de l'ordre de **25 m**, des niveaux piézométriques tout juste en équilibre avec le niveau du Chott Djerid. A l'avenir, cette situation ne peut qu'empirer, sauf à diminuer le rythme des prélèvements. En Algérie, la situation est encore plus préoccupante au **Chott Merouane** où la **piézométrie du CT** se trouve d'ores et déjà **sous la cote du chott**, en situation d'«appel».

Fig. 13 : Calage d'une série historique de niveaux piézométriques en régime transitoire



28 - Le calcul du **Bilan 2000 du SASS** permet les observations suivantes :

- la **somme des recharges du système** (y compris l'apport du COD par percolation profonde) totalise $30 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui représente **43% de l'ensemble des prélèvements par forages ($70 \text{ m}^3/\text{s}$)** ;
- L'ensemble des **contributions des réserves** (« apport par rabattement ») totalise **46. m^3/s** et représente **66%** des prélèvements par forages ;
- à la lecture de ce qui précède , et à l'examen de l'évolution des rabattements en fonction du temps, on peut d'ores et déjà prévoir que les rabattements continueront de progresser, même si l'on décidait de bloquer les pompes à leur niveau actuel. L'amplitude de cette progression, dans le temps et dans l'espace, reste à préciser : ce calcul constitue **l'objet de la Simulation prévisionnelle Zéro** ;
- en comparant les Bilans 1950 et 2000, on peut noter que le **débit de l'Exutoire Tunisien** accuse une **diminution d'environ 52 %** ;
- On note également la très **forte diminution des sorties du CT** vers les chotts et les sebkhas : **$2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2000 contre $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1950** ! Cette évolution (certes prévisible du fait des prélèvements affichés et des rabattements observés) constitue, si elle devait se poursuivre, le prélude à des **bouleversements majeurs** et peut-être **irréversibles** dans la région des chotts.

III - REALISATION des SIMULATIONS PREVISIONNELLES

A – Définition et réalisation des simulations exploratoires

29 - Il s'agit d'abord de définir un certain nombre de simulations exploratoires destinées à évaluer la capacité du SASS à réaliser, sur le plan hydraulique, les objectifs de développement des ressources en eaux définis par les trois pays. Pour ce faire, on doit :

- Préciser chacun des scénarios ou des plans de développement retenus, notamment et par rapport à l'an 2000, en termes de prélèvements additionnels spatialement distribués et d'échéancier de réalisation. Chaque scénario, ou plan, fait l'objet d'une simulation;
- Définir les Résultats attendus des simulations ;
- Définir les conditions de calculs des simulations : état initial, horizon de prédiction, variation temporelle des débits, conditions aux limites.

30 - L'objectif des simulations exploratoires est précisément d'explorer les possibilités du système : il s'agit à ce stade de dire jusqu'où on peut aller en termes de développement des ressources et étant données les incertitudes qui existent aussi bien au niveau des paramètres hydrogéologiques, qu'économiques ou sociaux et qui pourraient engendrer des précisions illusoires en termes d'hypothèses de travail et de résultats, il paraît intéressant de mener les calculs sur une période qui soit :

- suffisamment longue pour que les impulsions dont on se propose de mesurer les effets aient pu atteindre toute leur envergure et se manifester aussi loin que possible dans l'espace ;
- pas trop longue de façon à ne pas dépasser les limites de signification de l'outil eu égard aux sources d'incertitudes énoncées plus haut et eu égard à la longueur des historiques ayant servi au calibrage du Modèle.

Une durée de simulation de cinquante ans paraît à cet égard raisonnable : Les simulations exploratoires sont conduites sur 50 ans, l'état initial de référence étant l'état du système en l'an 2000, tel qu'il a été reconstitué par le Modèle.

31 - Afin que le Système aquifère puisse être exploré jusqu'au plus extrême de ses réactions et de ses capacités et dans une optique et un souci de « durabilité », on simule un débit constant sur toute la période de calcul, et ce débit représente le débit maximum envisagé par le plan ou le scénario considéré. A chacun des scénarios simulés sont associés les résultats suivants :

- carte des Rabattements 2000-2050 ;
- courbes de rabattements (2000 à 2050) ;
- principaux termes du Bilan 2050 et notamment débit calculé aux trois principaux exutoires : Ain Tawargha , Foggaras, Exutoire Tunisien ;
- évaluation, en termes de rabattements supplémentaires, de l'impact du scénario sur chacun des pays voisins ;
- carte des profondeurs du Niveau Piezometrique 2050 par rapport au sol ;
- carte des profondeurs du NP sous la surface des Chotts algéro-tunisiens, que l'on peut traduire en termes d'intensité de risque (de salinisation potentielle).

32 - Le Scénario de Référence consiste en le maintien de l'actuel, ou **Simulation Zéro**. Ce scénario est nécessaire à connaître si l'on désire comparer entre eux, et apprécier en connaissance de cause, les effets des divers scénarios de développement envisagés. Il consiste à maintenir **constants les prélèvements recensés en 2000** et à calculer l'évolution correspondante du système au cours des 50 prochaines années.

33 - En Algérie, deux scénarios ont été élaborés :

- **une Hypothèse Forte** représentant un prélèvement additionnel de **101 m³/s**, qui porterait les prélèvements algériens de **42 m³/s en 2000 à 143 m³/s** à l'horizon 2030 ;
- **une Hypothèse Faible** pour un prélèvement additionnel de **62 m³/s**, portant les prélèvements algériens de **42 à 104 m³/s**.

Au niveau de la Tunisie, le scénario envisagé prévoit que les économies réalisées par l'amélioration des efficacités de l'irrigation vont peu à peu compenser la demande additionnelle des nouveaux périmètres irrigués : ceci correspond à peu de chose près au scénario de « maintien de l'actuel ».

En Libye, les Simulations exploratoires concernent deux programmes :

- Le Champ de Pompage de Ghadamès-Derj, correspondant à la dernière phase du GMRP et où doit être mis en exploitation un débit additionnel de **90. Mm³/an** ;
- Le Champ captant de Djebel Hassaounah dans la nappe du Cambro-Ordovicien, qui est figurée par une couche de mailles à niveaux imposés pouvant varier dans le temps.

Récapitulatif des Simulations Exploratoires

SCENARIO	Forages CI m3/s	Forages CT m3/s	Total Forages SASS m3/s
Simulation Zero :			
Algérie [1]	21.2	20.9	42.1
Libye [2]	3.4	7.4	10.8
Tunisie [3] <i>Grès Sup inclus dans CI</i>	2.7	14.5	17.2
TOTAL SIM-ZERO	27.3	42.8	70.1
Débits_ADDITIONNELS :			
Algérie_Hyp_faible [4]	36.4	26.1	62.5
Algérie_Hyp_FORTE [5]	59.6	41.8	101.4
Libye_Ghadamès field [6]	2.9	0.0	2.9
Libye_Jbel Hassaouna	0.0	0.0	0.0
TOTAUX DEBITS SIMULES :			
TOTAL Hypothèse faible = [1]+[2]+[3]+[4]	63.7	68.9	132.6
TOTAL Hypothèse FORTE =[1]+[2]+[3]+[5]	86.9	84.6	171.5
TOTAL Ghadames field_Libye = [1]+[2]+[3]+[6]	30.2	42.8	72.9

34 - Au Continental Intercalaire, la simple poursuite des prélèvements actuels devrait entraîner d'ici à l'horizon **2050** : d'importants **rabattements** dans tout le Bas Sahara algérien, supérieurs à **40 m** dans une région centrée sur un axe El Oued – Hassi Messaoud. Ailleurs en Algérie les rabattements demeurent faibles.

- En Tunisie, les rabattements sont partout supérieurs à **20 m**. Ils dépassent 40m dans le secteur de Ksar Ghilane et sont de l'ordre de **25 m** autour du Chott Fedjej.
- En Libye, les rabattements sont d'environ **25 m** autour des principaux centres d'exploitation : Bani Walid, Wadi Zamzam, Wadi Ninah, Sufajin. Ailleurs, les rabattements calculés sont de l'ordre de **10m** dans l'ensemble de la Hamada El Hamra.

Les profondeurs des **Niveaux Piezométriques** montrent que les limites d'artésianisme calculées en 2050 ne sont pas très éloignées des limites actuelles : la perte d'artésianisme est limitée aux secteurs d'El Borma et de Ghadamès.

35 - Au Complexe Terminal, le scénario zéro se présente ainsi :

- En Algérie, les rabattements dépassent **30m** dans toute la vallée de l'Oued Rhir au Nord de Toggourt ; ils atteignent 60 m au nord des chotts.
- En Tunisie, les rabattements sont entre **20 et 30m** dans tout le Djerid et la Nefzaoua.
- En Libye, le maximum des rabattements (de l'ordre de 60m) se trouve au SudEst, autour des groupes de Soknah, Hammam et Ferjan.

Par ailleurs, la carte des Niveaux Piézométriques et celle des profondeurs des NP par rapport au sol, indiquent clairement **la disparition totale de tout artésianisme dans la région des Chotts algéro-tunisiens**. On peut même noter que les Chotts Merouane et Melhrir se trouvent totalement « **suspendus** » au dessus de la surface piézométrique du CT, et il en est de même en Tunisie aussi bien dans le Djerid que la Nefzaoua, avec tout ce que

cette **situation particulière, inconnue jusqu'ici dans la région**, peut impliquer comme risques de « réalimentation » de la nappe du CT par les eaux des Chotts.

Du point de vue du risque de contamination par le sel, ces secteurs sont donc d'ores et déjà fortement exposés et ce, sans même l'ajout d'aucun prélèvement nouveau : *la simple poursuite des rythmes de prélèvements actuels y constitue un danger potentiel majeur*. En Libye, l'artésianisme a baissé, notamment dans la zone côtière qui constitue la zone la plus exposée au risque d'inversion des écoulements.

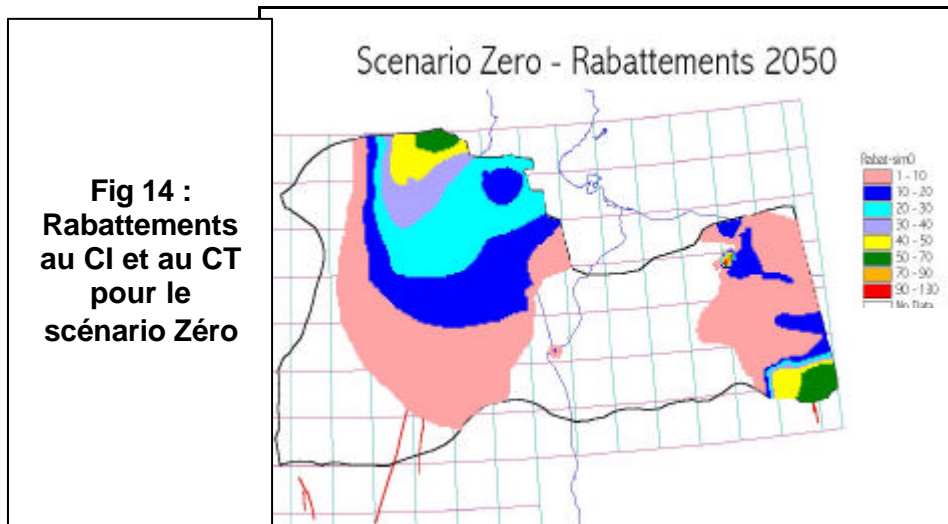
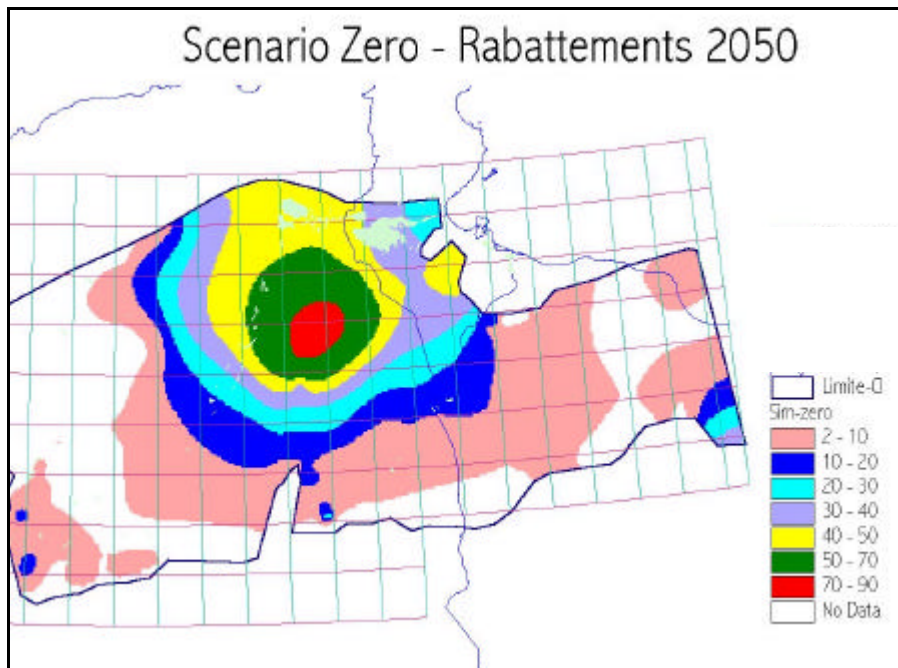


Fig 14 :
Rabattements
au CI et au CT
pour le
scénario Zéro

36 – L'Hypothèse Forte se manifeste au CI par des **rabattements de 300 à 400 m** à Ghardaia, Oued Rhir, El Oued, Ouargla. Il y a disparition totale de l'artésianisme dans le Bas Sahara algérien : dans toute la vallée de l'Oued Rhir, les profondeurs de pompage se situent entre **100m et 300m**. Si la Libye n'est pratiquement pas touchée par ce scénario, la Tunisie se trouve très fortement influencée :

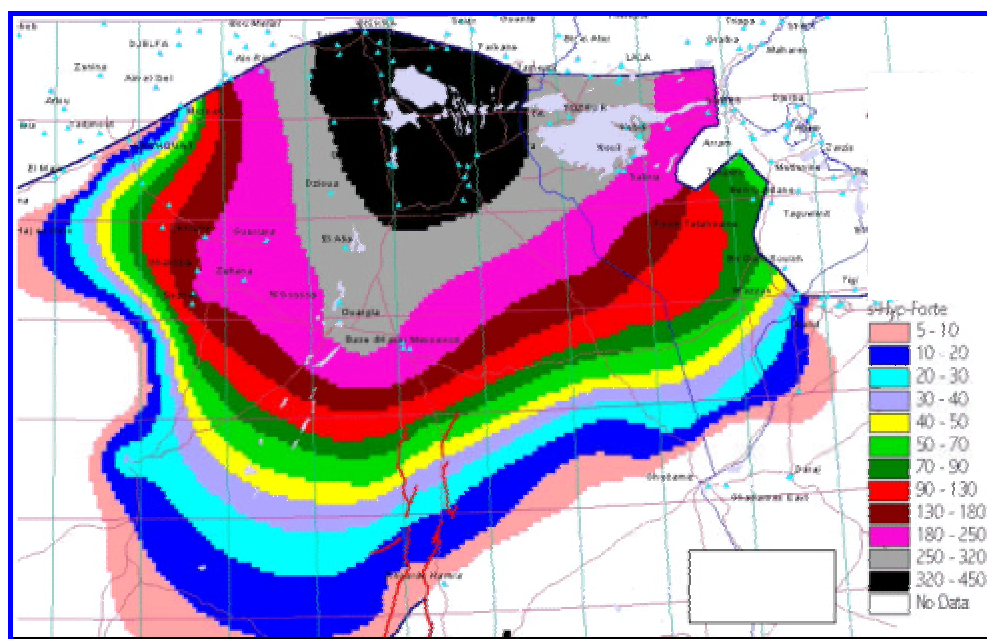
- **Rabattements de 200 à 300 m** dans les principaux champs captants,
- Extinction générale de l'artésianisme,
- Disparition totale de l'Exutoire Tunisien.

Au Complexe Terminal, il y a de très importants rabattements additionnels dans l'Oued Rhir, le Souf, Ouargla. En Libye, ce scénario n'a aucune incidence. Mais en Tunisie les impacts sont considérables :

- Rabattements additionnels de l'ordre de 50m au Djerid et de 30m dans la Nefzaoua,
- les Chotts (Djerid et Rharsa) sont en position de réalimentation vis à vis du CT et les différences de niveau sont de l'ordre de 50m en moyenne. Cette différence de niveau, qui constitue le principal indicateur de risque, est encore bien plus élevée en Algérie où elle dépasse **100 m** sous les Chotts Melhrir et Merouane, et atteint **200m** à Mghaier et Djamaâ.

37 - Les rabattements du CI dus à l'Hypothèse Faible sont également très importants : **250m** à El Oued-Biskra. **L'artésianisme a disparu** de tout le Bas Sahara et les profondeurs de pompage y sont de **100 m**. En Tunisie, **l'artésianisme a totalement disparu** et **l'Exutoire Tunisien est tari**. Au **CT**, les rabattements sont très élevés, aussi bien en Algérie qu'en termes d'influence sur la Tunisie et les Chotts sont partout en position de réalimentation potentielle.

Fig. 14 : CI Hypothèse forte ; Rabattements nets 2050



38 - Les rabattements induits par le champ de pompage de Ghadamès sur le CT sont négligeables. Quant au Continental Intercalaire, les rabattements y sont de l'ordre de **100 m** dans le champ et diminuent progressivement en s'en éloignant pour s'annuler dans un rayon de 200 à 300 km. Tout l'extrême Sud tunisien est influencé et dans la région de Debdeb en Algérie les rabattements induits sont de l'ordre de **60 m**. Par ailleurs, l'influence au CI du champ de Dj. Hassaouana se limite au bassin de Hamada El Hamra et n'atteint pas les frontières algérienne et tunisienne. En Libye, les rabattements calculés forment une auréole entourant le champ captant, avec un maximum de 50m au Sud.

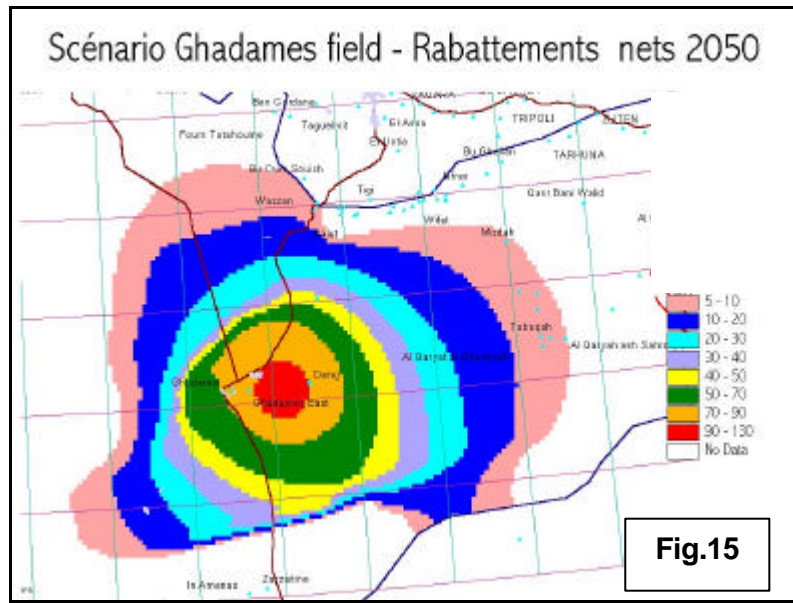


Fig.15

B - Miniaturisation du modèle pour l'investigation du réservoir

39 - Les simulations exploratoires ont mis en exergue un certain nombre de nuisances et de « risques » auxquels est exposée la ressource en eau du simple fait de son développement.

Vouloir continuer à exploiter encore plus les nappes du CI et du CT nécessitera désormais de savoir, en connaissance de cause, **minimiser et gérer ces risques**, parmi lesquels on peut notamment citer :

- la disparition de l'artésianisme,
- des hauteurs de pompages excessives,
- le tarissement de l'Exutoire Tunisien,
- le tarissement des Foggaras,
- les interférences exagérées de rabattements entre pays,
- la réalimentation potentielle par les Chotts.

Les résultats de l'«Hypothèse Forte» et de l'«Hypothèse faible» ont par ailleurs démontré les limites de l'approche «simulation pure» dans la définition d'une stratégie de développement du SASS. Aussi bien l'Hypothèse Forte que l'Hypothèse faible, qui paraissaient de prime abord devoir «encadrer» les choix des décideurs et les solutions envisageables, auraient au vu de ces résultats des conséquences dévastatrices sur le devenir du SASS. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de **rechercher une autre façon** de procéder à la **définition de solutions acceptables**, à l'aide d'un **modèle miniature**.

40 - Le principe du «**micro modèle**» est le suivant. On applique dans une **maille i** un prélèvement égal à l'unité de débit et maintenu constant pendant toute la durée de la simulation, et on calcule le rabattement dans chacune des mailles du modèle. Ce calcul peut être répété pour toutes les mailles. On aboutit à une **matrice d'influence à n^2** si **n** est le nombre total des mailles du modèle.

Soit $a_{ij}(t)$ le rabattement provoqué en **j** et au temps **t** [$t = 50\text{ans}$], par l'échelon unitaire de prélèvement en **i**, le rabattement provoqué en **j** par un pompage quelconque Q_i effectué en **i** est égal à : $r_{ij}(t) = a_{ij}(t)Q_i$.

La connaissance des coefficients a_{ij} est donc suffisante pour déterminer les rabattements correspondant à une répartition quelconque des pompages à l'intérieur du système aquifère. La définition de chaque fonction a_i nécessite d'effectuer une simulation sur le modèle, dont la durée est de 50 ans ; ce qui représente une certaine masse de manipulations.

Toutes les mailles du modèle (plusieurs dizaines de milliers) ne sont pas appelées à devenir des mailles de pompage, on limite les calculs aux mailles devant servir un jour à réaliser des pompages d'une part et à observer les effets des pompages d'autre part.

On peut aboutir ainsi à des matrices de coefficients d'influence de dimension « visuelle » et conviviale, que l'on puisse manipuler et dont on puisse immédiatement mesurer les réactions, dans une simple feuille de tableur sur l'écran d'un micro-ordinateur.

41 - Le principe adopté au vu des résultats des simulations exploratoires était donc de **s'affranchir de la recherche de scénarios de développement** à priori sans relation directe avec les propriétés de l'aquifère, fondés uniquement sur les prédictions de la demande en eau et de rechercher au contraire à bâtir des scénarios à base « **hydraulique** » en se fondant sur les capacités de production du SASS, en des sites aussi proches que possible des lieux où une demande actuelle ou future aurait le plus de chances de s'exprimer fortement, sans toutefois s'interdire de prospecter des secteurs favorables qui seraient éloignés des sites de demande potentiels mais pourraient s'avérer propices à l'exportation.

La première étape d'un tel processus consiste à inventorier tous les sites de pompages potentiels . Cet inventaire a pu être réalisé pays par pays.

42 – On est en présence de **89 sites** de pompages potentiels au total sur l'ensemble du SASS : **55 au CI et 34 au CT**. Chacun de ces sites fait l'objet d'une simulation « unitaire » sur le modèle numérique, qui consiste à calculer, sur une période de 50 années comptées à partir de 2001, la fonction de rabattement ou fonction d'influence en chacun des puits-témoins. Pour chacune des deux nappes, la dimension de la matrice des coefficients d'influence est devenue trop importante et notamment pour le CI où l'on obtient une taille de 55 x 55, qu'il devient impossible d'afficher dans une fenêtre unique sur écran.

Fig. 16 : Le convertisseur débits-rabattements du SASS

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?																																								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG							
		Ouled-djellal	El-oued	Djemaa	M'ghaier	Taleb-el-larbi	Sebseb	Guerrara	Zelfana	El-alia	N'goussa	Ouargla	H-Mess-nord	Deb-deb	C-F	Bhaier	Sabria	El-gounna	Ghoumrassen	Bordj-Bourguiba	Bir-zar	Tiaret	Borj-el-khadra	Hazoua	Deguache-hamma	PIK	Nalut	Sinawan	Ghadames	Rabattement-Total	Hauteur pompage	Etat	Contr.Rab							
1																																								
2	POMPAGES	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	17.0										
3	Ouled-djellal	0	0	0	0	0	14	0	10	10	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	46	-42	Artésien								
4	Tolga	0	0	0	0	0	13	0	10	10	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	45	-108	Artésien								
5	El-oued	0	0	0	0	0	10	0	8	10	4	3	4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	43	-83	Artésien								
6	Ben-guecha	0	0	0	0	0	9	0	7	8	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	36	-130	Artésien								
7	Djemaa	0	0	0	0	0	14	0	10	12	5	4	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	51	-163	Artésien	<= 10							
8	M'ghaier	0	0	0	0	0	13	0	10	11	4	3	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	47	-197	Artésien	<= 13							
9	Taleb-el-larbi	0	0	0	0	0	8	0	6	8	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	34	-92	Artésien								
10	Douar-el-maa	0	0	0	0	0	8	0	6	8	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	34	-95	Artésien								
11	Sebseb	0	0	0	0	0	45	0	16	4	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	147	0								
12	Guerrara	0	0	0	0	0	30	0	23	10	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	98	0								
13	Zelfana	0	0	0	0	0	41	0	21	8	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	0								
14	El-alia	0	0	0	0	0	21	0	16	18	9	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	-26	Artésien								
15	N'goussa	0	0	0	0	0	21	0	15	17	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	-25	Artésien								
16	Ouargla	0	0	0	0	0	22	0	15	13	12	11	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	-21	Artésien								
17	H-Mess-nord	0	0	0	0	0	17	0	12	13	12	12	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	4	0								
18	Deb-deb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	2	15	23	0	0	0	0	0	66	151	141	0								
19	C-F	0	0	0	0	0	4	0	3	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1	19	-62	Artésien								
20	Bhaier	0	0	0	0	0	4	0	3	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	1	21	-68	Artésien								
21	Sabria	0	0	0	0	0	5	0	4	5	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	1	24	-76	Artésien								
22	El-gounna	0	0	0	0	0	5	0	4	5	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	3	2	1	0	0	0	0	0	2	27	-49	Artésien								
23	Ghoumrassen	0	0	0	0	0	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6	4	2	0	0	0	0	0	3	24	69	0								
24	Bordj-Bourguiba	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	11	7	3	0	0	0	0	0	7	37	88	0								
25	Bir-Zar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	26	22	9	0	0	0	0	0	22	92	154	0								
26	tiaret	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	11	101	27	0	0	0	0	0	66	235	291	0								
27	orj-el-khadra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	5	27	25	0	0	0	0	0	85	190	174	0								
28	Hazoua	0	0	0	0	0	8	0	6	8	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	1	37	-57	Artésien	< 50							
29	Deguache	0	0	0	0	0	4	0	3	5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	20	31	0	< 50							
30	PIK	0	0	0	0	0	3	0	2	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	13	-89	Artésien	< 50							
31	Nalut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	3	281	0								
32	Sinawan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	13	30	15	0	0	0	0	0	41	117	237	0								
33	Ghadames	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	4	22	28	0	0	0	0	0	65	163	154	0								
34	Total Algerie					11.5	Total Tunisie		2.5	Total Libye		3.0	Débit exutoire tunisien (m3/s)													0.50														
Erq-Occidental / Coef2 / TUNISIE / ALGERIE / Alq+Tun+Lib / Coeff / initiale /																																								

43 - Or précisément, l'objet de la miniaturisation du modèle consiste à construire, sur la feuille d'un tableur, un **convertisseur débits-rabattements** de même format que la matrice des coefficients d'influence du problème, lié aux coefficients de la matrice et utilisant ces derniers pour, en vertu du principe de superposition des écoulements, calculer les rabattements correspondant aux débits de pompage affichés sur le convertisseur. Ces débits sont modifiables à souhait par l'opérateur, qui dispose aussitôt des nouvelles valeurs des rabattements correspondants calculés.

L'un des principaux avantages du convertisseur est son **interactivité** : l'opérateur doit donc **disposer sur le même écran à la fois des données et des résultats du problème**. Avec un écran ordinaire, le confort de manipulation commence à baisser notablement lorsqu'on atteint des tailles de tableaux dépassant 25 colonnes. C'est pour cette raison que le problème a été décomposé en parties : d'abord un **micro-modèle par pays et par nappe**, incluant des puits-témoins frontaliers pour apprécier les interférences transfrontières, ce qui permet dans une première étape de rechercher un certain nombre de configurations « acceptables », puis dans une seconde étape confronter ces dernières sur un convertisseur

groupant l'ensemble des champs « interférents » du SASS, qui regroupe d'une part ceux du bas Sahara algérien, la Tunisie et le bassin de Ghadamès pour la nappe du CI, et d'autre part l'ensemble du bassin des chotts pour ce qui concerne le CT.

44 - L'évolution passée de l'exploitation du SASS indique des **croissances vertigineuses au cours des vingt dernières années**. Si cette évolution, également partagée dans les trois pays, devait se prolonger, il y aurait sans doute de sérieuses raisons de s'inquiéter pour l'avenir des régions sahariennes, où l'on a pu d'ores et déjà enregistrer **les premiers signes d'une dégradation de l'état de la ressource** : très importants rabattements de nappe risquant d'entraîner sous peu une salinisation, **irréversible**, des eaux de la nappe du Complexe Terminal en équilibre hydraulique avec les chotts algéro-tunisiens.

Une telle évolution a pu être très fortement confirmée par les résultats des premières simulations exploratoires réalisées sur le Modèle numérique du SASS et notamment par la simulation des scénarios «**hypothèse forte**» et «**hypothèse faible**».

Les trois pays concernés par le devenir du système sont donc condamnés, à court terme, à une certaine forme de gestion concertée du Bassin Saharien : comment assurer un maximum de prélèvements d'eau pour le meilleur développement de la région sans risquer pour autant de dégrader l'état de la ressource ?

Et comment parvenir à formuler le « meilleur » schéma d'exploitation dans ce sens ?

Le Micro-Modèle du SASS a précisément été conçu pour ce faire. Encore faut-il d'abord inventorier les risques encourus et préciser les contraintes que l'on devra respecter pour minimiser ces risques. **Cela nécessite de pouvoir quantifier ces risques, ce qui revient à savoir les modéliser. Le Modèle Numérique du SASS est précisément investi d'une telle fonction.**

C – Réalisation des simulations prévisionnelles

45 - Les manipulations réalisées sur le micro-modèle au cours de l'Atelier de Tunis des **1 et 2 Avril 2002** ont permis de s'orienter vers un certain nombre de scénarios répondant aux objectifs de développement tout en minimisant les risques de dégradation par le respect des contraintes imposées.

Ces scénarios, identifiés sur le micro modèle, sont par la suite simulés sur le modèle numérique qui donne des résultats plus complets et permet plus précisément de mesurer le niveau de respect des contraintes.

Les résultats des simulations prévisionnelles sont évaluées à la lumière d'un certain nombre d'indicateurs que sont :

- les *rabattements nets* (abattements desquels ont été déduits ceux du scénario zéro calculés à la même période) ;
- les *interférences en rabattements* ;
- le *débit des exutoires* ;
- l'*artésianisme pour le CI et la position des niveaux par rapport aux Chotts pour le CT* ;
- le *bilan en eau 2050*.

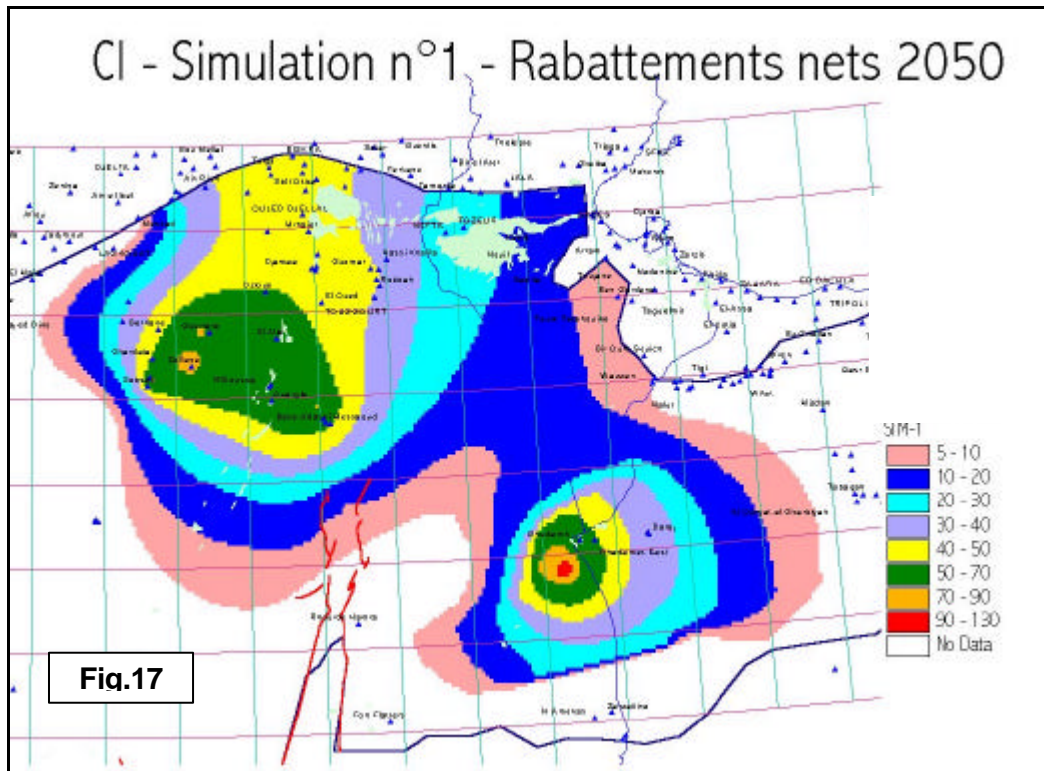
Prélèvements Additionnels au Continental Intercalaire m ³ /s								
Scénario	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5	CI-6	CI-7	CI-8
Algérie	8.5		2	8.5	38.5	80		118.5
Tunisie		2.2	1.4	2.2				2.2
Libye			2.9	3.6			5.2	8.35
Total	8.5	2.2	6.3	14.3	38.5	80	5.2	129

Prélèvements Additionnels au Complexe Terminal m ³ /s					
Scénario	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5
Algérie	14.7				14.7
Tunisie		3.3			3.3
Libye			11		11
Algérie-Oued Mya				18.0	18.0
Total	14.7	3.3	11	18.0	47

46 – Simulation CI-1 ; Le Bas Sahara Algérien : [8.5 m³/s additionnels]. Les rabattements sont concentrés autour de Zelfana-Ouargla et du champ de Debdeb. En Tunisie, le rabattement induit est de **25m** à Tozeur-Nefta, et de **12m** à Chott Fejej. En Libye, l'influence du pompage à Debdeb se traduit par des rabattements nets de l'ordre de **40 à 50m** au niveau du champ de Ghadames-Derj, ainsi du reste que dans l'extrême sud tunisien : **50m** à Bj el Khadhra et **30m** à Tiaret. Sur les Foggaras, l'impact de cette simulation est strictement nul.

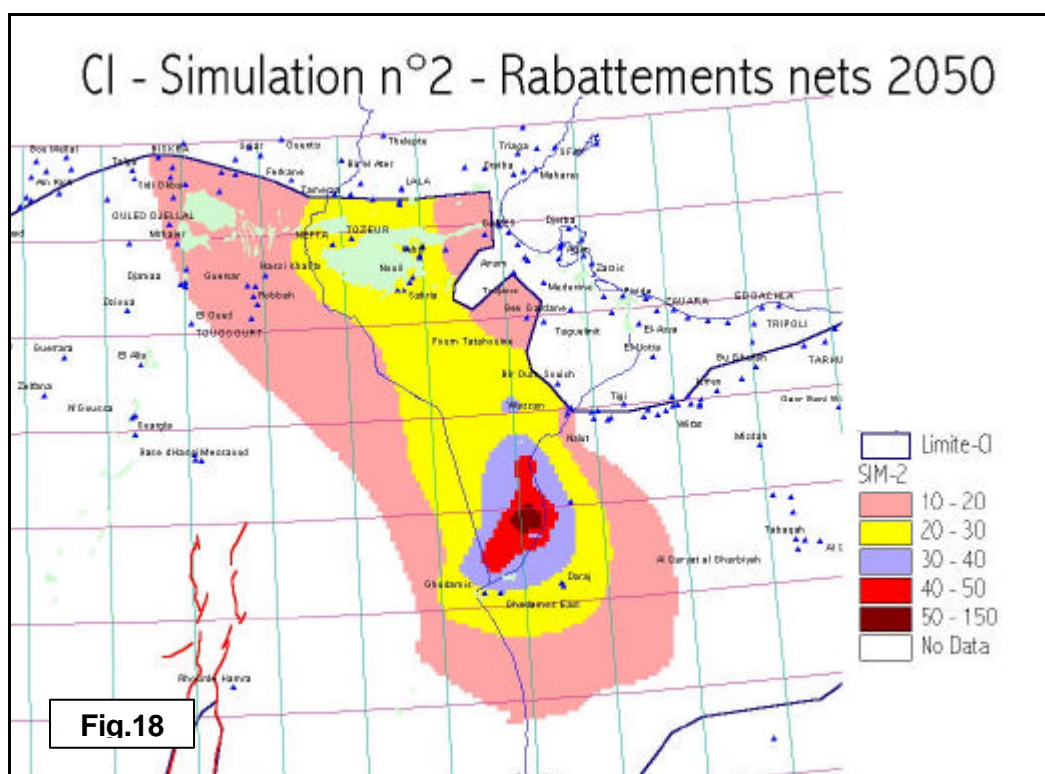
Quant à l'Exutoire Tunisien, son débit 2050 est passé à **0.6m³/s**, alors qu'il aurait été de **0.94m³/s** dans le cas du scénario zéro. En Algérie, il y a disparition de l'artésianisme à Hassi Messaoud ; ailleurs, l'artésianisme demeure actif un peu partout : **80m** à Ouargla, **50m** à Toggourt et à El Oued, **180m** à Mghaier. En Tunisie, nous avons encore **80m** à Tozeur et Sabria. On peut estimer à la lecture du Bilan que les débits de prélèvements additionnels proviennent à raison de :

- 93% par contribution des réserves,
- 4% par récupération sur l'exutoire tunisien,
- 2,5% sur la drainance.



47 - Simulation CI-2 ; Le CI en Tunisie : [2.2 m³/s additionnels]. Les rabattements les plus importants, de l'ordre de **130m**, s'observent dans l'extrême sud et notamment au champ de Tiaret. Ailleurs ils sont relativement faibles : **20m** dans la Nefzaoua et **15m** à Chott Fedjej. Au Nord, les influences sur l'Algérie sont faibles : **10m** à Biskra et Mghaier, **8m** à Toggourt, **13m** à El Oued, **22m** à Taleb El Arbi. Au sud, elles sont de **25m** à Debdeb en Algérie et de **30m** sur le Champ de Ghadames field en Libye. Le débit de l'Exutoire Tunisien est ramené à 0.5 m³/s. Sur l'artésianisme, l'incidence est minime. Par référence au scénario zéro, on peut considérer que le débit additionnel simulé (2.2m³/s) provient :

- des réserves de la nappe du CI à **73%**,
- de l'exutoire tunisien à **20%**,
- de la drainance à **5%**.



48 - Simulation CI3 ; le Bassin de Ghadamès : [6.3m³/s additionnels]. Dans le secteur des champs captants simulés, les rabattements attendus sont très élevés : de l'ordre de **180m à 200m** à Ghadamès, Debdeb, Tيارت ; et le cercle à **100m** de rabattement possède un rayon de 100km. Cette simulation ne permet pas de mesurer les influences mutuelles, les prélèvements étant effectués dans les trois pays. L'Exutoire Tunisien passe à **0.84m³/s**. Les débits additionnels sont fournis par :

- la contribution des réserves soit 86%,
- la drainance du Turonien soit **8%**,
- le Cambro-Ordovicien soit **3%**,
- l'exutoire tunisien soit **1.5%** .

49 - Simulation CI-4 ; le CI dans l'ensemble du Bassin Central : [14.3m³/s additionnels]. Cette simulation correspond, à peu de chose près, au cumul des débits affichés dans les trois simulations précédentes ; il est donc naturel, que les rabattements y représentent la somme des rabattements des simulations 1, 2 et 3. Les trois pays participent au pompage : il ne peut donc y avoir d'estimation des effets réciproques. L'Exutoire Tunisien passe à **0.13 m³/s**, sous l'effet conjugué des prélèvements tunisiens et algériens. Au niveau de l'artésianisme, Il existe peu de différence avec la simulation CI. Le débit total de pompage simulé est fourni par :

- les réserves du CI (**87%**),
- l'exutoire tunisien **5.5%**,
- la drainance du Turonien **4%**.

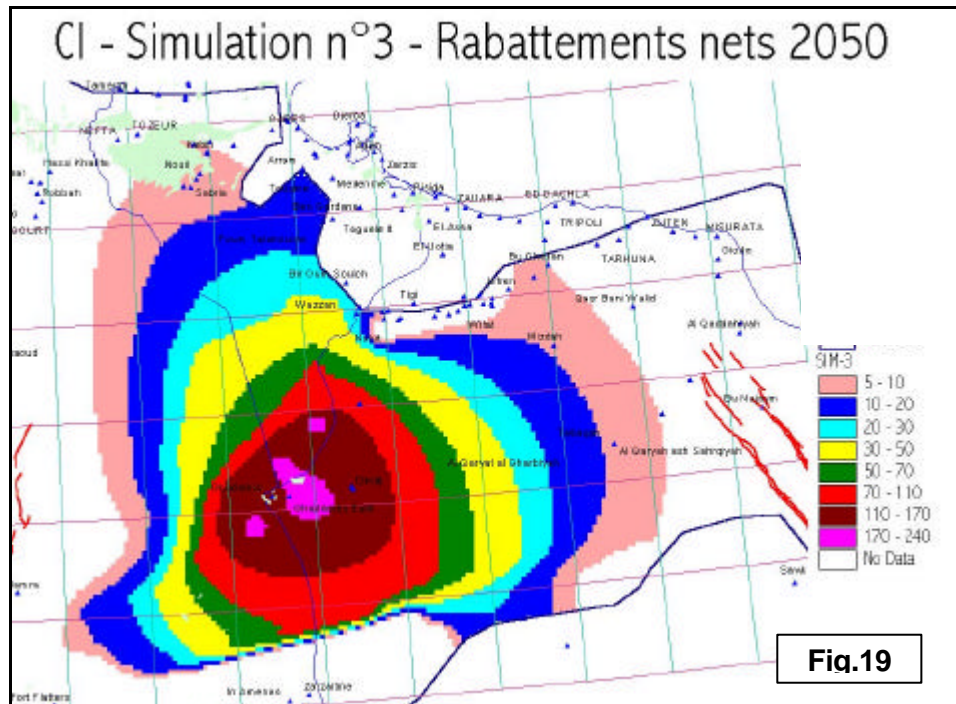


Fig.19

50 - Simulation CI-5 ; Le Bas Sahara Algérien et l'Adrar : [38.5 m³/s additionnels]. C'est la simulation n°1 à laquelle on a ajouté une forte sollicitation du Bassin Occidental notamment dans l'Adrar, In Salah et El Goléa. Tous ces nouveaux prélèvements se situent dans les zones à surface libre de la nappe du CI ; les rabattements se concentrent en des cônes localisés : très profonds en leur centre mais qui se propagent très peu. Les influences sur la Tunisie et la Libye, ainsi que Le débit de l'exutoire tunisien sont les mêmes que lors de la simulation n°1. Le débit des Foggaras passe à **1.32 m³/s**, alors qu'il était de **1.95m³/s** lors de la simulation du scénario zéro. Les débits additionnels simulés proviennent de : a) la contribution des réserves du CI à **97%**, b) des foggaras à **1.5%**.

51 - Simulation CI-6 ; Exploitation du CI dans le Grand Erg Occidental : [80. m³/s additionnels]. Cette simulation confirme et consolide les résultats de la simulation précédente sur les rabattements du CI dans sa zone à surface libre : localement intenses, se propageant très peu latéralement : **1m** à El Goléa qui se trouve dans un cercle de 100km, et pratiquement rien à Hassi Messaoud et Ouargla après 50 ans de pompages . Les influences sur la Tunisie et la Libye sont rigoureusement nulles à l'horizon 2050. Le débit des Foggaras est passé à **1.78 m³/s**, soit une baisse de 0.17 m³/s par référence au scénario zéro. Cette simulation n'a aucune incidence sur l'artésianisme. Les prélèvements additionnels (80m³/s) sont fournis par :

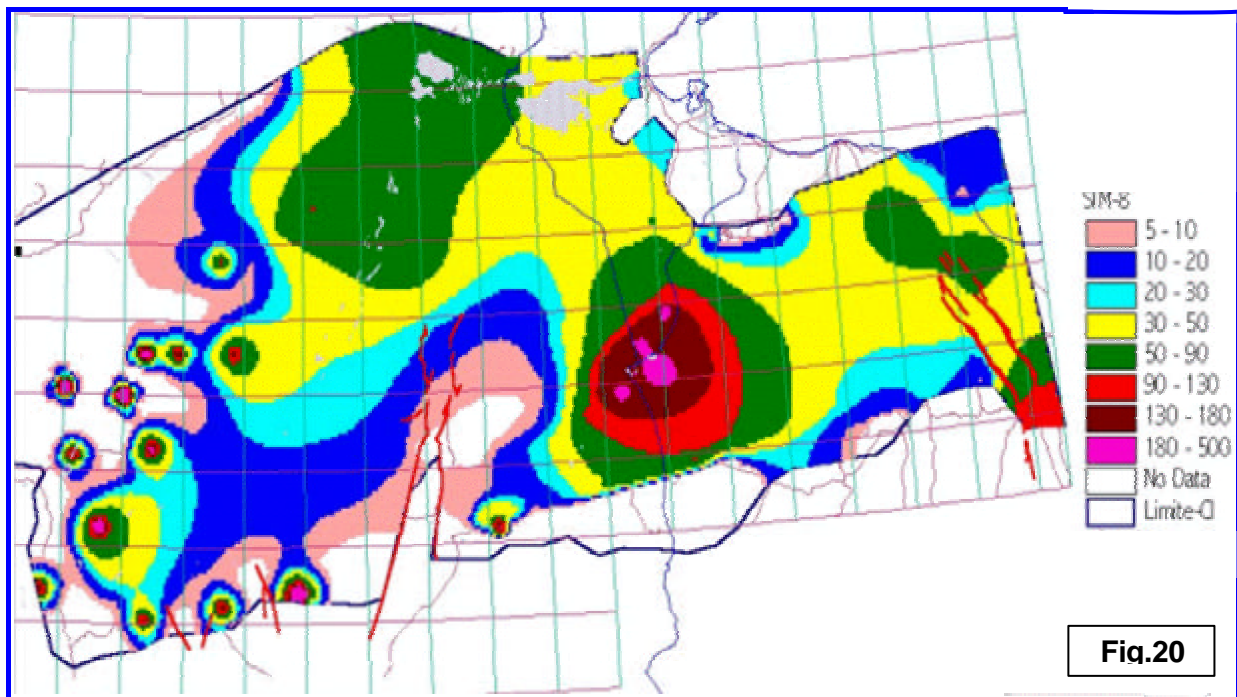
- la contribution des réserves à **99.75%**,
- la diminution du débit des foggaras à **0.22%**.

52 - Simulation CI-7 ; Résorption des Déficits 2030 en LIBYE : [5.1m³/s additionnels]. Deux secteurs s'individualisent nettement :

- Soknah-Hun au sud où les rabattements nets atteignent 110 m;
- un sillon de 60m allongé entre Bani Walid et Bou Nujaym.

Ailleurs, on peut signaler des rabattements de **20 à 25m** au niveau du littoral, diminuant progressivement vers l'Ouest. Les influences sur L'Algérie et la Tunisie sont faibles et se limitent à l'extrême sud tunisien et à la région de Debdeb. La percolation dans le Golfe de Syrte passe de **0.6 m³/s** dans le scénario zéro à **0.3 m³/s**. Dans le même temps, le débit de la source de Ain Tawargha passe de **1.3 m³/s** à **0.4 m³/s**. Une poche d'artésianisme à 30m subsiste dans le Graben ; ailleurs l'artésianisme a disparu. Toutefois et tout le long du littoral, la nappe du CI demeure très faiblement artésienne, et son NP reste partout largement au dessus du niveau de la mer. Les prélèvements additionnels proviennent de :

- la contribution des réserves à 29% ;
- la drainance du Turonien à 41% ;
- le Cambro-Ordovicien à 24%.



53 - Simulation CI-8 ; EXPLOITATION d'ENSEMBLE du CI : [129. m³/s additionnels]. On retrouve bien l'union des rabattements, des débits aux exutoires et de l'artésianisme respectifs correspondant aux simulations composant la CI8, soit les CI2, CI5, CI6 et CI7.

Au niveau du bilan en eau 2050 : Les prélèvements additionnels représentent **129 m³/s**, dont **118.5** pour l'Algérie. Ces débits supplémentaires doivent provenir :

- de la contribution des réserves du CI (**122.3 m³/s**) soit près de 95% ;
- de la drainance du Turonien (**3.2 m³/s**) soit 2% ;
- du Cambro Ordovicien (**1.2 m³/s**) soit 1% ;
- de la diminution du débit des exutoires (Ain Tawargha 0.4, Exutoire Tunisien 0.8, Golfe de Syrte 0.3, Foggaras 0.75 ; représentant un total de **2.25 m³/s**) soit 1.5%.

54 - Simulation CT-1 ; Prélèvements additionnels en ALGERIE : [14.7m³/s additionnels]. Les rabattements maxima, de l'ordre de 70 à 100m, se trouvent au sein du champ de Gassi Touil, sur lequel cette simulation a concentré les prélèvements. Ailleurs, les rabattements sont généralement assez faibles, notamment au niveau des chotts Merouane et Melhir, où ils sont de 10m. En termes d'interférences, la courbe des 5m suit à peu près la

frontière tunisienne. Les rabattements induits sont de 7m à Nefta, 5m à Tozeur et de 3m à Kebili. Quant à l'influence de cette simulation sur la Libye, elle est nulle. Au niveau de la position du NP de la nappe par rapport aux chotts : le niveau piezométrique du CT est globalement 10m plus bas que la simulation zéro au niveau du Melrhir et du Merouane, et 5m plus bas au niveau du Djerid ; or le scénario zéro avait lui même été qualifié de critique. Avec cette simulation CT1 nous serions donc, selon le critère des chotts, dans une situation encore peu plus risquée. Les débits additionnels proviendraient pour 14.6 m³/s (soit 99.3%) des réserves du CT.

55 - Simulation CT2 ; Prélèvements additionnels en TUNISIE : [3.3 m³/s additionnels].

Les rabattements sont de **25m** au Nord du Rharsa, de **10m** partout ailleurs sous les chotts tunisiens et entre **5 et 10m** dans toute la Nefzaoua. La frontière algérienne décrit globalement la courbe des rabattements à 10m. L'influence des prélèvements tunisiens est de **3m** à El Oued, elle est de **1m** à Mghaier. Au niveau de la position du NP de la nappe par rapport aux chotts : elle se trouve 10m plus bas que celle du scénario zéro. Au niveau du bilan en eau 2050 : le débit additionnel est fourni par les réserves du CT à plus de 99%.

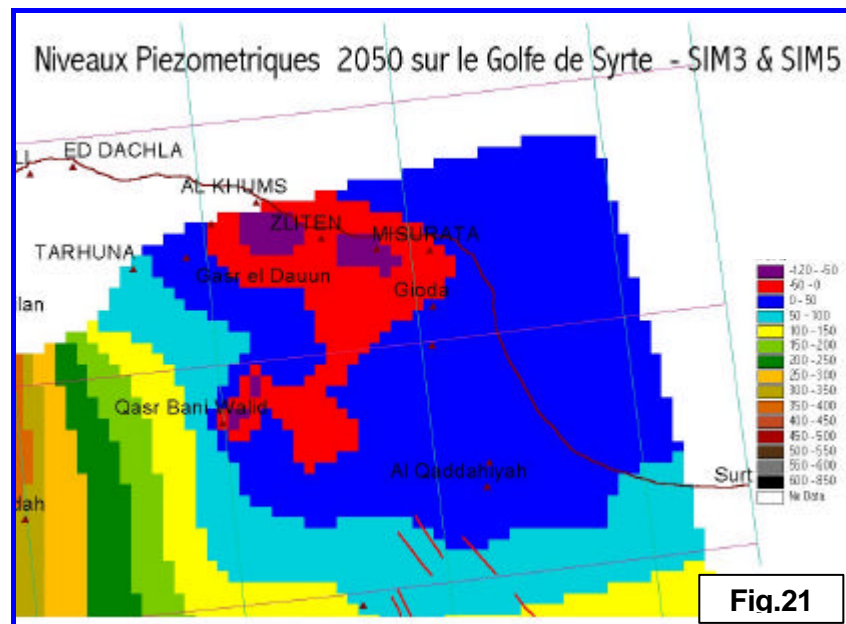


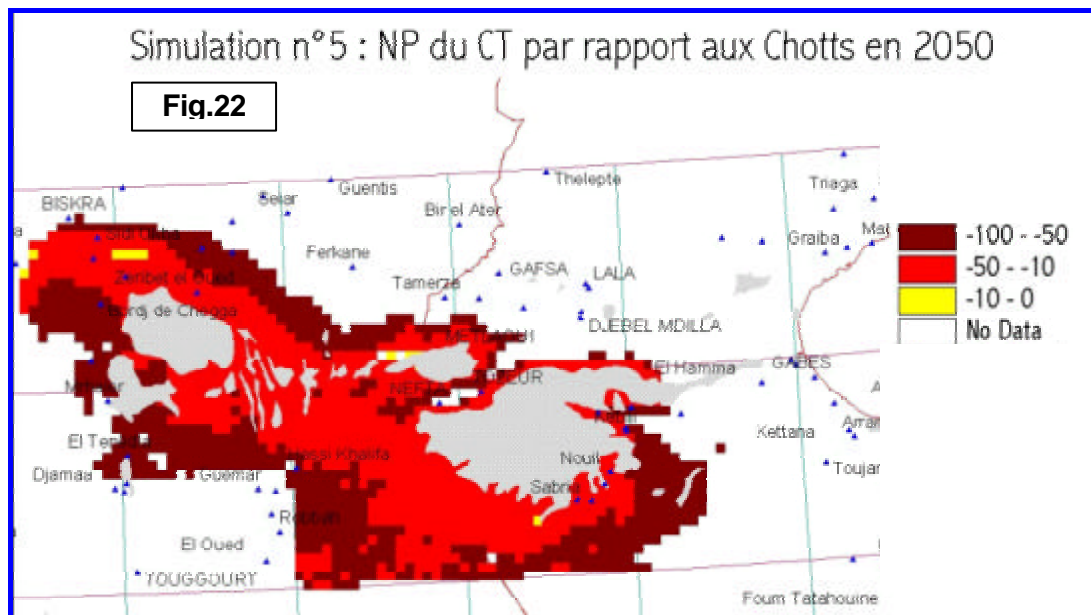
Fig.21

56 - Simulation CT3 ; Résorption des Déficits en LIBYE : [11.6 m³/s additionnels]. On note des rabattements nets de l'ordre de **100m** à Soknah et Waddan, de **10 à 20m** tout le long du Graben, et de **50m** dans les champs septentrionaux proches du littoral d'Al Khums - Zliten. Aucune interférence en Tunisie et Algérie. Le débit de Ain Tawargha passe de **1.3** (scénario zéro) à **0.4 m³/s**; et la drainance dans le Golfe de Syrte passe de **0.5 à 0.4 m³/s**. Les champs captants de la zone côtière [Al Khums, Zliten, Misurata] accusent des niveaux piezométriques particulièrement bas, atteignant des côtes inférieures à **-50m** sur le littoral ! Le débit additionnel est fourni par :

- les réserves du CT à raison de **6.9 m³/s** (59%),
- la drainance du Turonien à raison de **3.8 m³/s** (32%).

Le reste est récupéré sur le débit des exutoires.

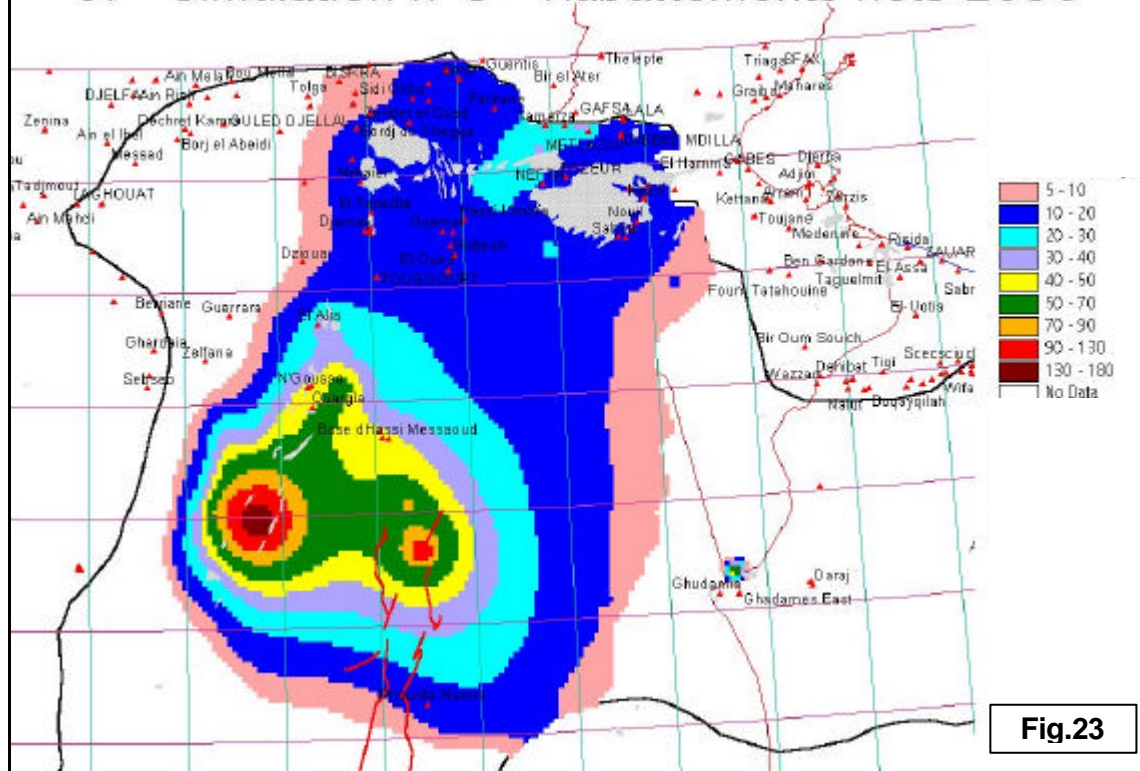
57 - Simulation CT4 ; Le Champ captant de l'Oued MYA : [18. m³/s additionnels]. Les rabattements nets sont circonscrits autour du champ, de l'ordre de 150m au centre. Aucune



58 - Simulation CT5 ; Exploitation d'ensemble du CT : [47. m³/s additionnels]. Les débits additionnels simulés représentent la somme des débits affichés lors des quatre simulations précédentes. Les effets sont globalement équivalents à la somme des effets décrits précédemment ; les plus notables étant :

- **10 à 15m** de rabattements sous les chotts entraînant une situation à risques accrus malgré une quasi stabilisation des prélèvements dans la région des chotts,
- des niveaux piezométriques à plus de **50m** sous le niveau de la mer sur le littoral libyen, traduisant une réelle situation de crise,
- enfin au niveau du bilan, l'omnipotence de la contribution des réserves du CT.

CT - Simulation n°5 - Rabattements nets 2050



IV - CONCLUSIONS

L'objectif de l'Etude du Système Aquifère du Sahara Septentrional était de :

- construire, pour chacune des deux principales nappes : celle du Complexe Terminal et celle du Continental Intercalaire, un modèle numérique de simulation, l'objet des modèles étant de «réaliser une synthèse cohérente des données et des connaissances acquises sur ces aquifères,
- établir le bilan des ressources en eau du Sahara septentrional,
- déterminer les ressources exploitables et élaborer des modalités de gestion de ces ressources sur la base de scénarios de développement ».

Au terme de cette étude, dont les travaux se sont poursuivis de Janvier 2000 à Juin 2002, qu'en est-il de la réalisation de ces objectifs ?

• **Modèle du CI vs Modèle du CT**

Au démarrage du projet SASS, on était en présence de deux traditions, deux visions, deux conceptions parallèles de l'hydrogéologie saharienne :

- du côté algéro-tunisien, l'épaisseur des formations semi perméables de séparation, la très forte différence de charge entre les deux principales nappes, avaient conforté une tradition ancrée de traitement séparé du CI et du CT, et les modèles depuis Géopétrole en 1963 ont été conçus comme des monocouches indépendants;
- du côté libyen, les couches de séparation entre formations aquifères sont moins épaisses et depuis le premier modèle régional d'Idrotecneco en 1981, il a été opté pour une structure multicouche.

Pour assurer une harmonieuse conjugaison des visions hydrogéologiques dans les trois pays, la conception générale du modèle SASS a dû abandonner la dualité CI vs CT adoptée par l'ERESS, au profit d'une **représentation Multicouche** dont l'élaboration du «**Modèle Conceptuel**» a bien montré qu'elle était la seule à pouvoir fédérer les hydrogéologies de l'Algérie-Tunisie avec celle de la Libye. La représentation du « Multicouche Saharien » permet de préserver les meilleures conditions de simulation sur le long terme, intégrant le Turonien le Paléozoïque, et prenant en compte les écoulements de drainance entre CI et CT.

• **Synthèse des Connaissances acquises**

La représentation Cartographique des écoulements constitue le premier niveau de la modélisation hydrodynamique. Une telle carte n'avait pas encore été dressée sur tout le territoire du SASS, mais des représentations portant sur des parties du territoire existaient bien, chacune apportant sa part au progrès des connaissances.

Dans le cadre du projet, il a été nécessaire de construire une carte piezométrique de manière à présenter un schéma d'écoulements cohérent sur l'ensemble du bassin. Cette carte définit les écoulements à l'état « **naturel** », peu ou pas influencé par les pompages.

Pour ce qui concerne la dynamique générale du système, les évolutions Piézométriques les plus significatives ont été regroupées par secteur géographique homogène et représentatif :

- au CI : Tamerna pour le bassin artésien à fortes pressions au sol, Kef N°27 pour les zones proches de la surface libre, Chott Fedjej pour la proximité de l'Exutoire Tunisien, Le Djerid pour de très forts rabattements, le bassin de Ghadamès et le graben ;

- au CT : en Tunisie, Il a fallu établir une série-type, ou « courbe de synthèse », par agrégation des mesures disponibles sur chaque groupe géographique.

La reconstitution des historiques de Prélèvements s'est présentée avec difficulté étant donné le nombre de points d'eau « **actifs** », la longueur des historiques et la diversité des méthodes de comptage selon les pays et selon les équipes qui se sont succédées.

• **Bilan en Eau et Ressources Exploitable du Sahara Septentrional**

Le projet ERESS avait défini ainsi les ressources en eau des grandes nappes du Sahara : « étant donné une répartition géographique actuelle et future des points de prélèvements, les ressources en eau d'une nappe sont le débit correspondant à une valeur et à un accroissement dans le temps, admissibles, des investissements et des coûts de fonctionnement ». Cette approche « **minière** » de la ressource des nappes réputées « **fossiles** » a dû être actualisée. Les simulations exploratoires effectuées sur le modèle SASS ont en effet mis en exergue un certain nombre de nuisances et de « **risques** » auxquels est exposée la ressource en eau du simple fait de son développement.

Vouloir continuer à exploiter encore plus les nappes du CI et du CT nécessitera désormais de savoir, en connaissance de cause, minimiser et gérer ces risques, parmi lesquels on peut notamment citer :

- la disparition de l'artésianisme,
- des hauteurs de pompages excessives,
- le tarissement de l'Exutoire Tunisien,
- le tarissement des Foggaras,
- d'importantes interférences de rabattements entre pays,
- la réalimentation potentielle par les Chotts.

Les résultats de l'« Hypothèse Forte » et de l'« Hypothèse faible » ont par ailleurs démontré les limites de l'approche « simulation pure » dans la définition d'une stratégie de développement du SASS. Aussi bien l'Hypothèse Forte que l'Hypothèse faible, qui paraissent de prime abord devoir « encadrer » les choix des décideurs et les solutions envisageables, auraient au vu de ces résultats des conséquences dévastatrices sur le devenir du SASS. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de rechercher une autre façon de procéder à la définition, en commun, de solutions acceptables, au moyen d'un modèle miniature

Le principe adopté au vu des résultats des simulations exploratoires était de **s'affranchir de la recherche de scénarios de développement à priori** sans relation directe avec les propriétés de l'aquifère, **fondés uniquement sur les prédictions de la demande en eau**, et de rechercher au contraire à **bâtir des scénarios à base « hydraulique », fondés sur les capacités de production du SASS et minimisant les risques de nuisances identifiées**, en des sites aussi proches que possible des lieux où une demande actuelle ou future aurait le plus de chances de s'exprimer fortement, sans toutefois s'interdire de prospecter des secteurs favorables qui seraient éloignés des sites de demande potentiels mais pourraient s'avérer propices à l'exportation. La première étape d'un tel processus a consisté à inventorier, pays par pays, tous les sites de pompages potentiels.

Comment assurer un maximum de prélèvements d'eau pour le meilleur développement de la région sans risquer pour autant de dégrader l'état de la ressource ?

Et comment parvenir à formuler le « meilleur » schéma d'exploitation dans ce sens ?

Le Micro-Modèle du SASS a précisément été conçu pour ce faire. Encore a-t-il fallu d'abord inventorier les risques encourus, et préciser les contraintes que l'on devra respecter pour minimiser ces risques. Cela nécessite de pouvoir quantifier ces risques, ce qui revient à savoir les modéliser. Le Modèle Numérique du SASS était précisément investi d'une telle fonction.

L'un des résultats des investigations effectuées sur ce modèle a permis de vérifier qu'il existe une possibilité de porter l'exploitation par forages du SASS, estimée à **2.2 Milliards de m³** en 2000 [1.33 en Algérie, 0.55 en Tunisie, 0.34 en Libye], jusqu'à un niveau de **7.8 Milliards de m³/an** à l'horizon 2030 et ce tout en respectant au mieux l'ensemble des contraintes relatives aux risques de dégradation de la ressource. Par pays, cette exploitation se décompose comme suit : **6.1 Milliards m³/an en Algérie, 0.72 Milliards m³/an en Tunisie, 0.95 Milliards m³/an en Libye**. La possibilité, [il s'agit en réalité d'une hypothèse] de tripler les prélèvements actuels, ferait passer le régime d'exploitation du SASS à un niveau représentant **Huit fois** ses ressources renouvelables. Une telle opération n'est évidemment réalisable que par puisage sur les réserves du système.