



SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL



UNE CONSCIENCE DE BASSIN

VOLUME 4

MODELE MATHEMATIQUE

Octobre 2002

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1^E PARTIE :	
CARACTERISATION DU SYSTEME AQUIFERE ET MODELE CONCEPTUEL	
I - LES CONCEPTS	5
I.1 – Systèmes, aquifères et modèles	5
I.2 – Modèle conceptuel	7
<i>I.2.1 - La caractérisation hydrogéologique</i>	8
<i>I.2.2 - La conceptualisation des systèmes aquifères</i>	8
II - CARACTERISATION GEOLOGIQUE	9
II.1 – Faciès géologiques du Sahara Septentrional	9
<i>II.1.1 - Les faciès du continental intercalaire</i>	9
<i>II.1.2 - Le Complexe Terminal</i>	12
II.2 – Corrélations lithostratigraphiques	14
II.3 – Le schéma du multicouche saharien	19
III - CARACTERISATION HYDROLOGIQUE	22
III.1 – Les précipitations sur le domaine du SASS	22
III.2 – Ruissellement sur le SASS	23
III.3 – Aires de recharge et alimentation des nappes	29
<i>III.3.1 - L'infiltration directe aux affleurements</i>	31
<i>III.3.2 - L'Infiltration des Crues d'Oueds</i>	32
<i>III.3.4 - Evaporation profonde</i>	33
IV - CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE	36
IV.1 – Tracé de la carte piézométrique du CI	36
IV.2 – Carte piézométrique du CT	40
IV.3 – Intégration des données isotopiques dans le schéma hydrodynamique	42
IV.4 – Répartition spatiale des transmissivités	47
IV.5 – Les coefficients d'emménagement	50
IV.6 – Historiques des niveaux piézométriques	51
<i>IV.6.1 - le Continental Intercalaire</i>	51
<i>IV.6.2 - Le Complexe Terminal</i>	53
IV.7 – Historiques des prélèvements	56
<i>IV.7.1- Diversité des Méthodologie et Sources d'information</i>	56
<i>IV.7.2 - Mise en forme des données et Résultats</i>	57
2^E PARTIE :	
ELABORATION DU MODELE MATHEMATIQUE	
CHAPITRE I - CONSTRUCTION DU MODELE	60
I - LE CADRE GENERAL DE LA CONSTRUCTION DU MODELE SASS	60
II - STRUCTURE GENERALE DU MODELE	62
II.1 – Schématisation particulière du CT au nord des chotts	63

II.2 - Structure du Graben de Hun	64
II.3 – Structure particulière au continental intercalaire en Tunisie	65
II.4 – Modèle conceptuel du CI dans le Sud Tunisien	65
III - EXTENSION ET DELIMITATION DES COUCHES	68
III.1- Pour ce qui concerne le continental intercalaire	68
III.2 – Pour ce qui concerne le complexe terminal	69
III.3 – Pour ce qui concerne le turonien	69
III.4 – Pour ce qui concerne les grès supérieurs	69
III.5 – Pour ce qui concerne le cambro ordovicien	69
IV - DISCRETISATION DE L'ESPACE ET MODELE MATHEMATIQUE	70
V - LE LOGICIEL DE SIMULATION	72
VI - LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE	73
VI.1 – Limites du continental intercalaire	73
VI.2 – Limites du complexe terminal	75
VII - LES TRANSMISSIVITES HORIZONTALES INITIALES	77
VIII - LES PERMEABILITES VERTICALES DES AQUITARDS	79
CHAPITRE II - CALAGE DU MODELE	81
I - PROTOCOLE DE CALAGE DU MODELE	81
II - LES PRINCIPALES ETAPES DU CALAGE	82
II.1 – Le modèle de Tripoli, ou Juin 2001	82
II.2 – Impact des modifications de débits en Algérie	82
II.3 – Premiers effets de la nouvelle configuration structurale du CI	83
II.4 – Le modèle du 20 août 2001	83
II.5 – Le modèle du 10 septembre 2001	85
II.6 – Le modèle du 23 septembre 2001, retour sur la structure des transmissivités	85
II.7 – Le modèle du 30 septembre 2001	85
II.8 – Reprise du modèle dans le bassin oriental	86
III -PREPARATION DES DONNEES NECESSAIRES AU CALAGE	86
III.1 - Données sur les prélèvements et leur évolution	86
III.2 - Données sur les niveaux piézométriques et leur évolution	88
IV - CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT	90
IV.1 – Définition d'un état de référence	90
IV.2 – Définition des critères de référence pour le calage en régime permanent	91
IV.3 – Principales modifications au cours du calage	91
IV.4 – Evaluation du calage en régime permanent	91
IV.4.1 - Reconstitution des Cartes Piezometriques d'ensemble du CI et du CT	91
IV.4.2 - Reconstitution des hauteurs piezometriques aux points de contrôle	93
IV.4.3 - Reconstitution des Débits des Sources et Foggaras	97
IV.5 – Résultats du calage en régime permanent	97
IV.5.1 - L'allure générale des écoulements calculés par le modèle	97
IV.5.2 – Les paramètres hydrodynamiques du modèle	98
IV.5.3 – Le bilan en eau du multicouche saharien	100
V - LE CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE	101
V.1 – Définition des historiques de référence et des critères de calage du modèle	101

V.1.1 - Conditions initiales et aux limites et Historiques de référence	101
V.1.2- Les Paramètres structuraux d'initialisation du calage	102
V.1.3 - Les critères du calage en Transitoire	102
V.2 – Degré de connaissance des historiques de prélèvements	103
V.2.1 - Exploitation des Forages en Algérie, Tunisie et en Libye	103
V.2.2 - Débits des Sources et Foggaras	103
V.3 – Les chroniques de niveaux piézométriques de références	103
V.4 – Les étapes du calage en transitoire	105
V.4.1 - Ajustement des paramètres du modèle	105
V.4.2 - Evaluation du Calage en Transitoire	105
V.4.3- Restitution des Débits des Sources	106
 VI - RESULTATS DU CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE	 107
VI.1- Distribution des coefficients d'emmagasinement	107
VI.2 – La carte des rabattements 1950-2000	116
VI.3 – Les cartes piézométriques calculées en 2000	117
VI.4 – Le bilan 2000	118
 3 ^E PARTIE :	
REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES	
 CHAPITRE I : DEFINITION ET REALISATION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES	 123
 I - DEFINITION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES	 123
 II - RESULTATS DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES	 130
II.1 - Poursuite de l'actuel : le scénario zéro	130
II.1.1 - Résultats en termes de Niveaux Piezométriques et de Rabattements 2050	131
II.1.2 - Résultats en termes de Bilans calculés en 2050	
 III - ALGERIE : HYPOTHESE FORTE	 135
III.1 – Prélèvements simulés et leur localisation	135
III.2 – Résultats en termes de rabattements et niveaux	136
 IV - ALGERIE : HYPOTHESE FAIBLE	 140
IV.1 – Rappel des prélèvements simulés	140
IV.2 – Résultats obtenus en termes de niveaux et rabattements	140
 V - LIBYE : GHADAMÈS FIELD	 142
 VI - LIBYE : DJ. HASSAOUNA FIELD	 143
 VII - EVOLUTION TEMPORELLE DES RABATTEMENTS	 144
VII.1- Continental intercalaire - Kiklah	145
VII.2 – Complexe terminal	146
 VIII - BILANS A L'HORIZON 2050	 146
 IX – ANALYSE DES RESULTATS DES SIMULATIONS	 148
IX.1 – Effets de la poursuite de l'actuel	148
IX.1.1 – Au continental intercalaire	148
IX.1.2 – Sur la nappe des grès supérieurs	148
IX.1.3 – Au complexe terminal	148

IX. 2 – Effets de l'hypothèse forte en Algérie	151
IX.2.1 – <i>Au continental intercalaire</i>	151
IX. 3 – Effets de l'hypothèse faible en Algérie	152
IX.3.1 – <i>Au continental intercalaire</i>	152
IX.3.2 – <i>Au complexe terminal</i>	153
IX.4 – Effets du scénario « Ghadamès field »	153
IX.5 – Effets du scénario « Dj. Hassaouna field »	153
 CHAPITRE II : MINIATURISATION DU MODELE POUR L'INVESTIGATION DU RESERVOIR	 154
 I - POURQUOI UN MODELE MINIATURE ?	 154
 II - FONCTIONS D'INFLUENCE ET COEFFICIENTS D'INFLUENCE	 155
 III - PROPRIETES, HYPOTHESES ET APPROXIMATIONS	 156
III.1. Conditions et horizon du calcul	156
III.2 – Linéarité des écoulements	160
III.3 – Allure des fonctions d'influence	161
III.4 – Pompes concentrées VS réparties	162
III.5 – Pompe constante VS graduellement variée	163
 IV - MATRICE DES COEFFICIENTS D'INFLUENCE	 164
IV.1 – Identification des champs captants et dimension du problème	164
IV.2 – La matrice des coefficients et le convertisseur débits-rabattements	166
 V - OBJECTIFS ET CONTRAINTES DE L'EXPLOITATION DU SASS	 168
V.1 – Objectifs : maximiser la production et préserver la ressource	168
V.2 Les contraintes et la gestion des risques	171
V.2.1 - <i>La Fonction " Exutoire Tunisien "</i>	171
V.2.2 - <i>Les Foggaras Algériennes</i>	172
V.2.3 - <i>Maintien de l'Artésianisme</i>	172
V.2.4 - <i>Minimiser les Hauteurs de Pompes régionalisées</i>	173
V.2.5 - <i>Protection de la nappe du CT vis à vis des Chotts</i>	173
V.2.6 - <i>Le Champ des Interférences</i>	173
 CHAPITRE III - DEFINITION ET REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES	 174
 I - ATELIER DES 1 & 2/04/02 : CHOIX DES SCENARIOS D'EXPLOITATION DU SASS	 174
 II - SIMULATION DES SCENARIOS D'EXPLOITATION SUR LE MODELE NUMERIQUE: PRINCIPAUX RESULTATS	 175
II.1 – Le continental intercalaire	175
II.2 – Le complexe terminal	189
 III - ANALYSE DES RESULTATS DES SIMULATIONS	 195
III.1 – Au continental intercalaire	195
III.2 – Au complexe terminal	200

4^E PARTIE :

REPRESENTATIVITE DU MODELE DU SASS ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

PREAMBULE	205
I - TRANSMISSIVITES ET DEBIT DE L'EXUTOIRE TUNISIEN	206
II - EMMAGASINEMENT EN NAPPE LIBRE	210
III - POIDS DU COMBRO-ORDOVICIEN COD	211
IV - LIMITE ORIENTALE	212
V - GOLFE DE SYRTE	213
VI - LES FOGGARAS	215
VII - LES CHOTTS	217
VIII - RECHARGE DES AQUIFERES	218
IX - RESERVES DU BASSIN OCCIDENTAL	220
X - COMPARAISON DES MODELES	222
XI - SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES	222
XII – L'EMMAGASINEMENT DANS LES AQUITARDS	224
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	229

LISTE DES ANNEXES

<i>Annexe n°1 Piézométrie de référence nappe du C10</i>	236
<i>Annexe n°2 Transmissivités du C1</i>	240
<i>Annexe n°3 Piézométrie de référence nappe du CT</i>	243
<i>Annexe n°4 Piézométrie de la nappe du Turonien</i>	245
<i>Annexe n°5 Transmissivités du CT</i>	246
<i>Annexe n°6 Points dont l'identificateur PM5 est différent de la BD</i>	249
<i>Annexe n°7 Calage en régime permanent</i>	250
<i>Annexe n°8 Calage en régime transitoire</i>	255
<i>Annexe n°9 Piézomètres de référence pour le calage transitoire</i>	260
<i>Annexe n°10 Potentiels imposés sur les limites</i>	262

INTRODUCTION

1970-2000, trente ans après la mise en œuvre, en Algérie et Tunisie, du projet ERESS, 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, et les prélèvements par forages de 450 Millions 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. Par voie de conséquence 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 et la nappe du Complexe Terminal. 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, 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 présent rapport final 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 d'Evaluation 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 exploratoire, la construction d'un modèle miniature du SASS pour l'investigation du réservoir, la définition et la réalisation des simulations prévisionnelles.

1^E PARTIE

CARACTERISATION DU SYSTEME AQUIFERE ET MODELE CONCEPTUEL

I – LES CONCEPTS

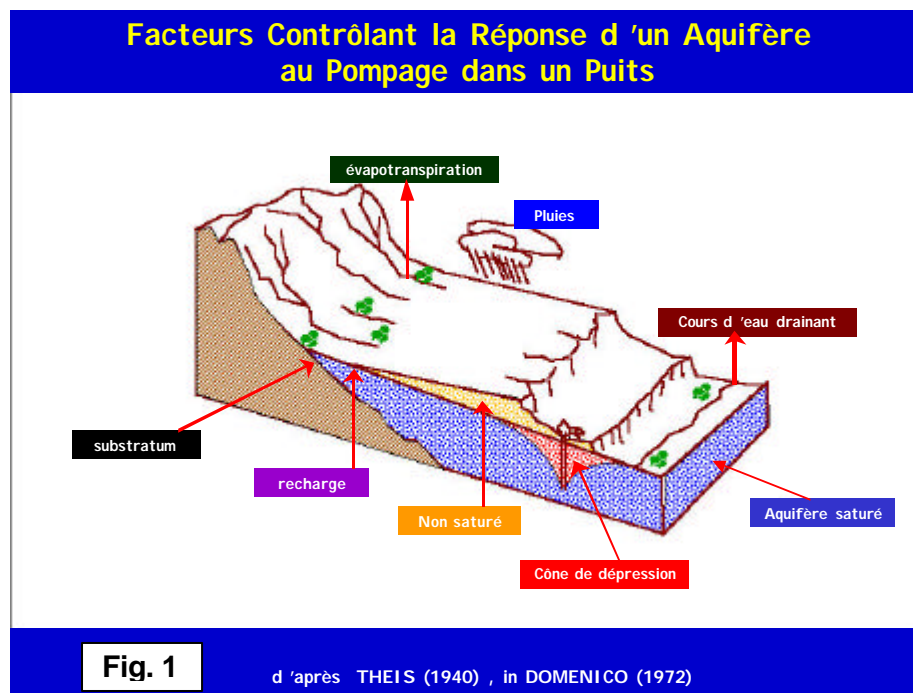
I.1 – Systèmes, aquifères et modèles

Avant d'aborder les problématiques propres au Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS », il paraît utile de revenir brièvement, dans cette première partie, sur un certain nombre de concepts, relatifs notamment à la définition et à l'appréhension d'un système, d'un aquifère, d'un système aquifère, d'un modèle, d'un modèle conceptuel ...

On peut, avec Dooge, définir un Système comme « *tout processus ou structure, mettant en relation une entrée, cause ou impulsion de matière, énergie ou information avec une sortie, effet ou réponse de matière, énergie ou information* ». Cette définition s'applique aux Systèmes Aquifères.

L'un des premiers exemples connus de système aquifère (fig.1), est présenté par Theis (1940)¹ : comment se comporte ce système en réponse à la mise en route du pompage ?:

- par un surcroît de recharge induite par le rabattement ?,
- par une baisse du débit à l'exutoire ?,
- par une diminution des réserves ?,
- par les trois à la fois ?.



Un tel problème peut être appréhendé de deux manières différentes : le géologue, par exemple, va se référer à un ensemble de roches perméables autorisant l'écoulement d'un certain flux, limitées par d'autres imperméables. L'hydrodynamicien va se référer à un système hydrodynamique intégrant le champ du potentiel sur le même domaine défini par ses conditions aux limites. L'hydrologue peut représenter le même problème par une

¹ In Domenico : Concepts and Models in groundwater hydrology ; Mc Graw Hill, 1972

juxtaposition de réservoirs paramétrés. Le géographe pourra tout décrire à l'aide d'un système d'information géographique.

Dans chacune de ces « conceptions » du système il y a une représentation, un modèle du milieu. Un système aquifère, il existera donc, autant de modèles, ou de niveaux de modélisation, qu'il existera de domaines modélisants (ou de champs de compétences ; Bogardi, 1994)² que l'on pourra adjoindre au domaine souterrain. En définitive, le système retenu, ou le modèle qui en constitue la représentation, résultera de l'imbrication de deux cercles : le cercle des représentations et le cercle des domaines (fig. 2 & 3).

Fig. 2 : Le cercle des représentations

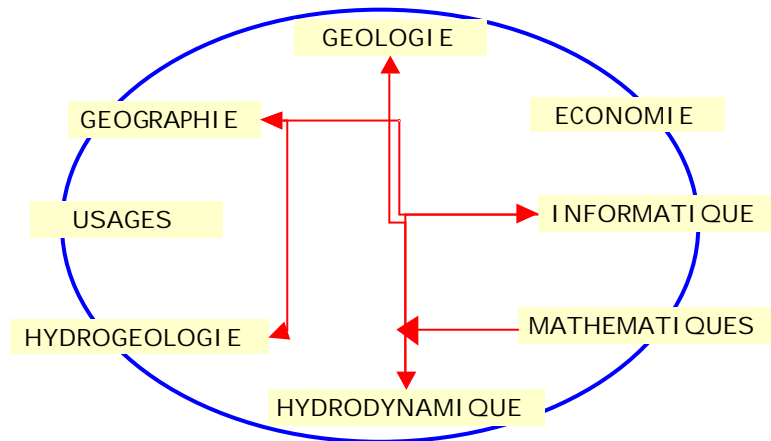
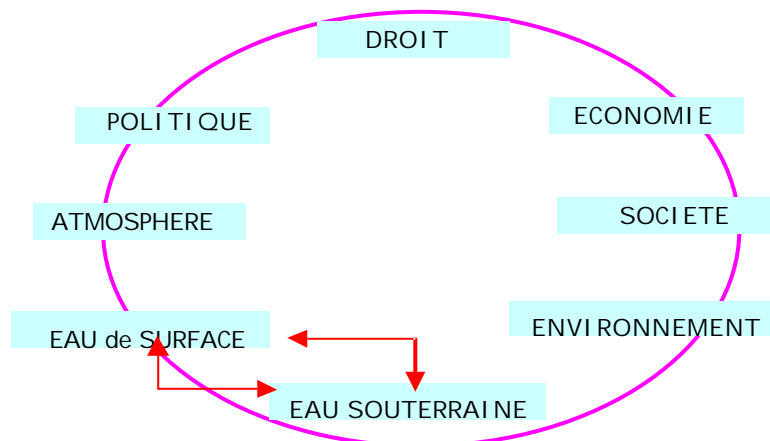


Fig. 3 : Le cercle des domaines modélisables



Ainsi défini, le système peut être représenté par le schéma d'Entrées-Sorties de Hall & Dracup (1970)³ : entrées contrôlées et non contrôlées, sorties souhaitables ou non. Transposée au modèle de gestion d'un système aquifère et tout particulièrement au **Système Aquifère du Sahara Septentrional** « SASS », cette représentation permet d'en identifier les Entrées et les Sorties (fig. 4). l'objet de tout modèle de gestion est d'aider le décideur à maximiser les sorties souhaitables et à minimiser les sorties non souhaitables et ce, par une action sur les entrées contrôlables dénommées « variables de décision ».

² Introduction of systems analysis : terminology, concepts, objective functions and constraints, in «Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management » ; ed. Bogardi, Nachtnebel, UNESCO, 1994.

³ Water resources systems engineering ; Mc Graw Hill , 1970.

Fig. 4 : Les entrées – Sorties du SASS

<u>ENTREES</u>	<u>SORTIES</u>
<u>CONTROLEES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - investissements - implantation d'ouvrages - monitoring 	<u>SOUHAITABLES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Ressources en Eau - Ressources Financières - Informations Utiles
<u>PARTIELLEMENT CONTROLEES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - pompages illicites - prélèvements non concertés entre pays - alimentation artificielle - contamination par le sel 	<u>NON SOUHAITABLES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Non Satisfaction des Besoins Actuels en Quantité - Non Satisfaction des Besoins des Générations Futures - Détérioration de la Qualité de l'Eau
<u>INCONTROLEES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - apports naturels 	<u>NEUTRES:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Ecoulements naturels à l'Exutoire du Système

La transformation du système, du fait des variables de décision et des entrées incontrôlées, est décrite par une série de « **variables d'état** ». Cette réponse du système (changement des variables d'état dû à une variation des entrées) sera caractérisée par les « paramètres du système »(cf. fig.5).

Fig. 5 : Modèle Conceptuel d'un système aquifère

<u>VARIABLES d'ETAT:</u>	<u>PARAMETRES:</u>
Niveaux Piezométriques	Nombre de Couches (perméables & semi perméables)
Salinités (températures)	Extensions ; Géométrie
	K, T, S, n, K', S'

I.2 – Modèle conceptuel

Le contenu du Modèle Conceptuel est, d'une manière très synthétique, décrit par la fig. 5. Classiquement, deux niveaux d'analyse sont nécessaires pour que l'on puisse parvenir à une définition correcte du modèle conceptuel d'un système aquifère :

1.2.1 – La caractérisation hydrogéologique

C'est la Phase préalable à toute modélisation. Cette étape comporte la compilation, l'analyse et la mise en forme de l'ensemble des informations disponibles:

- Données sur la Géologie régionale de surface et de subsurface
- Données topographiques y compris sur les cours et les plans d'eau
- Données Cartographiques: choix d'un support cartographique du modèle
- Existence de coupes géologiques et de corrélations lithostratigraphiques
- Séries historiques de données hydrométriques et météorologiques
- Données sur le fonctionnement hydrodynamique : recharges, écoulements, exutoires
- Séries historiques: piezometries, prélèvements, salinités
- Estimations des caractéristiques hydrauliques

1.2.2 – La conceptualisation des systèmes aquifères

L'ensemble des données décrivant le système hydrogéologique sont organisées et traduites en termes de systèmes d'écoulement définis notamment par un champ de potentiels et des conditions aux limites. Les points à développer pour la mise en œuvre du Modèle Conceptuel consistent notamment à :

- Elaborer 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'emménagement.

L'ensemble de ces éléments peuvent être organisés en des groupes homogènes. Dans ce qui suit, l'analyse du système SASS sera conduite sous trois formes de caractérisations :

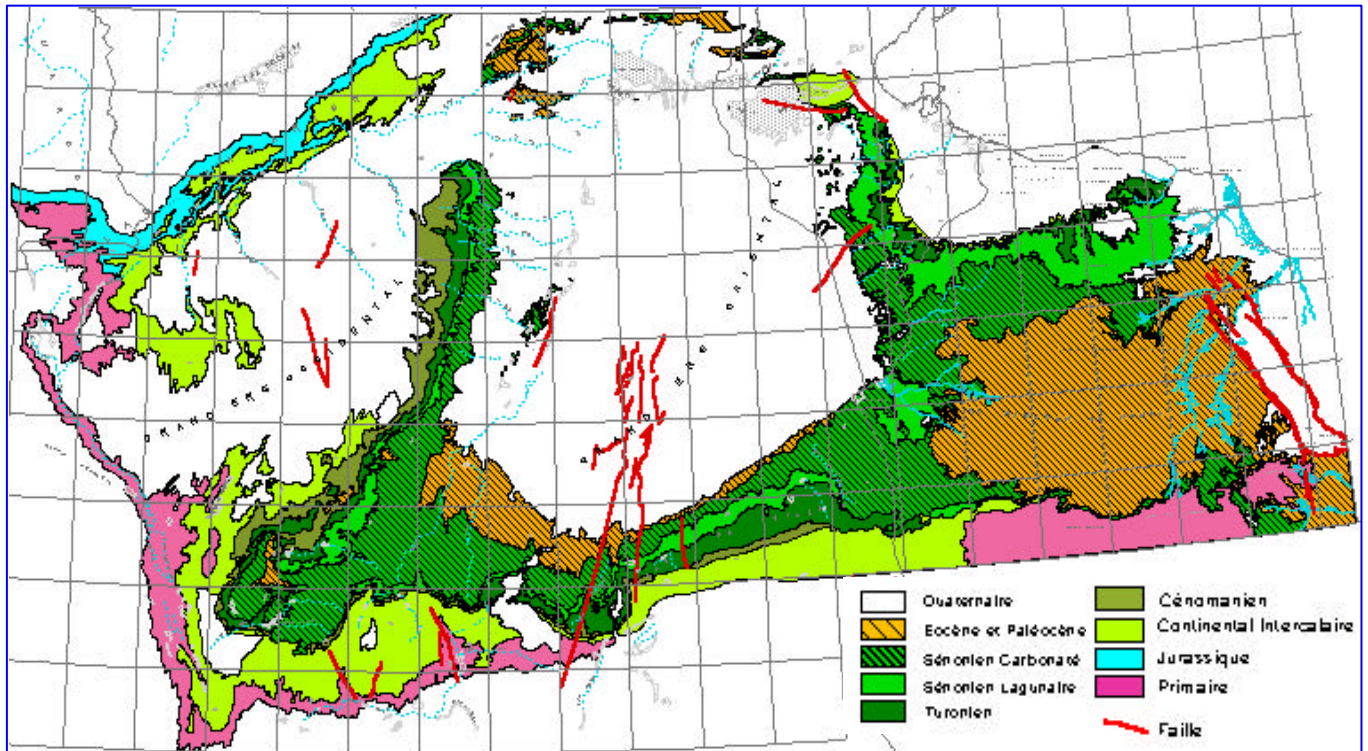
- A- La Caractérisation Géologique
- B- La Caractérisation Hydrologique
- C- La Caractérisation Hydrodynamique

II – CARACTERISATION GEOLOGIQUE

II.1 – Faciès géologiques du Sahara Septentrional

La carte géologique de la plate-forme nord saharienne (fig. 6) indique d'importants affleurements du Crétacé supérieur, qui débute avec la transgression cénomanienne et occupe dans la région un espace de près de **700.000 km²**.

Fig. 6 Carte des affleurements géologiques du SASS



II.1.1 – Les faciès du continental intercalaire

Directement surmontées par les argiles du Céno manien, les formations du Continental Intercalaire [CI] s'étendent jusqu'en bordure de la plate-forme, en une auréole continue d'El Goléa jusqu'à la limite sud de la Hamada El Hamra. Au Nord-Ouest du bassin, le CI affleure tout au long de l'Atlas Saharien et au N-E sur le Dahar et le Djebel Neffusa. Plus au Sud, le CI repose directement sur les formations marines du Pléozoïque, lequel forme en affleurement une ceinture continue allant de la frontière marocaine à la limite N-W du bassin, jusqu'à la ville de Hun à l'extrême S-E de la région.

L'observation des affleurements permet donc de définir le Continental Intercalaire comme l'ensemble continental compris entre les plissements hercyniens, qui ont chassé la mer de la plate-forme saharienne, et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement les formations continentales gréso-argileuses du Crétacé inférieur, auxquelles l'étude des coupes de forages a permis d'associer des sédiments marins ou lagunaires, post-paléozoïques et anté-céno maniens intercalés au sein du CI.

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, fondées à la fois sur l'étude des affleurements géologiques et sur l'étude des sondages, sont :

- Au Nord-Ouest ; le versant Sud de l'Atlas Saharien, marqué en affleurement par le contact Albien-Cénomaniens
- A l'Ouest Sud-Ouest ; la limite des affleurements Paléozoïques de l'Ougarta, marqués par le cours de la Zousfana et de la Saoura.
- Au Sud, la limite d'affleurement du CI sur le Paléozoïque, allant en continuité d'Adrar à Hun, décrivant les limites septentrionales des Tassilis et du Djebel Hassaouna.
- Au Nord, l'accident sud Atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golfe de Gabès par la faille d'EL Hamma - Médenine.
- Au Nord Est ; les affleurements du Continental Intercalaire sur le Dahar et le Djebel Nefussa.
- A l'Est ; les formations aquifères du Crétacé inférieur se prolongent bien au delà du graben de Hun . Mais à l'Est du Méridien 16° et en passant au bassin de Syrte, les eaux du CI deviennent saumâtres : c'est ce passage qui a été adopté comme limite de la zone d'étude de la nappe d'eau douce du CI.

Afin de pouvoir établir les coupes lithostratigraphiques formant le premier édifice architectural de toute modélisation hydrogéologique, il est nécessaire d'établir les échelles d'équivalences des faciès de cet ensemble à travers le bassin. Pour ce faire, une première série de simplifications permet de proposer, pour chacun des trois pays, une coupe-type des formations au sein du CI.

En Algérie

Cette coupe décrit plus particulièrement les faciès du Bas Sahara (région de Hassi Messaoud, Ouargla & Toggourt), susceptibles d'être corrélés à la Tunisie et la Libye. Au dessus de la discordance hercynienne, on peut distinguer de bas en haut :

- **Le Trias :**
 - Trias inférieur argilo-gréseux contenant de l'eau salée saturée ;
 - Trias supérieur évaporitique formé de sel massif pouvant dépasser 1000m d'épaisseur, formant un toit étanche et isolant des nappes d'eau douce du CI s.s.
- **Le Lias :** marqué par une incursion marine, quelques dépôts lagunaires mais surtout carbonatés.
- **Le Dogger :** le faciès carbonaté est prédominant.
- **Le Malm :** régime marin, dépôts calcaires et lagunaires alternants.
- **Le Néocomien :** argileux au Nord ,gréseux au Sud-Est et envahi d'eau salée.
- **Le Barrémien :** argilo-gréseux au Nord, franchement gréseux au Sud, contient de l'eau douce. Le Barrémien gréseux marque le premier niveau aquifère « utile » et d'importance de la grande nappe du Continental Intercalaire s.s [ép. # 100m]
- **L'Aptien :** situé entre deux ensembles continentaux du Barrémien et de l'Albien, l'Aptien correspond à une invasion marine matérialisée par une barre dolomitique de 20 à 30m d'épaisseur.

- **L'Albien** : sédimentation gréseuse plus importante qu'au Barrémien, réservoir à eau douce.[ép.# 600m]
- **Le Vraconien** : limité au Nord de la plate-forme, argileux, marque le toit du CI et le retour à la sédimentation marine.
- **Le Cénomani** : argiles, marnes et argiles gypseuses. [ép.# 400m]

En Tunisie

D'une manière très simplifiée, On distingue de bas en haut :

- **Le Trias** :
 - Trias inférieur gréseux contenant de l'eau salée, passant à de l'eau douce au SE mais à grande profondeur ;
 - Trias supérieur salifère, isolant des nappes d'eau douce du CI s.s.
- **Le Lias** : c'est le salifère supérieur, gypse, anhydrite, dolomies.
- **Le Jurassique supérieur** :
 - Bathonien & Callovo-Oxfordien ; le faciès carbonaté est prédominant au Nord, gréseux au Sud ; renferme de l'eau salée (« nappe du Jurassique ») .
- **Le Jurassique supérieur** :
 - Kimméridgien , faciès argileux.
- **Le Néocomien-Barrémien**: c'est la série des sables purbecko-wealdiens, grès et sables argileux de « Merbah el Asfer » au Sud, principale formation continentale à eau douce du CI. [ép.#300m], passant au Nord aux formations Kbar el Haj, Grès à bois et Bou Dinar.
- **L'Aptien** : barre dolomitique .
- **L'Albien** : sédimentation marine avec argiles et carbonates au NE. Vers le Sud (faciès Ain Gurttar) et le NW(faciès Sidi Aich), développement des faciès détritiques continentaux et passage au faciès Albien du Bas Sahara algérien.
- **Le Cénomani** : invasion marine généralisée ; calcaires et dolomies, marnes et calcaires marneux .

En Libye

- **Le Paléozoïque** : Grès et Quartzites du Cambro-Ordovicien ; renferme d'importantes réserves d'eau douce affleurant au Dj. Hassaouna, en relation directe avec les formations aquifères du Crétacé inférieur. Plus au Nord, recouvert en profondeur par les formations étanches du Carbonifère.
- **Le Trias** : renferme de bas en haut :
 - les grès, et sables argileux de Ouled Chebbi et Ras Hamia,
 - les calcaires, dolomies, gypse et argiles de Azizia et Bou Chiba. Au Sud et au Sud Ouest, le Trias passe à un faciès franchement gréseux à eau douce(Zarzaitine)
- **Le Lias** : puissante série évaporitique, gypse, anhydrite (Bir el Ghenem, les Abreghs), isolant le Trias du Crétacé inférieur. Cette série se poursuit dans le Bathonien (Giosc et Tokbal).
- **Le Malm** : Callovo-Oxfordien et Kimméridgien (Chameau Mort et Shakchouk) ; Grès, sables, argiles, calcaires et dolomies. Les sédiments continentaux prédominent : cette série est confondue avec le Crétacé inférieur pour former l'aquifère du CI s.l. .
- **Le Crétacé inférieur** : Néocomien, Barrémien, Aptien et Albien ; Grès continentaux ; faciès constant sur l'ensemble du bassin libyen (formation Kiklah) renfermant de l'eau douce ; constitue le CI. s.s. ; la formation Kiklah passe vers le NE(Tawurgha) à un faciès dolomitique. A l'Est du méridien 16° l'aquifère Kiklah renferme de l'eau salée.

- **Le CénoManien** : retour de la sédimentation marine ; argiles, gypse, calcaires, dolomies, marnes, sel ; (formations Ain Tobi et Yefren) ; constitue le toit imperméable du CI.

II.1.2 - Le Complexe Terminal

Classiquement, et selon la définition de K.Killian, le terme « Continental terminal » désignait les formations continentales, sableuses et argileuses, du MioPliocène. Mais d'après Bel et Demargne(1966) : « la nappe du Continental Terminal contenue dans les sables du MioPliocène est plus ou moins 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 Continental Terminal, par opposition au Continental Intercalaire ».

C'est avec le projet ERESS que l'on verra apparaître la notion de « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par Bel et Cuche (1969) : « ce terme de « nappe du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique. 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 imperméables viennent 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 ».

En procédant pays par pays ainsi qu'il a été réalisé pour le CI, une coupe-type simplifiée du Complexe Terminal [CT] est proposée ci-après :

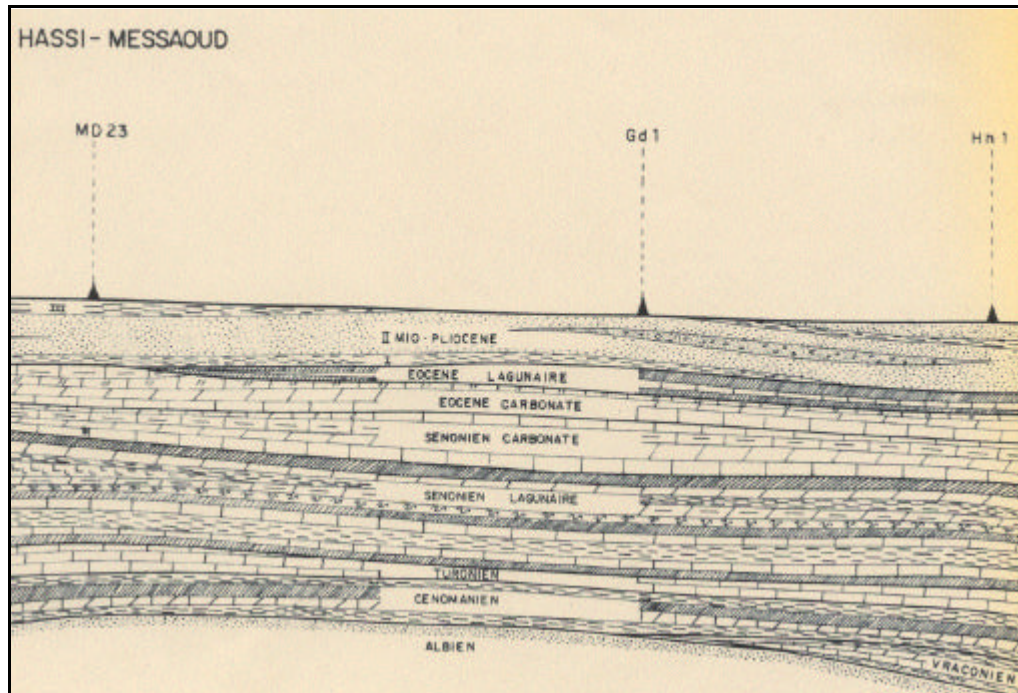
En Algérie

La description du CT se limite ici au Bassin Central, limité à l'Ouest par la Dorsale du Mzab.

- Le Turonien : formation calcaire et dolomitique, aquifère et étendue sur tout le bassin sauf à l'extrême Nord où il devient marneux et peu perméable. La nappe turonienne, de bonne qualité chimique sur tout le pourtour du bassin, accuse de très fortes salinités dans le secteur de Hassi Messaoud.
- Le Sénonien inférieur ou Sénonien lagunaire : peu perméable, constitue sans doute l'écran le plus étendu et le plus efficace entre le CI et le CT.
- Le Sénonien supérieur ou Sénonien carbonaté : formation carbonatée perméable.
- l'Eocène inférieur ou Eocène carbonaté : formation carbonatée perméable, formant un seul et même ensemble lithostratigraphique avec le Sénonien carbonaté.
- L'Eocène moyen ou Eocène évaporitique : argiles gypseuses dont l'existence est limitée à la partie Nord du bassin central (région des Chotts).
- Le Mio-Pliocène : sédimentation fluvio continentale présentant une forte hétérogénéité et une structure lenticulaire, dans laquelle Bel et Demargne distinguent quatre niveaux, soit de bas en haut :
 - **Niveau 1** : argileux, peu épais, présent seulement au centre du bassin central.
 - **Niveau 2** : grés-sableux, c'est le niveau le plus épais (400m au Sud de Gassi Touil) et le plus constant. Il s'étend sur tout le bassin central ainsi que sur le bassin occidental. C'est le principal niveau aquifère du MioPliocène.
 - **Niveau 3** : argiles sableuses quasi-imperméables, épaisses et constantes dans la région des Chotts.

- **Niveau 4**: sableux, très épais dans la zone des Chotts. Affleure sur de grandes surfaces.

Fig. 7: La série du Continental Terminal selon Bel et Demargne (1966)⁴



En Tunisie

- **Le Turonien** : barre dolomitique perméable de 80 à 100m d'épaisseur ; présente un intérêt aquifère dans la Nefzaoua mais susceptible de renfermer de l'eau salée dans la presqu'île de Kebili.
- **Le Sénonien inférieur ou Sénonien lagunaire** : forme un écran peu perméable
- **Le Sénonien supérieur ou Sénonien carbonaté** : formation aquifère, particulièrement perméable dans la Nefzaoua et le Djerid.
- **Le Paléocène** : série argilo marneuse, formation El Haria.
- **L'Eocène inférieur** : série de calcaires peu épais (formation Metlaoui : 20m) non reconnus comme aquifères.
- **L'Eocène moyen** : ou Eocène évaporitique.
- **Le Mio-Pliocène** : présente deux faciès principaux :
 - Le Pontien ou formation Beglia : sables épais avec passées argileuses.
 - La formation Segui : argiles sableuses de couverture.

En Libye

- **Le Cénomanien inférieur (formation Ain Tobi)** : calcaires dolomitiques au Nord, faciès détritique assimilé à Kiklah au Sud.
- **Le Cénomanien moyen (formation Yafrin)** : série marneuse (ép.#150m) formant écran entre Kiklah et les aquifères du Crétacé sup. Dans le graben et à l'Est l'épaisseur des marnes se réduit considérablement.
- **Le Turonien [& Cénomanien sup] (formation Nalut)** : calcaires dolomitiques, bon aquifère sur la moitié Nord du Bassin, plus marneux au Sud.

⁴ BEL et DEMARGNE ; 1966 : Etude géologique du Continental Intercalaire; DEC, Alger.

- **Le Sénonien inférieur (formation Tigrinna)** : argiles, marnes et gypse. C'est le Sénonien lagunaire. (ép.#150m)
- **Le Sénonien moyen (Mizdah)** : série calcaire formant un bon aquifère dans le bassin oriental.
- **Le Sénonien supérieur (Maestrichtien) et le Paléocène (formation Zmam)** : marnes et calcaires marneux, très développés sur le plateau de la Hamada el Hamra et le bassin de Syrte.
- **L'Eocène** : série calcaire développée uniquement dans le graben et à l'Est. Aquifère plutôt médiocre.
- **L'Oligocène** : calcaire ; n'existe que dans le Sud du graben à Hun et Waddan.
- **Le Mio-Plio-Quaternaire** : développé le long de la côte Nord ; série transgressive sur le Crétacé sup. ; de bas en haut on rencontre :
 - les calcaires fissurés de l'Aquitainien aquifère ;
 - les marnes du Miocène Moyen ;
 - les calcaires, marnes et gypse du Miocène sup. et Plio-Quaternaire.

II.2 – Corrélations lithostratigraphiques

Pour entreprendre la mise en relation de la succession de formations géologiques identifiées respectivement en Algérie, en Tunisie et en Libye, un grand nombre de coupes et de corrélations lithostratigraphiques ont dû être établies à travers l'ensemble de la région.

Nous avons constitué une Base de Données Géologiques comportant 365 Forages:

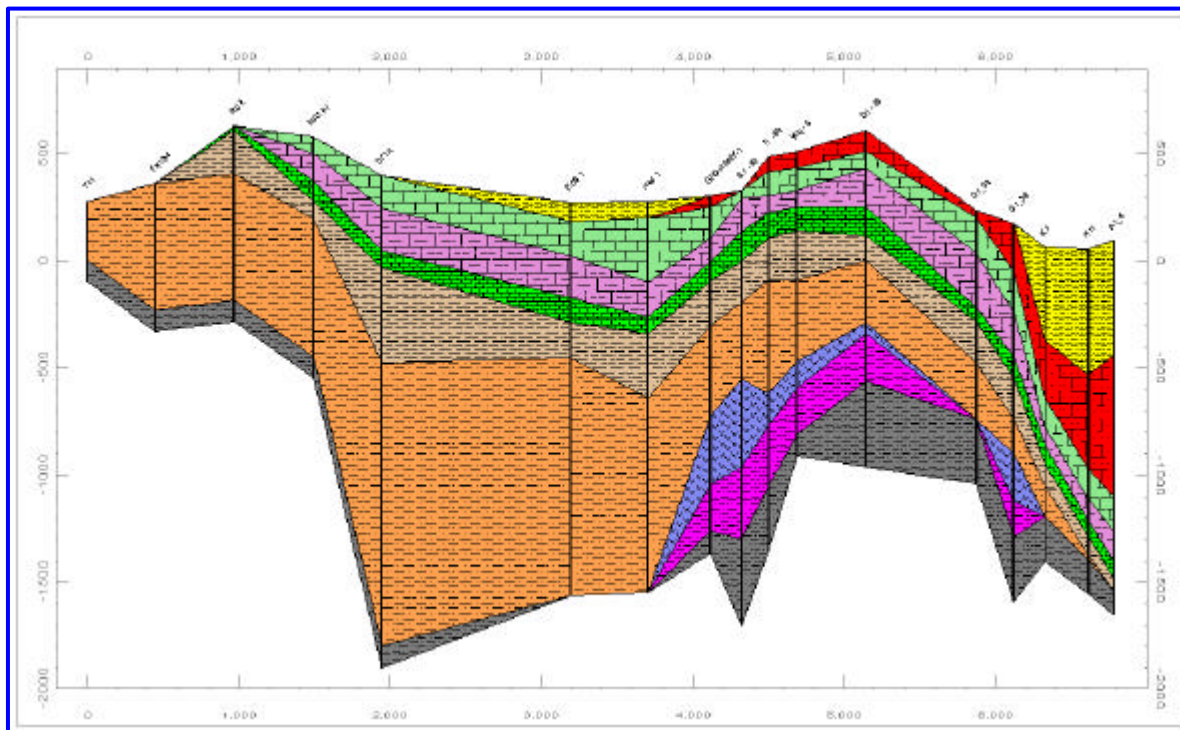
- 175 Forages comportant une coupe complète intégrant CI & CT.
- 120 Forages renseignés uniquement sur le CI .
- 70 Forages renseignés seulement sur le CT .

Le Modèle Conceptuel constitue l'aboutissement 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 peut être succinctement résumé par les trois coupes géologiques des fig. 8, 9 et 10.

Sur la première coupe, W-E à travers l'ensemble du Sahara Septentrional, on décèle clairement la structure générale du SASS en trois bassins :

- **le bassin occidental** limité ici au 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.

Fig. 8 Coupe méridionale W-E à travers le SASS, des FOGGARAS d'ADRAR au GRABEN de HUN

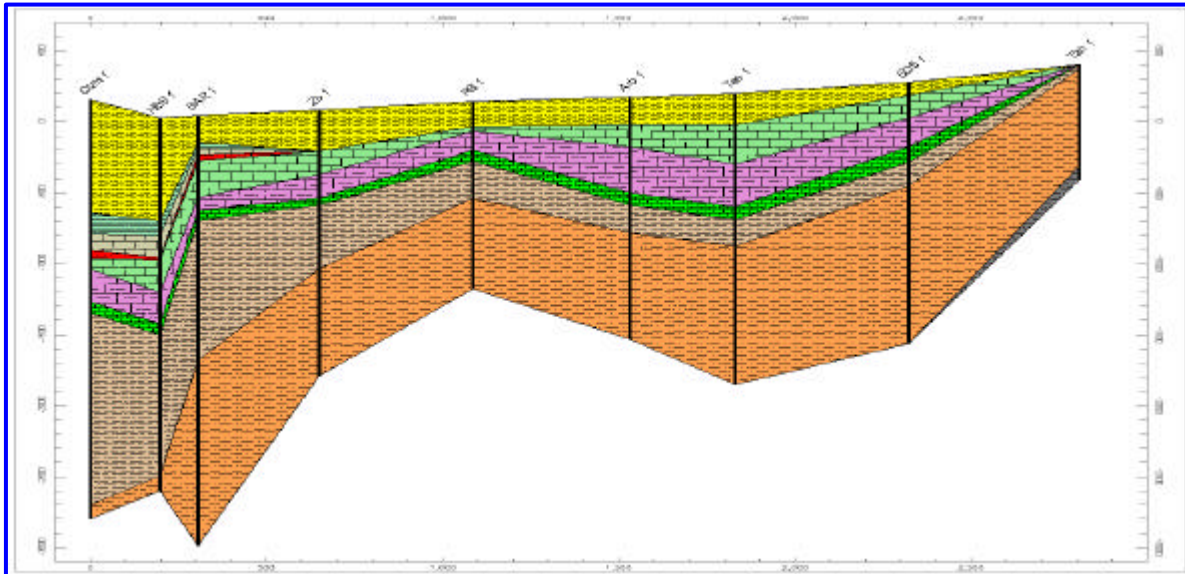


MP	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Em	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ei	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Palc	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
SenC	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
SenL	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Tu	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Cen	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
CIK	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
LIK	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Trias	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	
Palz	Text	<input checked="" type="checkbox"/>	

Sur la deuxième coupe, Nord-Sud et strictement médiane du SASS, on peut observer clairement :

- l'approche des affleurements du CI dans le Tinhert,
- l'ennoyage des formations du CI au Nord dans la fosse de subduction Sud-Atlasique et l'épaississement considérable de la couverture Céno manienne à cet endroit,
- l'apparition des calcaires éocènes recouverts par l'Eocène évaporitique, tous deux limités à la région Nord des Chotts,
- l'extension considérable de la sédimentation Mio-Pliocène dans le bassin central,
- enfin et ceci est observable sur les trois coupes (hormis le bassin occidental), l'omniprésence et la grande régularité des formations successives du Céno manien, du Turonien et du Sénonien lagunaire.

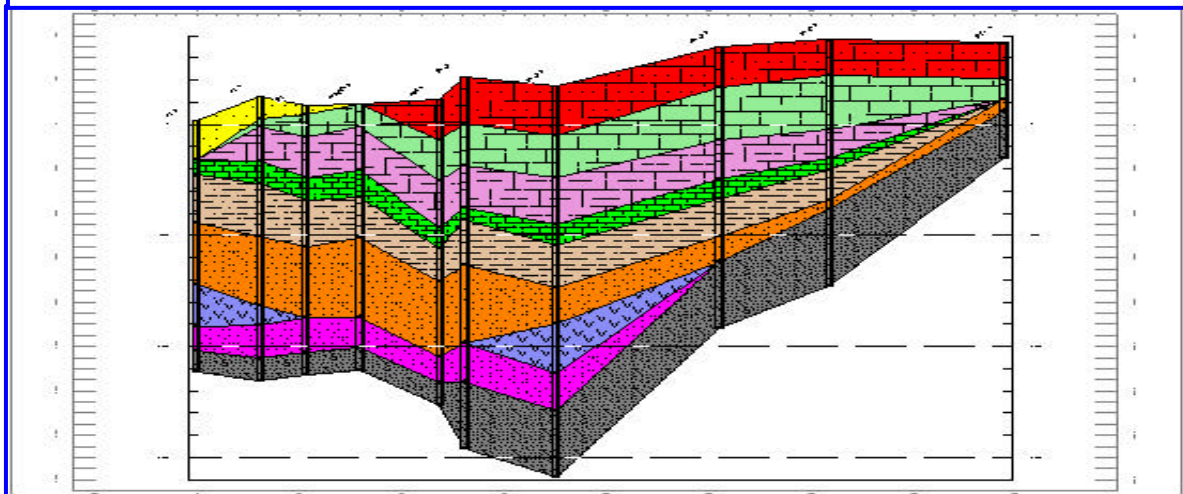
Fig. 9 : Coupe méridienne N-S (Méridien 7°30)



Sur la troisième coupe, on peut noter deux observations intéressantes :

- vers le Nord (secteur de Tawargha), les grès du Cambro-Ordovicien(Paléozoïque), le Trias gréseux et la formation Kiklah communiquent parfaitement et forment un seul et même aquifère ;
- au Sud, à l'approche du haut-fond du Dj. Hassaouna, il n'existe pas de séparation entre le Continental Intercalaire et le Cambro Ordovicien.

Fig. 10 : COUPE N-S à la limite orientale du SASS



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 effectuées⁵, nous pouvons à présent conjuguer ensemble Algérie, Tunisie et Libye. L'objectif

⁵ La base de données géologiques développée permet le dessin instantané des corrélations lithostratigraphiques.

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,
- traduire ces formations en termes purement lithologiques pour apprécier leurs degrés de perméabilité,
- traduire enfin les formations lithologiques obtenues en termes de formations aquifères ou d'aquitards et aquicludes.

Ces étapes, pour chacun des trois pays, sont présentées dans le tableau 1.

Tab.1 : Corrélations Hydro-stratigraphiques en Algérie, Tunisie et Libye

ALGERIE				
Unité stratigraphique		Unités litho-stratig	Unités Lithologiques	Aquifères & Aquitards
Mio - Pliocène		Continental Terminal	sables	2ème nappe des sables
			argiles	semiperméable
			sables & argiles	1ère nappe des SABLES
			argiles	semiperméable
Eocène Moyen		Eocène évaporitique	argiles gypseuses	Semi perméable
Eocène Inférieur		Eocène carbonaté	calcaires	Nappe des CALCAIRES
Paléocène				
Sénouien سنيون	Maestrichtien	Sénouien carbonaté	calcaires	
	Campanien			
	Santonien			
Sénouien Inférieur		Sénouien lagunaire	argiles, gypse, sel	Imperméable
Turonien		Turonien dolomitique	dolomie	Nappe du TURONEN
Cénomanién		Cénomanién argilo-évaporitique	argiles vertes à gypse & mammo-calcaires	Imperméable
Albien		Continental Intercalaire	grès continentaux	Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE
Aptien			calcaires & dolomies	
Barremien			grès et argiles continentaux	
Néocomien			argilo-gréseux	eau salée
Malm مالم	Kimmeridgien	Jurassique	dépôts calcaires et lagunaires	Nappe du Jurassique
	Callovo-Oxfordien			
Dogger	Bathonien			
Lias		salifère sup.	dépôts lagunaires et carbonatés	Toit imperméable
Keuper		Trias Salifère	sel massif	
Mushelkalk				
Bundstandstein		Trias Gréseux	argilo-gréseux	Nappe salée du Trias

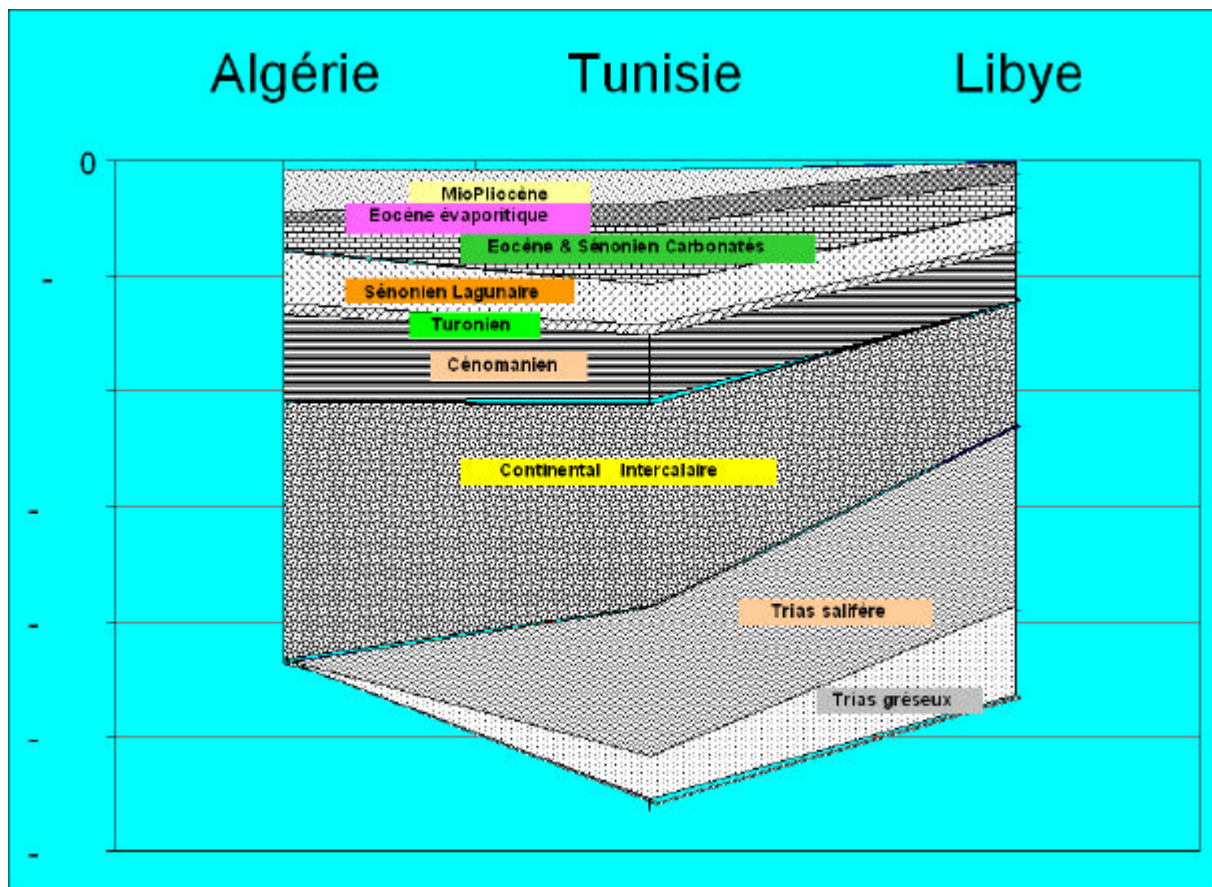
TUNISIE			
Unité stratigraphique	Unités lithostratig	Unités Lithologiques	Aquifères & Aquitards
Mio - Pliocène	formation Zarzis	argiles	Toit Imperméable
		sables	Nappe des SABLES du Djerid
Eocène Moyen	Eocène évaporitique	argiles gypseuses	Semi perméable
Eocène Inférieur	Metlaoui	calcaires	aquifère non reconnu
Paléocène	El Haria	argiles de transition	Semi perméable
Senonien Sup	Maestrichtien	Abiod	Nappe des Calcaires Sup de Nefzaoua
	Campanien		
	Santonien	Aleg	Semi perméable
Senonien Inférieur	Zebbag Supérieur	calcaires	Nappe Calcaires Inf/Nefzaoua
		unité marno-gypseuse	
Turonien	dolomie d'El Guettar	calc.dolomit & dolomies	Nappe du TURONIEN
Cénomanién	Zebbag Moyen	argiles , marnes , gypse & marno-calcaires	Imperméable
Albien	Ain el Guettar	gréseux à l'O ; carbonaté à l'E	Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE
Aptien	dolomie aptienne	argiles et dolomie massive	
Barremien	Série Merbah el	grès et sables argileux	
Néocomien :Wealdien	Asfer	sables wealdiens	
Malm	Kimmeridgien	Merbah el Asfer basal	semi-perméable
	Callovo-Oxfordien	Foum Tataouine	Nappe du JURASSIQUE
Dogger	Bathonien	calcaires de Khechaoua	
Lias	Salifère Supérieur: gypses de Mestaoua	anhydrite, dolomies, argiles	Imperméable
	Keuper	Trias évaporitique	
	Mushelkalk	Trias dolomitique	
Bundstandstein	Trias gréseux	grès rouges & noirs	Nappe du TRIAS

LIBYE					
Unité stratigraphique		Unités Litho-Stratig		Unités lithologiques	Aquifères & Aquitards
Plio-Quaternaire		Plio-Quaternaire		calcaires,marnes,gypse	aquifère local
Miocène		Miocène		Marnes	semiperméable
Aquitanien		Aquitanien		calcaires fissurés	aquifère
Oligocène		Oligocène		calcaire	aquifère local
Eocène		Eocène		calcaires	aquifère médiocre
Paléocène		Zmam		Calcaires, marnes, calcarénites	Upper Cretaceous- Paleocene : MIZDA Aquifer
Senonien Sup	Maestrichtien				
	Campanien				
	Santonien				
Senonien Inférieur		Mizda	Thala	Marnes, gypse, dolomies	semiperméable
			Mazuza	Calcaires compacts	
		Tigrinna	Argiles , marnes, gypse		
Turonien		Gharyan - Nalut		Dolomies, calc. Dolomitiques	NALUT Aquifer
Cénomanién		Sidi as Sid	Yefren	Calc, marne, dolom, gypse, sel	imperméable
			Ain Tobî	Argiles, gypse et Calc.dolomit	
Albien		Kiklah s.l	Kiklah s.s	Sables, grès, calc.dolomitiques	Jurassic - Lower Cretaceous : KIKLAH Aquifer
Aptien					
Barremien					
	Néocomien -Wealdien		Cabao	Grès , sables argileux	
Malm	Kimmeridgien		Shakshouk	Calcaires, dolomies	
	Callovo-Oxfordien		Chameau Mort	Grès, sables, argiles	
Dogger	Bathonien	Giosc & Tacbal		Grès, gypse, calcaires	imperméable
Lias		Les Abreghs		Anhydrite, dolomie	
		Bir El Ghenem		Calc, dolom, gypse, anhydrite	
Keuper		Bou Chiba		Argiles, gypse	
Mushelkalk		Azizia		Calc, dolomie karstifiée, gypse	
Bundstandstein		Ras Hamia		Grès, sables argileux	Trias : AZIZIA Aquifer
		Ouled Chebbi		Grès	

II.3 – Le Schéma du multicouche saharien

Le stade ultime de simplification géologique du Sahara septentrional, à travers l'établissement des coupes-types séparément pour chacun des pays, puis l'établissement des corrélations lithostratigraphiques régionales, trouve sa matérialisation dans la confection du bloc diagramme de la fig. 11. Bien qu'il soit schématisé à l'extrême et à dessein, ce qui forcément lui confère un caractère localement erroné⁶, ce bloc diagramme rend compte d'une continuité exceptionnelle au sein des séries sédimentaires de la plate-forme saharienne. Ce schéma suggère notamment la continuité et l'homogénéité des grandes formations aquifères ainsi que des séries semi-perméables.

Fig. 11 : Bloc-diagramme géologique simplifié du SASS



Précisément, la dernière étape de lecture des coupes-types par pays a consisté à traduire d'«aquitards». Mis en vis à vis et rattachés à l'échelle stratigraphique, ces séries fournissent le schéma de la fig. 12, où sont représentées **en bleu les formations aquifères à eau douce** les plus significatives, **en rose les aquifères à eau salée**. **Le reste des formations** [formations semi-perméables, imperméables, aquifères de qualité médiocre] **demeurant incolore**.

⁶ exemple : l'Eocène évaporitique possède une extension spatiale réduite et n'existe pas en Libye .

Si l'on exclut les aquifères à eau salée du Trias, du Jurassique et du Néocomien en Algérie, 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 équivalent⁷ en Libye les deux nappes respectivement de l'Aquitaniens et du PlioQuaternaire.

Fig. 12 : Aquifères et Aquitards du SASS

Unité stratigraphique		Aquifères & Aquitards		
		ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Plioquaternaire	Moi-Pliocène	2ème nappe des sables	Toit Imperméable	aquifère local
Miocène		semiperméable		semiperméable
Aquitaniens		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	
Sénonien Sup	Maestrichtien		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	NALUT Aquifer
Cénomaniens		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	
	Callovo-Oxfordien		Nappe du JURASSIQUE	
Dogger	Bathonien			
Lias		Toit imperméable	Imperméable	imperméable
Keuper				
Mushelkalk				
Bundstandstein		Nappe salée du Trias	Nappe du TRIAS	Trias : AZIZIA Aquifer

⁷ cette «équivalence» se mesure en position stratigraphique ; mais ces aquifères libyens sont limités au bassin oriental et n'ont aucune relation physique avec les nappes équivalentes d'Algérie et de Tunisie.

Un degré de simplification supplémentaire permet de parvenir à l'élaboration du schéma de la fig.13, où les **aquifères sont figurés par des couleurs vives et les couches semiperméables par une couleur bleu-nuit**.

Si l'on exclut les nappes du Paléozoïque et le Trias gréseux de Libye, et 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 semi-perméables ; soit :

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

Fig.13 : Schéma du Multicouche Saharien

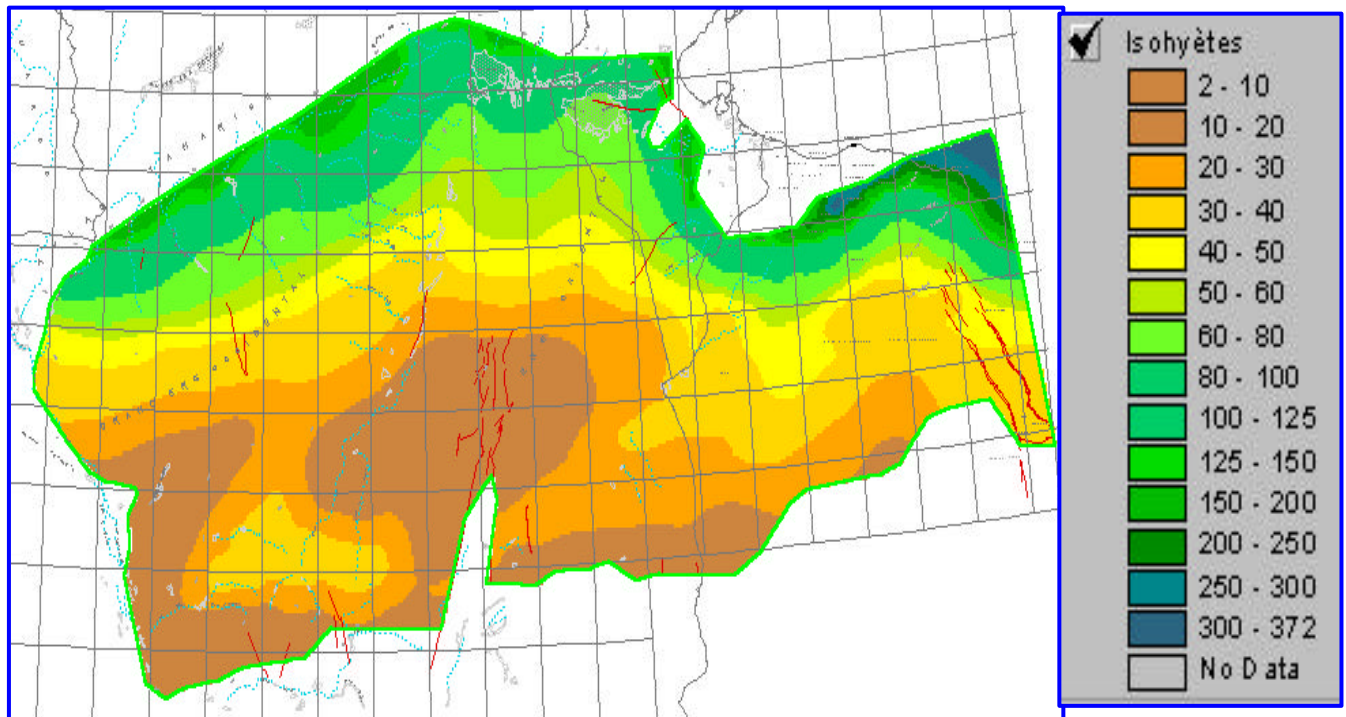
SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE du SAHARA SEPTENTRIONAL		
ALGERIE	TUNISE	LIBYE
Toit Imperméable	Toit Imperméable	
Nappe des SABLES	Nappe des SABLES du Djerid	Nappe du MioPlioQuaternaire
Semi perméable	Semi perméable	semiperméable
Nappe des CALCAIRES	Nappe des Calcaires - Nefzaoua	Upper Cretaceous-Paleocene: MIZDAH
Imperméable	Semi perméable	semiperméable
Nappe du TURONEN	Nappe du TURONEN	NALUT Aquifer
Imperméable	Imperméable	imperméable
CONTINENTAL INTERCALAIRE SL	CONT INTERCALAIRE & Jurassique	Jurass Lower Cretaceous - KIKLAH
Paléozoïque	Imperméable	imperméable
		Trias :AZIZIA Aquifer
		Paléozoïque

III – CARACTERISATION HYDROLOGIQUE

III.1 – Les précipitations sur le domaine du SASS

Par interpolation de la carte pluviométrique en courbes isohyètes établie par DUBIEF (1953), on peut disposer d'une grille (en cellules de 5kmx5km) représentant la lame d'eau moyenne (moyenne des 25 années 1926-1950) en tout point du domaine du SASS⁸ (fig. 14).

Fig. 14 : Carte de isohyètes en mm/an



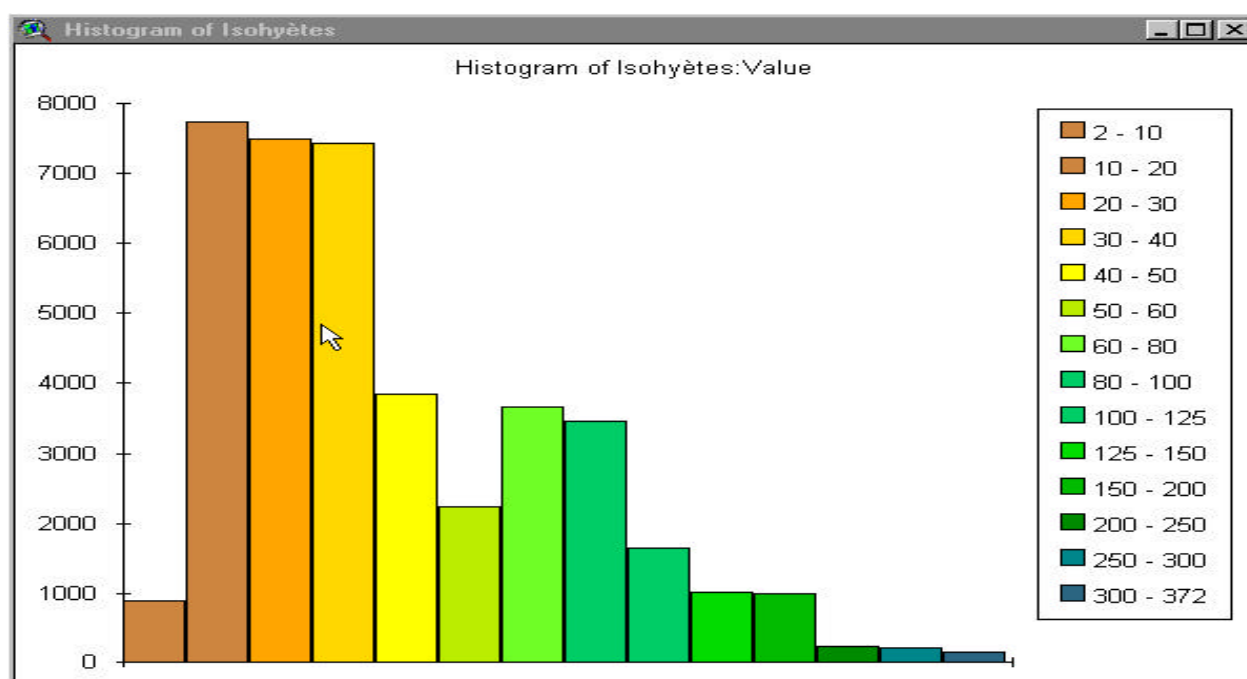
L'histogramme construit à partir de cette grille (fig.15) permet de calculer la pluie moyenne sur le bassin versant.

Si n_i est le nombre de cellules par classe de l'histogramme et y_i la valeur moyenne de la classe, la lame d'eau moyenne P précipitée sur le bassin est obtenue par : $P = \frac{\sum n_i \cdot y_i}{\sum n_i}$;

Soit $P = 51$ mm. Pour une surface totale de 1.027.000 Km², le volume des Ressources Pluviales « moyennes » du SASS s'établit à **52 Milliards de m³/an**.

⁸ Le domaine de la fig.14 représente les limites d'extension de l'aquifère du Continental Intercalaire. Exceptée la région de Biskra où le Complexe Terminal déborde légèrement vers le Nord, on peut considérer que le domaine du SASS correspond à peu près aux limites du CI.

Fig. 15 : Histogramme des isohyètes



III.2 – Ruissellement sur le SASS

Depuis les travaux de DUBIEF (1953), Il existe peu d'observations du ruissellement dans la région et l'hydrologie saharienne d'une manière générale paraît avoir, hormis l'exception présentée ci-après, suscité bien peu d'intérêt⁹. Pourtant, si l'on examine la structure altimétrique du Sahara, et si l'on se limite dans un premier temps à la région centrale, on peut définir (fig.16), du 28^e au 35^e parallèle, et du 3^e au 11^e méridien, un « bassin versant des chotts » d'environ 500.000 km². Ce bassin est certes occupé pour un tiers par le Grand Erg Oriental et l'ancien lit de l'Oued Igharghar, et pour un cinquième par le Tinghert et l'Isaouane, dont la contribution à des écoulements superficiels peut être contestée (Dubief, 1953). Il n'en demeure pas moins un certain nombre de bassins versants actifs sur près de 250.000 km², descendant de l'Atlas Saharien, de la Dorsale du Mزاب et du Dahar.

Sur le Dahar précisément, la contribution de M. FERSI (1979)¹⁰ est précieuse. Mettant à profit l'observation du ruissellement sur huit bassins de Tunisie centrale et méridionale (cf. tableau 2), Fersi a établi une formule empirique valable en climat aride, qui relie la lame ruissellée à la pluviométrie (moyenne annuelle) et aux caractéristiques physiographiques résumées par la pente moyenne. Ajustée sur les points expérimentaux (fig.17), l'équation de Fersi s'écrit :

$$\overline{Lr} = 0.017 * \overline{P} \cdot \sqrt{IG}$$

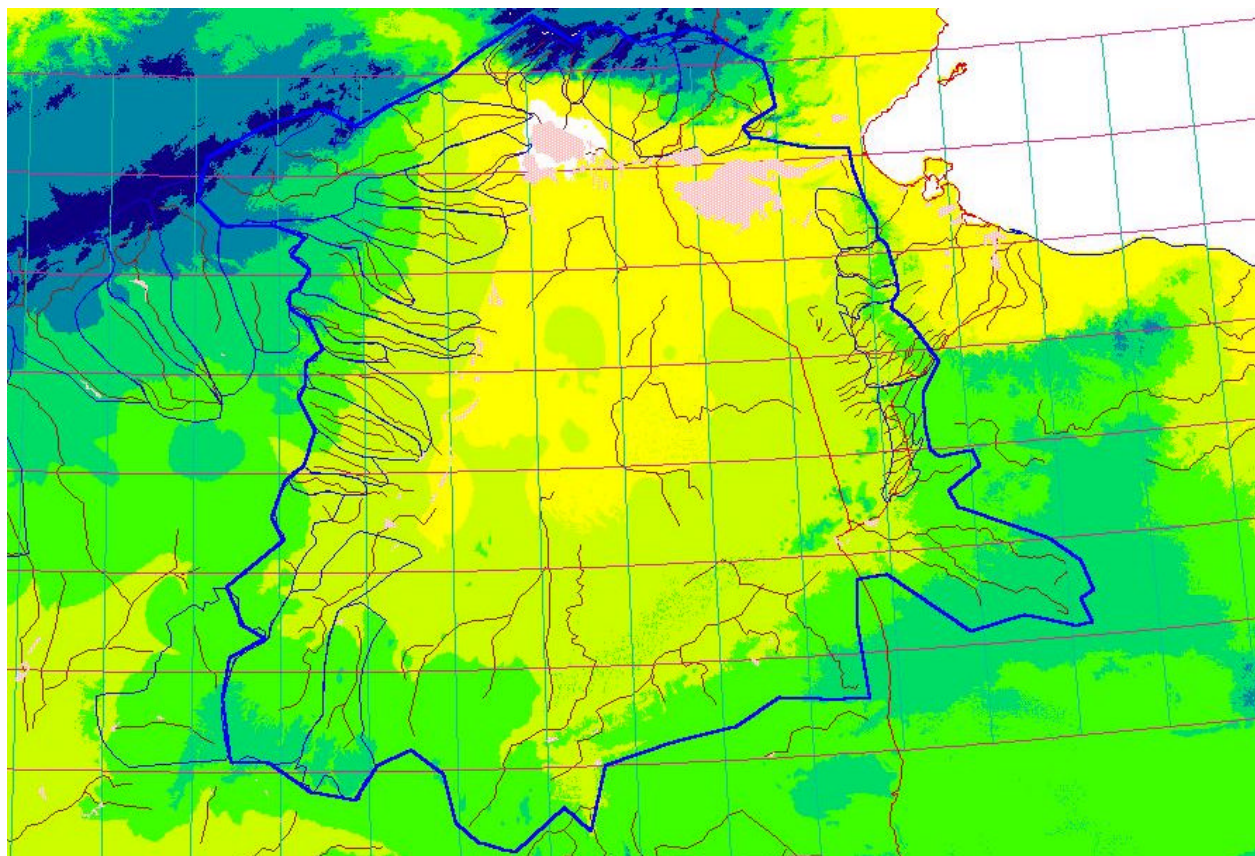
⁹ Dubief est sans doute l'unique chercheur à avoir « cru » à la recharge actuelle des nappes sahariennes par les eaux superficielles. Depuis cinquante ans, le développement séparé et parallèle des hydrologies superficielle et souterraine, les progrès et l'attrait de la paléohydrologie, une lecture un peu rapide des résultats des datations radiométriques, la difficulté et l'ampleur d'une approche rationnelle de la recharge des nappes sahariennes, le climat certes propice enfin, ont conforté l'image des « mines d'eau sous les déserts » [expression de J.Margat et K.Saad] et le concept des « nappes fossiles » du Sahara s'est peu à peu établi en véritable idéologie.

¹⁰ FERSI. M ; 1979: Estimation du ruissellement moyen annuel sur les BV du SE, du SW et Sahel sud ; DGRE

avec \overline{Lr} : lame ruisselée moyenne en mm
 \overline{P} : pluie moyenne en mm
 IG : pente moyenne du bassin en m/Km

Cette formule a permis à Fersi (1979) de proposer des estimations du ruissellement moyen sur l'ensemble des bassins-versants du Sud Tunisien.

fig. 16 : le Bassin Versant des Chotts

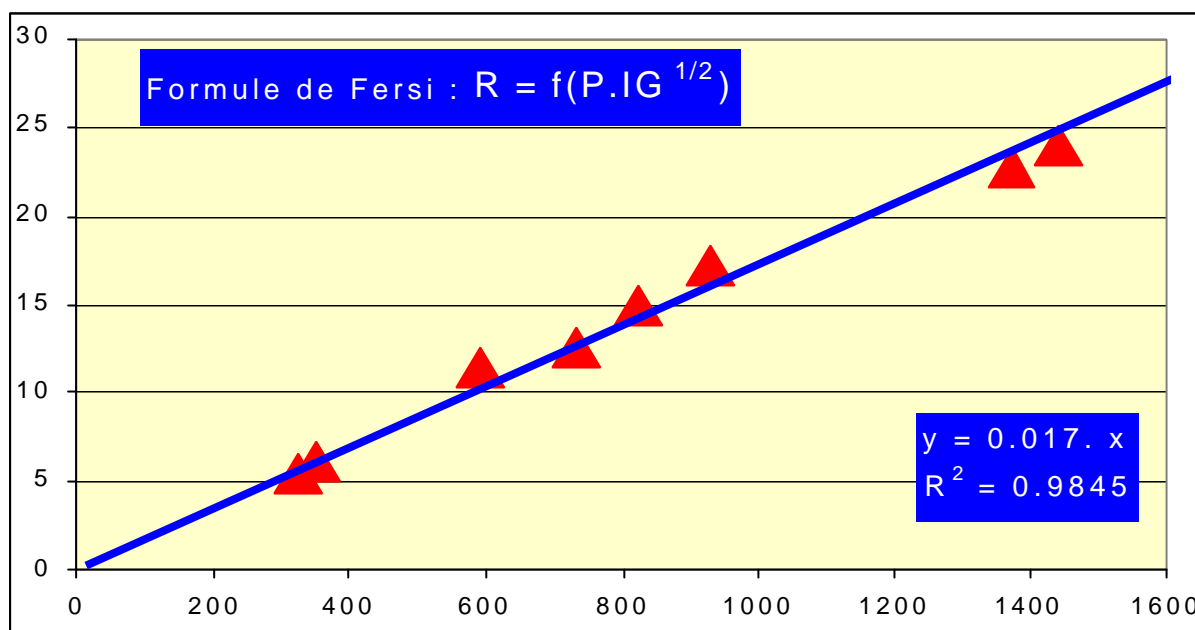


**Tableau 2 : Ruissellement en Tunisie Centrale et Méridionale
(d'après Fersi, 1979)**

Bassin Versant	S (km2)	IG (m/km)	P. Mm	R. Mm	$P \times IG^{1/2}$
Oued El Hamma	735	4.8	160	6.1	351
Oued Chaffar	240	3.6	170	5.5	323
Oum Ezzessar à Koutine	285	16.5	180	12.5	731
Oued Gabès pont GP1	88	10.8	180	11.5	592
Oued Zita	3.4	30	170	17.1	931
Oued Merguellil à Haffouz	675	13	380	22.7	1370
Oued Hatteb à Ain Saboun	813	13	400	24	1442
Oued Zeroud à Kt-Zazia	2200	6.6	320	15	822

S : superficie, Ig : Indice Général de pente, P : pluviométrie, R : ruissellement

Fig. 17 : Loi de Fersi pour le ruissellement fonction de la pluie annuelle et de la pente du BV



Application à l'estimation du ruissellement sur l'Atlas Saharien

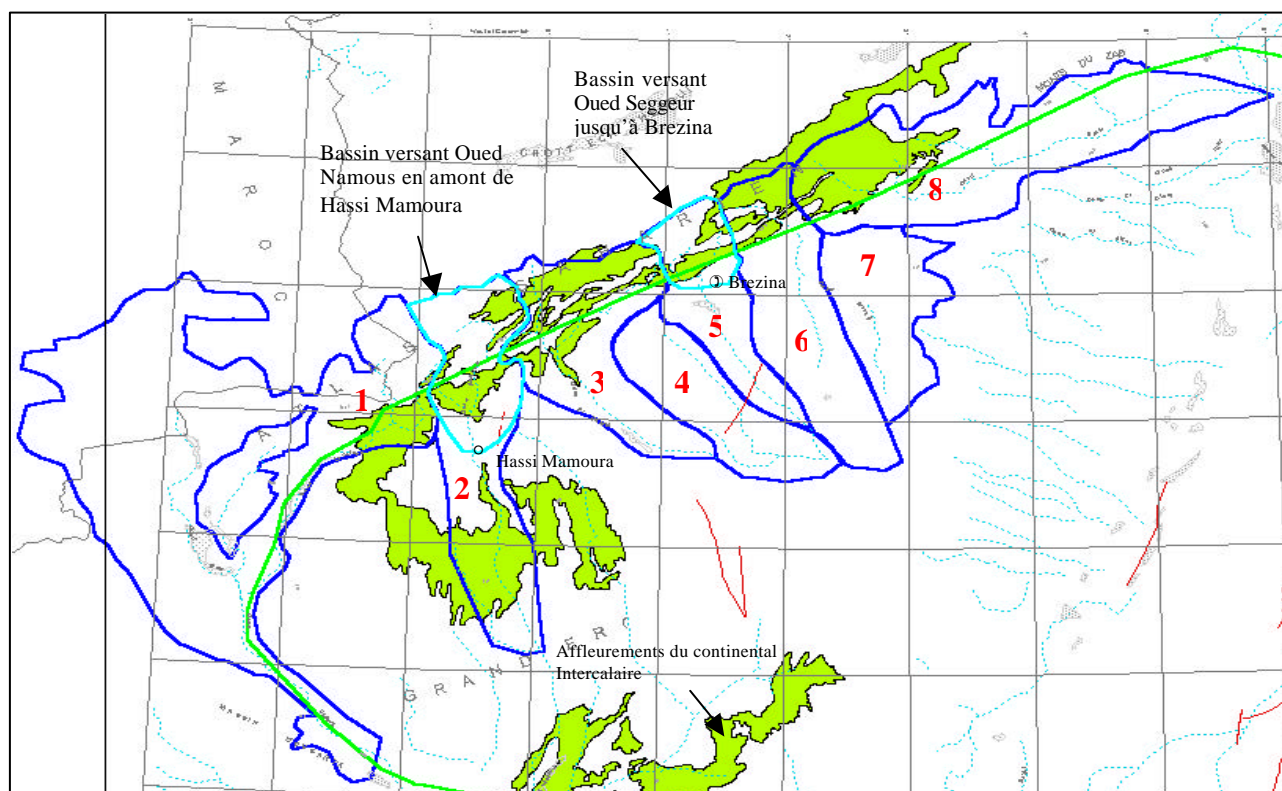
On peut définir huit bassins-versants principaux qui descendent de l'Atlas Saharien en direction de la zone d'influence du SASS (fig.18) :

- 1 : Bassin versant de l'Oued Zousfana-Saoura
- 2 : Bassin de l'Oued Namous**
- 3 : Bassin de l'Oued Rharbi
- 4 : Bassin de l'Oued Mazar
- 5 : Bassin de l'Oued Seggeur**
- 6 : Bassin de l'Oued Zergoun
- 7 : Bassin de l'Oued Mehaiguène
- 8 : Bassin de l'Oued Djeddi

Parmi ces bassins, deux ont fait l'objet d'observations hydrométriques : il s'agit de l'Oued Namous à Hassi Mamoura, et de l'Oued Seggeur à la station de Brézina. Nous allons utiliser ces observations, rapportées par BRL (1998)¹¹, pour vérifier si la formule de Fersi est applicable dans les conditions de l'Atlas saharien.

¹¹ BRL ingénierie ; 1999 : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes - Connaissances d'Ensemble

Fig.18 : les Bassins du versant sud de l'Atlas Saharien



Dans le tableau 3 figurent à la fois les données d'observation concernant ces deux derniers oueds et les valeurs de ruissellements moyens annuels correspondants calculés par la formule de Fersi.

Tableau 3 : Ruissellement Observé et Calculé sur l'Atlas Saharien

Bassin versant	P_{moy} (mm)	I_G (m/km)	$L_r(\text{mm})$ Calculé (Fersi)	$L_r(\text{mm})$ observe (BRL)	S (km ²)	$V_r(\text{Mm}^3)$ calculé	$v_r(\text{Mm}^3)$ observe (BRL)
O.Namous à hassi Mamoura	189	8.17	8.85	7	8910	79	62
Oued Seggeur à Brezina	245	12.1	13.97	13	3905	55	50

Pour chaque bassin versant, on détermine l'indice de pente globale I_G . La pluie moyenne est obtenue de la manière suivante : l'interpolation (linéaire pondérée par l'inverse des distances) des isohyètes de DUBIEF (1953)¹² fournit une surface discrétisée en cellules de 5x5km. Le décompte, sur l'histogramme, des cellules de même valeur sur un bassin versant donné fournira la pluie moyenne pondérée sur ce bassin (Fig. 19a et 19b).

¹² DUBIEF. J ; 1953 : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara ; SES , Alger.

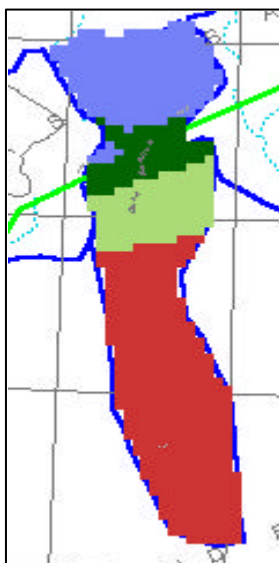


Fig. 19a : Plages de pluie moyenne sur le bassin versant de l'Oued Namous

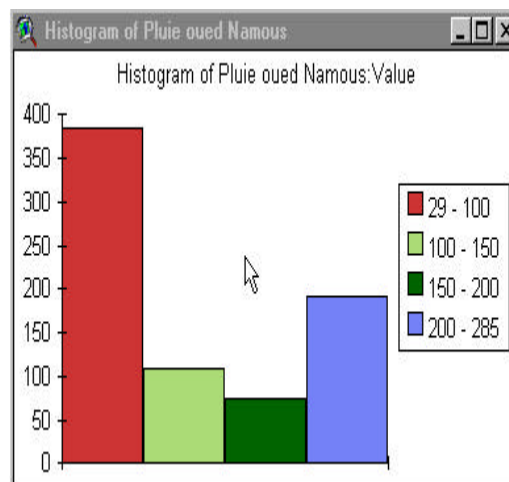


Fig. 19b : Histogramme des cellules de pluie moyenne sur le bassin versant de l'Oued Namous

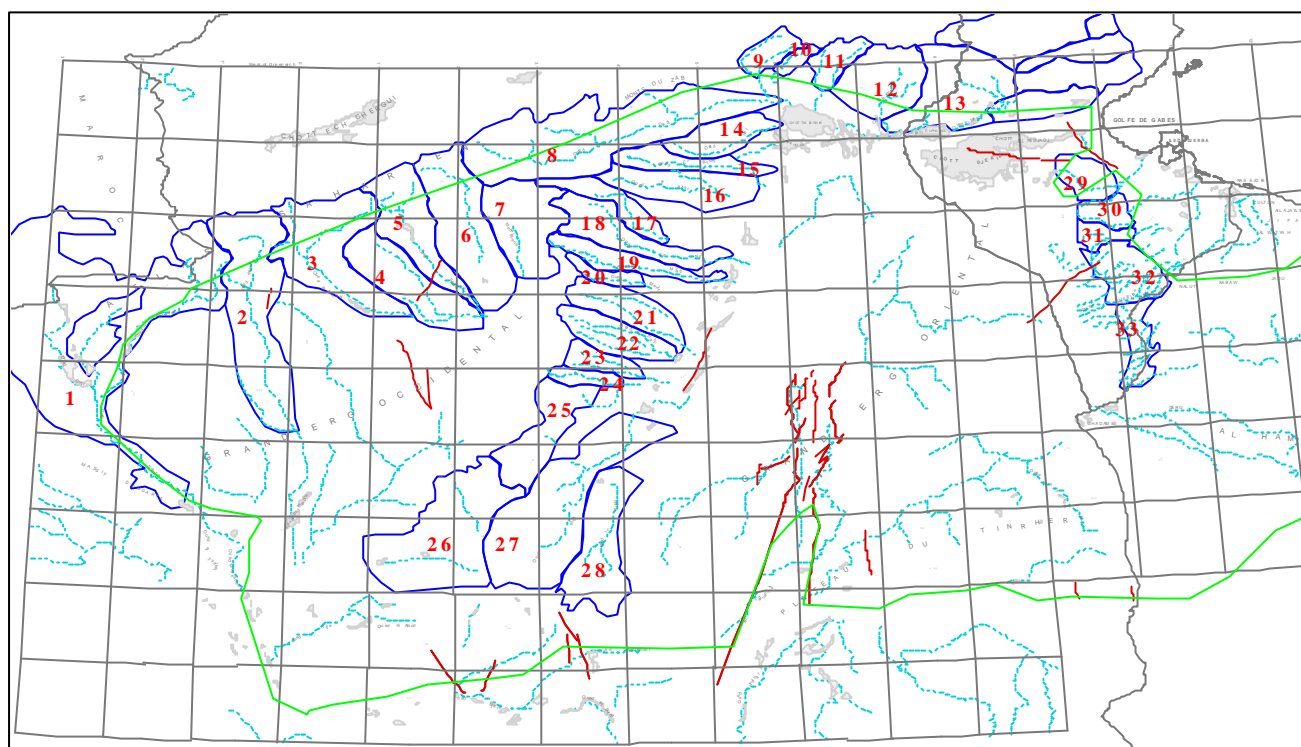
Le résultat obtenu est extrêmement favorable. La formule de FERSI, valable pour deux grands oueds de l'Atlas saharien, peut donc être appliquée aux autres bassins versants du Système Aquifère du Sahara Septentrional. En première analyse, on peut en dénombrer une trentaine (fig. 20 et tableau 4).

Tableau 4 : Bassins versants du Sahara Septentrional¹³

1 : Oued Béchar – Saoura	12 : Oued Djedah	23 : Oued Gouiret Moussa
2 : Oued Namous	13 : Oued El Melah	24 : Oued Djafou
3 : Oued Rharbi	14 : Oued Ittel	25 : Oued Djoua
4 : Oued Mazar	15 : Oued Rtem	26 : Oued Ech Cheguig
5 : Oued Seggeur	16 : Oued Attar	27 : Oued Mya
6 : Oued Zergoun	17 : Oued Zegrir	28 : Oued In Sakki
7 : Oued Mehaiguène	18 : Oued N'sa	29 : Oued Hallouf
8 : Oued Djeddi	19 : Oued M'zab	30 : Secteur Mahbes
9 : Oued Biskra	20 : Oued Metlili	31 : Secteur Lisséri
10 : Oued Biraz	21 : Oued Touil	32 : Secteur Djneiene
11 : Oued El Arab	22 : Oued Fahl	33 : Secteur Tiaret

¹³ Libye non comprise

Fig. 20 Bassins versants du Sahara Septentrional



Les ruissellements calculés, par la formule de Fersi, sur les bassins versants de l'Atlas Saharien sont présentés ci-après :

Tableau 5 : Ruissellements calculés sur l'Atlas Saharien

	Bassin versant	P_{moy} (mm)	l_g (m/k m)	L_r (mm)	S (km ²)	V_r (Mm ³)
ATLAS SAHARIEN	Oued Namous (ensemble du bassin)	128	4.09	4.24	19052	81
	<i>O. Namous à hassi Mamoura</i>	189	8.17	8.85	8910	79
	Oued El Rharbi	159	4.48	5.52	14974	83
	Oued Seggeur (ensemble du bassin)	154	6.04	6.20	9662	60
	<i>Oued Seggeur à Brezina</i>	245	12.1	13.97	3905	55
	Oued El Mazar	78	2.22	1.90	10590	20
	Oued Zergoun	113	3.93	3.67	15729	58
	Oued Mehaiguene	79	2.23	1.92	10581	20
	Oued Djeddi	177	2.71	4.78	26068	124
	<i>Oued Saoura</i>	114	3.76	3.62	58447	212
	Total Atlas (Saoura non compris)					446

Le Tableau 6 ci-après présente le Ruissellement moyen annuel calculé sur le Dahar, les Aurès, Chott Gharsa et la dorsale du M'zab.

Tableau 6 : Ruissellements sur les autres BV du Sahara Septentrional

Bassin versant	P_{moy} (mm)	I_G (m/km)	L_r (mm)	S (km²)	V_r (Mm³)
Secteur O. Hallouf	130	6.28	5.34	3396	18
Secteur O. Mahbès	Calculés par FERSI (1979)				6
Secteur O. Lisseri					3
Secteur O. Djeneiene					11
Secteur O. Tieret					5
Total DAHAR					44
Oued Biskra	186	20	13.66	2800	38
Oued Biraz(ou Abiod)	175	25	14.35	1100	16
Oued El Arab	206	16	13.51	3100	42
Oued El Djerah	174	13.21	10.36	8650	90
Total AURES					186
Oued El Melah	160	8.72	7.75	12156	94
Total GHARSA					94
Oued Ittel	95	3.44	2.89	5000	14
Oued Rtem	103	3.26	3.05	4500	14
Oued Attar	88	3.08	2.54	8000	20
O. Zegrir	108	2.97	3.06	4100	13
O. N'sa	85	2.54	2.22	7800	17
O. M'zab	66	2.49	1.71	5000	9
O. Metlili	59	3.72	1.88	1700	3
O. Touil	42	2.53	1.10	6326	7
O. Fahl	37	2.47	0.96	5777	6
O. Gouiret Moussa	35	1.09	0.59	2755	2
O. Djafou	33	1.58	0.68	1790	1
O. Djoua	26	3	0.74	8106	6
O. Ech Cheguig	28	0.95	0.44	19407	9
O. Mya	23	1.43	0.44	21972	10
O. In Sekki	23	1.49	0.46	11113	5
Total DORSALE MZAB					136

En conclusion, on peut estimer, en toute première analyse, que l'ensemble du ruissellement interannuel moyen sur le SASS¹⁴ serait de l'ordre de **1 Milliard m3/an**.

III.3 – Aires de recharge et alimentation des nappes

Il existe peu d'indications précises et de travaux portant sur la quantification de la recharge des nappes sahariennes et cette question est toujours demeurée sans réponse véritable. Le développement des modèles, qui peuvent calculer la recharge par calage des transmissivités, a accrédité une telle situation. Si bien que, **projet après projet, étude après étude, la connaissance de l'alimentation du CI et du CT n'a jamais pu bénéficier d'investigations spécifiques** qui aient pu l'extraire de son statut de coquetterie scientifique présentant peu d'intérêt pratique.

¹⁴ Compte non tenu de la Libye

Les commentaires du projet ERESS sur cette question sont édifiants :

« La recharge de la nappe du CI s'effectue par infiltration :

- des ruissellements à la périphérie du domaine ...notamment l'Atlas Saharien , le Dahar ...le Tademait , le Tinhert ;
- des pluies d'années exceptionnelles sur le Grand Erg Occidental. ... Bien que les zones d'alimentation soient connues... il était impensable d'envisager une campagne de mesures qui aboutisse à une évaluation sérieuse Il a été plus sage de représenter ces zones par un potentiel imposé et de faire calculer par le modèle le débit d'entrée ... » ...

« Il est très probable qu'une alimentation directe se produise sur les zones d'affleurement du CT et le Grand Erg Oriental à la faveur de pluies exceptionnelles... Etant donné l'impossibilité pratique d'évaluer l'importance de ce phénomène ...il a été supposé que toute l'alimentation provenait des limites du domaine... limites à potentiel imposé ... »¹⁵

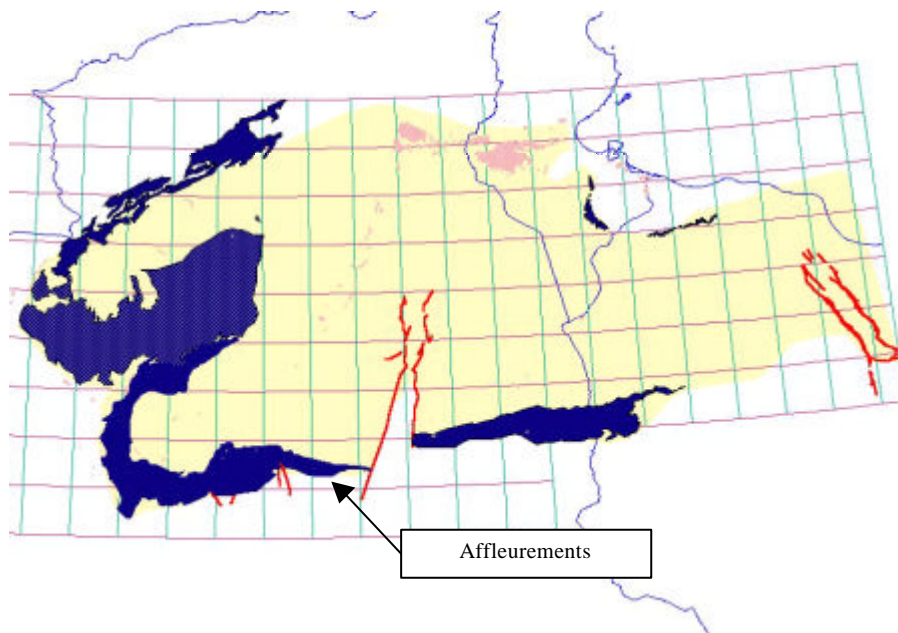
Il est vrai que trente années après l'ERESS, on en est toujours au même point sur cette question, et que le modèle du SASS sera probablement amené à représenter l'alimentation de la même manière que les modèles précédents. Cependant, il a été envisagé, en tout état de cause, de tenter d'approcher les ordres de grandeur du phénomène, de sorte que, avant (ou après) la construction du modèle, on puisse encadrer les données à introduire, ou bien critiquer les résultats obtenus. Pour ce faire, les trois éléments suivants sont disponibles :

- les précipitations moyennes en tout point,
- la cartographie des affleurements géologiques,
- une première évaluation des quantités ruisselées dans les bassins-versants.

Ces éléments ont été utilisés pour élaborer une première estimation de l'alimentation avec ses deux volets :

¹⁵ UNESCO , 1972

Fig. 21 : Affleurements perméables utiles du CI



III.3.1 – L’infiltration directe aux affleurements :

Les cartes fig. 21 et 22 représentent l’extension de l’ensemble des affleurements « utiles » des formations perméables du SASS, ceux situés sur des régions où la nappe est libre et qui contribuent à l’alimentation des nappes, respectivement du CI et du CT par infiltration directe des précipitations.

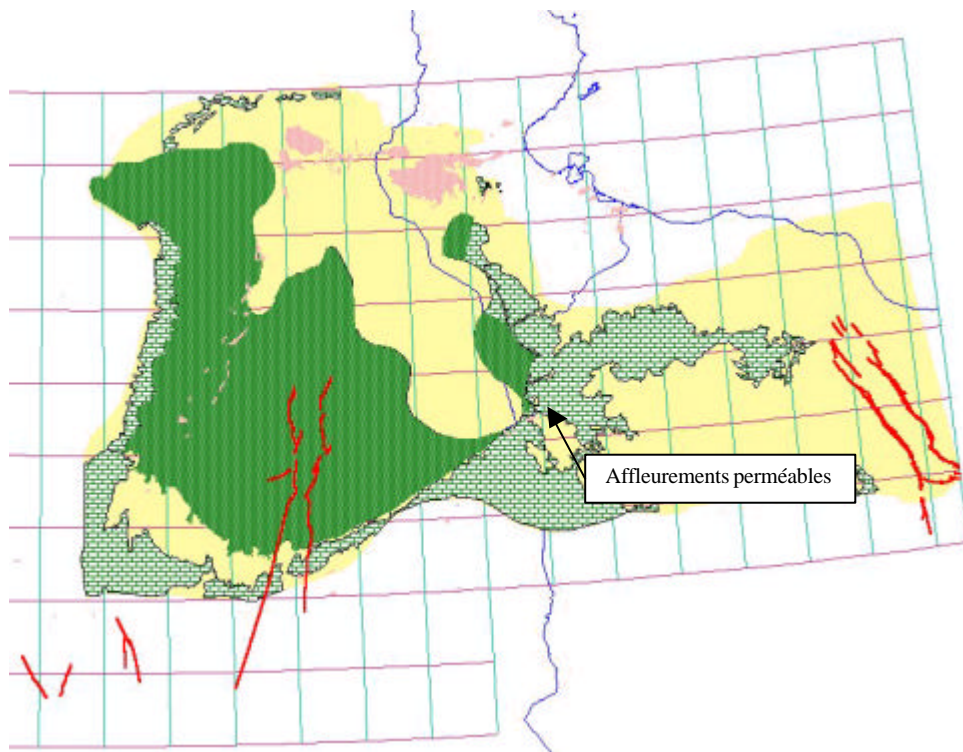
La conjugaison de cette carte avec celle des précipitations moyennes va fournir le tableau 7, qui permet de constater que :

- les affleurements perméables utiles¹⁶ 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.
- En faisant varier de **1% à 10%** le coefficient d’Infiltration des précipitations, **les volumes infiltrés** globalement dans le SASS **varient entre 0,3 et 3 Milliards m³/an**.
- Enfin l’ensemble des estimations de recharge du SASS publiées à ce jour¹⁷ tournent autour de **1 Milliard m³/an** [répartis à **2/3 pour le CT et 1/3 pour le CI**], ce qui représente, dans la logique des calculs précédents un coefficient d’infiltration directe des précipitations de l’ordre de **3%**. [compte non tenu de l’infiltration indirecte des crues]. Ce coefficient est ramené à seulement **2%** si l’on tient compte des apports par infiltration des crues d’oueds.

¹⁶ situés dans les secteurs à nappe libre

¹⁷ DDC-Burgeap (19063), Geopetrole (1964), Unesco(1972), Srivastava (1983), Zammouri (1990), Geomath (1994)

Fig. 22 : Affleurements perméables utiles du CT



III.3.2 – L’Infiltration des Crues d’Oueds

Le ruissellement inter-annuel moyen sur l’ensemble des Bassins-versants du SASS a été estimé à **1 Milliard de m³/an**.

Sur l’infiltration des crues dans les lits d’oueds en zones arides, il existe peu de travaux et de modèles validés sur des résultats d’expérimentations en vraie grandeur. A cet égard les travaux sur l’infiltration des crues des Oueds Zeroud et Merguellil dans le cours de leur lit traversant la plaine de Kairouan peuvent constituer une référence digne d’intérêt (Y. Nazoumou, 2002). Ces travaux indiquent, toutes proportions gardées, que les volumes infiltrés, en valeur moyenne interannuelle, représentent globalement **30% des apports totaux en ruissellement**. Par analogie, l’ensemble des infiltrations de crues sur le domaine du SASS pourrait se situer autour d’un volume de **300 Millions de m³/an**.

Il serait fort imprudent de vouloir aller au delà de la recherche de ces ordres de grandeur en l’état actuel des connaissances.

Tableau 7 : Infiltration directe sur les affleurements perméables du SASS

Continental Intercalaire						
Nappe	ZONE	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Vol. moyen précipité (Mm³/an)	Volume infiltré avec Coef. Infil 1%	Volume infiltré avec Coef. Infil 10 %
CI	Atlas Saharien_CI	23302	218	5080	50.80	507.98
CI	Adrar B Drich-Tinrhert	28129	14	394	3.94	39.38
CI	Tidikelt-Touat-Gourara	55855	15	838	8.38	83.78
CI	Grand Erg Occidental	87533	38	3326	33.26	332.63
CI	Nefusa-Yefren	585	217	127	1.27	12.69
CI	Dahar Tataouine	1157	130	150	1.50	15.04
Total CI		196500	50	9900	99	992
Total CI+CT		583000	51	30090	300	3000

Complexe Terminal						
Formation	ZONE	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Vol. moyen précipité (Mm³/an)	Volume infiltré avec Coef. Infil 1%	Volume infiltré avec Coef. Infil 10 %
Sen-C	Nord des chotts	2582	151	390	3.90	38.99
Sen-C	Mzab	9328	48	448	4.48	44.77
Sen-C	Tadmaït	22721	24	545	5.45	54.53
Sen-C	Tinrhert	27943	28	782	7.82	78.24
Sen-C	Tunisie-Libye	40329	57	2291	22.91	229.15
Sen-C	Sud Libye	1036	29	30	0.30	3.00
Sen-C	Dahar Matmata	208	89	19	0.19	1.85
Sen-C	Atlas Tunisien	0		0	0.00	0.00
Total Sen-C		188800	65	12300	123	1230
MPL	Miopliocène , yc Grand Erg Oriental	197200	40	7890	78.	789.
Total CT	SenC + MPL	386000	52	20190	202	2019

III.3.4 – Evaporation profonde

Dans le cas d'une nappe peu profonde, le régime d'évaporation à partir de la surface libre est déterminé par les conditions météorologiques. Lorsque le niveau de la nappe s'abaisse, le flux d'évaporation diminue et tend vers une valeur limite correspondant au flux maximal que le sol peut transmettre. La détermination du flux d'évaporation a été le sujet de plusieurs recherches dont on peut citer le modèle de Gardner (1958)¹⁸ pour évaluer le flux maximal d'eau que le sol peut transmettre :

$$E_{lim}=c(n)ad^{-n} \quad (1)$$

où : Elim est le flux d'évaporation,

- d la profondeur de la nappe,
- a et n sont des constantes empiriques caractérisant la conductivité hydraulique du sol.

¹⁸ Gardner, W.R., 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil. Sci., 85, 228-232.

D'autres chercheurs font abstraction des propriétés du sol. C'est le cas de la formule d'Averianov qui ne fait intervenir que l'évaporation en surface et la température moyenne annuelle :

$$E = E_{pot} \left(1 - \frac{d}{d_{cr}}\right)^n \quad (2a)$$

$$\text{avec } d_{cr} = 170 + 8T \pm 15 \quad (2b)$$

où :

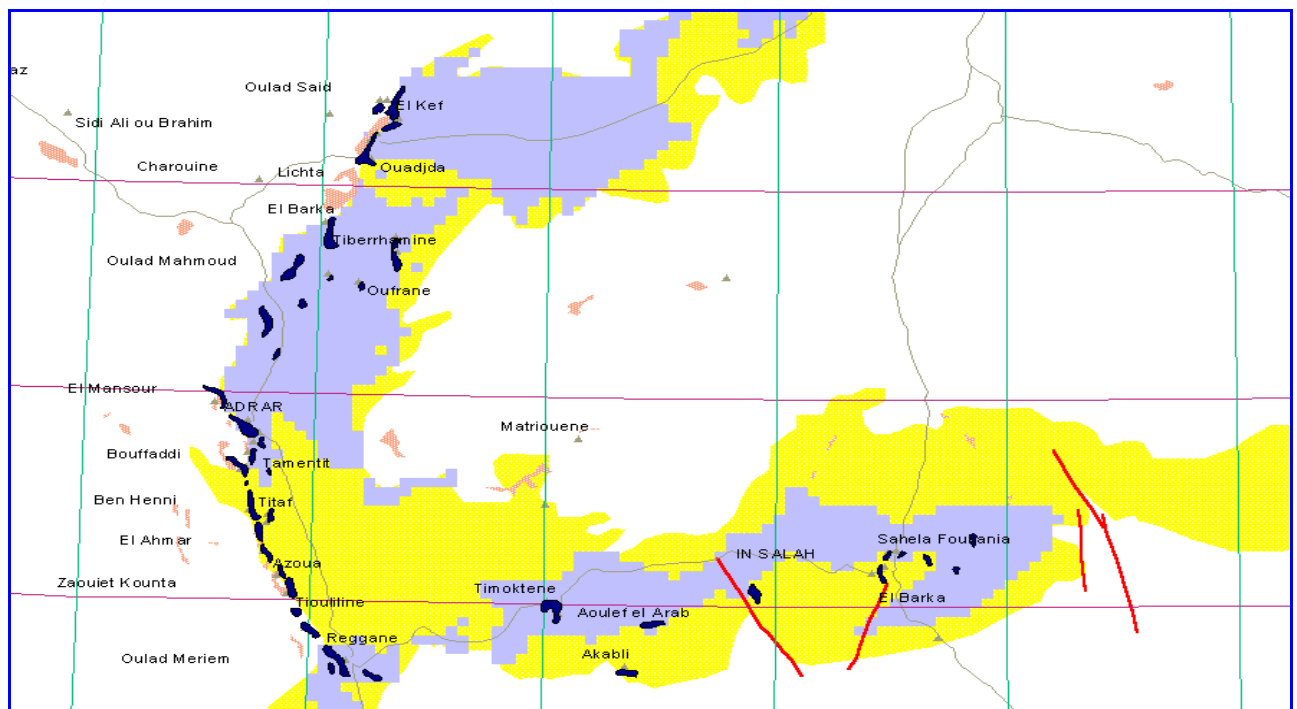
- E est l'évaporation annuelle,
- E_{pot} l'évaporation potentielle en surface,
- d la profondeur de la nappe,
- T la température annuelle moyenne (en °C),
- n un coefficient compris entre 1 et 3
- d_{cr} est la profondeur de la nappe au-delà de laquelle l'évaporation devient négligeable.

Coudrain-Ribstein et al (1998)¹⁹ propose une formule universelle applicable en zone aride pour calculer le flux limite d'évaporation profonde (dans le cas d'un sol nu) :

$$E_{lim} = \frac{71.9}{d^{1.49}} \quad (3)$$

La nappe du Continental Intercalaire peut être soumise à de fortes pertes par évaporation dans les zones d'affleurements où elle est libre et proche de la surface du sol. La profondeur des niveaux du CI est faible sur la majeure partie des affleurements du CI dans la région du Gourara-Touat-Tidikelt (cf.fig. 23 où sont colorées en gris-bleu les zones où la surface libre est à moins de 30m de profondeur).

Fig. 23 : Gourara-Touat-Tidikelt ; Position des foggaras et zones de faible profondeur de la nappe à surface libre du CI



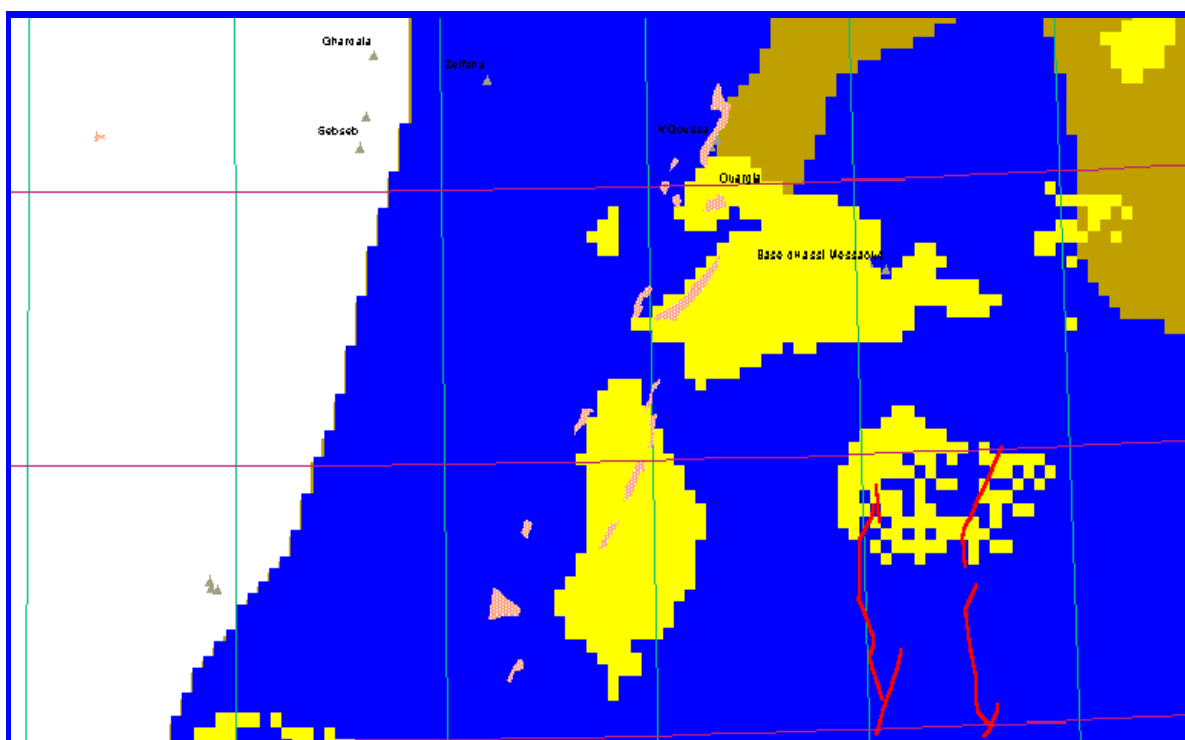
¹⁹ Coudrain-Ribstein, A., Pratz, B., Talbi, A., Jusserand, C., 1998. L'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride est-elle indépendante de la nature du sol ; C.R. Acad. Sci. Paris, Sc. terre, 326, 159-165.

Le flux d'évaporation est calculé par l'équation (2) en imposant en surface l'évaporation potentielle. En se référant aux données climatologiques mesurées à la station d'Adrar, la température moyenne annuelle établie sur 29 ans est de 23.7°C, ce qui porterait à près de 4m la profondeur critique (cf. équation 2b) au-delà de laquelle l'évaporation devient négligeable. Les données sur l'ETP sont rares. L'ETP moyenne calculée par la formule de Penman de 1970 mm à Idri (Libye) située à la même latitude qu'Adrar a été considérée. Calculée ainsi, l'évaporation moyenne sur la région représente un débit continu équivalent de 10.m³/s, ce qui paraît considérable, serait-ce pour une première approximation.

En effet, pour évacuer un tel débit dans la région, encore faut-il accroître d'autant les apports à la nappe du CI en infiltrant dans l'Erg Occidental ainsi que sur le plateau du Tademaït dans le secteur du bassin occidental. Les implications d'une telle hypothèse sont certes lourdes de conséquences pour la modélisation du système mais demeurent sans contradiction vis à vis des aires de recharge potentielles identifiées.

Quant à la nappe du CT, elle n'est pas épargnée par l'évaporation profonde, principalement dans le secteur de l'Oued Mya (voir fig. 24 où sont colorées en jaune les zones où la surface libre est à moins de 30 m de profondeur).

Fig. 24 : Zones de faible profondeur de la nappe à surface libre du CT



IV – CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE

IV.1 – Tracé de la Carte Piézométrique du CI

Le tracé de la carte piézométrique d'un système aussi vaste que le CI comporte toujours un certain degré de parti-pris : **la représentation 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 ; or ceci n'est pas chose aisée même si l'on dispose de mesures. Une telle carte n'avait pas encore été dressée sur tout le territoire du SASS²⁰. Des représentations portant sur des parties du territoire existaient bien pourtant, chacune apportant sa part au progrès des connaissances sur le système.

La première contribution d'envergure à la connaissance des écoulements du CI est sans doute celle apportée par A. CORNET (1964) qui identifie deux directions principales de circulation : l'une allant de l'Atlas vers l'axe de drainage du Gourara, du Touat et du Tidikelt, la seconde zone de drainage principale étant constituée (fig. 25) par « les chotts du Bas-Sahara dans le Sud Constantinois et le Sud Tunisien ». Quelques années plus tard, l'étude commandée par l'Organisme Technique de Mise en Valeur des Richesses du Sous-sol Saharien, réalisée par SCG- BURGEAP(1963), concluait ainsi : « ... **L'hypothèse de la remontée des eaux du Continental Intercalaire vers les Chotts du Sud Tunisien (Fedjej-Djerid) où elles s'évaporerait, doit être rejetée. L'exutoire principal de la nappe du CI paraît constitué pour l'essentiel par les nappes Crétacées et Miocènes de la région de Gabès qu'elle alimente à travers la grande faille d'El Hamma** ».

Cette vision sera adoptée par le projet ERESS (fig. 26), qui fera de l'«Exutoire Tunisien» l'unique sortie de la nappe dans le bassin central du SASS. A l'extrême ouest de la région, le Miopliocène occupe une position de relais vis-à-vis du CI et les écoulements s'effectuent en direction de la Saoura.

Les écoulements de la formation Kiklah vers le golfe de Syrte ont été décrits par GEFLI (1978)²¹, puis par P. PALLAS (1978)²² qui confirme **l'exutoire libyen**, ainsi que les apports en provenance respectivement des affleurements de l'Adrar ben Drich au Sud et du Djebel Nefussa au Nord. Plus tard, GEOMATH (1994)²³ va adopter une vision sensiblement différente : les nappes de Kiklah et du Trias gréseux sont confondues, l'aquifère est limité vers l'Est à la première faille du graben, à l'amont immédiat de laquelle une forte anomalie piézométrique est attribuée à l'apport par une trouée paléozoïque, enfin vers le Nord les écoulements du Trias l'emportent sur le Kiklah, lequel ne reçoit pas d'apport du Dj. Nefussa, et l'exutoire principal est attribué à la nappe de la Djeffara, aussi bien en Libye qu'en Tunisie.

²⁰ Une représentation à petite échelle a été proposée par M. Besbes et M. Zammouri en 1988 : Extension en Libye du modèle du CI algéro-tunisien; int. Conf. Comput. methods and water resources, Rabat.

²¹ GEFLI ; 1978 : Survey for the development of the Central Wadi Zone & Golf of Sirte ; Groudwater resources ; Final synthesis report ; Text & App 2&3- water analyses, hydrogeol cross sections, maps.- ref : AL-WR-205.

²² P. PALLAS ;1980 :Water resource socialist people's arab libyan republic. In Salem & Busrewille : the geology of Libya ; Ac. Press ; vol II

²³ GEOMATH ; 1994 : Western Jamahirya System; Hydrogeological Modelling of aquifers & well fields; Final Report ; Text & pl . ref : AW-MI-579.

Fig. 25 : Isopièzes du Continental Intercalaire, A. CORNET (1964)

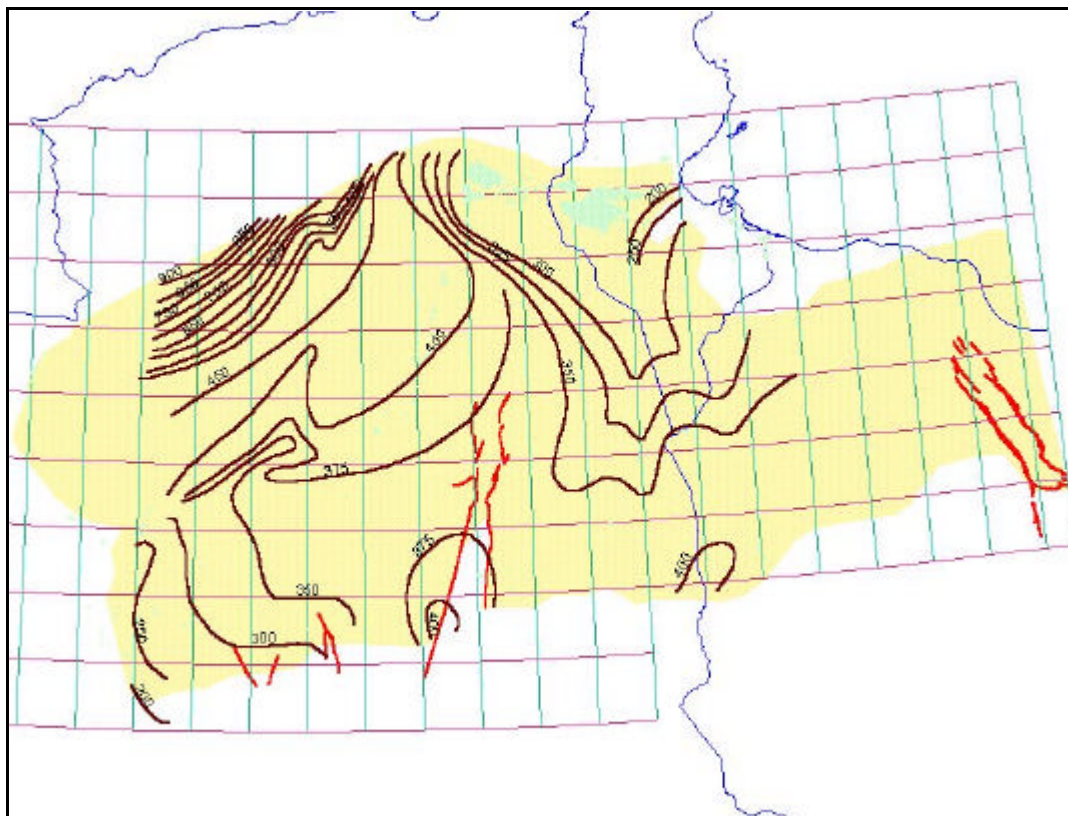


Fig. 26 : Piézométrie du Continental Intercalaire ; ERESS (1972)

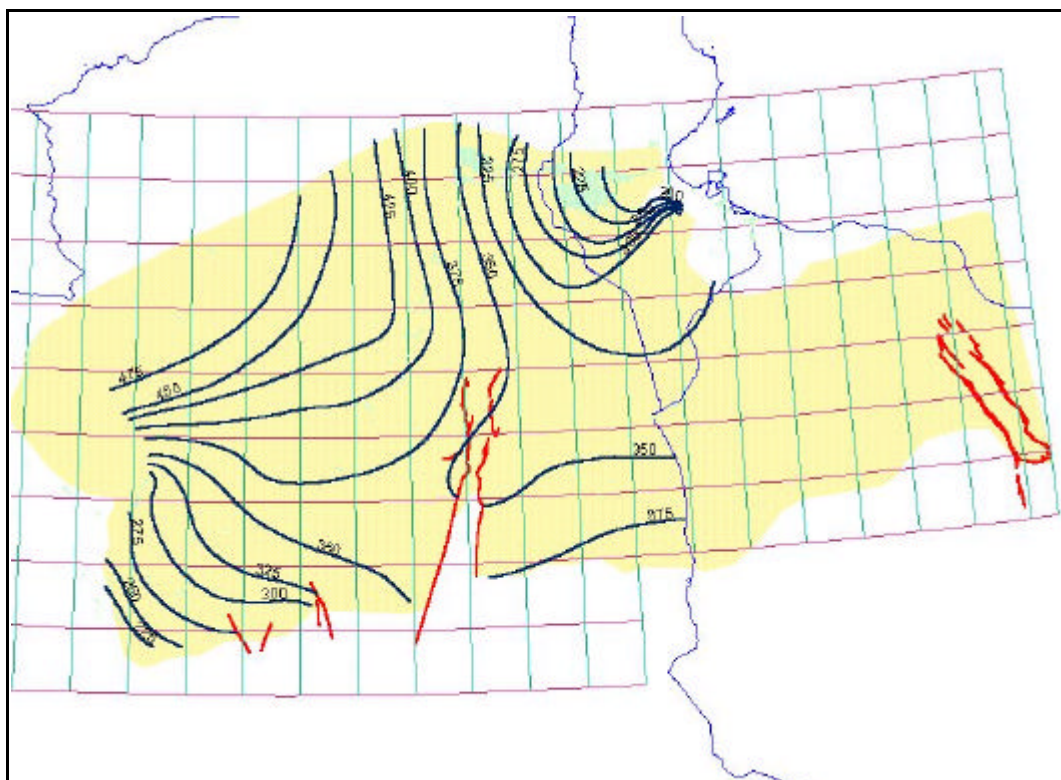


Fig. 27: Aquifère du crétacé inférieur ; P. PALLAS (1978)

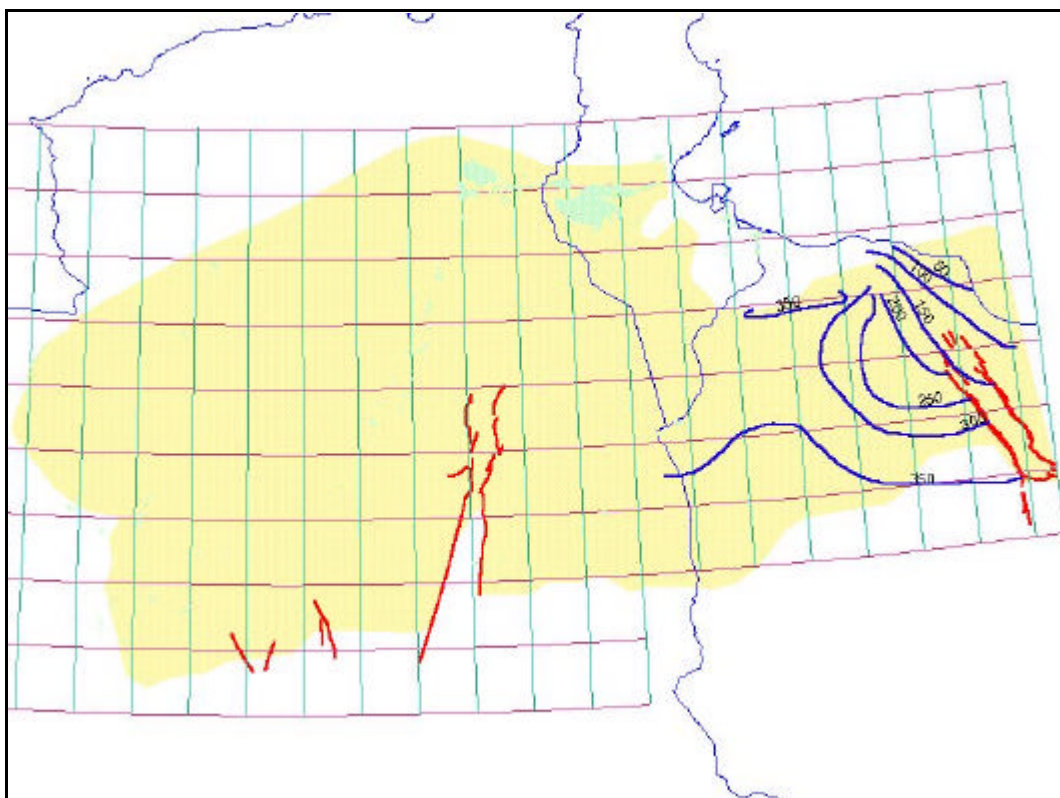
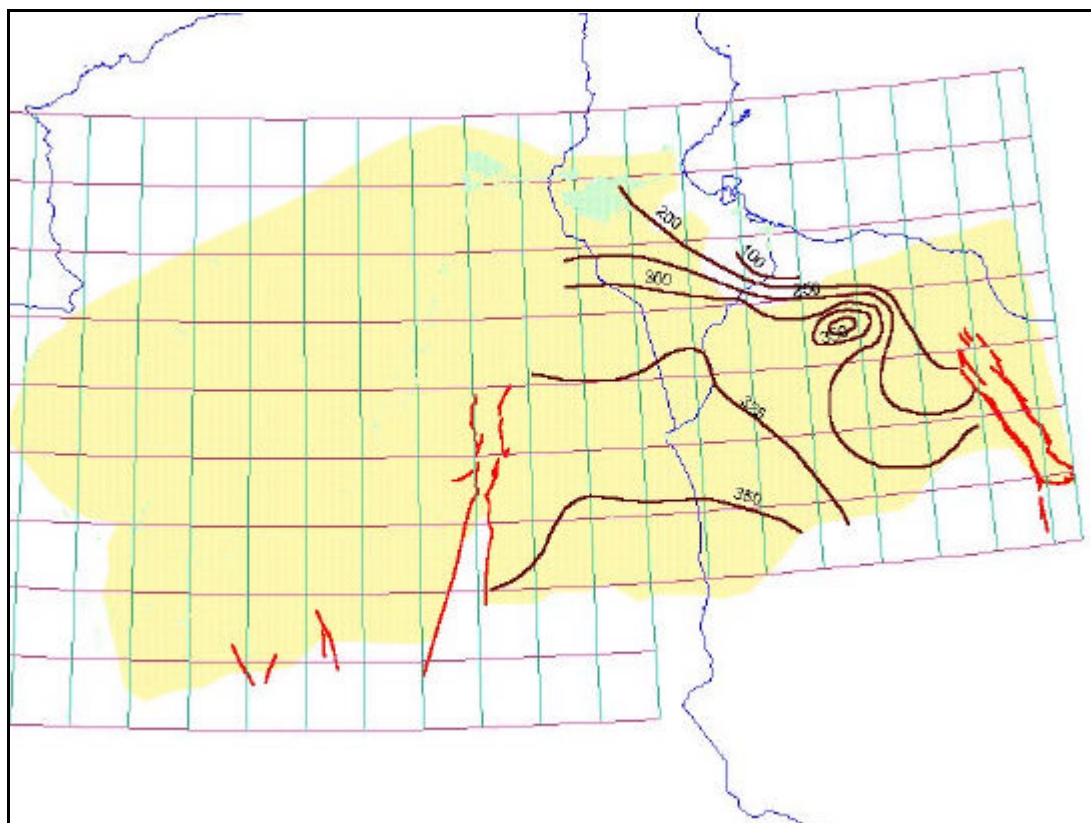
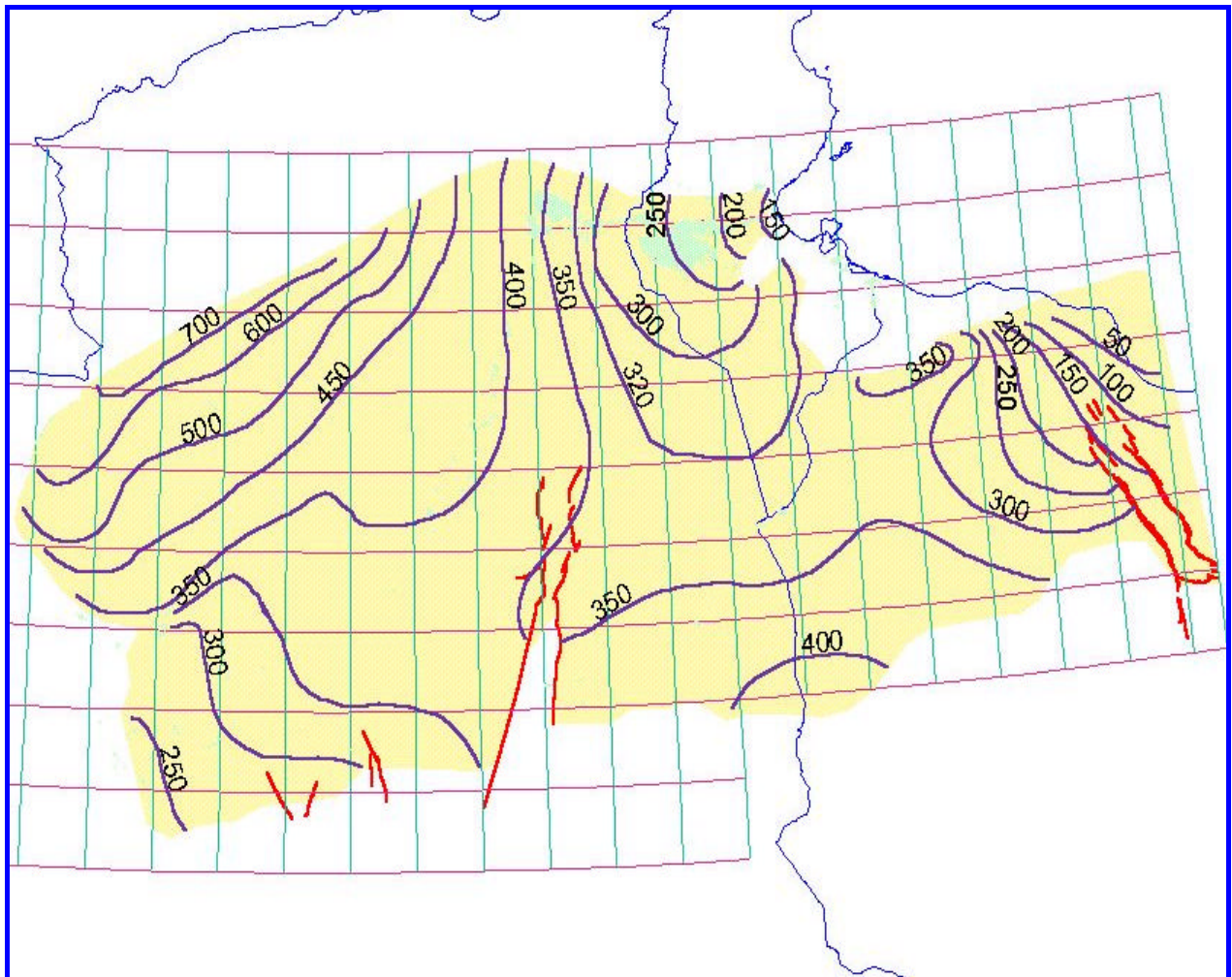


Fig 28 : Aquifère du Trias-Jurassique-Crétacé inférieur ; GEOMATH (1994)



Dans le cadre du projet SASS, il a été nécessaire de construire une carte piézométrique d'ensemble, qui tienne compte des contributions précédentes, de manière à présenter un schéma d'écoulements cohérent sur l'ensemble du bassin. Le résultat, présenté fig. 29, est une synthèse de toutes ces contributions. Cette carte définit les écoulements de la nappe du Continental Intercalaire à l'état « naturel », peu ou pas influencé par les pompages. Cette représentation spatiale de la surface piézométrique est soutenue par un certain nombre de mesures, non forcément toutes synchrones mais datées de périodes antérieures aux pompages les plus significatifs, mesures anciennes et tirées de sources documentaires, présentées en Annexe.

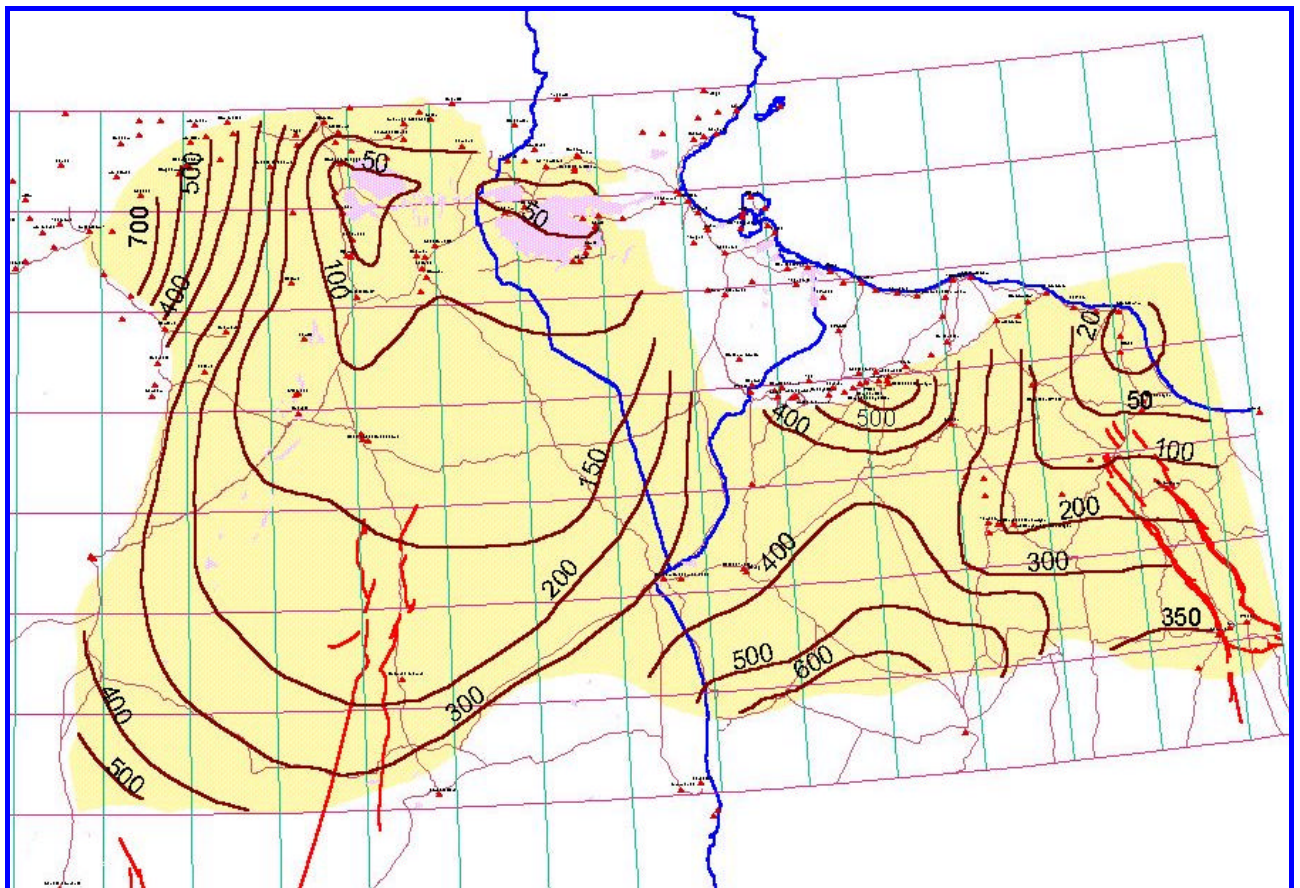
Fig. 29 : Piézometrie initiale de référence pour le Continental Intercalaire, SASS, 2000



IV.2 – Carte piézométrique du CT

Comme pour le CI, la cartographie générale des écoulements à l'échelle de tout le Complexe Terminal résulte de l'accumulation des contributions successives élaborées depuis quarante ans, depuis la publication par A. Cornet (1964) de la première carte piézométrique couvrant tout le « Continental Terminal » du Sahara. Parmi les contributions les plus significatives, on peut citer notamment Bel et Cuhe (1969)²⁴, le Projet ERESS (1972), A. Levassor (1975), A. Mamou (1976), Armines-Enit (1984), Srivastava (1983), Idrotecneco (1981), Gefli (1978), P. Pallas (1978), Geomath(1994). L'ensemble de ces travaux a permis de dresser une carte piézométrique «initiale » ou encore peu influencée, à l'échelle de toute la région du SASS (voir fig.30), qui pourra servir de référence pour décrire le système en régime permanent. Des valeurs ponctuelles relativement anciennes, relevées dans les références qui précèdent, ou dans les archives des services nationaux et la base de données du projet SASS, sont consignées dans l'Annexe consacrée aux hauteurs piézométriques du CT.

Fig. 30 : Piézometrie initiale de référence pour le Complexe Terminal SASS, 2002



²⁴ BEL et CUCHE ; 1969 : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal ; ERESS ; Ouargla.

Fig. 31 : Isopièzes du Continental Terminal ; A. CORNET (1964)

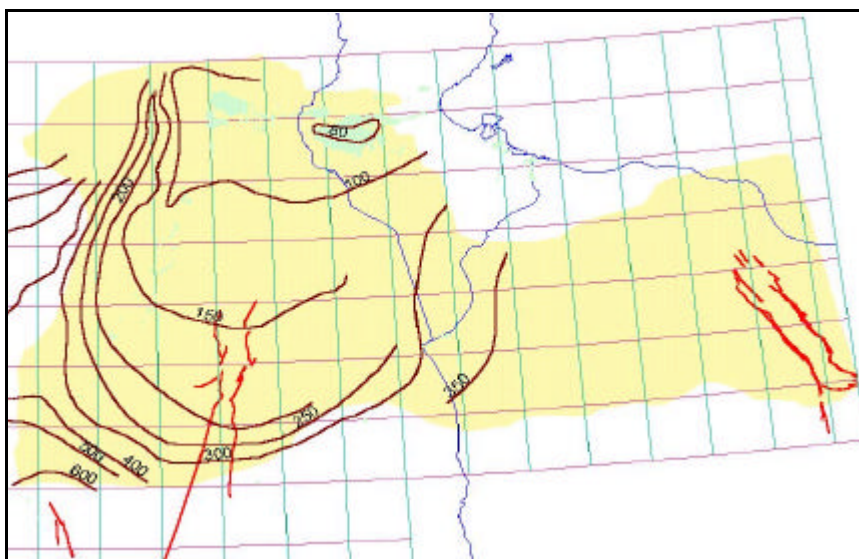


Fig. 32 : Complexe Terminal ; ERESS (1972)

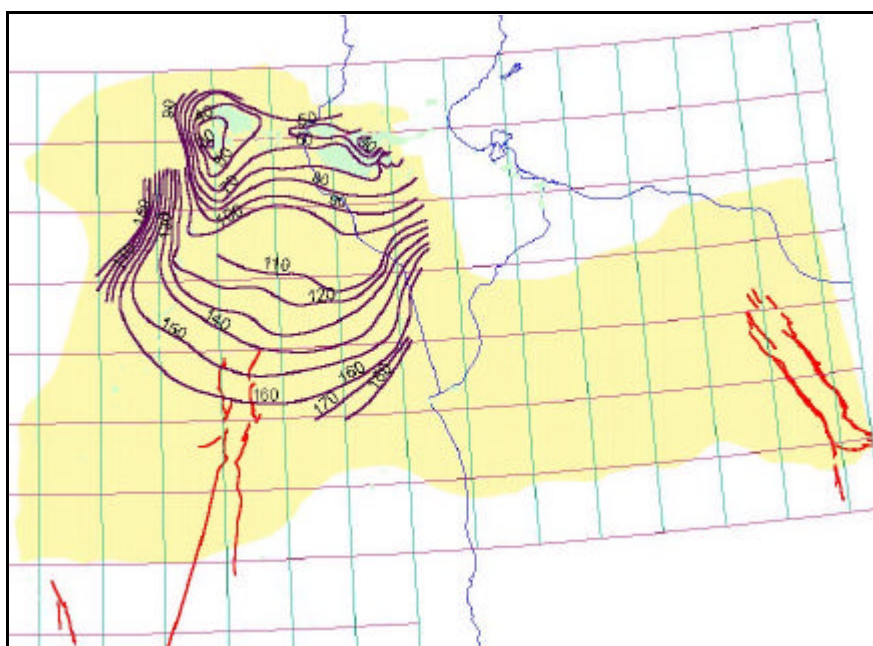
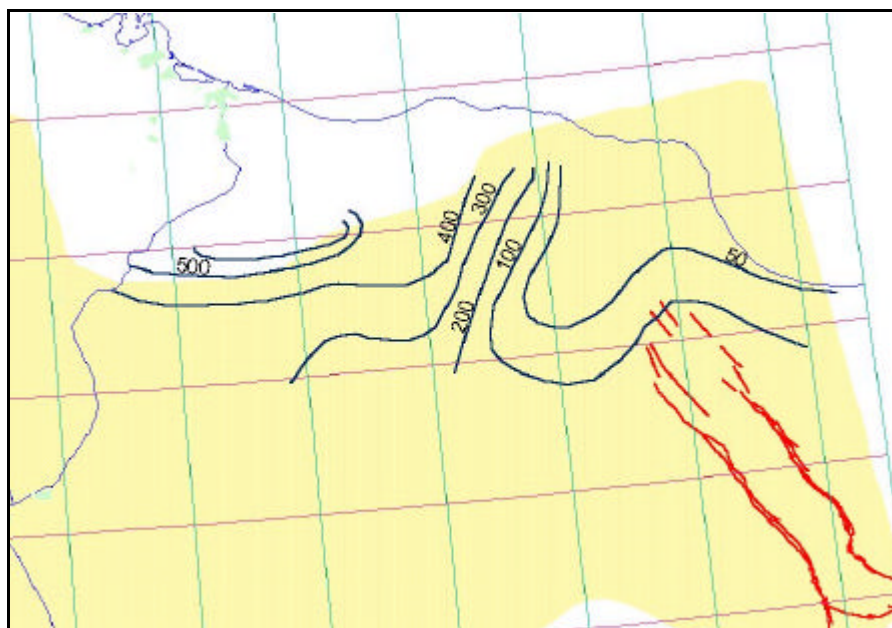


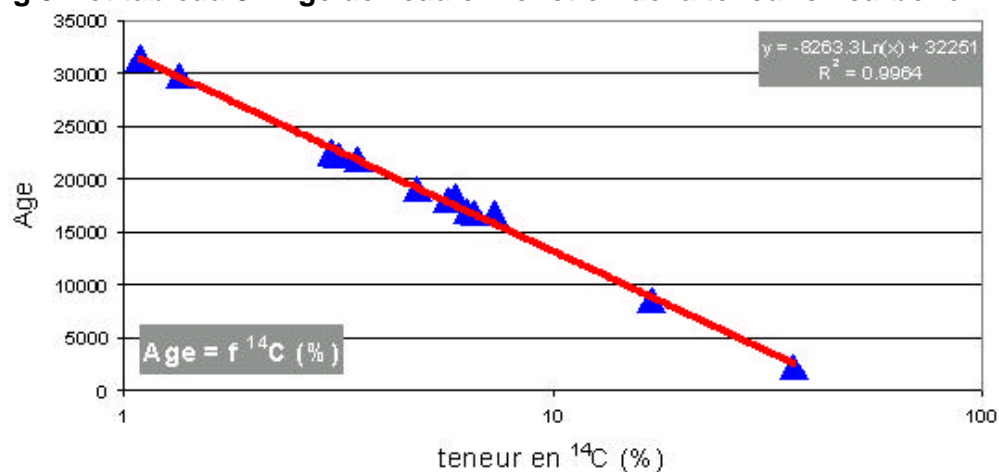
Fig. 33 : Piézometrie de l'aquifère de la formation "Nalut"; P. PALLAS (1978)



IV.3 – Intégration des données isotopiques dans le schéma hydrodynamique

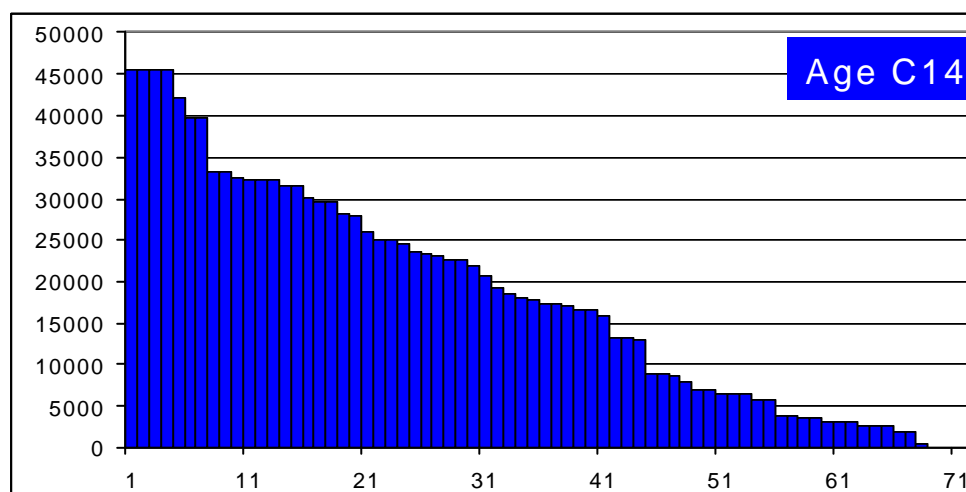
Les données isotopiques concernant l'activité en carbone 14 ont été rassemblées, ainsi que les ages correspondants. Sur les quelques 72 points d'eau du CI possédant des valeurs d'activité publiées dans les divers documents consultés (cf. références), seuls une douzaine comportent une estimation de l'âge correspondant. La régression des valeurs représentant l'âge de l'eau par l'activité carbone 14 (fig. 34) fournit une relation parfaitement linéaire, qui permet une estimation de l'âge des eaux pour l'ensemble de l'échantillon des 72 points d'eau (cf. tableau 9). 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 et la valeur médiane est à 17.500 ans, ce qui dénote une distribution normale, attestée par l'allure de l'histogramme des ages classés (fig. 35).

Fig.34 et tableau 8 : Age de l'eau en fonction de la teneur en carbone 14



Pays	Identifiant	Date	¹⁴ C (%)	Age (ans)
L	T/276/77	1977	1.09	31500
L	T/359/89	1989	1.35	29800
L	Agric. Project		3.05	22500
L	T/25/87	1987	3.15	22200
L	WG22		3.5	21900
L	Zintan		4.82	19100
L	T/203/80	1980	5.68	18000
L	1285/3/1		5.92	18400
L	T/96/76	1976	6.28	17000
L	T/64/78	1978	6.55	16800
L	H 5		7.3	16800
L	T/277/77	1977	16.9	8600
L	Seb. Mezezzem		36.3	2200
L	T/276/77	1977	1.09	31500
L	T/359/89	1989	1.35	29800
L	Agric. Project		3.05	22500
L	T/25/87	1987	3.15	22200
L	WG22		3.5	21900
L	Zintan		4.82	19100
L	T/203/80	1980	5.68	18000
L	1285/3/1		5.92	18400
L	T/96/76	1976	6.28	17000
L	T/64/78	1978	6.55	16800
L	H 5		7.3	16800
L	T/277/77	1977	16.9	8600
L	Seb. Mezezzem		36.3	2200

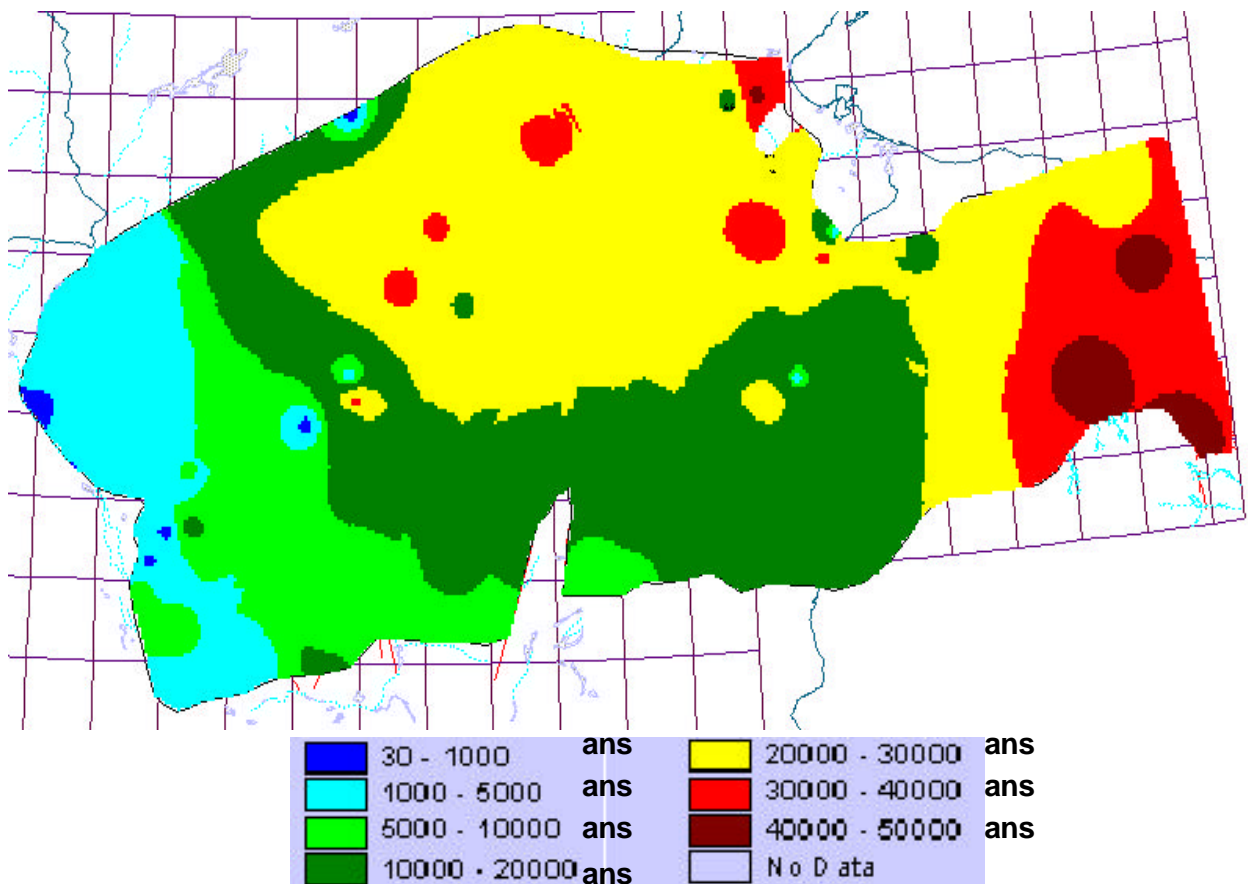
Fig. 35 : Eaux du Continental Intercalaire - Histogramme des ages classés



Cartographie des Ages des eaux souterraines

Il a donc été possible de collecter une série de données représentative, bien répartie dans le domaine du SASS (voir tableau 9). Par interpolation sur un support cartographique, la fig. 36 représente la répartition des activités en C14 mesurées aux forages, traduite en ages-équivalents des eaux de la nappe du continental intercalaire.

Fig. 36 : Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14 (en année)



La lecture de la carte des âges 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, dans la répartition spatiale des âges au C14, l'organisation du SASS selon les trois Bassins géologiques et hydrodynamiques.

Dans le Bassin Central, les eaux sont toutes anciennes (sup. à 20.000 ans), et les âges 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 (inf. à 10.000 ans). Tout au long de leur parcours (plus de 500km) de la zone de recharge principale qu'est l'Atlas Saharien, vers la zone d'exutoire principale qu'est la vallée du Gourara, du Touat et du Tidikelt, les eaux du Continental Intercalaire continuent de se renouveler tout au long de leur cheminement. Cette observation est en cohérence avec la géologie régionale ; en effet, le CI n'est plus recouvert ici par le Crétacé supérieur et la nappe du CI est à surface libre.

Dans le Bassin Oriental, les eaux sont anciennes. Et contrairement à ce que l'on observe autour de l'exutoire tunisien où il y a concordance entre l'hydrodynamique et l'évolution des âges, ce n'est pas le cas ici. En effet, la source de Taourgha, qui se trouve dans la zone d'exutoire, est elle-même issue d'un mélange d'eaux anciennes du CI et d'eaux plus jeunes (moins profondes) du Complexe Terminal ; de ce fait ce n'est pas là que l'on observe les âges les plus élevés. 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 », « renouvelé », non pas par des eaux actuelles mais par les eaux anciennes du Cambro-Ordovicien.

Gradients des temps de séjour

L'age radiométrique d'un échantillon d'eau souterraine correspond au temps de séjour moyen de toutes les eaux contenues dans l'échantillon. Cela peut représenter des ages très différents correspondant à divers spectres de transit. Il faut donc bien se garder de vouloir à tout prix faire correspondre l'age radiométrique d'un échantillon (composé d'un mélange de particules fluides d'ages variés) avec l'age hydrodynamique de l'échantillon considéré : un exemple édifiant nous est offert avec le cas de Ain Taourgha. Toutefois, la cartographie du gradient des temps de séjour moyens peut fournir des indications sur les vitesses de circulation moyennes des eaux souterraines.

Tableau 9 : Relation Activités-Ages C14 des eaux du CI*

Pays	Identifiant	Nom ou localisation	Aquifère	Type Ouv	X = ¹⁴ C (%)	Y = Age estimé	Source
A	71/16	Hamaguir (103 K 1)	CI	Forage	18.9	7964	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/16	Timimoun	CI	Puits	30.9	3902	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/15	Hi. Marroket (66 L 7)	CI	Forage	1.0	32588	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/14	El Goléa	CI	Forage	32.0	3613	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/9	Adrar	CI	Puits	24.4	5853	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/10	Bou Ali (344 O 4)	CI	Foggara	22.3	6597	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/11	Reg. Ville	CI	Puits	33.2	3308	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	71/14	Reg. Plateau	CI	Forage	33.5	3234	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	71/15	Aoulef El Arab (53 O 5)	CI	Foggara	38.8	2020	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	70/13	In Salah	CI	Puits	21.3	6995	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	71/9	Tit 101	CI	Forage	36.0	2639	CONRAD MM., FONTES J.C., 1972
A	130 H 7	Laghout	CI	Forage	54.7	25	GONFIANTINI et al., 1974
A	408 H 11	Tamerna	CI	Forage	1.1	31463	GONFIANTINI et al., 1974
A	119 I 8	Berriane	CI	Forage	1.3	30083	GONFIANTINI et al., 1974
A	17 I 9	Guerrara 2	CI	Forage	1.7	27866	GONFIANTINI et al., 1974
A	436 I 11	Sidi Mahdi	CI	Forage	2.1	26120	GONFIANTINI et al., 1974
A	112 I 8	Melika	CI	Forage	2.5	24679	GONFIANTINI et al., 1974
A	11 J 9	Zelfana 2	CI	Forage	0.0	32251	GONFIANTINI et al., 1974
A	447 J 10	Ouargla 1	CI	Forage	1.4	29471	GONFIANTINI et al., 1974
A	4 K 9	Daïet Remt	CI	Forage	5.2	18628	GONFIANTINI et al., 1974
A	Hi Messaoud	Hi Messaoud	CI	Forage	4.1	20592	GONFIANTINI et al., 1974
A	7 K 12	Rde el Baguel AB7	CI	Forage	2.4	25017	GONFIANTINI et al., 1974
A	12 N 12	Tin Fouyé	CI	Forage	17.3	8695	GONFIANTINI et al., 1974
A	1 N 12	Tabankort	CI	Forage	9.9	13307	GONFIANTINI et al., 1974
A	Fort Flatters	Fort Flatters	CI	Forage	22.8	6414	GONFIANTINI et al., 1974
A	1 J 8	Hassi Fahl	CI	Forage	0.9	33123	GONFIANTINI et al., 1974
A	El Goléa	El Goléa	CI	Forage	32.0	3613	GONFIANTINI et al., 1974
A	66 L 7	Hi Maroket	CI	Forage	1.0	32251	GONFIANTINI et al., 1974
A	Hi Infel	Hassi Infel	CI	Forage	59.6	25	GONFIANTINI et al., 1974

Pays	Identifiant	Nom ou localisation	Aquifère	Type Ouv	X = ¹⁴ C (%)	Y = Age estimé	Source
A	Od Mahmoud	Oulad Mahmoud	Cl	Forage	54.0	25	GONFIANTINI et al., 1974
A	Adrar Puits Samatrach	Adrar Puits Samatrach	Cl	Forage	24.4	5853	GONFIANTINI et al., 1974
A	334 O 4	Bou Ali (344 O 4)	Cl	Forage	22.3	6597	GONFIANTINI et al., 1974
A	Sbaa	Sbaa	Cl	Forage	46.5	524	GONFIANTINI et al., 1974
A	Reggane	Reggane	Cl	Forage	33.5	3234	GONFIANTINI et al., 1974
A	53 O 5	Aoulef El Arab	Cl	Forage	38.8	2020	GONFIANTINI et al., 1974
A	In Salah	In Salah	Cl	Forage	5.6	18015	GONFIANTINI et al., 1974
A	In Salah Puits Hydra	In Salah Puits Hydraulique	Cl	Forage	21.2	7015	GONFIANTINI et al., 1974
A	Tit 101	Tit 101 Forage	Cl	Forage	36.0	2639	GONFIANTINI et al., 1974
A	73 L 7	Garet Louazoua	Cl	Forage	10.0	13224	GONFIANTINI et al., 1974
A	3 N 7	Timeldjane	Cl	Forage	10.2	13060	GONFIANTINI et al., 1974
A	4 N 7	El Hassene	Cl	Forage	17.0	8839	GONFIANTINI et al., 1974
T	6664	Oued Nakhla	Cl	Forage	0.2	45550	GONFIANTINI et al., 1974
T	5664	CF1	Cl	Forage	0.9	33123	GONFIANTINI et al., 1974
T	7305	Seftimi 2	Cl	Forage	6.6	16658	GONFIANTINI et al., 1974
T	BZA1	Bir Zobbas	Cl	Forage	0.4	39823	GONFIANTINI et al., 1974
T	Ez A1	Om Zab	Cl	Forage	2.9	23453	GONFIANTINI et al., 1974
T	ECH A1	Ech Chouech	Cl	Forage	6.0	17445	GONFIANTINI et al., 1974
T	6511	Oued Lorzot	Cl	Forage	0.0	32251	GONFIANTINI et al., 1974
T	6855	Oued Ouni	Cl	Forage	53.3	25	GONFIANTINI et al., 1974
T	5717	Ksar Gihilane	Cl	Forage	1.6	28367	ERESS
L	T/25/87	Mizda	Cl	Forage	3.15 ± 2.37	22770	BRL, 1997
L	T/64/78	Sinawan	Cl	Forage	6.55 ± 1.2	16720	BRL, 1997
L	T/96/76	Derj	Cl	Forage	6.28 ± 1.3	17068	BRL, 1997
L	T/203/80 New	T203/80 new (Ghadamis)	Cl	Forage	5.68 ± 0.74	17898	BRL, 1997
L	T/276/77	T276/77 (Ghadamis)	Cl	Forage	1.09 ± 1.15	31539	BRL, 1997
L	T/277/77	T277/77 (Ghadamis)	Cl	Forage	16.9 ± 3	8888	BRL, 1997
L	T/359/89	T/159/89 (SE Derj)	Cl	Forage	1.35 ± 2.63	29771	BRL, 1997
L	WG22	WG22 (Ghadamis)	Cl	Forage	3.5 ± 0.83	21899	BRL, 1997
L	Agric. Project	Agricultural Project	Cl	Forage	3.05 ± 0.41	23036	BRL, 1997
L	Zintan	Zintan (E Nalut)	Cl	Forage	4.82 ± 1	19255	BRL, 1997
L	Seb. Mezezzem	Seb. Mezezzem	Cl	Forage	36.32 ± 4.36	2566	BRL, 1997
L	H 5	Hamada Al Hamra			7.3	15825	Idrotecneco, 1982 (P.66)
L	WS-2	Wadi Qirzah, well WS-2	Kiklah		0,0 ± 0,4	39823	GWA
L	B1-39	Well B1-39	Kiklah		0,2 ± 0,4	45550	GWA
L	ZZ13	Wadi Zamzam ZZ13	Kiklah		0,2 ± 0,4	45550	GWA
L	W-6	Ash Shuwayref W-6	Kiklah		0,2 ± 0,4	45550	GWA
L	Wadi Marmuta	Wadi Marmuta	Kiklah		2,4 ± 1,4	25017	GWA
L	Wadi Faysal well n° 3	Wadi Faysal well n° 3	Kiklah		3,2 ± 0,5	22640	GWA
L	1285/3/1	1285/3/1 (c.s.)(Ghadamis)	Kiklah		5.92 ± 0.72	17556	GWA
L	J-18	Al Jufrah J18	Paléozoïque		0.3 ± 0.4	42200	GWA
L	Tawurgha source	Tawurgha source	Source		2.8 ± 0.8	23743	GWA

(*) voir annexe 8 du volume 2 : Hydrogéologie

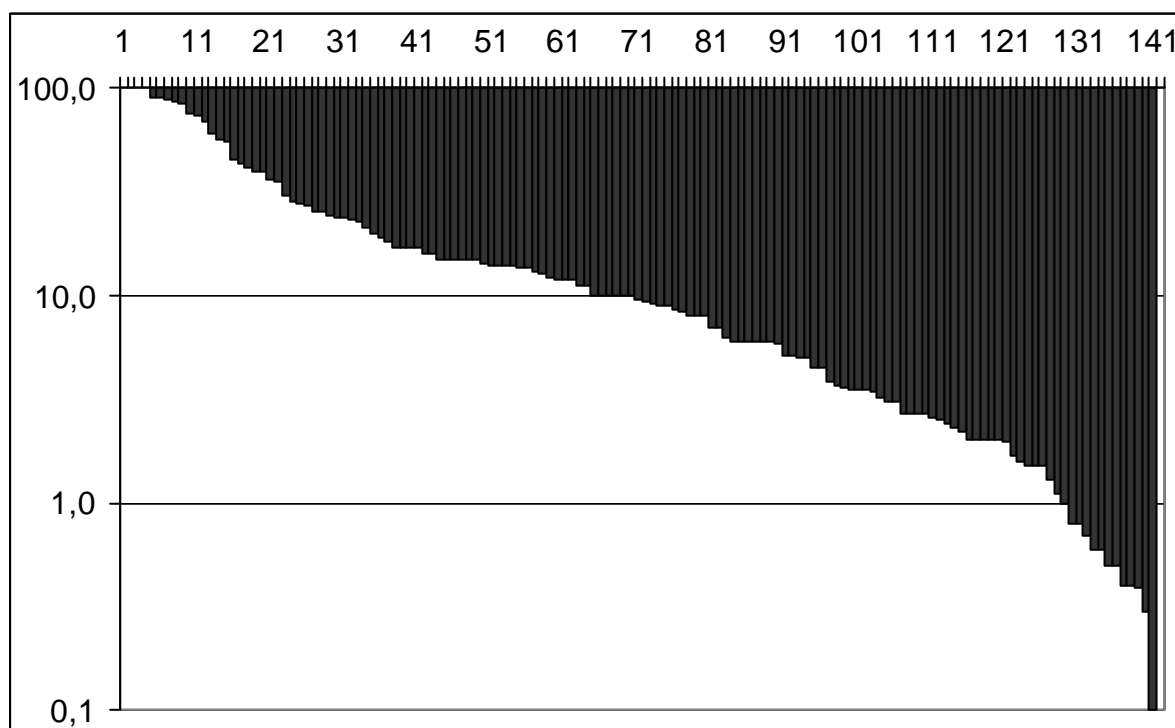
IV.4 - Répartition spatiale des transmissivités

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 (cf. volume Hydrogéologie²⁵). Ces informations se présentaient sur divers supports : Bases de Données nationales, archives, Rapports publiés et inédits. Toutes ces valeurs, dont la position géographique se trouve fig. 39 et 41, sont consignées dans les tableaux en Annexe.

La série des Transmissivités du CI, dont la distribution est représentée fig.37, admet pour Moyenne la valeur $20.E^{-3}$ m²/s et pour Médiane $10.E^{-3}$ m²/s. Quant à la série du CT, elle a une moyenne de $16.E^{-3}$ m²/s et une Médiane de $9.E^{-3}$ m²/s, ce qui donne des caractéristiques statistiques très proches pour les deux formations.

Les cartes fig. 40 et 41 donnent une idée plus précise de la répartition spatiale des Transmissivités respectivement dans le CI et le CT. Cette répartition peut servir de repère au cours du calage du Modèle de simulation en régime permanent.

Fig. 37 : Courbe de distribution des transmissivités du CI : $T \times 10^{-3}$ m²/s



²⁵ SASS, Rapport Final, Volume Hydrogéologie.

Fig. 38 : Courbe de distribution des transmissivités du CT: $T \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

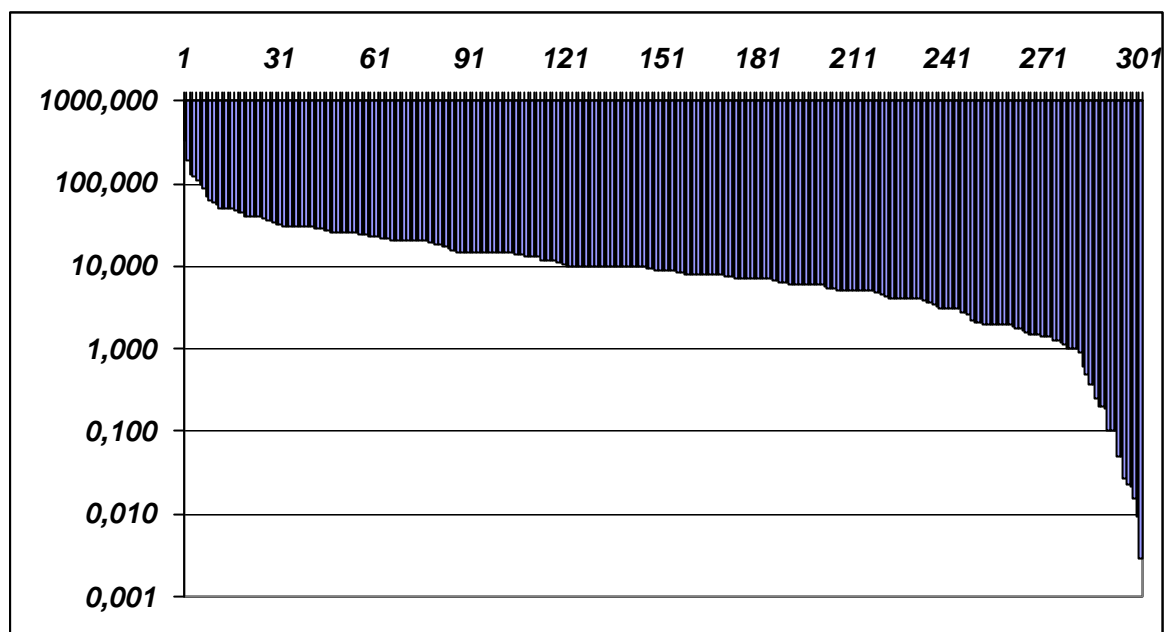


Fig. 39 : Transmissivités du CI collectées dans le SASS

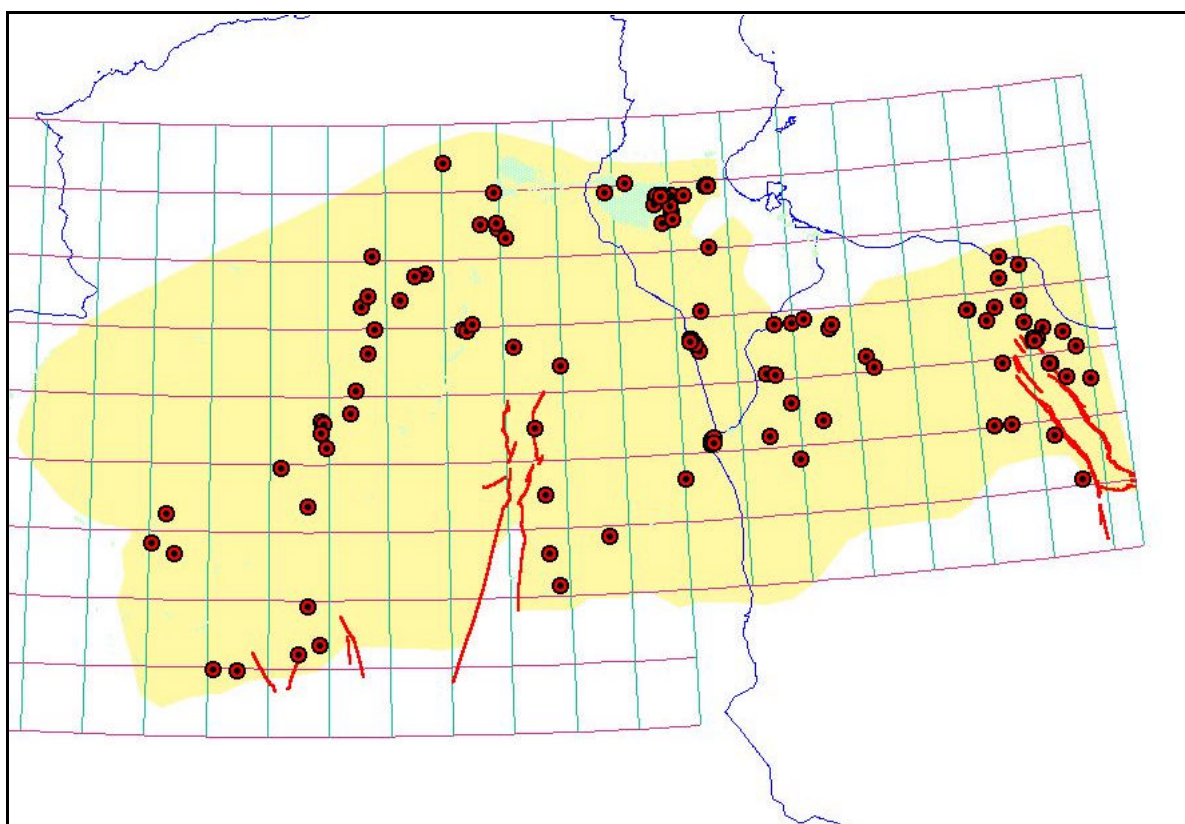


Fig. 40 : Distribution spatiale des transmissivités du C.I (m²/s)

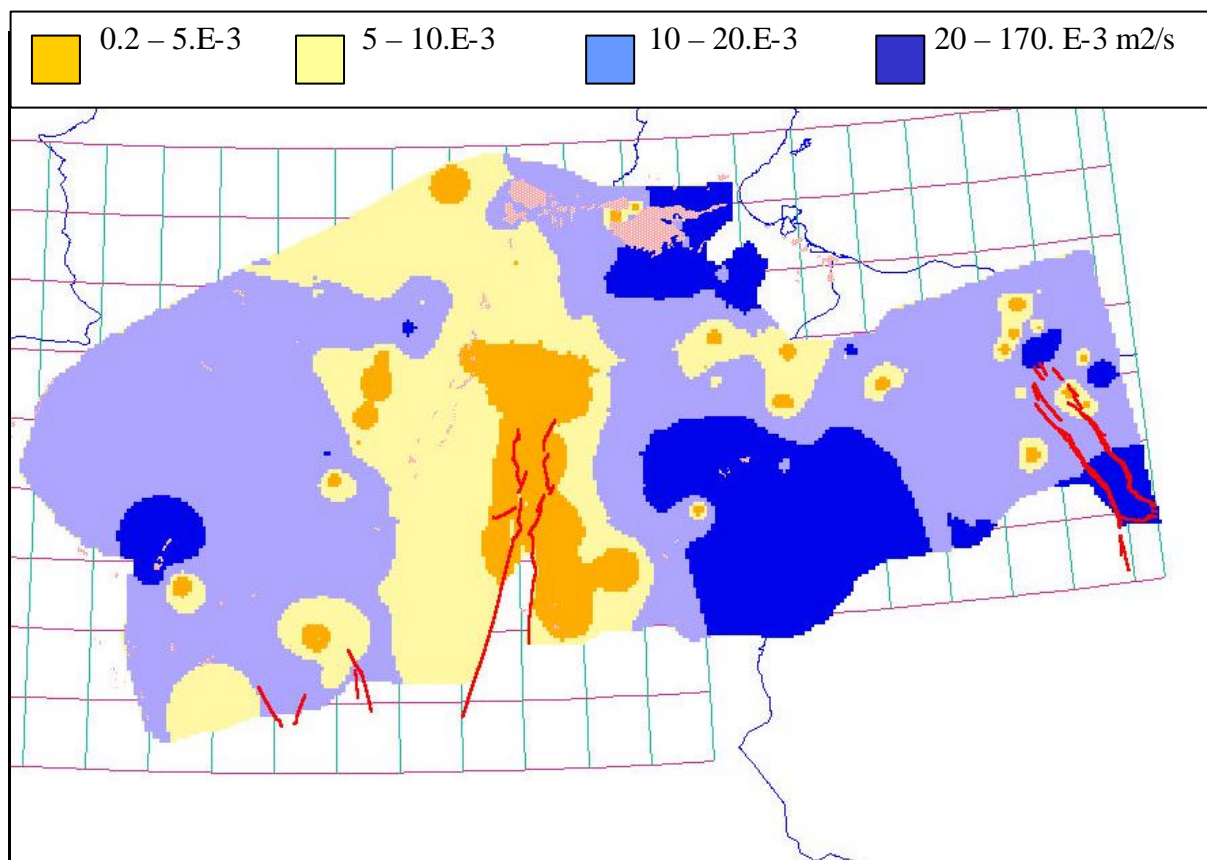


Fig. 41 : Distribution spatiale des transmissivités du C.T (m²/s)

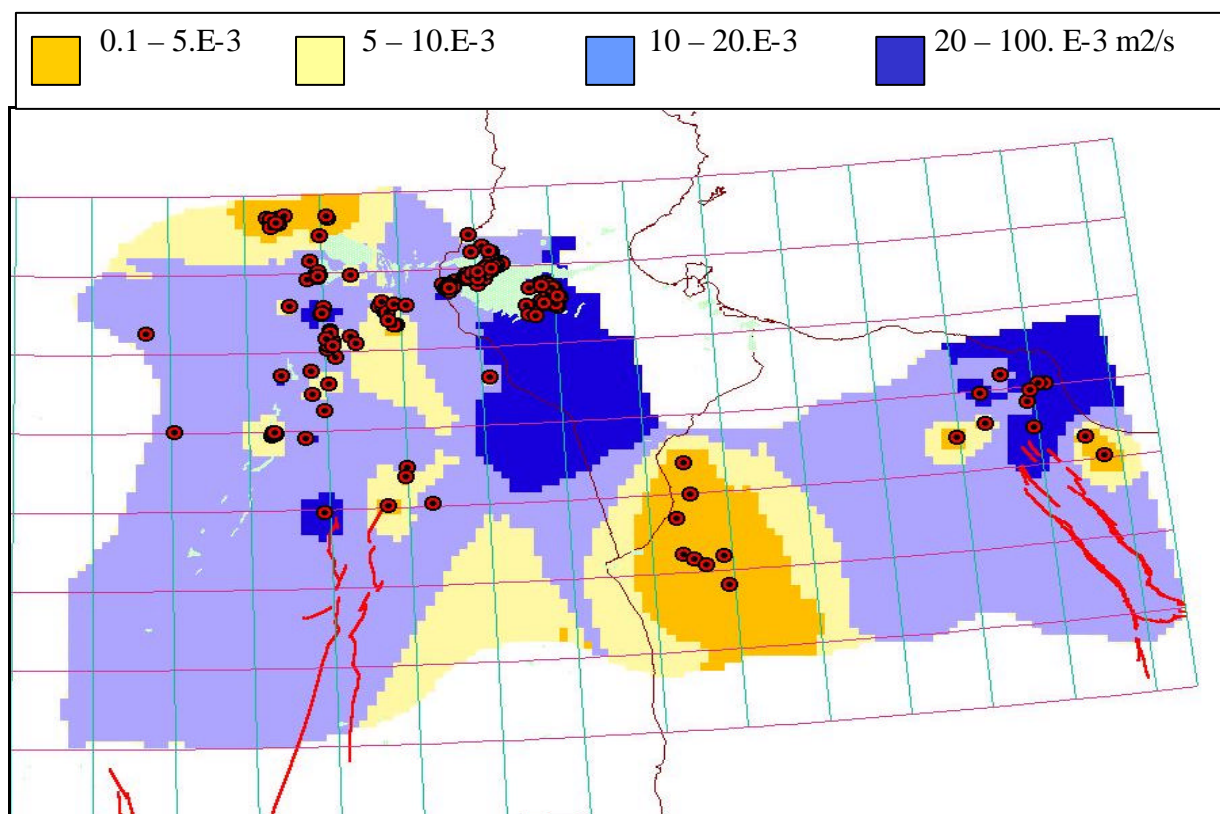
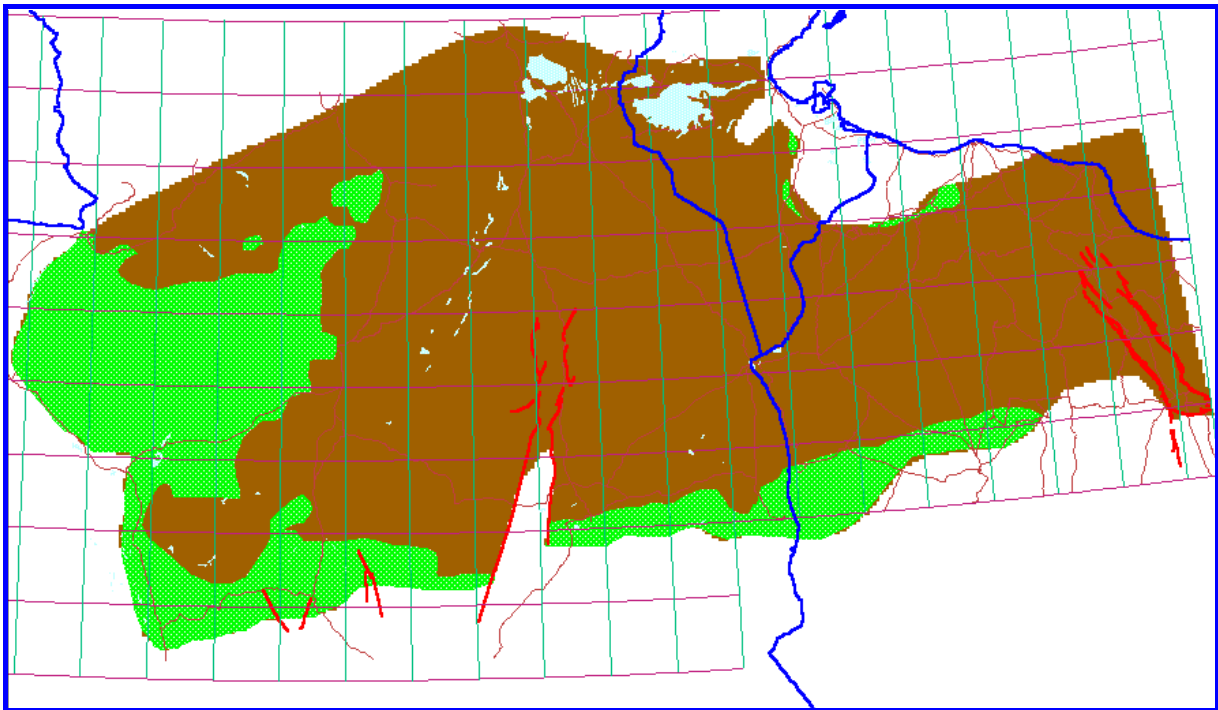


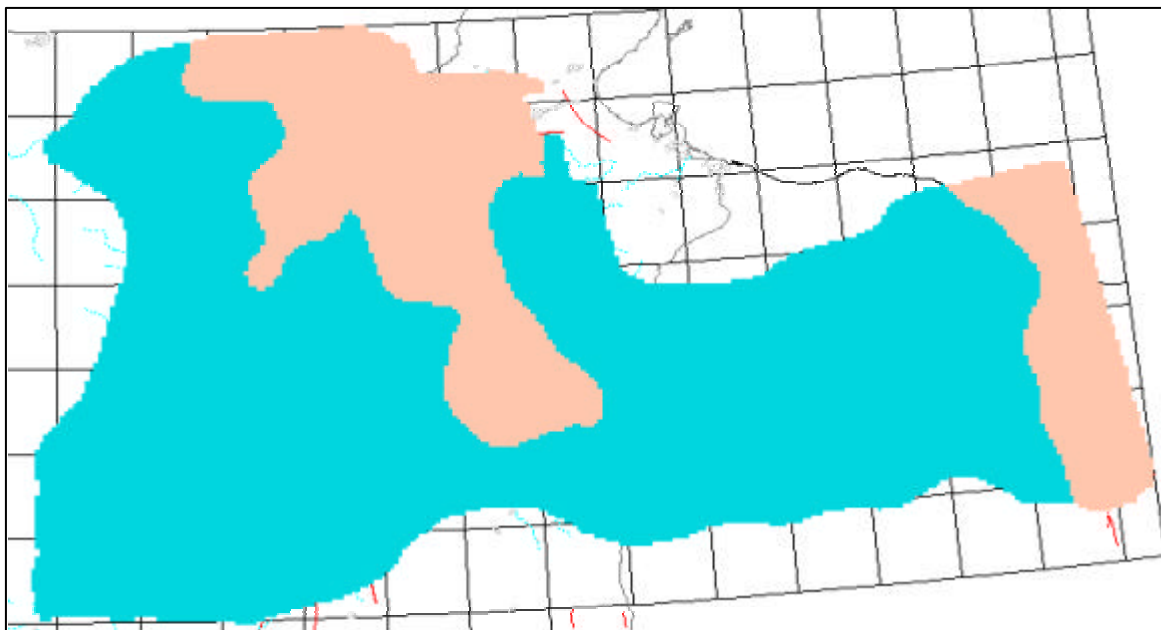
Fig. 42: Extension (en vert) de la Zone à surface libre du Continental Intercalaire



IV.5 - Les coefficients d'emmagasinement

L'ensemble des informations disponibles sur les coefficients d'emmagasinement du CI et du CT figure dans le volume 2 du rapport final SASS (Hydrogéologie). Il a été jugé utile, pour aider à la conception du Modèle, de construire la carte d'extension de la zone à surface libre, obtenue en tout point par différence entre la cote du toit de la formation et la cote du Niveau Piezometrique de référence (carte piezometrique « initiale »), respectivement pour le CI et le CT. Ces délimitations forment un premier indicateur pour l'affectation des coefficients d'emmagasinement de nappe libre lors du calage du modèle en régime transitoire.

Fig. 43 : Extension (en bleu) de la Zone à surface libre du Complexe Terminal

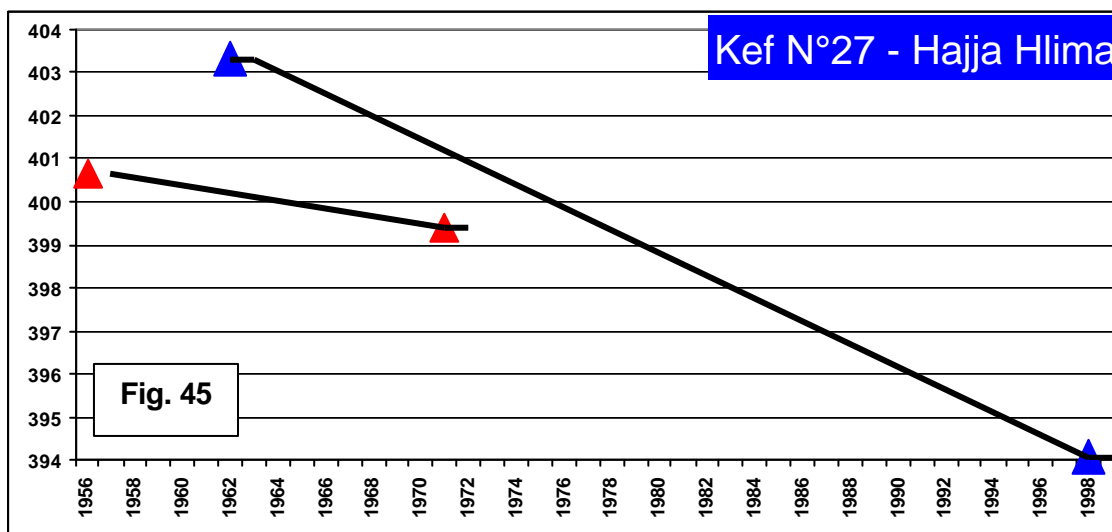
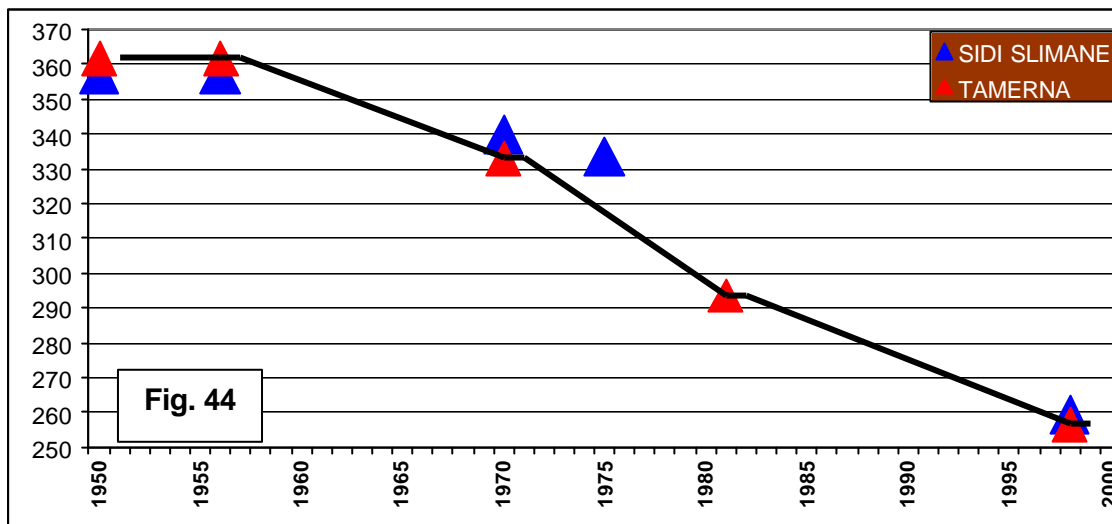


IV.6 - Historiques des niveaux piézométriques

IV.6.1 - le Continental Intercalaire

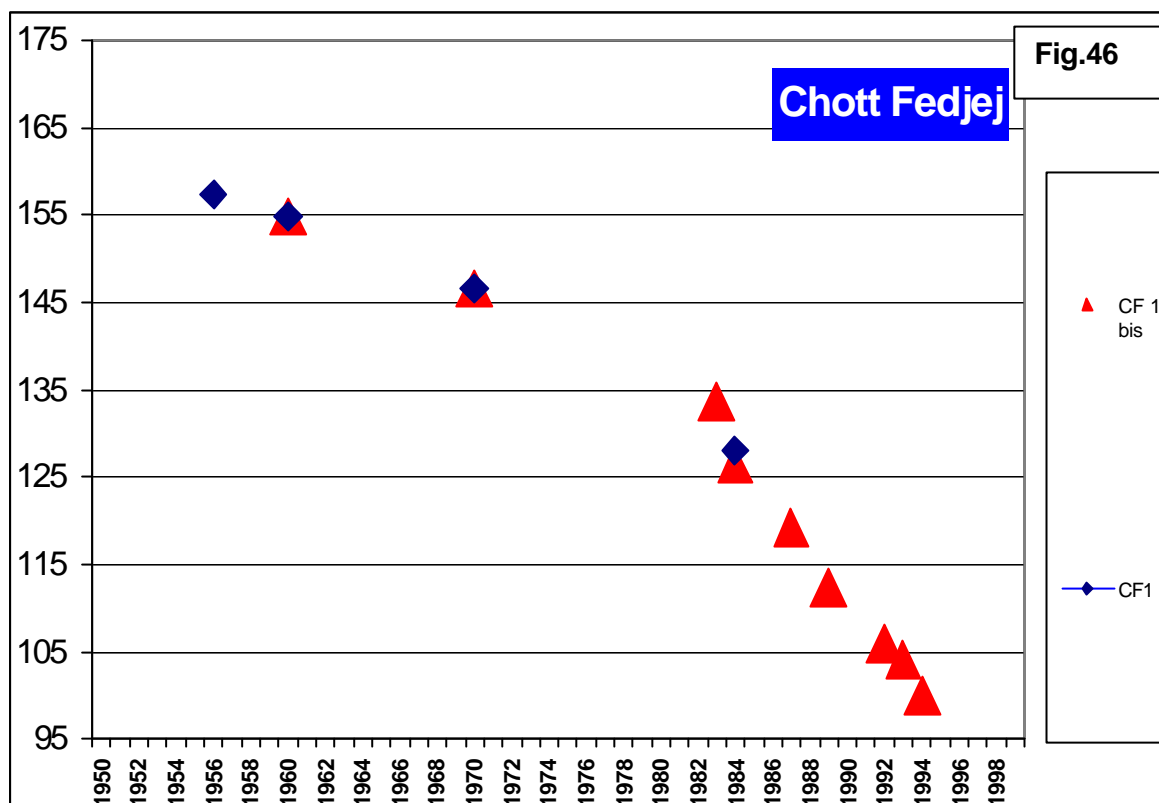
IV.6.1.1 Evolutions piézométriques du CI en Algérie

Les évolutions les plus significatives sont présentées ci-après, sur les fig 44 et 45, 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.

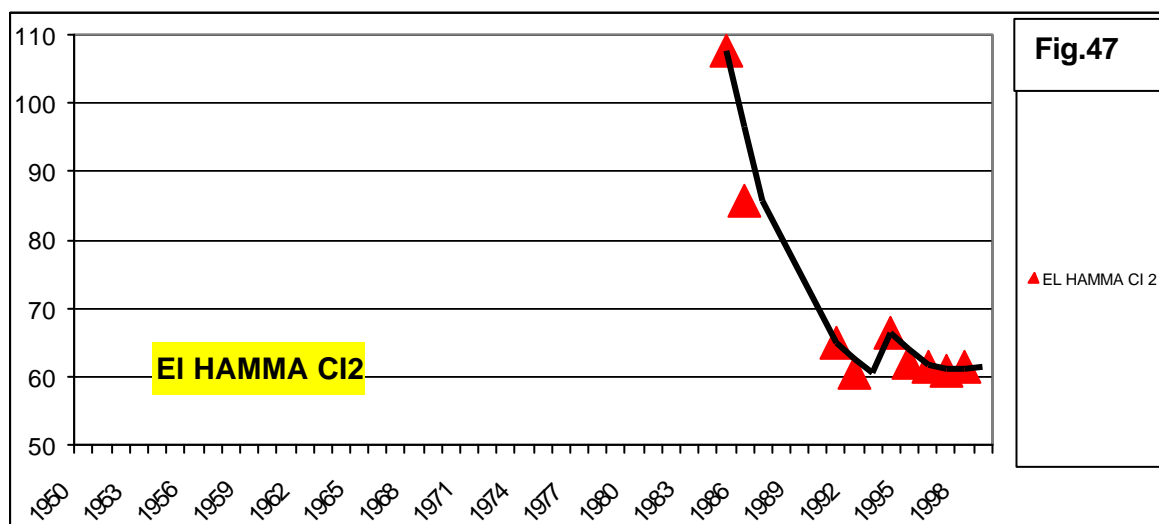


IV.6.1.2- Evolutions piézométriques du CI en Tunisie

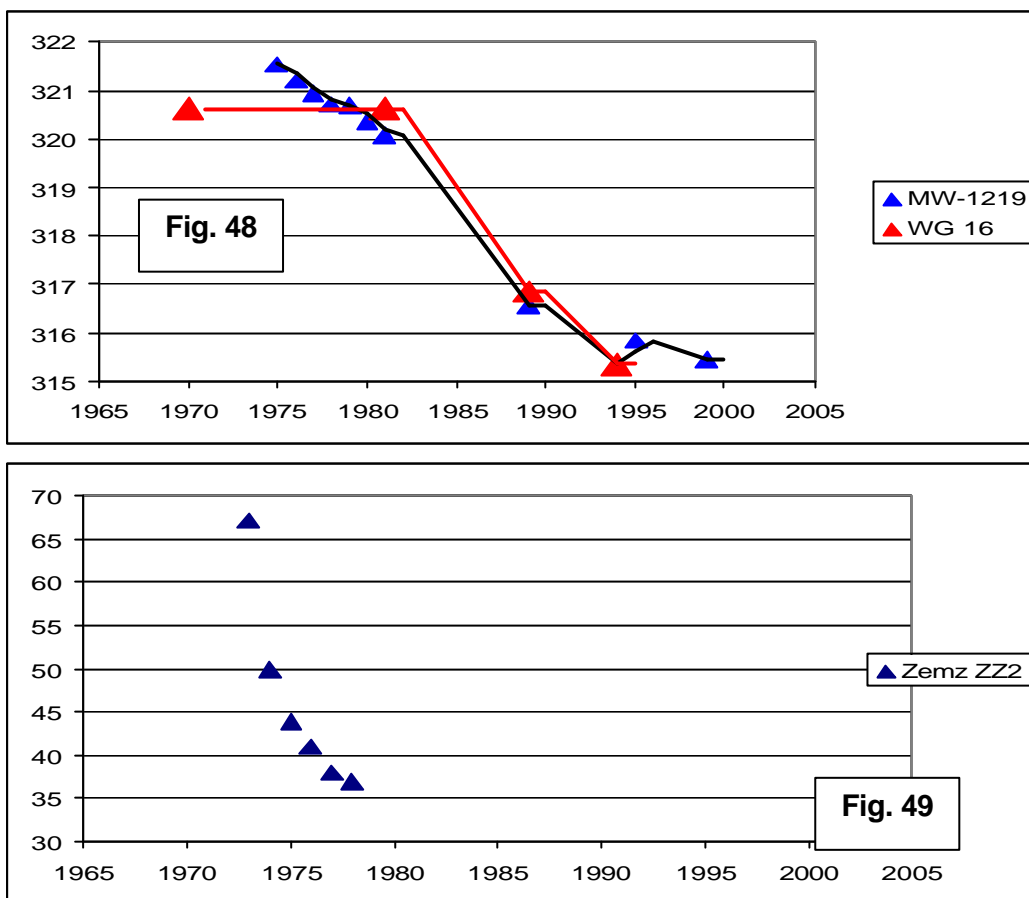
Le suivi piézométrique est ici généralement plus dense, de sorte que l'analyse des séries s'en trouve facilitée. Le premier degré d'analyse des séries consiste à tracer, comme en Algérie, les graphes $h(t)$ en les regroupant par secteurs géographiques homogènes. Cette construction est présentée, pour deux secteurs particuliers, le Fejej et le Djerid, sur les fig. 46 et 47.



Les graphes $h(t)$ en les regroupant par secteurs géographiques homogènes. Cette construction est présentée, pour deux secteurs particuliers, le Fejej et le Djerid, sur les fig. 46 et 47.



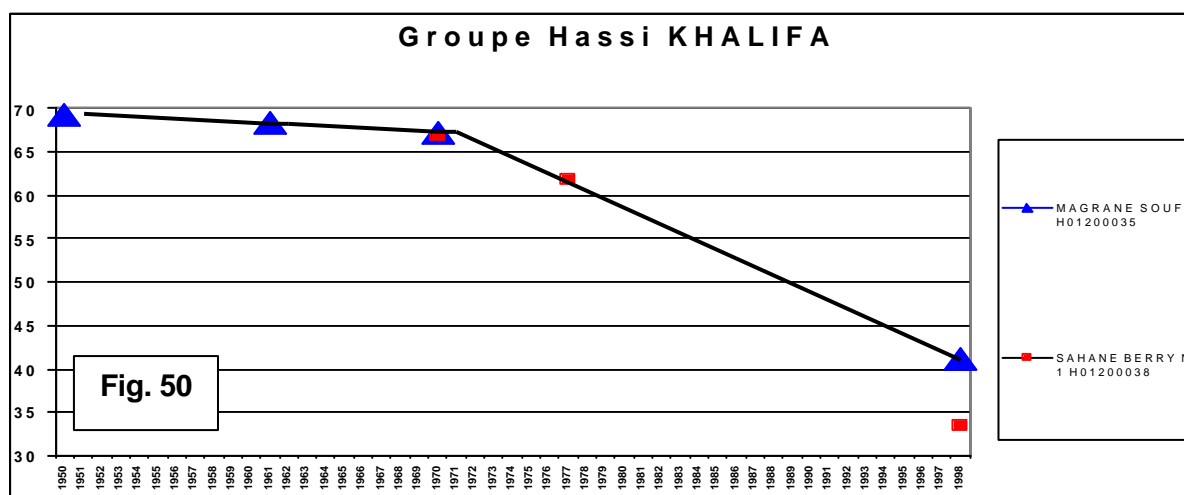
IV.6.1.3 - Evolutions piézométriques du CI en Libye

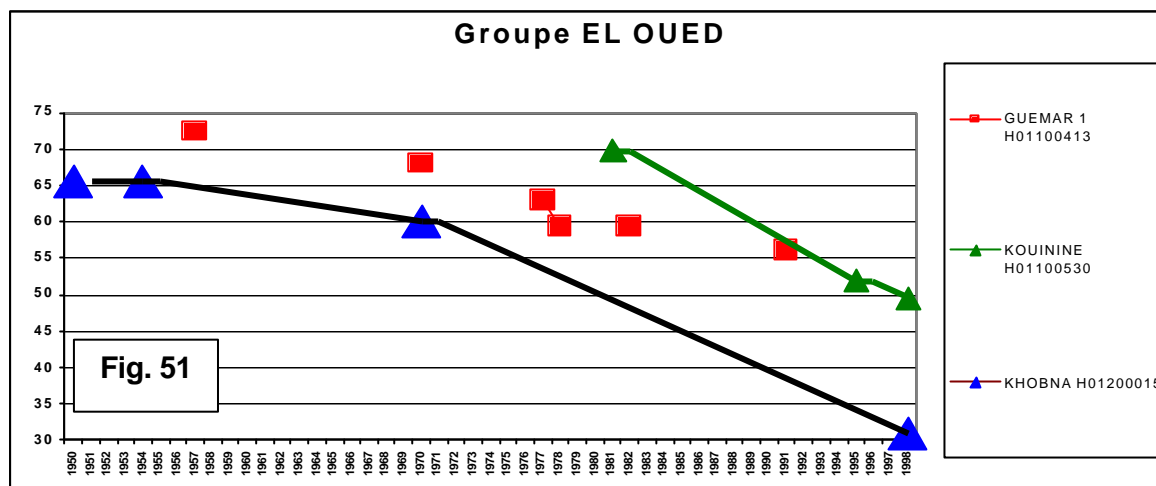


IV.6.2 - Le Complexe Terminal

De la même manière que pour le CI, Une première sélection permet de dresser la carte des historiques possibles (au moins deux mesures). L'élimination des points présentant des anomalies « impossibles à corriger » permet ensuite de retenir les forages « utiles », lesquels permettront de dresser les évolutions historiques représentées.

IV.6.2.1 - Evolutions Piézométriques du CT en Algérie



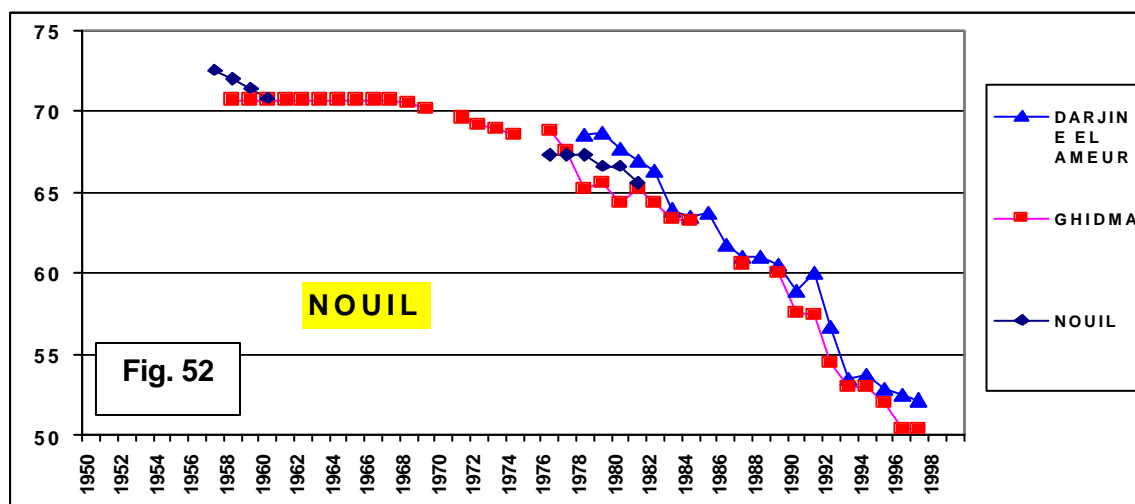


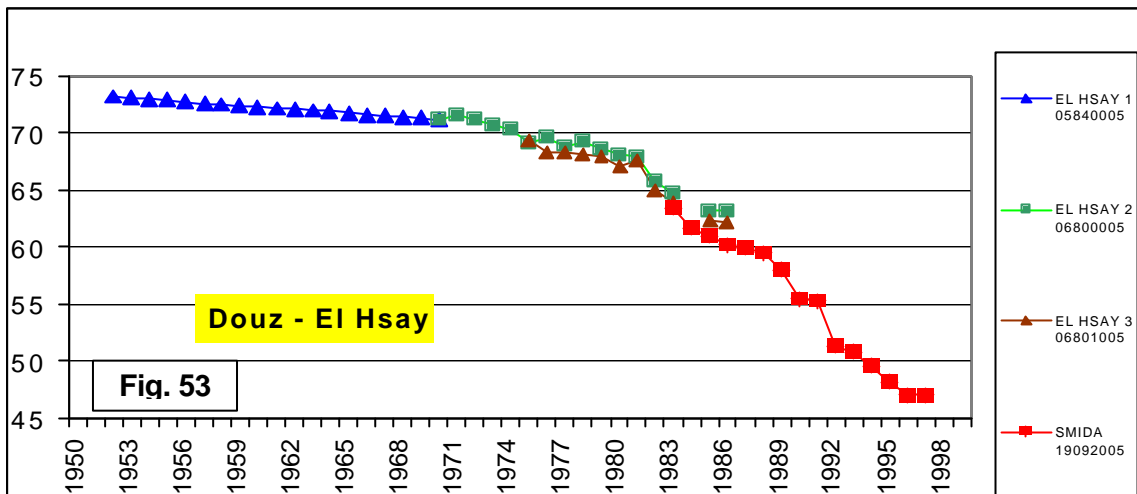
IV.6.2.2- Evolutions Piézométriques du CT en TUNISIE :

De la même manière que pour le CI Tunisie, la présentation des courbes d'évolution piézométriques se fait par regroupements géographiques homogènes.

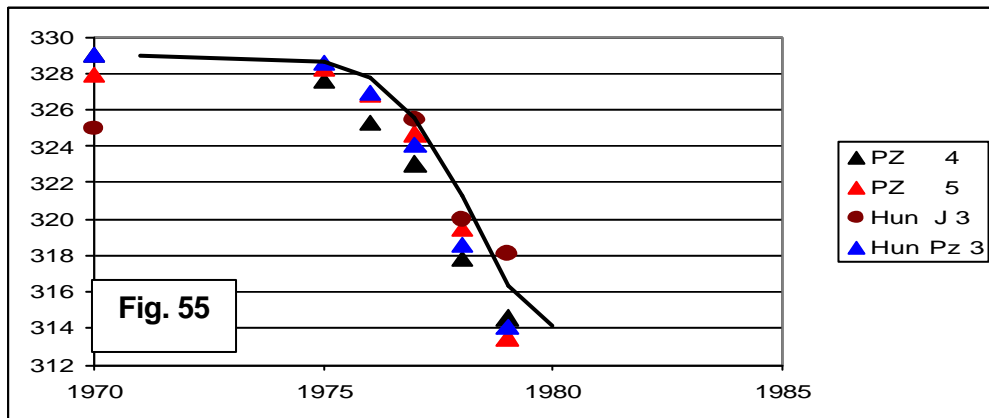
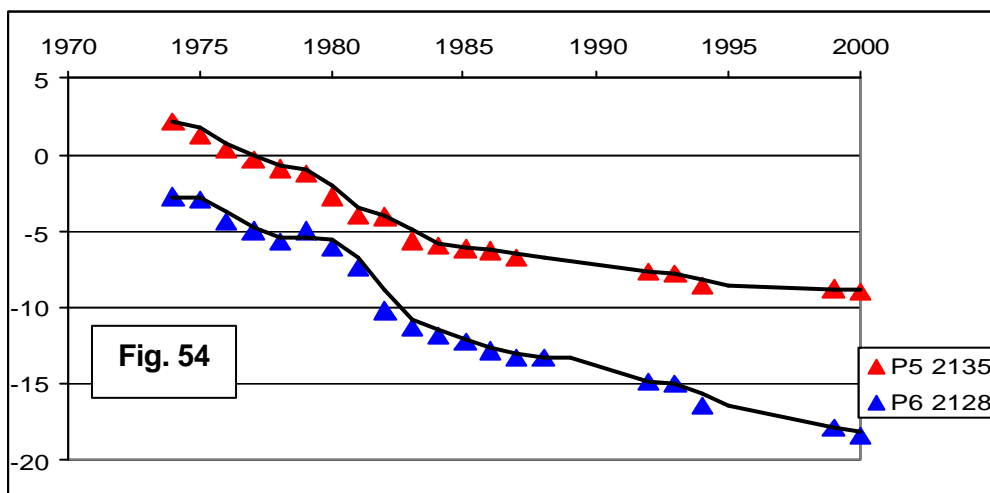
Mais une situation peu commune s'est présentée : une multitude de forages observés, un très grand nombre de mesures, mais peu de séries suffisamment longues pour autoriser une interprétation en connaissance de cause de l'évolution du système aquifère sur une période aussi longue que celle d'investiguer (50 ans) et ce pour une raison parfois très simple, qui est la durée de vie des forages.

Etant donnée la profusion des informations disponibles, il a été envisagé, 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 . Le procédé est présenté sur les fig.52 et 53.





IV.6.2.3 - Evolutions Piézométriques du CT en LIBYE



Les positions de l'ensemble des points de contrôle des niveaux piézométriques en régime transitoire utilisés sont reportées sur la fig.86 (deuxième partie), tant pour le CI que pour le CT.

IV.7 - Historiques des prélèvements

IV.7.1- Diversité des Méthodologie et Sources d'information

Dans la reconstitution de l'historique du SASS, trois périodes consécutives sont à distinguer, au cours de chacune desquelles les équipes ayant eu en charge l'acquisition et la mise en forme des données de prélèvements ont procédé d'une certaine méthode.

Ces périodes ou ces étapes sont les suivantes :

- la période du projet ERESS : **1950 - 1970**
- la période du projet RAB : **1971 - 1981**
- la période couvrant la Base de Données du projet SASS : **1982 - 2000**

Quelques ordres de grandeur permettront de mesurer l'ampleur de la tâche :

- Il a été estimé 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.

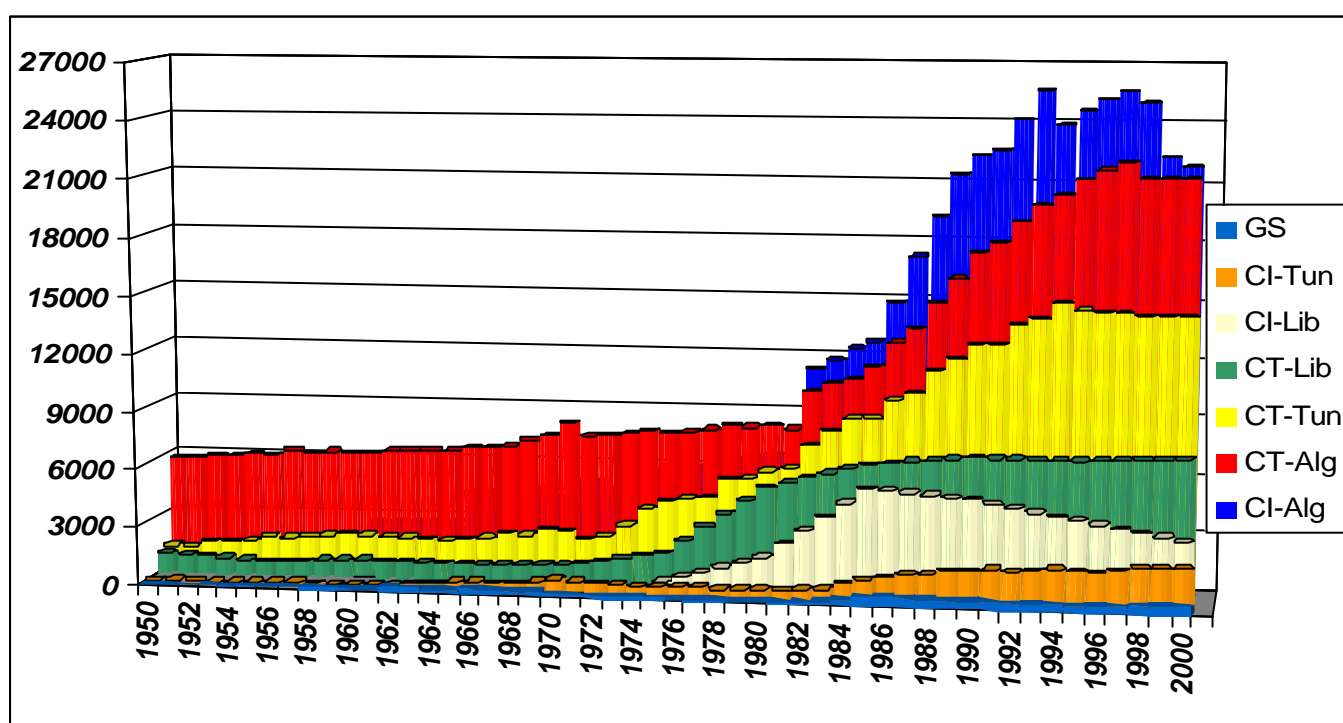
Lorsqu'on connaît la grande difficulté qu'il y a à évaluer avec précision les débits de prélèvements sur une nappe comportant plusieurs milliers de puits, et la démultiplication de ces difficultés lorsqu'il s'agit de **reconstituer** l'évolution de ces débits au cours du temps, on doit s'attendre à rencontrer un certain nombre de difficultés à raccorder entre elles ces trois périodes, y compris en Tunisie où, depuis trente ans, des traditions de publication d'Annuaire d'exploitation des nappes profondes sont pourtant fortement établies.

La plus grande des difficultés rencontrée concerne le mode de comptage et de contrôle des débits qui diffère d'une période à l'autre et parfois au cours d'une même période. En effet :

- Au cours du projet ERESS, les débits étaient comptés par palmeraies ou Groupes de forages. Par ailleurs, les Sources étaient assimilées à des pompes
- Au cours du projet RAB, les débits sont comptés par secteur géographique et par maille du modèle (15 km x15 Km au CT et 25 km x25 Km au CI) : le débit d'une maille pouvant inclure sans distinction aussi bien le débit des forages que celui des sources contenues dans la maille.
- Quant au projet SASS, il repose sur la mise au point d'une base de données, où chaque forage et chaque source sont individuellement identifiés, et doivent donc posséder une histoire particulière.
- Au cours du même projet SASS, les méthodes d'estimation varient d'un pays à l'autre :
 - **En Algérie**, on dispose des Inventaires réalisés par l'ANRH dans les années 90 pour chacune des wilayas concernées : EL Oued, Ouargla, Ghardaia, Adrar, Illizi, Biskra..., certaines ayant fait l'objet de deux inventaires (El Oued). Nous possédons alors une estimation ponctuelle dans le temps du débit d'exploitation, lorsque ce dernier a pu être mesuré ou évalué avec un minimum de rigueur. La difficulté consiste alors à reconstituer son évolution dans le temps.

- **En Tunisie**, la DGRE dispose des Annuaire d'exploitation, édités depuis 1973, ce qui a certainement facilité la reconstitution historique. La difficulté rencontrée ici concerne les puits forés, dénommés « sonde à main », sur lesquels les informations sont beaucoup moins précises et pour lesquels les prélèvements sont affectés non pas individuellement mais par Groupes de forages, notamment dans le CT à Kebili.
- **En Libye**, on ne dispose pas d'un historique individuel par puits : toute l'information concernant les prélèvements est rapportée à des groupes de pompages ; nous disposons d'une cinquantaine de Groupes pour l'ensemble de la Libye, ce qui est à priori très insuffisant et risque de provoquer une concentration artificielle des pompages, préjudiciable à la représentativité des modèles à construire.

Fig. 56 : Evolution des Prélèvements sur forages, par aquifère²⁶ et pays



IV.7.2 - Mise en forme des données et Résultats

Les Historiques de Prélèvements mis en forme, affectés individuellement à chacun des points d'eau exploités, sont consignés dans la BASE de DONNEES du SASS [table « points » et table « exploitation »].

²⁶ l'aquifère des Grès Supérieurs [GS sur la légende] est présenté plus loin, dans la partie « calage du modèle ».

L'évolution des prélèvements par forages, consignée par Aquifère et par pays dans le tableau 10 et sur la fig. 56, indique un peu partout dans le SASS 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, en Libye (où il n'y a pas eu d'estimation individuelle par forage) à l'attribution d'un poids trop important à la mise en service des adductions du GMRP. Toujours est-il que certaines anomalies flagrantes doivent être signalées, afin que les opérations de calage du modèle en transitoire puissent être pondérées en conséquence et notamment :

- au CI en Algérie : entre 1981 et 1982, le débit passe brutalement de 7m³/s à 11 m³/s. Tandis qu'à l'opposé, entre 1998 et 1999, on passe de 25 m³/s à 22 m³/s.
- au CT en Algérie : de 1950 à 1980, le débit total n'évolue que de 6 m³/s à 8 m³/s en l'espace de 30 ans. Et en l'espace d'une année de 81 à 82, on passe de 8 m³/s à 10 m³/s.
- au CI en Libye : le débit des forages passe de 5.6 m³/s à 3.3 m³/s entre 1985 et 2000.

Tableau 10 : Historique des prélèvements par forages de 1950 à 2000 (en l/s)

Historique des prélèvements 1950 - 2000 par Nappe et par Pays , en L/s																
Année	CI-Alg	CT-Alg	CI-Lib	CT-Lib	CI-Tun	CT-Tun	GS		Année	CI-Alg	CT-Alg	CI-Lib	CT-Lib	CI-Tun	CT-Tun	GS
1950	485	5770		1059	2	1281										
1951	487	5826		1005	42	1277			1976	5836	7862	802	2551	508	4556	104
1952	462	6000		950	42	1569			1977	5888	8011	1086	3268	525	4616	102
1953	524	5978		895	42	1584	38		1978	6301	8229	1370	3986	451	5567	91
1954	905	6158		841	42	1695	36		1979	6427	8190	1654	4704	490	5645	78
1955	899	6119		786	44	1924	52		1980	6597	8251	1938	5422	485	6055	68
1956	1017	6372		828	144	1841	36		1981	7038	8121	2678	5686	480	6247	70
1957	989	6257		869	144	1957	50		1982	11137	10100	3417	5950	547	7454	123
1958	300	6343		910	134	2035	95		1983	11608	10507	4157	6214	617	8269	206
1959	310	6305		951	114	2147	92		1984	12266	10791	4896	6478	955	8896	301
1960	2476	6334		993	118	2094	90		1985	12623	11510	5635	6742	1139	8946	460
1961	2481	6469		984	138	2055	86		1986	14691	12717	5553	6833	1273	9930	530
1962	2500	6525		975	153	2056	240		1987	17068	13474	5470	6925	1503	10252	479
1963	2524	6558		966	277	2033	224		1988	19171	14827	5387	7017	1498	11438	508
1964	2550	6556		957	307	1998	205		1989	21283	16051	5305	7109	1748	12079	447
1965	4143	6703		948	412	2112	190		1990	22238	17397	5222	7201	1794	12876	403
1966	4166	6718		965	437	2154	294		1991	22568	17921	5038	7195	1904	12896	408
1967	4215	6855		981	426	2434	254		1992	24086	18961	4853	7189	1825	13889	428
1968	4347	7211		998	446	2366	226		1993	25572	19871	4668	7182	1903	14176	401
1969	3997	7443		1014	507	2719	207		1994	23818	20397	4484	7176	2018	15037	387
1970	4811	8205	4	1031	670	2642	174		1995	24559	21105	4299	7170	1927	14679	356
1971	4835	7485	4	1185	587	2284	124		1996	25176	21667	4112	7210	1860	14652	383
1972	4549	7559	4	1339	562	2444	119		1997	25553	22103	3925	7251	2033	14563	369
1973	4406	7673	4	1493	541	3048	116		1998	24963	21212	3738	7292	2169	14415	476
1974	5525	7918	4	1647	467	3952	120		1999	22207	21212	3551	7332	2214	14432	477
1975	5998	7776	518	1833	450	4343	115		2000	21778	21212	3364	7373	2215	14432	477

2^E PARTIE

ELABORATION DU MODELE MATHEMATIQUE

CHAPITRE 1 - CONSTRUCTION DU MODELE

I - LE CADRE GENERAL DE LA CONSTRUCTION DU MODELE SASS

Dans le Sahara Algéro-Tunisien, les connaissances utilisées reposent encore essentiellement sur les résultats des trois contributions fondamentales que furent :

- La synthèse hydrogéologique publiée par A. CORNET : « **Introduction à l'hydrogéologie saharienne** »¹, qui a proposé une architecture encore actuelle des principaux niveaux aquifères et une description générale de leur fonctionnement hydrodynamique.
- L'étude de BEL et DEMARGNE², qui dresse une analyse minutieuse des différents niveaux respectivement aquifères et aquitards constituant l'ensemble de ce qui sera dénommé « **Complexe Terminal** » ; ou « **CT** ». Cette étude comporte également des cartes structurales et des coupes stratigraphiques à travers l'ensemble des forages, qui constituent une référence incontournable pour l'étude du CT.
- L'« **Etude du Continental Intercalaire Saharien** »³, ou « **CI** ». Cette étude a notamment permis :
 - grâce à l'analyse de l'ensemble des forages pétroliers, de proposer des cartes structurales des formations du CI utilisées encore de nos jours ;
 - d'élaborer un schéma d'écoulement de la nappe du CI qui soit rigoureusement cohérent sur le plan hydrodynamique, d'en délimiter les aires d'alimentation et d'en préciser les principaux exutoires. C'est notamment dans ce document que l'on retrouve la première référence à l'« Exutoire Tunisien » et la première estimation de son débit, évalué à 3,2m³/s ;
 - de valider toutes ces hypothèses et de proposer un premier bilan plausible du CI, encore valable, avec la construction, par Géopétrole⁴, du premier Modèle analogique du système CI.

Dans la partie libyenne du SASS, c'est une quinzaine d'années plus tard que paraîtront trois autres contributions fondamentales, qui fixeront un niveau de connaissances des systèmes hydrogéologiques toujours actuel . Il s'agit de :

- La synthèse publiée par P.PALLAS en 1980 : « **Water resources of the socialist people's arab Libyan republic** »⁵. Il s'agit de la première contribution à une compréhension cohérente du fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble des formations aquifères du SASS.

¹ Rev. de géogr. phys. et de géol. dyn. (2), vol. VI, fasc.1 ; 5-72, 1964.

² « Etude géologique du Continental Terminal », DEC, Alger, 1966

³ réalisée sous la direction de M.GOSSELIN par BURGEAP & la Direction des carburants (IFP) pour le compte de l'Organisme Technique de Mise en Valeur des Richesses du Sous-Sol Saharien, 1963

⁴ GEOPETROLE ; 1963 : Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien, pour l'org. mise en valeur sous-sol saharien.

⁵ in « the geology of Libya ; Ac.Press ; vol II ; Salem & Busrewille(ed) », 1980.

- Cette contribution sera **suivie par la construction, par IDROTECNECO, du premier modèle régional⁶** représentant, sur une grande partie de l'extension du SASS, l'ensemble des couches aquifères qui nous intéressent : la formation Kiklah, équivalent du CI, et la formation Upper Cretaceous, équivalent du CT et du Turonien. Ce modèle intègre les grès du Cambro Ordovicien qui formaient une cible privilégiée.
- **Le modèle Idrotecneco** ayant été limité à l'Est à la grande faille de Hun, il sera relayé (pour les besoins de notre présente étude) par l'étude GEFLI⁷ réalisée en 1978. Cette étude est très riche de corrélations géologiques profondes, qui permettent de délimiter la fermeture orientale du domaine du SASS non pas à la faille de Hun mais jusqu'au Golfe de Syrte, intégrant ainsi la source de Tawargha et la drainance en mer dans le système, ensemble que l'on peut désigner par « **l'Exutoire Libyen de la nappe du Continental Intercalaire** ». L'étude Gefli comporte par ailleurs une analyse très fine de l'hydrodynamique du système, et une première représentation sur modèle numérique des différents horizons aquifères étudiés.

Ces six contributions fondamentales ont par la suite été enrichies et complétées par d'importantes études et notamment les modèles de simulation dont les réalisations successives ont permis de fructifier progressivement les connaissances acquises au fur et à mesure de ces trente dernières années. Parmi ces contributions, celle du **Projet ERESS⁸ (1972)** demeure incontestablement parmi les plus essentielles et les plus actuelles par la disponibilité et la robustesse des outils de simulation proposés, la pédagogie et la clarté des documents produits.

Après l'ERESS, on peut noter, pour ce qui concerne la partie algéro-tunisienne des réservoirs, les importantes contributions du projet Rab80⁹, celles d'ARMINES¹⁰, d'ARMINES-ENIT¹¹ et de Brl-Ecole des Mines¹². Pour ce qui est de la partie libyenne du réservoir, on peut considérer que les points de vue « actualisés » concernant l'architecture des couches, l'hydrodynamique et le bilan en eau du système doivent être recherchés respectivement dans GEFLI (1978) pour la partie orientale et dans GEOMATH¹³ et BRL¹⁴ pour la partie centrale et la Hamada El Hamra proprement dite, ainsi bien entendu que dans l'article de Pizzi et Sartori¹⁵.

On doit enfin noter qu'une première modélisation intégrale du Continental Intercalaire Saharien, à l'échelle Algéro-Tuniso-Libyenne, a été présentée par Besbes et Zammouri¹⁶ (1988) et Zammouri (1990)¹⁷.

A la lumière de ce qui précède, et 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 à construire doit répondre à deux préoccupations majeures, en apparence contradictoires mais en réalité complémentaires :

⁶ « Hydrgeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. Annex 3 : Construction of the Model, Final Report », 1982.

⁷ Survey for the development of Central Wadi Zone & Gulf of Sirte ; Groundwater resources, 1978.

⁸ Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, UNESCO, 1972.

⁹ Actualisation des Modèles ERESS, PNUD, 1987.

¹⁰ Modélisation multicouche de l'Oued Rhir, 1975.

¹¹ Sous Modèle Nefzaoua-Djerid, 1984.

¹² Modèles du CT et du CI, CDARS, 1998.

¹³ Western Jamahiriya system hydrogeological modelling of aquifers and well fields; final report.

¹⁴ Ghadames Project water resources ; Mathematical Model, 1997.

¹⁵ Journal of Hydrology, 75 ; 1984.

¹⁶ M. BESBES, M. ZAMMOURI; 1988 : Extension en Libye du modèle du CI algéro-tunisien ; int. Conf. Comput. methods and water resources, Rabat

¹⁷ M.Zammouri : Thèse de Doctorat, Fac.Sc.Tunis, 1990.

1- **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 sur ce Système. Cette filiation implique l'adoption, 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.

2 - **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. **Une telle représentation**, qui ne manquera pas d'«alourdir» un peu le modèle sur un plan numérique, **permettra de préserver les meilleures conditions de simulation intégrant le Turonien et prenant en compte les écoulements de drainance entre CI et CT sur le long terme.**

II - STRUCTURE GENERALE DU MODELE

La structure initiale, adoptée au terme de l'élaboration du Modèle Conceptuel, comprend quatre couches aquifères séparées par trois aquitards (fig. 57):

Fig. 57 : structure initiale du modèle

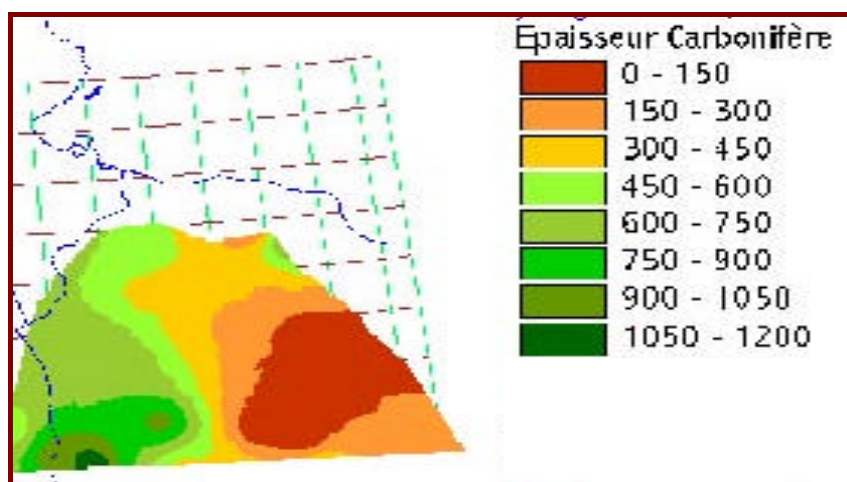
COMPLEXE TERMINAL
SENONIEN LAGUNAIRE
DOLOMIE du TURONIEN
CENOMANIEN
CONTINENTAL INTERCALAIRE
CARBONIFERE
CAMBRO - ORDOVICIEN

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 plus tard après la mise en exploitation des champs captants du Dj Hassaouna, ainsi que le laisse présupposer la faible épaisseur de la couche semi-perméable de séparation (le Carbonifère, cf. fig. 58) et le contact direct très développé entre les deux aquifères (CI & COD) dans le secteur Sud du bassin. (cf. coupe fig. 10)

Fig. 58 : Epaisseur du carbonifère (en m) sur la limite d'extension du Cambro-Ordovicien



II.1 - Schématisation particulière du CT AU Nord des Chotts

En réalité, la nappe du Complexe Terminal occupe plusieurs niveaux aquifères dans le Miopliocène et dans le Sénonien carbonaté. Cette série, qui peut dépasser 1000m d'épaisseur, ne peut constituer un réservoir homogène ; cependant, à l'échelle du Sahara, il est raisonnable de schématiser cet ensemble aquifère par un système hydraulique monocouche même si cette schématisation perd toute réalité à une échelle locale.

Toutefois, il existe des zones où les intercalations imperméables prennent suffisamment d'importance pour mettre un tel schéma en défaut. C'est notamment le cas pour la région Nord des Chotts où «les graviers du Miopliocène reposent sur les marnes gypsifères de l'Eocène moyen et les calcaires de l'Eocène inférieur ne sont plus exploités : ils plongent rapidement vers le Nord sous le fossé MioPliocène qui, orienté W-E, marque une zone de subsidence maximum en avant de l'accident sud-atlasique, à moins qu'ils disparaissent par changement de faciès (F.Bel et D. Cuhe, 1969¹⁸) ».

« Dans la région nord des chotts...étant donné le peu d'importance pratique des calcaires éocènes à faible transmissivité, il n'a été tenu compte de cette nappe que comme une source d'alimentation des formations sus jacentes....sous forme d'un débit d'injection de 200 l/s fixé au Nord de Djemaa (UNESCO, 1972¹⁹) ».

¹⁸ F.Bel et D.Cuhe : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal; Rap.int. SES/ERESS, 1969

¹⁹ ERESS, Plaquette 3 : la Nappe du Complexe Terminal, Modèle Mathématique

II.3 - Structure particulière au continental intercalaire en Tunisie

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. Il a donc été décidé, avec la participation des hydrogéologues du Sud tunisien²⁰, de reprendre l'ensemble des coupes de forages existantes et de procéder à une nouvelle analyse des données hydrogéologiques de manière à pouvoir élaborer une nouvelle vision structurale des principales formations du CI, qui soit la plus fidèle à l'état actuel des connaissances.

II.4 - Modèle conceptuel du CI 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 cent cinquante forages. Ces forages se répartissent sur les cinq provinces géologiques classiquement identifiées dans la région :

- le Djérid
- le Sillon des Chotts
- le Mole du Melaab
- la Plateforme Saharienne
- l'Extrême Sud

Les corrélations interprovinces établies au terme de l'étude comparative des faciès sont fondées sur les éléments suivants :

- le rattachement à l'échelle stratigraphique universelle
- la description des formations lithostratigraphiques locales et leurs équivalences
- leur traduction en termes hydrauliques sous forme d'Aquifères et Aquitards

De ces corrélations résulte une échelle « Hydro-Stratigraphique » comportant, du haut vers le bas, six entités aquifères séparées par des couches semi-perméables. Ces six entités, présentes sur tout ou partie de la région, sont :

- l'ALBIEN – AIN GUETTAR, reconnu uniquement dans l'extrême-sud
- Les GRES SUPERIEURS et leur équivalent à l'Ouest : les Sables de SIDI AICH
- Les GRES à BOIS
- Les GRES du CHOTT
- Le PURBECKO-WEALDIEN et son équivalent au Nord : la formation KBAR el HAJ
- Le JURASSIQUE dolomitique renfermant de l'eau salée

Les coupes géologiques élaborées (cf.fig.61), permettent de réaliser la continuité de chacun des aquifères identifiés. Il n'était évidemment pas question, en raison de l'extension fort réduite des Grès du Chott par exemple, ou du très faible nombre de forages captant les Grès à Bois, de représenter toutes ces formations en tant que couches aquifères à part entière sur le modèle. Par ailleurs, l'Albien, en raison de sa disparition en dehors de l'extrême sud,

²⁰ B. Abidi : La nappe du Continental Intercalaire du Sud-Est tunisien ; Rapp.int. DGRE/OSS ; Déc. 2001

B. Ben Baccar : La nappe du Continental Intercalaire au niveau du Sillon des chotts-Nefzaoua, caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et relations avec la plateforme saharienne ; rapp.int.DGRE/OSS ; Mai 2002

L. Moumni: La nappe des grès de Sidi Aich ou Continental Intercalaire du Djerid;Rapp.int.DGRE/OSS;Nov.2001

pouvait être intégré au Purbecko-Wealdien, de sorte également que le passage à l'Algérie et à la Libye puisse s'opérer sans disharmonie.

Il a donc été décidé de limiter la représentation du CI en Tunisie 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 Grès du Chott et les Grès à Bois.
- les GRES SUPERIEURS dont la singularité se justifie par un comportement piezométrique atypique dans l'espace et dans le temps en apparence sans relation avec le Continental Intercalaire.

fig. 61 : Coupe géologique recoupant toutes les formations identifiées dans le CI du sud tunisien et sa schématisation bicouche

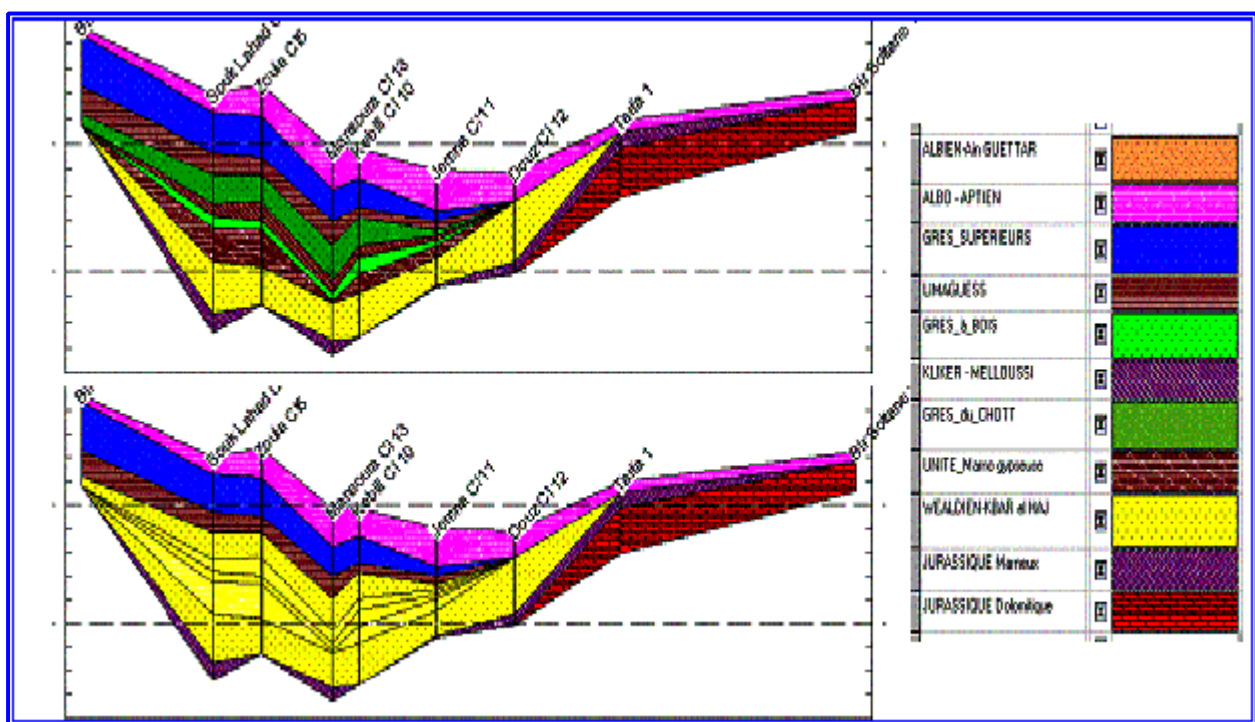
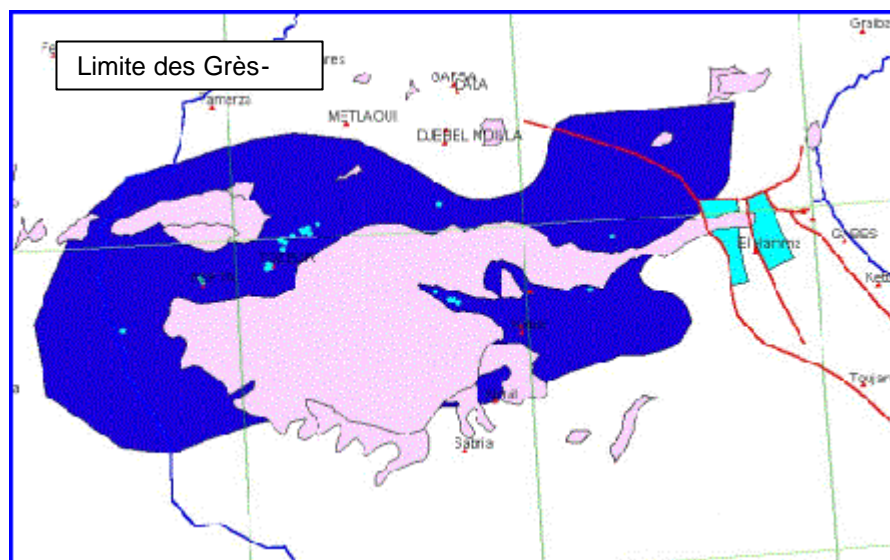


Fig. 62 : Extension de la couche des GRES SUPERIEURS



Le nouveau schéma structural du Modèle du SASS (fig. 63) va donc comprendre une couche aquifère supplémentaire : l'aquifère des Grès Supérieurs (extension fig. 62-a). Par ailleurs, la nouvelle délimitation du CI dans la région de Gabès comprend une importante lacune correspondant au Mole du Melaab, d'où l'aquifère est considéré définitivement²¹ absent (cf.fig.62-b).

Fig. 63 : Nouveau schéma structural du Modèle du SASS

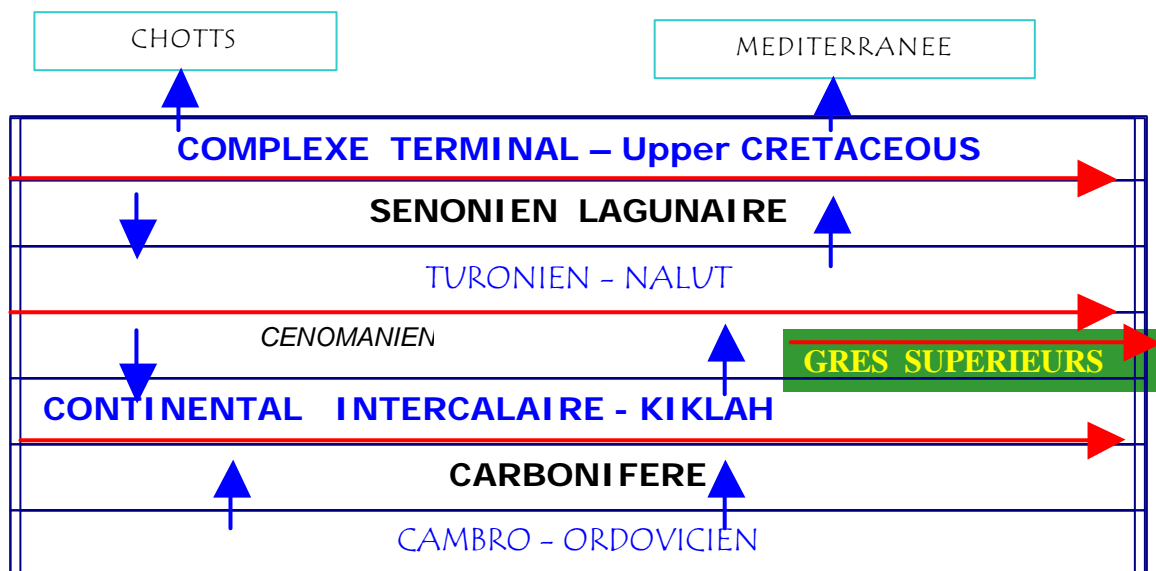
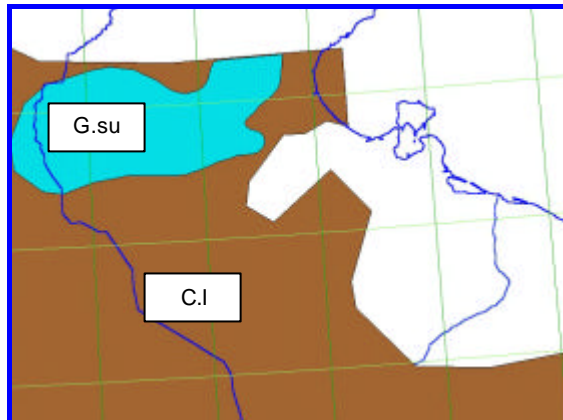


Fig. 62-b : Limites respectives du CI et des Grès Supérieurs



²¹ l'absence d'aquifère sur le mole du Dj. Melaab a été reconnue dès la construction du premier modèle du CI par GEOPETROLE (1963). Le premier modèle ERESS a conservé cette lacune dans une première étape de calage, puis a opté pour « la mise en eau » du mole afin d'élargir l'exutoire tunisien et pouvoir y faire transiter un débit plus important. C'est ce dernier schéma qui a été adopté au cours des premières phases d'ajustement du modèle SASS [cf. M.BESBES et M.ZAMMOURI : « Construction et ajustement du modèle de simulation, Rapport de phase ; SASS-OSS, Mai 2001 »], schéma auquel il a été renoncé au terme de l'analyse structurale fine du CI élaborée dans le sud tunisien.

III - EXTENSION ET DELIMITATION DES COUCHES

L'extension des deux principales couches du modèle est présentée fig.65 et fig.66.

III.1- Pour ce qui concerne le Continental Intercalaire

L'extension minimale adoptée forme l'union des modèles respectifs :

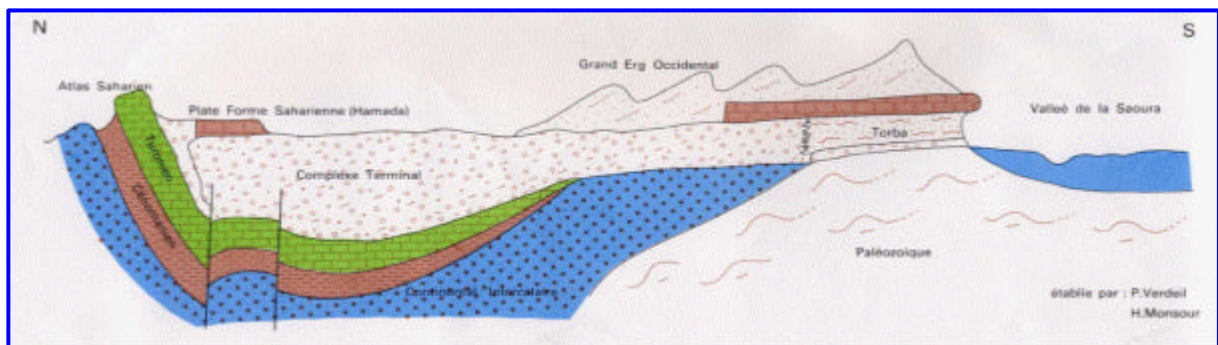
- du CI de l'ERESS ;
- du TRJLC (Trias-Jurassic-Lower Cretaceous) de GEOMATH ;
- de la formation KIKLAH telle que représentée par GEFLI.

Les limites du Continental intercalaire en Algérie et en Tunisie sont à peu près les mêmes que celles adoptées par l'ERESS.

En Algérie cependant, le modèle est étendu vers l'ouest et le nord-ouest pour inclure les aires de recharge du CI de l'Atlas Saharien et le Grand Erg occidental jusqu'à la Saoura. Cette modification est justifiée par le fait que le Continental Intercalaire est relayé par les formations sableuses du Mio-Pliocène (Bassin Occidental du Continental Terminal) occupant les piedmonts de l'Atlas, puis plus au Sud par les dunes du Grand Erg Occidental. Toutes ces formations forment entre elles des relais hydrauliques (voir fig.64); elles sont assimilées au CI.

L'intégration de ce volume additionnel d'aquifère permet de tenir compte des très importantes réserves d'eau qui y sont contenues : en raison de la concentration des zones à surface libre dans cette région, cette dernière constitue le véritable «château d'eau du Continental Intercalaire ». Cette nouvelle extension permet de réserver la possibilité de simuler l'exploitation de ces réserves, même si, en raison des difficultés d'accès, ces régions sont encore peu reconnues.

Fig. 64 : coupe schématique de l'Atlas à Beni Abbès



Pour ce qui concerne les limites orientales en Libye adoptées dans le modèle, on peut noter en particulier que :

- La limite Sud-Est est une limite naturelle d'extension des formations du Crétacé inférieur, mais elles sont ici en continuité avec l'aquifère cambro-ordovicien;
- Au Nord-Est les formations gréseuses du Continental intercalaire passent à des carbonates dolomitiques et ce changement de faciès se traduit par une importante réduction des transmissivités le long de la côte, mais l'aquifère se poursuit en mer ;
- A l'Est, les formations aquifères du Crétacé inférieur se poursuivent bien au delà du graben. A l'Est du méridien 16°E, l'aquifère du CI présente de faibles transmissivités et

une forte salinité. De ce fait il perd de son intérêt, mais en raison de la présence d'importantes exploitations (Wadi Washkah, Wadi Zamzam, Wadi Bayy al Kabir) situées à proximité, la limite adoptée du CI utile est positionnée le long du méridien 16°30' pour que le modèle puisse éventuellement estimer les effets d'un accroissement de prélèvement dans cette zone limitrophe.

III.2 - Pour ce qui concerne le Complexe Terminal

Le modèle du SASS forme l'union du CT de l'ERESS, de la formation « Upper Cretaceous » de GEOMATH, et des formations Mizda et Nalut représentées par GEFLI.

Les limites occidentales et septentrionales du CT sont les mêmes que celles adoptées par l'ERESS et sont des limites naturelles.

Au Nord, la limite suit le tracé de la flexure atlasique et correspond à la limite d'extension du Miopliocène

Dans le Sud du Sahara Algérien, où l'ERESS s'était arrêté arbitrairement au parallèle 30°, les limites du modèle ont été repoussées vers le Sud jusqu'aux limites naturelles d'affleurements du Sénonien Carbonaté telles qu'elles ont été décrites par Bel et Demargne (1966) ; ceci permet ainsi de mieux tenir compte des réserves à surface libre représentées par les volumes importants d'aquifères qui n'avaient pas été pris en compte.

La partie orientale du bassin passe, à la faveur du graben de Hun, au bassin de Syrte où la sédimentation tertiaire fortement développée prend la place du Crétacé supérieur qui s'enfonce profondément et devient très peu transmissif et salé. Les limites du Modèle adoptées pour la couche du CT correspondent aux limites naturelles des deux aquifères du Cénomano- Turonien (Nalut) et du Sénonien (Mizdah), correspondant au nord et au sud, à la limite d'extension de ces formations. A l'Est, les formations existent encore sous la couverture tertiaire mais au delà du méridien 16°30, les deux aquifères deviennent très peu transmissifs et salés . C'est cette limite qui a été fixée à l'Est du CT.

III.3 - Pour ce qui concerne le Turonien

Cette couche possède les mêmes limites que le CT, sauf sur le Dahar et le Djebel Neffussa où les aires d'affleurements diffèrent très légèrement.

III.4 - Pour ce qui concerne les Grès Supérieurs

Les limites du modèle sont conformes aux limites géologiques de la couche.

III.5 - Pour ce qui concerne le Cambro Ordovicien

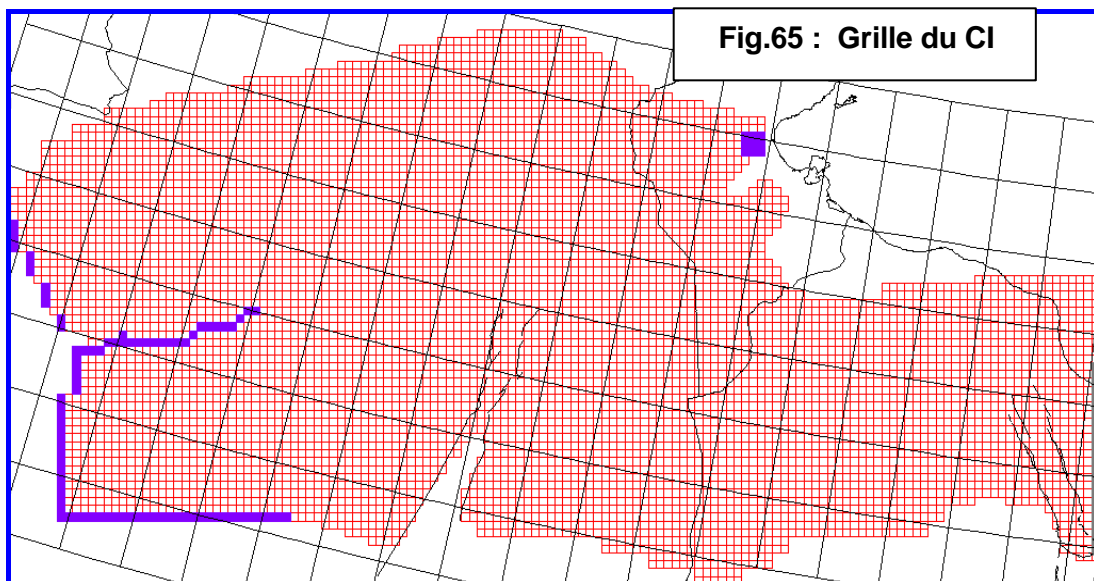
Le limite de cette couche (cf. fig.58) est celle adoptée par GEOMATH, limitée vers le Sud où elle est arbitrairement tronquée au niveau de la plus méridionale des limites du Continental Intercalaire, parallèlement à la grille du modèle.

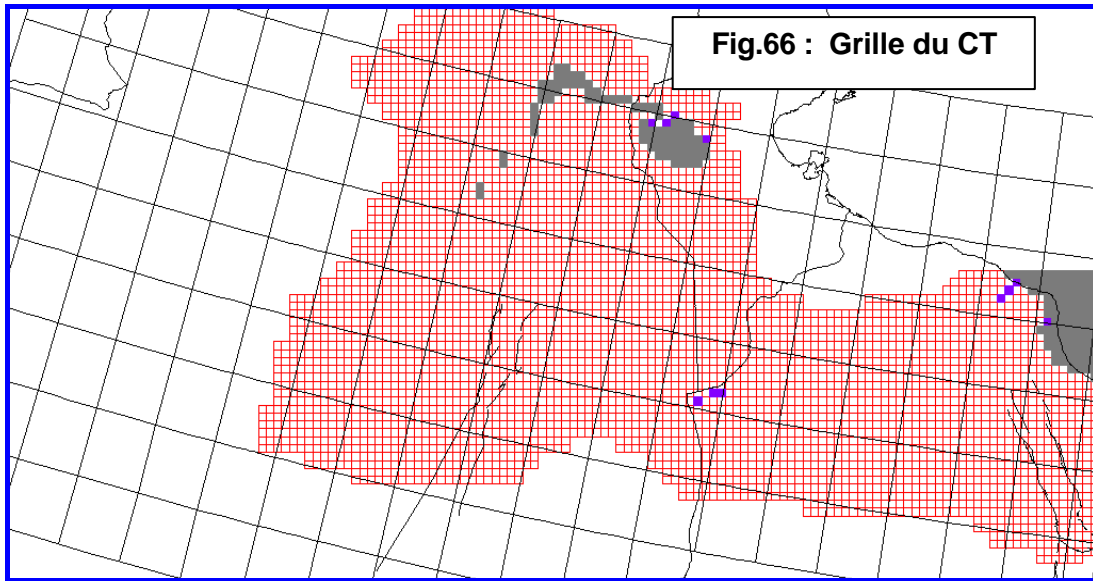
IV – DISCRETISATION DE L'ESPACE ET MODELE MATHEMATIQUE

Pour faciliter le transfert des données des anciens modèles (essentiellement de l'ERESS dont le projet disposait effectivement des données numériques) vers celui à réaliser, une grille de discrétisation identique à celle du Continental Intercalaire (ERESS, 1972) a été préalablement choisi, qui se trouve être le Modèle le plus étendu dans l'espace du SASS. Cette grille représente un maillage carré régulier de 25km x 25Km. Cette première représentation a permis de tester et valider la faisabilité d'une modélisation multicouche du SASS. Par la suite, et avec l'avancement du calage, il a été décidé de découper en quatre chacune des mailles précédentes pour une représentation plus fine du système. Soit un maillage final de **12,5 km x 12,5 Km**, représentant pour chacune des couches :

- Complexe Terminal 4295 mailles
- Turonien 4295 mailles
- Grès Supérieurs 109 mailles
- Continental Intercalaire 6639 mailles
- Cambro-Ordovicien 1185 mailles

Soit un total de **16523 Mailles** représentant une superficie développée de près de 2580000 Km². Les fig. 65 et 66 représentent le découpage en mailles des deux principales couches aquifères « actives » du Modèle : le CI et le CT.





Quant aux couches semi perméables, elles sont représentées par les flux verticaux qui les traversent sous l'effet des différences de charges entre couches aquifères superposées : ce sont les flux de Drainance. Nous utilisons en effet un Modèle quasi-tridimensionnel fondé sur « l'hypothèse du Multicouche », hypothèse selon laquelle les écoulements dans les couches semiperméables (aquitards) sont strictement verticaux lorsque l'on considère que les écoulements dans les aquifères principaux sont horizontaux. On démontre que cette hypothèse se trouve amplement vérifiée lorsque le contraste des perméabilités entre formations adjacentes (aquifère/aquitard) est important : un rapport de 10^4 est suffisant. Cela est bien le cas dans le Sahara où les études réalisées (que ce soit en Algérie et Tunisie ou en Libye) situent les perméabilités verticales du Cénomanién et du Sénonien lagunaire plutôt vers les 10^{-10} à 10^{-13} m/s [voir plus loin : perméabilités verticales des aquitards]. Dans ces conditions, l'équation générale de l'écoulement dans le multicouche, qui constitue le Modèle Mathématique du SASS, est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_H + q_B = S \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

$$q_H = K_v \frac{H_H - H_C}{e_H}$$

$$q_B = K_v \frac{H_B - H_C}{e_B}$$

où :

T_x est la Transmissivité de l'aquifère selon Ox

T_y est la Transmissivité de l'aquifère selon Oy

Ox et Oy sont les axes principaux d'anisotropie

q_H est le Flux spécifique de Drainance vers le Haut

q_B est le Flux spécifique de Drainance vers le Bas

h est la Charge hydraulique dans l'aquifère

H_C est la charge hydraulique moyenne dans la maille courante

H_H est la charge hydraulique moyenne dans la maille supérieure

H_B est la charge hydraulique moyenne dans la maille inférieure

K_v est la perméabilité verticale de la couche semi-perméable

e_H est l'épaisseur de la couche semiperméable supérieure

e_B est l'épaisseur de la couche semiperméable inférieure

V - LE LOGICIEL DE SIMULATION

Etant donnée la complexité structurale du SASS, il était impératif que la conduite des étapes de construction du modèle [passage du modèle conceptuel au modèle numérique] et de calage en régime permanent et transitoire puissent être conduites avec un logiciel « transparent » sur le plan hydrogéologique. L'outil retenu devait par ailleurs garantir que le modèle du SASS pût être facilement transportable entre les trois pays, ce qui impliquait impérativement une implantation sur PC et sur un système d'exploitation Windows. Le meilleur outil aujourd'hui disponible et remplissant ces conditions est le logiciel **PMWIN** et notamment sa version PM5.

La version 5 du logiciel Processing Modflow (PM5), élaborée par W. H. Chiang et W. Kinzelbach²², utilise le code Modflow mis au point par l'U.S. Geological Survey et permet la modélisation des transferts d'eau dans un système aquifère multicouche par la méthode des différences finies.

Le modèle mathématique du module d'écoulements est celui présenté dans l'encadré précédent.

D'autres codes utilitaires sont incorporés dans PM5. Il s'agit de PMPATH (tracé des lignes de courant et des vitesses d'écoulement), du code PEST qui est un programme d'optimisation et de calage automatique, et du module de transport MT3D.

PM5 comporte également un module de modélisation stochastique et un interpolateur intégrant les méthodes de Shepard (inverse de la distance), de triangulation d'Akima et de Renka, et le procédé de krigeage.

En plus des conditions aux limites usuelles (potentiel imposé, flux imposé et condition mixte de Cauchy), des conditions particulières peuvent être schématisées : faille, évapotranspiration et échange nappe souterraine - écoulement superficiel dans un réseau de drainage ou dans un canal.

D'autres aspects de la modélisation peuvent être traités comme le dénoyage, le déplacement de la limite nappe libre-captive, la subsidence et les écoulements densitaires dus à la salinité ou à la température.

L'introduction des données s'effectue maille par maille, ce qui entraîne 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. Il a donc été **indispensable de développer un programme d'interfaçage entre la base des données et le pré-processeur de PM5**. La structure du fichier d'entrée des historiques des prélèvements (wel.dat) étant en ASCII, cette opération est réalisable.

Quant à la présentation graphique des résultats, elle peut être enregistrée sous format DXF, HPGL ou BMP.

Toutefois, il est préférable que les cartes de valeurs (piézométrie, rabattement, subsidence, concentration, paramètres hydrauliques, etc.) soient enregistrées sous forme de fichiers ASCII ou sous forme de fichiers directement lus par SURFER ou ARCVIEW pour l'amélioration de la présentation des résultats. Cette remarque est également valable pour les séries chronologiques.

²² Wen Hsing CHIANG & Wolfgang KINZELBACH : 3-D Groundwater Modeling with PMWIN, Springer-Verlag, 2001

VI – LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

VI.1 – Limites du Continental Intercalaire

- **Limite Nord Algérie-Tunisie**

Vers le Nord, les formations du CI s'ennoient à grande profondeur par subduction sous la flexure Atlasique, comme en témoignent les forages de Ouled Djellal et de Guanntass. Par ailleurs, entre Laghouat et El Hamma de Gabès, les courbes isopièzes du Continental Intercalaire sont toujours orthogonales à la flexure atlasique, confirmant la nature imperméable de cette limite Nord.

- **Limite Nord-Ouest**

Les courbes piezométriques attribuent à cette limite un rôle majeur dans l'alimentation de la nappe du CI. Au terme de la brève analyse hydrologique esquissée plus haut, il n'a pas été possible de chiffrer cette alimentation avec une précision acceptable. Au cours des premières étapes du calage du Modèle, l'alimentation sera représentée et déduite à partir de conditions de potentiel imposé variable dans l'espace, dont les valeurs sont extraites de la carte piezométrique de référence²³ (cf. fig.29).

- **Limite Ouest**

Elle correspond à la vallée de la Zousfana et de la Saoura. L'allure des courbes piezométriques indique qu'il s'agit d'un exutoire, représenté par des drains sur le Modèle.

- **Limite Sud-Ouest**

Dans la vallée du Gourara, du Touat et du Tidikelt, le chapelet des foggaras est représenté par une ligne de drains, dont le débit devrait être restitué par le calage du modèle. Dans la partie Nord de cette limite, la sebkha de Timimoun est également représentée par des drains.

- **Limite Sud**

A l'Est de In Salah et jusqu'à la Dorsale d'Amguid où le CI est absent, il s'agit d'une limite à flux nul. Dans le Tihghert, les apports par les affleurements de l'Adrar Ben Drich, sur une longueur d'environ 400 km à cheval sur la frontière, sont représentés et déduits à partir de conditions de potentiels imposés dont les valeurs sont tirées de la carte piezométrique. Plus à l'Est et jusqu'au graben de Hun, le CI se termine par une limite imperméable, sachant que dans une grande partie de cette région, le contact avec l'aquifère des grès du Cambro-Ordovicien va déterminer d'importants échanges verticaux.

²³ Il est vrai que la connaissance des niveaux piezométriques dans cette région précisément est encore très médiocre, et il en va de même pour les transmissivités. Cet état de fait sera commenté lors de l'examen des résultats du calage en permanent. C'est la raison pour laquelle on s'est attaché à respecter les ordres de grandeur des estimations de recharge déjà proposées par les prédécesseurs du projet SASS, qui ont été confortées et confrontées par la brève analyse hydrologique présentée dans la première partie.

- **Limite Est**

Il n'existe pas de limite hydraulique précise à l'est du réservoir. La limite du modèle est ici représentée par une condition de potentiels imposés à travers une résistance, qui autorisera de procéder à une première estimation des échanges de cette nappe du CI avec son prolongement oriental saumâtre, que ce soit à l'état actuel ou encore lors des simulations prévisionnelles.

- **Golfe de Syrte**

Le Continental Intercalaire, relayé ici par des formations carbonatées moins perméables, se prolonge en mer. Le modèle se termine par une série de potentiels imposés à travers une résistance, en mesure de simuler les percolations en mer à travers le toit de la nappe captive du CI.

- **Limites Nord Libye et Est Tunisie**

Marquée par les affleurements du CI sur les hauteurs du Dj. Nefussa et du Dahar, cette limite contribue à l'alimentation de la nappe. Elle est figurée par une série de potentiels imposés qui déterminent, par calage du modèle, les débits d'infiltration.

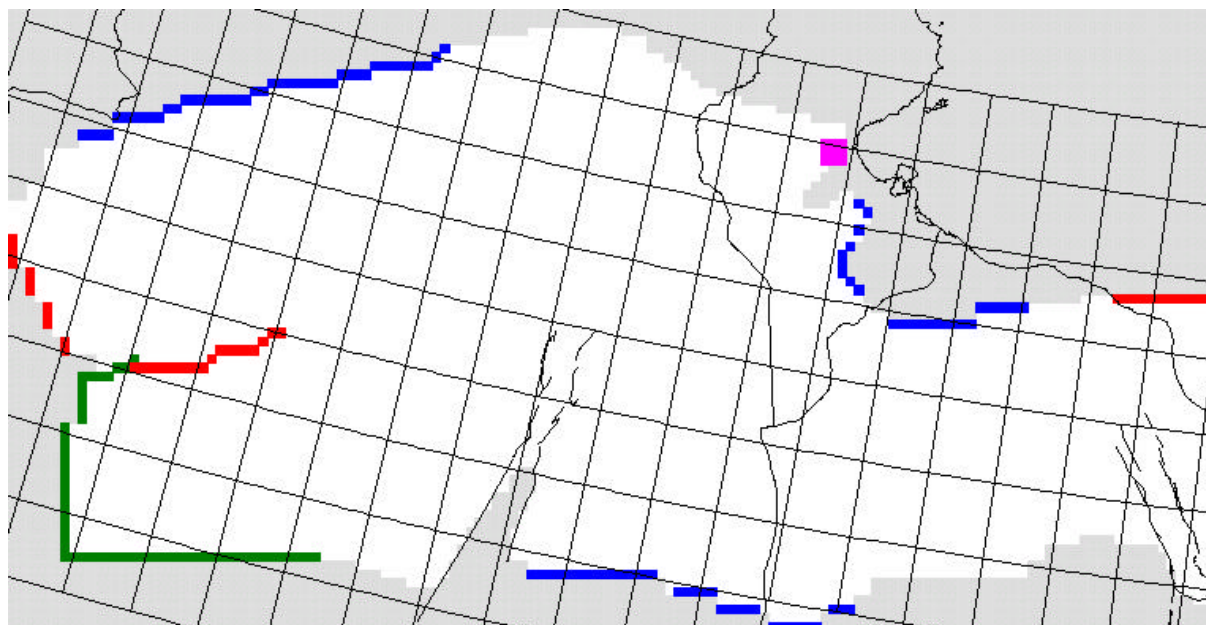
- **Seuil d'El Hamma**

Ce seuil est représenté par des conditions de Drains, où sera calculé par le modèle le débit qui transite à travers l'exutoire tunisien.

- **La représentation du Cambro-Ordovicien**

Le Cambro-Ordovicien (COD), se présente 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 plus tard après la mise en exploitation des champs captants du Dj Hassaouna, ainsi que le laisse présumer la faible épaisseur de la couche semi-perméable de séparation (le Carbonifère) et le contact direct très développé entre les deux aquifères (CI & COD) dans ce secteur.

Fig. 67 : Continental Intercalaire ; Conditions aux limites adoptées en Régime Permanent



- Condition de potentiel
- Condition de drain (Chott ou Sebkhah)
- Condition de drain (source ou foggara)
- Condition de drain (Exutoire tunisien)
- Condition de drain (Limite orientale)

VI.2 – Limites du Complexe Terminal

• Limite Nord des Chotts, de Biskra à Gafsa

Cette limite suit le tracé de la flexure Atlasique et correspond à la limite d'extension du MioPliocène vers le Nord. Cette région est marquée par l'occurrence de très importants ruissellements en provenance des Aurès et du bassin de Gafsa, mais la contribution potentielle de ces apports à la nappe est limitée d'une part par la surface réduite des affleurements et par des Transmissivités relativement faibles à l'amont. En tout état de cause, cette limite est figurée par des potentiels imposés.

• Limite Nord-Ouest, l'Atlas Saharien

Si l'on s'arrête au MioPliocène du Bassin Central ainsi qu'il a été convenu de procéder pour la définition de la couche CT du modèle, cette limite correspond à l'extension de ces formations qui surmontent l'Eocène moyen imperméable. Cette limite reçoit notamment les apports de l'Oued Djedi ainsi que ceux d'autres bassins de moindre importance. Elle est représentée par des conditions de potentiels imposés.

- **Limite Ouest et Sud-Ouest**

Elle correspond au tracé de la dorsale du Mzab, et s'étend sur près de 400 km depuis le 32^e jusqu'au 28^e parallèle. C'est la limite d'extension à l'Ouest de la nappe du Complexe Terminal ; elle reçoit les apports des crues des oueds dévalant la dorsale et l'infiltration aux affleurements du Sénonien carbonaté et du MioPliocène. Elle est représentée par des conditions de potentiel imposé.

- **Limite Sud-Algérie**

Elle correspond, entre les parallèles 29° et 28°, et de la dorsale du Mzab à la frontière Libyenne, à la limite d'extension sud des formations du Sénonien carbonaté. Ces formations s'étendent sur les plateaux du Tademait et du Tinhert, dominés par l'isohyète 20 mm ! c'est dire si l'infiltration directe des précipitations ne devrait pas constituer la source d'apports dominante. Mais cette limite reçoit les apports de l'Oued Mya, et elle est traversée par le lit fossile de l'Oued Igharghar, dont le bassin versant s'étend jusqu'au massif du Hoggar. Cette limite est représentée par des potentiels imposés.

- **Limite Sud-Libye**

Entre les Méridiens 10° et 14°, elle correspond à la limite d'extension sud du Crétacé supérieur. Elle est représentée par des conditions de Potentiel imposé.

- **Limite orientale du Modèle**

Cette limite est représentée par une condition de flux nul.

- **Limites Est Tunisie et Nord Libye ; Dahar et Dj. Nefussa**

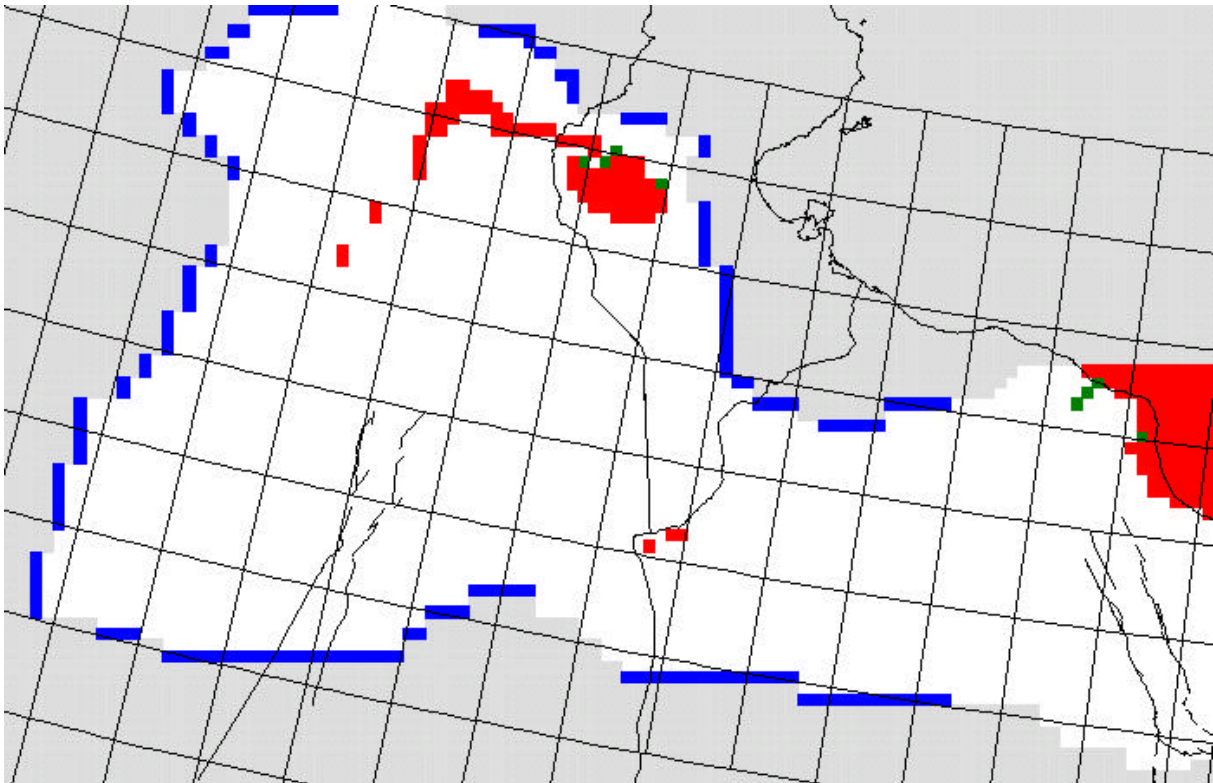
Faute de pouvoir disposer d'une estimation préalable des apports le long de ces limites, celles-ci sont figurées par des conditions de potentiel imposé.

- **Représentation des percolations internes ; les conditions de Drains**

Les exutoires naturels de la nappe sont représentés par des conditions de drains, qui simulent la percolation du CT vers les systèmes suivants :

- a) les chotts Melrhir, Merouane, Djérid et Rharsa.
- b) les sebkhas El Hajira, Ngoussa, Mjazzam et Tawergha.
- c) la Méditerranée dans le Golfe de Syrte.
- d) les sources du Djérid et de la Nefzaoua
- e) la source Ain Tawergha et celle de l'Oued Kaam

Fig. 68 : Complexe Terminal ; Conditions aux limites adoptées en Régime Permanent (la légende est celle de la fig. 67)



Nota : Toutes les valeurs de niveaux piézométriques adoptées sur les limites à potentiels imposés, qui ont servi au terme du calage à calculer les débits d'alimentation des nappes, sont présentées, zone par zone, dans les Annexes de la Deuxième Partie.

VII – LES TRANSMISSIVITES HORIZONTALES INITIALES

Les cartes initiales de répartition des Transmissivités (qui servent à démarrer le calage du modèle), ont été établies essentiellement à partir des résultats des modélisations antérieures pour lesquels le projet a pu accéder à l'information relative aux Transmissivités. Il s'agit (cf. fig.69 & 70):

- Des deux modèles monocouches du CT et du CI (ERESS) construits en 1972 par Unesco et actualisés en 1984 (Pnud, 1985), qui englobent la partie algéro-tunisienne des nappes du CT et du CI.
- Du modèle multicouche construit par GEOMATH (1994) en Libye. Ce sont les couches aquifères situées dans le bassin de Hamada al Hamra et désignées par GEOMATH sous les noms respectifs de :
 - Crétacé supérieur,
 - Trias-Jurassique-Crétacé inférieur,
 - Cambrien-Ordovicien-Dévonien ; qui se rapportent à la partie libyenne du système d'étude du SASS. La première couche groupe les réservoirs aquifères de Mizda et de Nalut, la seconde correspond à Kiklah.
- Du modèle du CI algéro-tunisien (BRL-Ecole des Mines, 1998) qui couvre le domaine du modèle ERESS et s'étend un peu vers le Nord-Ouest sans toutefois intégrer la totalité du bassin du Grand Erg Occidental.

- Des trois modèles monocouches représentant respectivement les nappes de Mizda, Nalut et Kiklah, modèles réalisés en 1978 par GEFLI et s'étendant sur le bassin de Sirte et Zam Zam au Nord-Est de la Libye.

Cette situation constituera le point de départ du calage du modèle du SASS en régime permanent. Ce niveau d'information sera par ailleurs enrichi par l'ensemble des valeurs de Transmissivités récoltées dans les trois pays au cours du projet SASS, et dont une représentation cartographique a été présentée fig. 40 et 41.

Pour ce qui concerne le Turonien du secteur algéro-tunisien, qui n'a fait l'objet d'aucune étude hydrogéologique à caractère régional, il a été utilisé, comme indicateur des Transmissivités, les variations de faciès décrites par Bel et Demargne [calcaréo-marneux au Sud du parallèle d'El Goléa et au Nord de Djamâa, et calcaire entre El Goléa et Djamâa, ainsi que les quelques valeurs ($5 \cdot 10^{-6}$ à $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) issues des résultats d'essais de pompage réalisés par Sonatrach dans la région de Hassi Messaoud (Franlab, 1978) pour dresser un carte initiale des transmissivités.

Fig. 69 : Transmissivités du CI issues du Modèle ERESS, $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

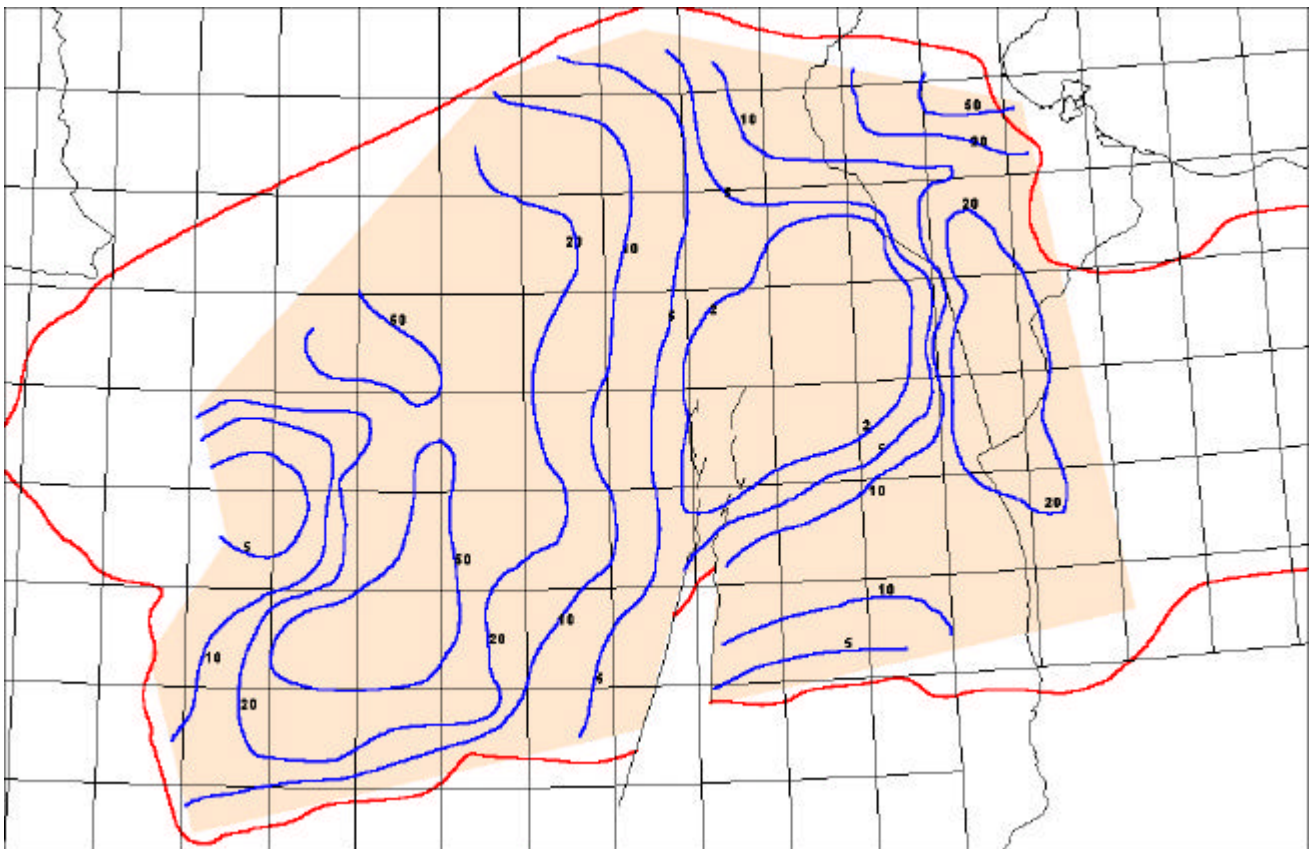
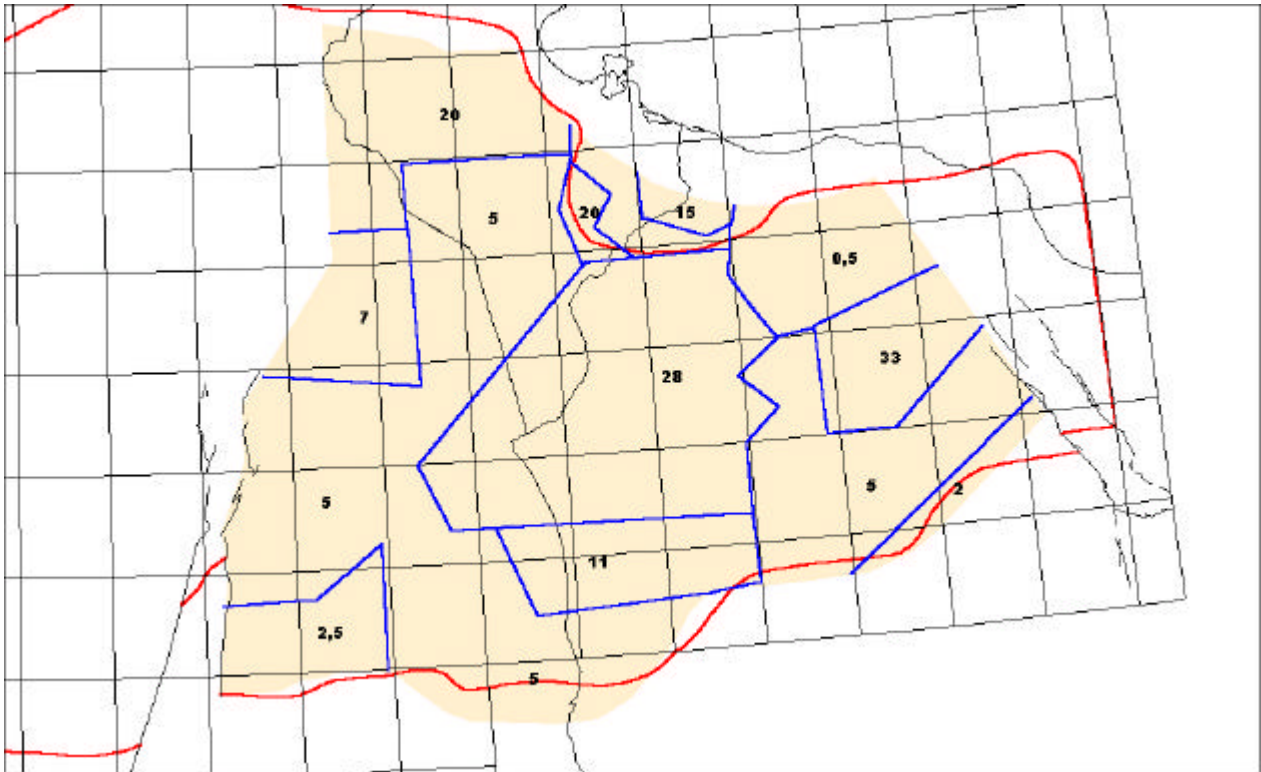


Fig.70 : Transmissivités du TRJLC - Kiklah issues du Modèle GEOMATH , $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$



VIII – LES PERMEABILITES VERTICALES DES AQUITARDS :

Les aquitards considérés dans le système multicouche sont de haut en bas :

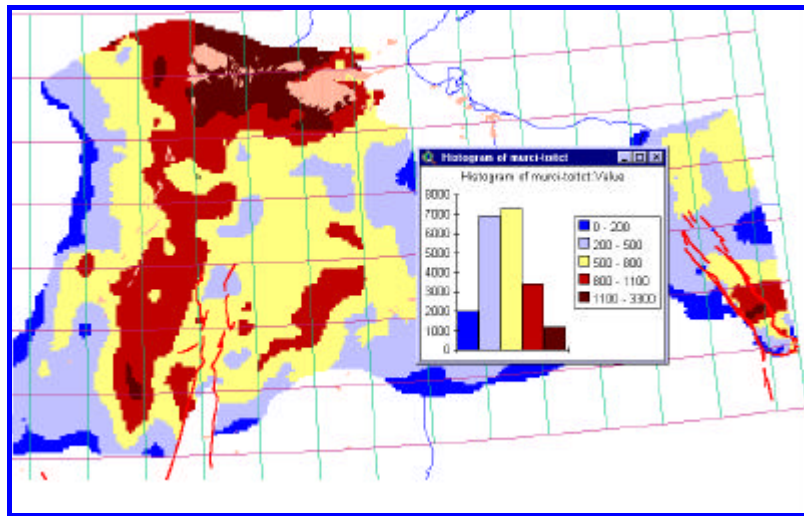
- Le Sénonien lagunaire qui s'intercale entre les aquifères du CT et du Turonien, dont l'épaisseur moyenne est de 150m en Algérie-Tunisie et de 30m en Libye
- Le Cénoomanien qui sépare les aquifères du Turonien et du CI, épais en moyenne de 300m en Algérie, 200m en Tunisie et 80m en Libye.
- Le Carbonifère qui sépare l'aquifère du CI de celui du COD.

Si dans la partie Libyenne des réservoirs, il existe quelques valeurs de référence, du moins en terme d'ordre de grandeur, issues des modélisations successives de Idrotecneco (1982), Geomath (1995) et Brl (1997), dans la partie algéro-tunisienne, il n'existe au niveau des études ERESS pas d'indice autorisant une représentation régionale fiable de ce paramètre.

En fondant sur les informations acquises par la base de données géologiques et l'analyse structurale qu'elles permettent désormais de réaliser à peu de frais, il a été possible de tracer la carte de l'épaisseur des obstacles qui s'opposent à la circulation de flux entre le CI et le CT ; ces obstacles sont les formations essentiellement du Sénonien lagunaire et du Cénoomanien. La fig 71 présente la carte de l'épaisseur des formations comprises entre le toit du CI et le mur du CT : cette épaisseur dépasse 1000m sur de grandes superficies du Sahara central et que sa valeur moyenne(cf. histogramme des fréquences) peut être considéré de l'ordre de 500 m.

Entre CI et CT, les écoulements de drainance sont théoriquement possibles, en vertu de la répartition des différences de charge entre ces deux couches aquifères. La fig. 72 représente ces pertes de charge verticales, pour lesquelles il peut être adminis (cf.histogramme) une valeur moyenne de 200 m.

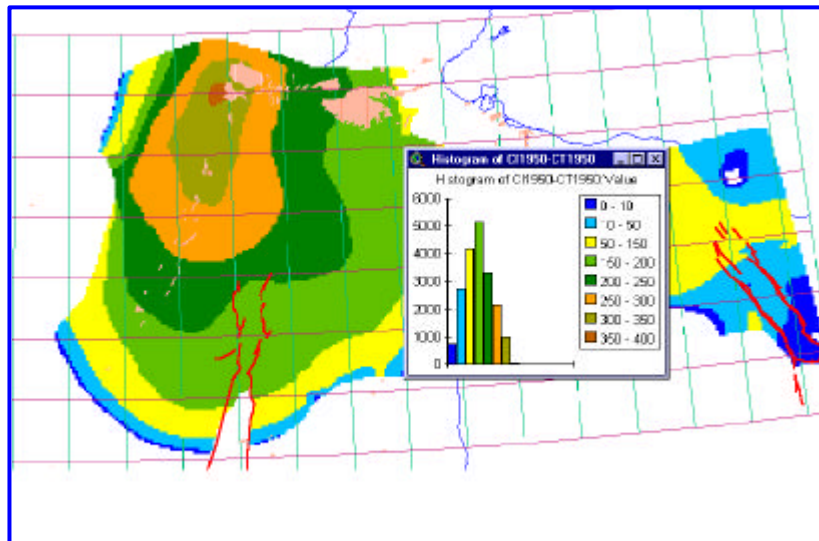
Fig. 71 : Epaisseurs (en m) des formations séparant les aquifères du CI et du CT



Très sommairement, le gradient hydraulique vertical moyen peut être estimé à 0.4. Par ailleurs, la recharge de la nappe du CI est généralement estimée à une valeur qui tourne autour de 10 m³/s, alors que le débit total des exutoires naturels de la nappe (foggaras, exutoire tunisien et participation à Ain Tawurgha) est estimé à 9 m³/s environ, soit donc, et à titre d'hypothèse, un débit de 1m³/s réservé à la drainance CI→CT.

En considérant une surface de drainance potentielle de l'ordre de 500.000 km², la perméabilité verticale est de l'ordre de 5. 10⁻¹² m/s. Cette valeur serait une moyenne sur le bassin, qui tolère des variations dans l'espace et selon les formations en présence.

Fig.72 : différences de charge entre le CI et le CT (en m)



Comme Perméabilité verticale, il a été adopté une valeur moyenne initiale (initiale au sens des premiers essais de calage du modèle) égale à 10⁻¹² m/s dans le Sénonien lagunaire sur l'ensemble du domaine. Dans les zones de recharge communes des nappes du CT et du Turonien, une valeur cent fois plus élevée a été affichée pour rendre compte de la communication hydraulique entre les deux nappes. Quant à la perméabilité verticale initiale du Cénomanien, elle est supposée égale à 10⁻¹¹ m/s en Algérie-Tunisie et à 5. 10⁻¹¹ m/s en Libye. Pour le Carbonifère, il a été adopté une valeur de 10⁻¹² m/s qui s'élève à 10⁻¹⁰ m/s au Sud-Est.

CHAPITRE II - CALAGE DU MODELE

I – PROTOCOLE DE CALAGE DU MODELE

Classiquement, la première phase du calage d'un modèle est le calage en régime permanent, de sorte à minimiser le nombre de paramètres à ajuster et qui a pour objectif d'assurer la cohérence de l'ensemble des données introduites concernant les conditions aux limites, la piézométrie et les Transmissivités.

La seconde phase du calage du modèle consiste à vérifier son fonctionnement en régime transitoire, sur une période durant laquelle l'évolution de l'état du système aura été significative en termes de débits prélevés et de rabattements de niveaux observés.

Les paramètres à ajuster au cours de cette deuxième phase de vérification sont la répartition spatiale des coefficients d'emmagasinements et l'évolution temporelle des alimentations mais il est clair, dans le cas du SASS, que les débits d'alimentation ne peuvent faire l'objet d'une modulation dans le temps, car d'une part leur connaissance est encore rudimentaire et d'autre part l'éloignement des zones d'apport vis à vis des zones de pompages est tellement grand que la recherche d'une telle précision n'aurait pas d'incidence sur les prédictions du modèle.

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 la limite orientale des couches aquifères*, 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 la présentation d'une première version du modèle, calée et présentée au Comité de Pilotage du projet à Tripoli en Juin 2001, version dénommée « Modèle de Tripoli », les révisions les plus importantes ont été :

a) La révision des historiques de prélèvements en Algérie :

des compléments d'enquêtes, réalisées par l'ANRH au cours du printemps 2001, permettaient d'aboutir à une révision notable des historiques de prélèvements algériens, représentant un abattement global, en l'an 2000, de l'ordre de **15%** par rapport aux précédentes estimations. Il fallait donc reprendre le calage du modèle pour tenir compte de ces développements.

b) La révision de l'Exutoire Tunisien de la nappe du CI :

Au terme de la première phase d'ajustement du modèle, était apparue la nécessité d'une reprise du modèle dans le Sud tunisien où le calage du CI, par référence à l'évolution des rabattements observés entre 1950 et 2000, n'avait pas été jugé acceptable. L'impossibilité de réduire les écarts importants persistant sur le champ des Chott Fedjej (CF), les importantes anomalies demeurant inexplicables dans tout le Djerid, indiquaient bien la nécessité d'une refonte totale de la conception même du modèle dans ces régions.

c) La reprise du modèle dans le Bassin Oriental :

Dans son rapport de Janvier 2002 le comité d'évaluation du modèle a émis un certain nombre de recommandations portant d'une part sur la position des limites orientale et Nord orientale du modèle en Libye, d'autre part sur la représentation des prélèvements en groupes libyens, en termes de position géographique mais également d'évolution temporelle, telle qu'elle avait été admise et adoptée dans la base de données du SASS.

II - LES PRINCIPALES ETAPES DU CALAGE

II.1 - Le modèle de Tripoli, ou Juin 2001

Ce modèle représente la première tentative complète d'intégration des connaissances hydrogéologiques au sein du modèle du SASS. La structure quasi-tridimensionnelle du modèle comprend trois aquifères (CT, Turonien, CI) sur l'ensemble de l'espace où ces aquifères sont présents, séparés par deux aquitards (Sénonien lagunaire et Cénomanién). Le modèle comporte deux couches à potentiel imposé en haut et en bas, représentant la région des Chotts Algériens et Tunisiens et le Golfe de Syrte (couche du haut), et l'aquifère du Cambro-Ordovicien (couche du bas).

Les paramètres hydrauliques (transmissivité et emmagasinement) des aquifères du CT et du CI sont pratiquement les mêmes que ceux utilisés dans les modèles précédents (ERESS, GEOMATH et GEFLI). Les paramètres hydrauliques de l'aquifère Turonien et la conductivité hydraulique verticale des aquitards ont été déterminés par calage du modèle, par essais et erreurs, en partant d'une valeur initiale estimée à partir de quelques essais réalisés par la Sonatrach dans la région d'Hassi Messaoud, pour le Turonien, et de données de la littérature pour les conductivités verticales des aquitards.

Le calage en régime permanent de ce modèle est très satisfaisant ; les charges hydrauliques et le bilan en eau calculés sont relativement en bon accord avec les observations. Malheureusement, ce modèle s'est révélé incapable de rendre compte du comportement transitoire de l'aquifère du CI dans la région des Chotts Tunisiens (Chott Fedjej, Chott Djerid). A partir de ces résultats, la structure du CI dans le Sud Tunisien a été entièrement revue.

II.2 - Impact des modifications de débits en Algérie

Au terme d'une dernière série de vérifications réalisées par les équipes d'Alger et de Ouargla de l'ANRH, un certain nombre d'erreurs ont pu être corrigées, portant le total des prélèvements 1998 en Algérie, toutes nappes confondues, de 52. m³/s à 45.9 m³/s.

Tableau 11 : Corrections des débits de prélèvements en Algérie

Nappe du CI		Prélèvements 1998 par WILAYA , en l/s							Total
source	Foggaras	ADRAR	BISKRA	EL OUED	GHARDAIA	ILLIZI	OUARGLA	TAMANRAS	
ANRH - original	2700	6370	1600	2300	8000	1020	4700	3160	29850
ANRH - corrigé	2700	6100	1720	1370	6740	1360	3550	1420	24960
Nappe du CT		Prélèvements 1998 par WILAYA , en l/s							Total
source	BISKRA	KHENCHELA	TEBESSA	EL OUED	OUARGLA				
ANRH - original	350	300	200	9300	12400				22550
ANRH - corrigé	350	420	200	10680	9350				21000

Sans rien toucher à la structure ni aux paramètres du modèle, les historiques de débits nouvellement acquis pour l'Algérie ont été simulés sur le modèle de Tripoli. Cette opération n'a comporté aucun calage, mais un simple calcul des niveaux piezométriques et des nouveaux bilans.

Le résultat obtenu, en termes de rabattements calculés, comparés aux rabattements « de Tripoli » et en termes de bilans des flux calculés en 2000, montre l'ampleur des modifications induites par ces changements de pompages imposés, indiquant par là la nécessité d'une révision du modèle un peu partout en Algérie.

Cette révision du Modèle a été mise en œuvre en même temps que l'on procédait aux modifications nécessitées par la nouvelle représentation de l'Exutoire tunisien du CI.

II.3 - Premiers effets de la nouvelle configuration structurale du CI

La nouvelle structure adoptée pour le CI dans le Sud Tunisien comprend deux aquifères ; l'aquifère inférieur représente les formations du CI au sens strict, l'aquifère supérieur représente les « Grès Supérieurs ». La division du CI en deux couches se justifie par la grande différence des charges hydrauliques qui existe entre ces aquifères. Pour les Grès Supérieurs, la carte piézométrique de référence pour 1950 a été reconstituée. Une révision de l'historique des prélèvements pour la période 1950-2000 a aussi été faite, tant pour les Grès Supérieurs que pour le CI.

La structure quasi-tridimensionnelle du Modèle **du 20 Août** résulte de l'ajout de la couche des Grès Supérieurs au Modèle de Tripoli, et d'une nouvelle configuration de la limite du CI dans la région de Gabès où le dôme du Melaab a été exclu de l'aquifère. Quelques calculs préliminaires, qui prennent en compte la mise à jour des prélèvements Algériens et Tunisiens (ces derniers pour tenir compte d'une réaffectation inter couches du CI), ont montré que **le débit calculé en régime permanent de l'exutoire Tunisien du CI ne peut alors pas dépasser 1,8 m³/s** (alors que **le débit généralement admis de cet exutoire est de 3,6 m³/s**).

Avec le champ des transmissivités affichées, le nouveau dessin du môle et les conditions de potentiel imposé aux limites d'alimentation, **la recharge du CI par le Dahar chute à 0.6 m³/s, alors qu'elle était de 2.6m³/s sur le Modèle de Tripoli et 1.99 m³/s sur celui de l'ERESS.**

II.4 - Le Modèle du 20 Août 2001

Dés lors qu'a été établie l'impossibilité de faire transiter par l'exutoire tunisien un débit conséquent avec le champ des Transmissivités de l'ERESS²⁴, il a été décidé de prendre un certain recul vis à vis de cette distribution, notamment dans les régions où l'absence de forages, et par conséquent de valeurs à priori de Transmissivités, pouvait autoriser une telle option. Une telle modification du champ des Transmissivités était devenue incontournable si l'on voulait restituer un débit de l'ordre de 3.6 m³/s à l'exutoire tunisien [en réalité 3.9 m³/s si l'on tient compte de la percolation dans le Chott Fedjej].

Origine des débits de l'Exutoire Tunisien du CI, d'après le Modèle ERESS

Recharge Dahar = 1.99 m³/s ; Limite Libye = 0.49 m³/s
Plateau du Tinhert = 0.22 m³/s ; Atlas Saharien = 1.2 m³/s [complément à 3.9]
Si l'on admet en toute première approximation une recharge sur le Dahar de l'ordre de 0.6 m³/s (cf. « premierseffets », plus haut), Il faudra bien alors que la contribution de l'Atlas Saharien au débit de l'Exutoire Tunisien soit sensiblement révisée à la hausse.

Pour pouvoir restituer une telle augmentation, **il a fallu en définitive aménager un tube de courant d'environ 100 km de large allant de Touggourt à la faille d'El Hamma, dans lequel les Transmissivités du CI sont portées à 2. 10⁻² m²/s** : les augmentations de Transmissivités les plus fortes (jusqu'à dix fois celles de l'ERESS) étant localisées dans la région de l'Erg Oriental caractérisée par l'absence de mesures. Une telle augmentation peut paraître arbitraire en l'absence de références ; mais le SASS n'est pas le premier à devoir augmenter très sensiblement les Transmissivités dans ce secteur : GEOMATH (in BRL, 1997) qui a construit un modèle transfrontière du CI, a de son côté dû adopter au même

²⁴ Cette impossibilité avait déjà été établie par FRANLAB (1972). En effet, dans la mesure où le mole du Melaab y était représenté, le premier modèle de l'ERESS ne pouvait véhiculer un débit supérieur à **2 m³/s par l'E.T.**

endroit de fortes transmissivités ($2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) pour l'exutoire tunisien, certainement pour « compenser la perte », des flux que le modèle ERESS faisait venir de Libye, et pouvoir ainsi drainer plus d'apports venant de l'Atlas à l'Ouest. Mais la comparaison avec GEOMATH s'arrête là, ce dernier admettant l'ensemble de la Djeffara tuniso-libyenne comme exutoire du CI.

L'autre modification notable des paramètres hydrauliques (par rapport à Tripoli) concerne les coefficients de Drainance, pour lesquels une «fenêtre » a été aménagée sous le Chott Djerid entre les Grès Supérieurs et le Turonien d'une part, le Turonien et le Complexe Terminal d'autre part.

Avant d'aller encore plus loin en matière de calage, il a été décidé d'éprouver la capacité prédictive du modèle par un calcul prévisionnel maintenant les prélèvements 2000 constants. Les premiers résultats indiquent clairement que les niveaux piézométriques du CT sont « maintenus » par les Chotts, lesquels demeurent liés à la nappe même en cas de dénoyage, en raison des conditions adoptées de potentiels imposés dans les chotts, et de ce fait contribuent à la « réalimentation » de la nappe dès que le niveau piézométrique descend en dessous du niveau des chotts.

Ce phénomène est particulièrement visible sous le Chott Djérid, où se dessine un vaste secteur circulaire peu rabattu qui peut être dû, en première analyse, soit :

- aux flux de recharge de la nappe par le Chott,
- à un excès de drainance provenant du Turonien, favorisée par la «fenêtre » du chott Djerid,
- à une surestimation des coefficients d'emmagasinement adoptés en nappe libre, ou plus simplement au fait qu'il n'existe pas de forages d'exploitation dans l'enceinte du Chott.

Afin de pouvoir évaluer en connaissance de cause l'effet des paramètres précédents, il a été décidé de construire une nouvelle version du modèle dans laquelle :

- les mailles du Chott sont automatiquement déconnectées du CT sitôt que le Niveau Piézométrique de cette nappe descend sous le niveau du chott,
- la fenêtre de drainance du chott Djerid (Grès Sup. → Tur. → CT) disparaît pour laisser la place à une drainance plus diffuse et homogène dans l'espace,
- le calage des historiques de niveau en régime transitoire doit laisser la possibilité d'une diminution substantielle des coefficients d'emmagasinement en « nappe libre », notamment dans les secteurs du Complexe Terminal où les valeurs précédentes ont été jugées excessives dans de très larges plages sans aucune mesure ni essai (Grand Erg Oriental).

Coefficients d'emmagasinement en nappe libre

Ce degré de liberté supplémentaire que l'on doit adopter à cette étape du calage se justifie par l'absence de valeurs de référence dans ces régions. Il paraît utile à ce stade de rappeler les critères adoptés par le Modèle ERESS pour l'affectation des valeurs du coefficient d'emmagasinement dans les secteurs à surface libre :

« La nature du réservoir aquifère a conduit à distinguer deux cas :

Les roches à porosité intergranulaire ... pour lesquelles une valeur moyenne de $150 \cdot 10^{-3}$ a été adoptée comme coefficient d'emmagasinement.

Les roches fissurées ... pour lesquelles une valeur plus faible a été adoptée, comprise entre $100 \cdot 10^{-3}$ et $150 \cdot 10^{-3}$ » [ERESS, plaquette 3 : Nappe du CT, p37]

II.5 - Le Modèle du 10 Septembre 2001

Par rapport au précédent, le présent modèle se distingue par :

- La disparition de la fenêtre drainante du Chott Djerid, qui cède la place à une drainance diffuse ;
- Une réduction substantielle des Transmissivités des Gres Supérieurs ;
- La modification de la structure des Grès Supérieurs dont le « creux piezométrique » n'est plus représenté comme résultat d'une percolation vers le Djerid, mais par un drainage du Chott Fedjej en condition de Drain ;
- Une modification des conditions aux limites imposées sur les Chotts algéro-tunisiens : d'une couche de mailles à potentiels imposés figurant dans le modèle du 20/8, les Chotts passent à une condition de Drain à débit – limite nul, ce qui interdit toute réalimentation du CT par les Chotts ;
- Un réajustement du champ des Transmissivités du CI nécessité par l'ensemble des modifications précédentes : d'une façon générale, les transmissivités actuelles sont globalement de 20 à 25% plus élevées que celles du Modèle du 20 Août ;
- Une réévaluation du débit calculé de l'Exutoire Tunisien, qui passe de 2.75m³/s à 3.3m³/s, se rapprochant très sensiblement des estimations classiquement adoptées ;
- Enfin une réduction substantielle, dans le Complexe Terminal, des coefficients d'emménagement des zones à surface libre. [Le coefficient d'emménagement en nappe libre joue un rôle privilégié dans le comportement à long terme du système aquifère : Malheureusement, dans le CT, on ne dispose : - ni de valeurs mesurées du coefficient d'emménagement en nappe libre, -ni de points de contrôle en nombre suffisant et fiables qui permettraient, comme au CI, de rectifier les valeurs de S par calage en se fondant sur les historiques de rabattements].

II.6 - Le Modèle du 23 Septembre 2001, Retour sur la structure des Transmissivités

Le **Modèle du 23 Septembre** a été construit suite aux recommandations du comité d'évaluation du modèle, en remplaçant les transmissivités du CI du Modèle du 10 Septembre par celles du Modèle de Tripoli (égales à celles de l'ERESS). Les résultats du calage sont de la même qualité que ceux du Modèle du 10 Septembre (**il faut noter en particulier l'excellent accord des rabattements calculés et mesurés au Chott Fedjej**). Comme on pouvait s'y attendre, le **débit en régime permanent de l'exutoire Tunisien du CI n'est que de 1,9 m³/s**. Ce modèle correspond au choix d'affecter plus de confiance aux estimations des transmissivités, basées sur des données de terrain, qu'au débit de l'exutoire naturel Tunisien, qui a été l'objet de nombreuses études mais demeure entaché d'incertitudes.

II.7 - Le Modèle du 30 Septembre 2001

Le **Modèle du 30 Septembre** dérive du Modèle du 23 Septembre en y doublant les transmissivités du CI dans la région de Biskra, El Oued, Nefzaoua. **Les résultats du calage de ce modèle sont d'excellente qualité et le débit permanent de l'exutoire Tunisien est de 3,1 m³/s, ce qui est très proche des estimations antérieures de ce débit.**

Le Modèle du 30 Septembre est donc une synthèse, un compromis, entre les deux options dont il a été question ci-dessus. En réalité, l'information géologique disponible dans la zone du triangle de Biskra, El Oued, Nefzaoua est très limitée, et la décision d'y doubler les transmissivités utilisées par le Modèle ERESS n'est donc pas en contradiction avec les données expérimentales.

Ce Modèle du 30 Septembre peut donc être considéré comme un état final acceptable de la phase de calage du Modèle SASS. C'est ce modèle-là qui répond le mieux à l'ensemble des critères et des contraintes imposées au calage, c'est celui qui paraît le mieux indiqué pour la réalisation des simulations prévisionnelles de développement des ressources en eau du SASS.

II.8 – Reprise du Modèle dans le Bassin Oriental

La prise en compte des nouvelles données acquises en Libye, au premier semestre 2002, a nécessité une actualisation du Modèle. Ces travaux ont été rendus nécessaires suite à la rectification du tracé de la limite Est et Nord-Est du modèle, de sorte que les champs de captage de Soknah et Waddan au SE, captant des formations oligocènes, aient pu être intégrées au Complexe Terminal, que le captage profond de Waddan pût être rattaché au CI, et que les champs de Khoms-Zliten fussent également entièrement représentés, ce qui n'était pas le cas précédemment, la construction du Modèle ayant été réalisée bien avant la réactualisation des données de prélèvements en Libye. Par ailleurs, l'évolution des historiques de prélèvement a été revue et corrigée. Le Modèle a été reconfiguré pour intégrer toutes ces nouvelles informations. Cela a certes nécessité un important volume de travaux : reconfiguration des limites et de certaines conditions aux limites, recalage en permanent, puis en transitoire. De sorte que **cette dernière version du Modèle soit bien celle qui servira à réaliser les simulations d'exploitation future des ressources en eau du SASS.**

III - PREPARATION DES DONNEES NECESSAIRES AU CALAGE

III.1 - Données sur les prélèvements et leur évolution

Les prélèvements, leur distribution dans l'espace et leur évolution dans le temps constituent, avec l'alimentation, le «**terme source**» du modèle mathématique, terme qui ne fait pas, comme les Transmissivités, l'objet d'un calage par tâtonnement, et qui ne doit par conséquent pas souffrir la moindre incertitude ni discontinuité, faute de quoi on ne saurait plus très bien ce que peut signifier le modèle ainsi obtenu. Cette règle est, il est vrai, très fréquemment violée pour ce qui concerne les flux de recharge ; et c'est une raison supplémentaire pour apporter le plus grand soin et la plus grande rigueur à la préparation des données concernant les prélèvements.

De très longs mois ont été nécessaires à l'équipe du projet et aux équipes nationales pour pouvoir élaborer, vérifier, puis valider l'histoire des prélèvements, point d'eau par point d'eau, et ce, sur une période continue la plus longue possible, soit une série de cinquante ans allant de 1950 à 2000.

Les cartes fig 14 et 15 représentent la répartition géographique des prélèvements en 2000, et ce pour chacun des aquifères CT et CI. Quant aux fig 16 et 17, elles présentent l'évolution historique des prélèvements totaux dans chacun de ces aquifères.

Ces informations représentent une masse considérable de données, de l'ordre de 7×10^4 valeurs annuelles de débits [près de 1200 forages «**activés**» au CI, 2000 au CT, pour une durée de fonctionnement d'environ 20 ans en moyenne]. Il était évidemment hors de question d'introduire ces valeurs manuellement dans le modèle, d'autant qu'elles étaient déjà mises en forme et stockées dans la base de données. C'est pour cette raison que l'équipe du projet SASS a dû développer un interface spécifique Base de Données / Modèle compatible avec Processing MODFLOW.

Tableau 12 : Nombre de Forages ou groupes de forages ayant été en exploitation²⁵ sur tout ou partie de la période 1950-2000

Algérie	CI	928
	CT	1326
Tunisie	CI	126
	CT	690
	GS	46
Libye	CI	29
	CT	29
Total		# 3200

En raison de l'arrivée continue d'informations nouvelles et de données sans cesse corrigées, il n'a pas été possible pour le modèle d'intégrer rigoureusement les mêmes informations que les dernières versions de la base de données. Par ailleurs, les prélèvements de certains points d'eau qui ne possédaient pas de coordonnées ou des coordonnées les situant à l'extérieur du modèle, (points d'eau dont la notoriété n'a pas permis à l'équipe du projet de les replacer par ses propres moyens), n'ont pas été comptabilisés dans les prélèvements modèle. Ces points sont recensés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Forages exploités en 2000, hors limites du modèle

Exploitation - 2000 _ Forages Hors Limites du Modèle													
	NOCLAS	NOM	P	X LAMB	Y LAMB	Q-m3/an		NOCLAS	NOM	P	X LAMB	Y LAMB	Q-m3/an
Continental Intercalaire	L00700099	Kef 2	A			1324512	Complexe Terminal	J01100118	Base 24/2 H11	A			567648
	N00300032	BOUDA 4	A			699840		X04000033	DJEDIDA (D13 F..)	A			814680
	N00300033	BOUDA 3	A			209952		X04000085	AIN BOUZOUID D4 F84	A			946080
	N00300034	EL MANSOUR	A			524880		X04000239	RNS ALCIM	A			261749
	X00100057	bbm 3	A	314962.94	-1033163.57	147168		X04000248	RNS ENTP 1	A			65437
	X00100058	bbm 4	A	312033.96	-1028938.18	378432		X04000249	RNS ENTP 2	A			130874
	X00100060	bbm 6	A	346912.98	-1075752.08	105120		X04000252	RNS GTP	A			261749
	X00100063	bendrou	A			1419120		X04000655	F14 La Douane	A			1198368
	X00100067	emp 13	A			388800		I01100469	Ain Chemora D34 F107	A	808624	504906	412859
	X00100092	pk 200	A			77760		19924005	Dar El Gaied 1 bis	T	1119330	362837	1185624
	X00100286	bordj el assa	A			1198368		19941005	Dar Kouskoussi 1 bis	T	1110046	364246	554364
	X00100479	tafzioune	A			1261440		20750005	CRDA Kebili	T	1110105	363300	3024
	X03000023	Tinfouyé I	A			78840		Total-CT					6402456
	X03000024	Tinfouyé II	A			78840							
	X03000026	B.O.D F 5 prison	A			473040							
	X03000028	B.O.D F 7 tab tab 2	A			946080							
	X03000033	Tabankort Tab 1	A			1892160							
	X03000034	Tab 2 (Maouar)	A			1576800							
	X03000035	RNS A.SKHOUNA	A			2522880							
	X03000036	TFT 603 ENTP	A			126144							
	X03000042	Z.S.M.A. TIARA	A			630720							
	20454005	Oued Ennakhl	T	1261209	225556	29664							
	P00400130	REGGANE IND 1	A	275363	-502840	482112							
	P00400132	TAARABET	A	244818	-498515	414720							
	P00400133	REGGANE III	A	230000	-500812	165888							
	TOTAL-CI					17153280							

Ces erreurs de report sont à l'origine d'un écart de débit égal à 0.9 m³/s pour l'année 2000, dont la majeure partie provient de points sans coordonnées ; ce qui représente une erreur de 1.1 %.

²⁵ source : Base de Données du SASS

tableau 14 : écarts entre modèle et Base de Données

D E B I T S 2 0 0 0 M o d è l e v s B D			
	M O D E L E	B D	D i f f é r e n c e
C I - A l g	2 1 . 2	2 1 . 8	0 . 6
C T - A l g	2 0 . 9	2 1 . 2	0 . 3
C I - L i b	3 . 4	3 . 4	0 . 0
C T - L i b	7 . 4	7 . 4	0 . 0
C I - T u n	2 . 2	2 . 2	0 . 0
C T - T u n	1 4 . 4	1 4 . 4	0 . 0
G S	0 . 5	0 . 5	0 . 0
T O T A L	7 0 . 0	7 0 . 9	0 . 8

III.2 - Données sur les niveaux piézométriques et leur évolution

La charge hydraulique (niveau piézométrique) constitue la Variable d'Etat du système modélisé, que le modèle aura pour objet de reconstituer, au mieux de ses performances, au terme des opérations de calage. La bonne connaissance de cette grandeur, des incertitudes liées à son acquisition, de sa distribution dans l'espace et de son évolution dans le temps, est donc primordiale pour la réalisation du modèle et la qualité de son calage.

Les **distributions spatiales des charges** (datées) les plus anciennes connues sont celles publiées (après Cornet, puis Bel & Demargne) par l'ERESS pour l'Algérie et la Tunisie. Elles sont datées de 1950 pour le Complexe Terminal, et de 1956 pour le Continental Intercalaire.

En Libye, n'est pas disponible une information ancienne de qualité comparable aux documents de l'ERESS. De plus, les données sont ici plus fragmentaires. Ainsi, pour pouvoir esquisser une carte piézométrique « initiale » portant sur l'ensemble du territoire libyen du SASS, puis pour la « raccorder » à celle de l'ERESS, il a fallu reconstituer les fragments d'un puzzle en piochant sur un certain nombre de documents dont les plus importants sont : la synthèse de P.PALLAS (1980), l'étude GEFLI(1978), le rapport SRIVASTAVA (1981), l'étude IDROTECNECO (1982), le modèle GEOMATH (1995) et l'étude BRL (1997).

Le résultat de cette « construction » d'une carte piézométrique, désignée par convention « **Piézométrie 1950** », bien que la concordance précise avec cette date ne soit pas partout assurée, est présenté fig.29 et 30, respectivement pour le Continental Intercalaire et pour le Complexe Terminal, et fig. 73 pour ce qui concerne l'aquifère des Grès Supérieurs.

Critique et Validation des Données Piézométriques²⁶

En Hydrogéologie, la complexité des problèmes se mesure généralement plus au degré de complexité géologique des systèmes que par la multitude, la diversité et l'hétérogénéité des informations à manipuler. De ce fait, il n'existe pas de traditions, et donc pas d'outils éprouvés, d'analyse systématique, de critique et de validation des données hydrogéologiques en grand nombre.

Le problème du SASS a été à cet égard exemplaire, et constitue un cas d'étude exceptionnel par la quantité, la diversité, l'hétérogénéité des données acquises par le projet. Ces données sont certes de qualité inégales, et certaines d'entre elles pouvaient présenter des anomalies qui les rendaient inutilisables en l'état. Il était donc nécessaire, au terme de la mise en forme des contenus de la base de données du SASS, de rechercher des méthodes et des outils d'analyse systématique et de validation de ces données, par l'élaboration d'un certain nombre d'outils adaptés.

La mise en œuvre de ces outils a permis d'identifier puis de corriger les données aberrantes détectées. Ces outils ont concerné notamment **le Champ des Données Piezométriques** : Inventaire des Historiques « possibles » ; Détection et correction des valeurs aberrantes (comme les Corrections Systématiques de Signe) ; la vérification de la Plausibilité des hauteurs piezométriques corrigées.

Une fois que toutes les corrections préliminaires – corrections à caractère systématique – ont été effectuées, il n'était pas assuré que les valeurs obtenues du Niveau piezométrique fussent encore correctes et valables. Aussi, était-il nécessaire de pouvoir en jauger la plausibilité au moyen de procédures de filtrage et à l'aide de critères précis. Pour ce faire, elles ont été passées au crible des quatre procédés suivants :

- Report sur carte et figurés différents selon la valeur,
- Tracé des isovaleurs,
- Cohérence de l'Altitude déclarée avec celle tirée du Modèle Numérique de Terrain,
- Cohérence avec la carte piezométrique d'ensemble.

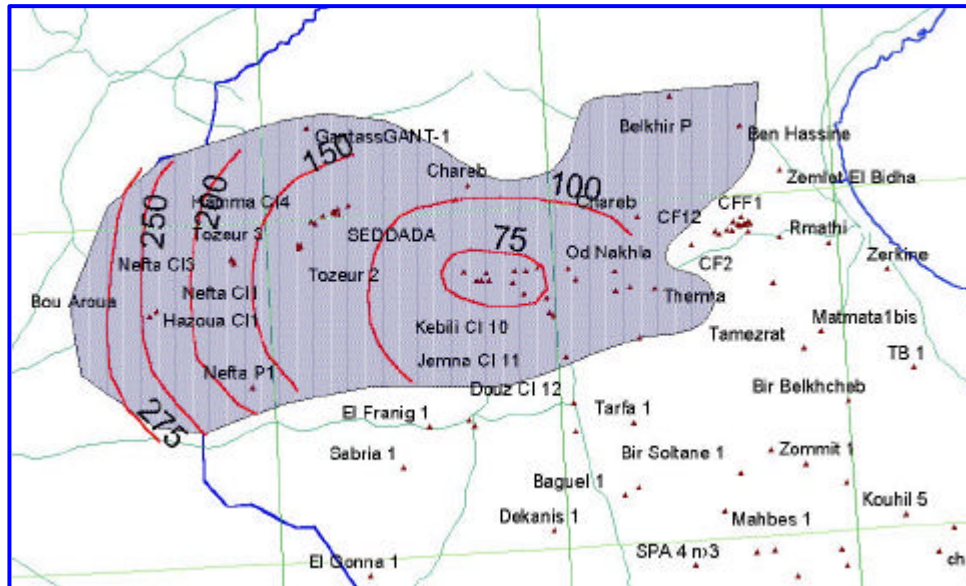
Quant à la connaissance de **l'évolution temporelle des hauteurs piezométriques**, de 1950 à nos jours, elle est très inégalement distribuée dans l'espace. Si l'on dénombre les séries piézométriques enregistrées à ce jour dans la base de données du SASS, on peut y compter plusieurs centaines de séries, mais de qualité très inégale et parfois médiocre (cf. encadré). Pour simplifier le problème, et faire en sorte que ces données en très grand nombre mais de qualité diverse puissent être valorisées pour assurer un meilleur ajustement du modèle, ils ont été regroupées par secteurs géographiques homogènes. Dès lors, et par comparaison visuelle, il devient possible de procéder (certes avec beaucoup de précautions) au bouchage des trous de la série « **type** » du groupe, qui est la série la plus longue et celle qui est jugée la plus cohérente avec l'histoire régionale, par « **emprunt** » à d'autres piezomètres ou forages du même groupe. Le résultat de l'opération fournit des « **séries de synthèse** », généralement une série par groupe ou secteur géographique.

Un tel procédé peut être utilisé avec profit et sans grand danger sur les séries les plus « **denses** », ce qui n'est pas du tout possible sur les séries « **clairsemées** » comportant un très petit nombre de mesures.

²⁶ cf. note SASS : Analyse des données (2001).

Les valeurs des Niveaux Piézométriques retenues dans ces séries originales ou de synthèse, retenues par secteur et qui seront utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire figurent dans la Base de Données SASS ; elles sont néanmoins reproduites ici en Annexe .

Fig. 73 : Piezometrie initiale de référence dans les Grès Supérieurs



IV – CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

IV.1 - Définition d'un Etat de Référence

L'état de référence pour le calage du modèle doit refléter un régime quasi-permanent du système. Etant donnée la grande extension latérale des réservoirs modélisés, et l'important éloignement existant entre les centres d'exploitation traditionnels du Bas Sahara et les limites hydrauliques du bassin, les nappes représentées devraient se comporter comme des nappes captives quasiment infinies : dès lors, il est théoriquement difficile de pouvoir observer des comportements permanents au delà de quelques dizaines de km autour des champs captants.

Dans une telle configuration, le choix est très limité, puisqu'il n'existe aucune situation piézométrique représentant l'ensemble du système antérieurement à 1950, et que les forages de l'Oued Rhir et du Djerid prélèvent déjà à cette époque d'importants débits sur la nappe du Complexe Terminal, de l'ordre de **7 m³/s**. C'est donc cette période, **l'année 1950 assimilée à un état permanent, qui servira de référence pour le calage du modèle en régime permanent.**

Ce choix est conforté par la possibilité de tracé d'une carte piézométrique **sinon « observée »** partout, du **moins « reconstituée »** pour les deux nappes du CT et du CI sur l'ensemble du domaine (cf. fig. 29 et fig. 30).

IV.2 - Définition des critères de référence pour le calage en Régime Permanent

Les critères et les objectifs du calage vont consister à reconstituer aussi fidèlement que possible les variables d'état du système que constituent respectivement :

- les cartes piézométriques d'ensemble construites pour le CI et le CT, représentant un régime de quasi-équilibre daté d'environ 1950 .
- les valeurs piézométriques ponctuelles observées ou estimées récoltées dans le cadre des études réalisées au préalable (voir Tableau, en Annexe).
- le débit des résurgences naturelles jaugé à cette époque. Il s'agit des sources du Djérid et de Nefzaoua du CT en Tunisie, des sources de Ain Tawergha et Wadi Kaam en Libye pour la nappe du CT (la première alimentée en partie par drainance profonde en provenance du CI) ; et des foggaras algériennes pour le CI.

IV.3 – Principales modifications au cours du calage

Les modifications sont après résumées, par rapport aux valeurs initiales adoptées, se rapportent aux paramètres hydrodynamiques du modèle :

- Les transmissivités horizontales ont été modulées dans la zone frontalière entre Libye et Algérie-Tunisie pour diminuer le contraste brutal que présentaient les cartes de transmissivités issues respectivement des modèles ERESS et GEOMATH.
- La carte piézométrique de référence de la nappe du CT indique un faible gradient hydraulique au niveau du secteur Sud-Ouest(certes l'un des moins connus) que le modèle n'arrivait pas à reconstituer. La transmissivité a dû être portée là à **0.3 m²/s**.
- La perméabilité verticale du Cénomanien ainsi que celle du Sénonien lagunaire ont été augmentées dans le secteur libyen, notamment au niveau du graben de Hun où les couches semi perméables sont fracturées et deviennent beaucoup moins étanches.
- La perméabilité verticale du Cénomanien et du Sénonien lagunaire a été fortement diminuée dans la partie algéro-tunisienne sauf au niveau d'El Biod (Sud de l'Algérie) où les eaux du CI se déversent dans le Turonien à la faveur du système de failles d'Amguid.
- La transmissivité horizontale de la nappe du Turonien a été diminuée en Algérie-Tunisie car le drainage du CT par cette nappe demeurerait trop important.
- Une faille étanche (possible sur PM5) a été introduite au niveau du Graben de Hun afin de reproduire la rupture des courbes isopièzes dans ce secteur, notamment au CI. L'allure piézométrique a été modifiée mais sans rapport avec la carte piézométrique observée. La faille a par la suite été supprimée.
- La perméabilité verticale du Carbonifère a été augmentée dans les zones à faible épaisseur pour favoriser l'échange vertical entre le COD et le CI, et également entre le COD et le Turonien dans les zones (Jufrah) où le CI est absent.

IV.4 - Evaluation du Calage en Régime Permanent

IV.4.1 – Reconstitution des Cartes Piezometriques d'ensemble du CI et du CT

Pour évaluer la capacité du Modèle à reproduire au mieux l'état piezometrique régional de référence, il a été procédé :

- d'abord à la «**discrétisation** » (transformation des courbes en points) des courbes isopiezometriques dessinées fig.29 & 30,
- ensuite à l'interpolation du champ de valeurs obtenues sur l'ensemble du domaine de la nappe.

Enfin sur la même grille, à l'interpolation, sur le même domaine, des valeurs calculées au centre des mailles par le modèle.

La distribution des différences de niveau piezométrique [Calculé par le modèle - Observé] constitue un bon indicateur de « **fidélité régionalisée** » du modèle par rapport à la réalité-terrain. (cf. fig. 74 pour le CI et fig.75 pour le CT). Les résultats obtenus sont assez favorables : 70% de la superficie d'aquifère aussi bien CI que CT présentent des écarts inférieurs à 25m ! Il demeure certes des zones «rouges » où l'écart dépasse 75m, mais ce sont généralement des secteurs périphériques qui comportent peu ou pas de points d'observation, où le résultat de l'interpolation est lui même incertain et où il aurait été vain de s'acharner plus sur le calage : les piedmonts de l'Atlas et le Grand Erg Occidental en sont un exemple représentatif.

Fig. 74 : Ecart de calage en régime permanent du CI

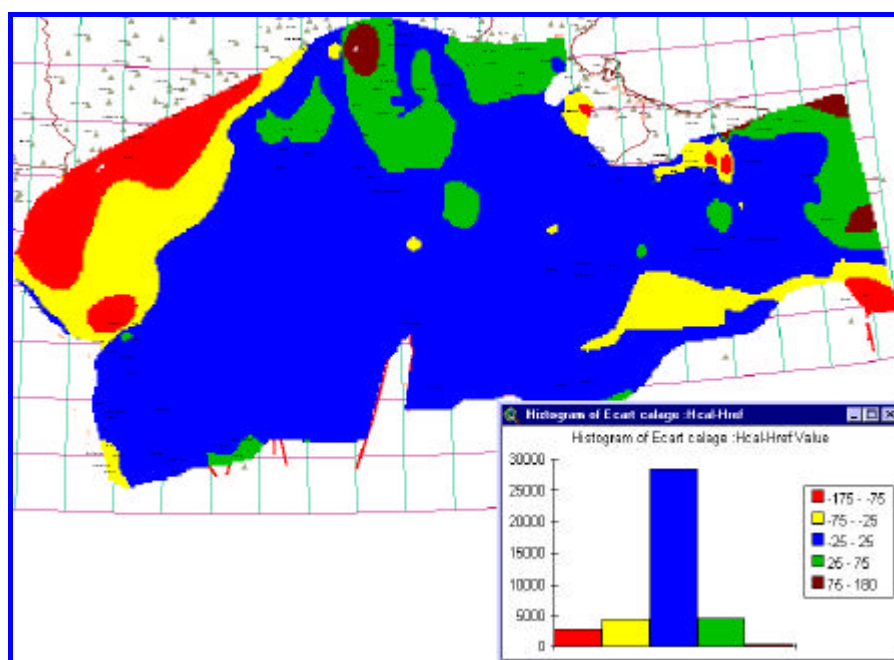
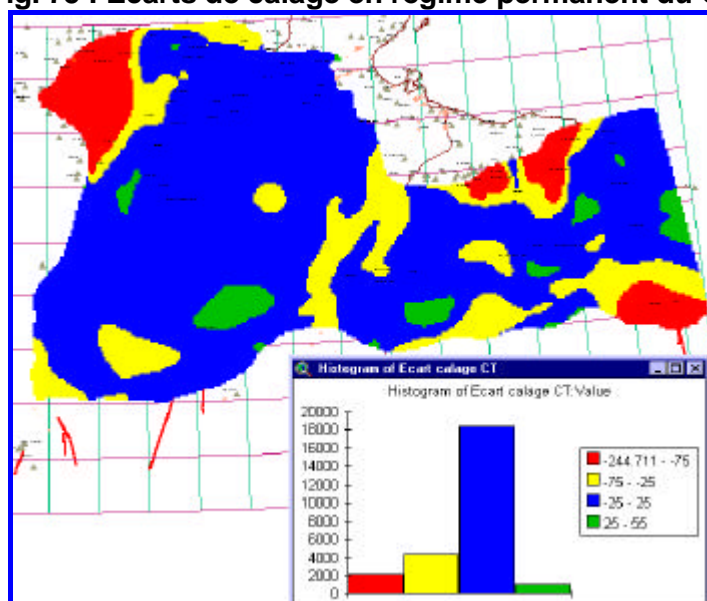


Fig. 75 : Ecart de calage en régime permanent du CT



La superposition des courbes isopiézométriques calculées et observées permet également de se faire une bonne idée de la capacité du modèle à « épouser » les formes des courbes dessinées. En effet, bien que la position de ces courbes dessinées ne soit pas d'une grande rigueur mathématique (elles sont généralement tracées au « jugé » par interpolation visuelle), leur forme traduit toute l'expérience et le savoir-faire de l'hydrogéologue qui les a tracées. 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* (voir fig.78 et 80) .

IV.4.2 – Reconstitution des hauteurs piezométriques aux points de contrôle

IV.4.2.1- Répartition spatiale des points de Contrôle

Comme le montre la figure 22, les points de contrôle piezométrique de la nappe du CI couvrent la quasi-totalité du domaine modélisé avec toutefois une plus faible densité au niveau du Grand Erg Occidental, du plateau du Tademaït, du secteur compris entre Hassi Messaoud et la frontière algéro-tunisienne ainsi que dans le sud du bassin de la Hamada El Hamra. Au niveau de la nappe du CT, les points d'observations piézométriques sont concentrés dans les zones d'exploitation : vallée de l'oued Rhir, El oued, secteur compris entre Hassi Messaoud et El Borma, Djérid, Nefzaoua, Ghadamès, Hun et Sirt. Ailleurs, l'absence de données piézométriques est totale (fig.23). Pour ce qui concerne la nappe du Turonien, les observations piézométriques se trouvent en Libye. En Algérie, un point unique dans le Sahara central a été observé au niveau d'un forage pétrolier à Hassi Messaoud, où l'eau présente une salinité de plus de 200 g/l et une forte température (Franlab, 1978). La cote piézométrique y a été corrigée par conversion de la hauteur de la colonne d'eau salée en hauteur d'eau douce-équivalente selon le principe de l'équilibre des pressions :

En un point de cote z les pressions p_1 et p_2 exercées respectivement par une colonne d'eau salée h_s et une colonne d'eau douce h_d s'écrivent:

$$p_1 = \rho_s \times g \times h_s$$

$$p_2 = \rho_d \times g \times h_d$$

Soit en égalisant les pressions :

$$h_d = \frac{\rho_s}{\rho_d} h_s$$

Des mesures de débit, de salinité et de pression à une cote de **-700 m** par rapport au niveau moyen des mers ont été réalisées dans les forages au CI réalisés par SONATRACH à Hassi Messaoud . L'eau prélevée présente une salinité de **210 g/l**, une température de **70° C** et une densité de **1.137** (Franlab, 1978). La charge hydraulique mesurée étant de **80 m**, la hauteur correspondante de la colonne d'eau dans le puits est alors de 780 m. Si l'on applique la relation ci-dessus, la hauteur de la colonne d'eau douce équivalente serait de 887 m, soit une charge hydraulique corrigée de **187 m**.

Fig. 76 : correction de l'effet de densité sur la hauteur piézométrique

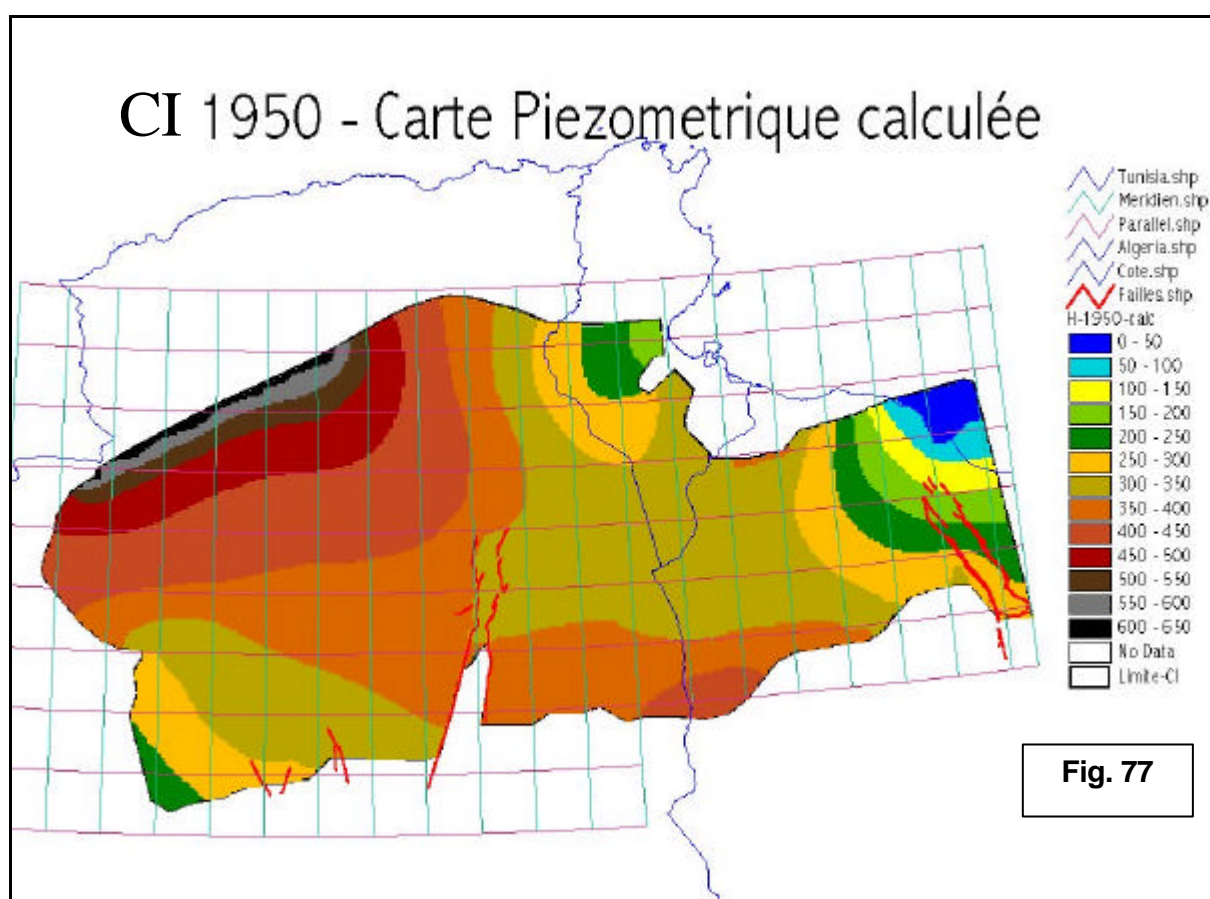
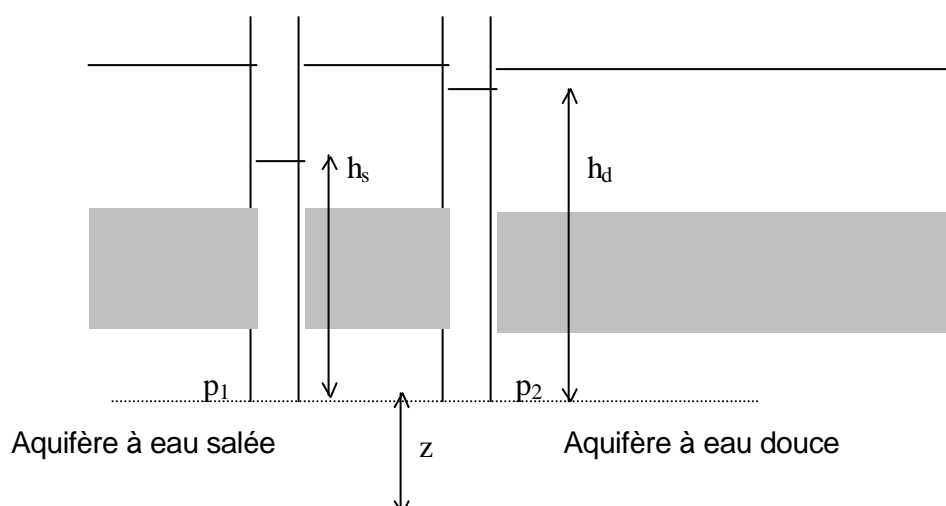


Fig. 77

Fig. 78 : CI – Régime Permanent – Courbes piezometriques calculées (en bleu) et courbes de référence tracées (en mauve)

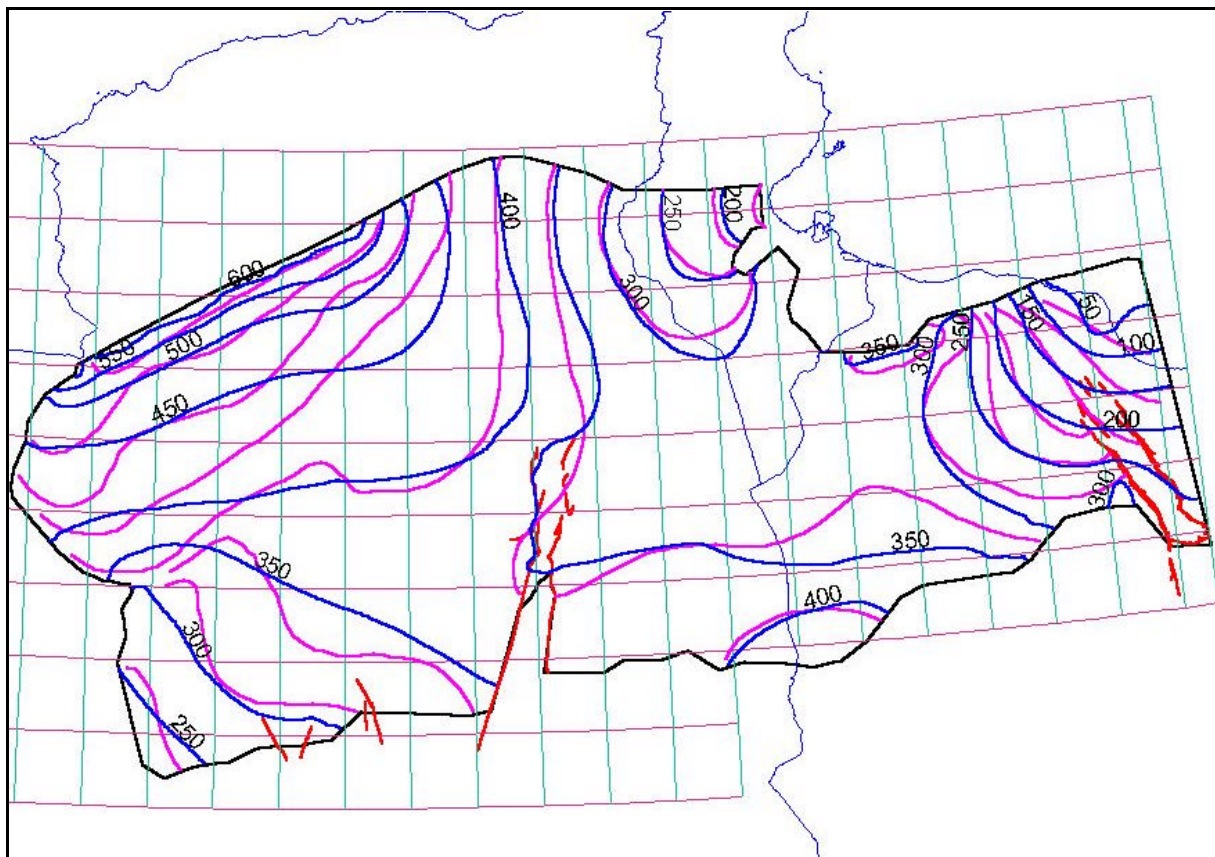


Fig. 79

CT - Piezometrie 1950 calculée

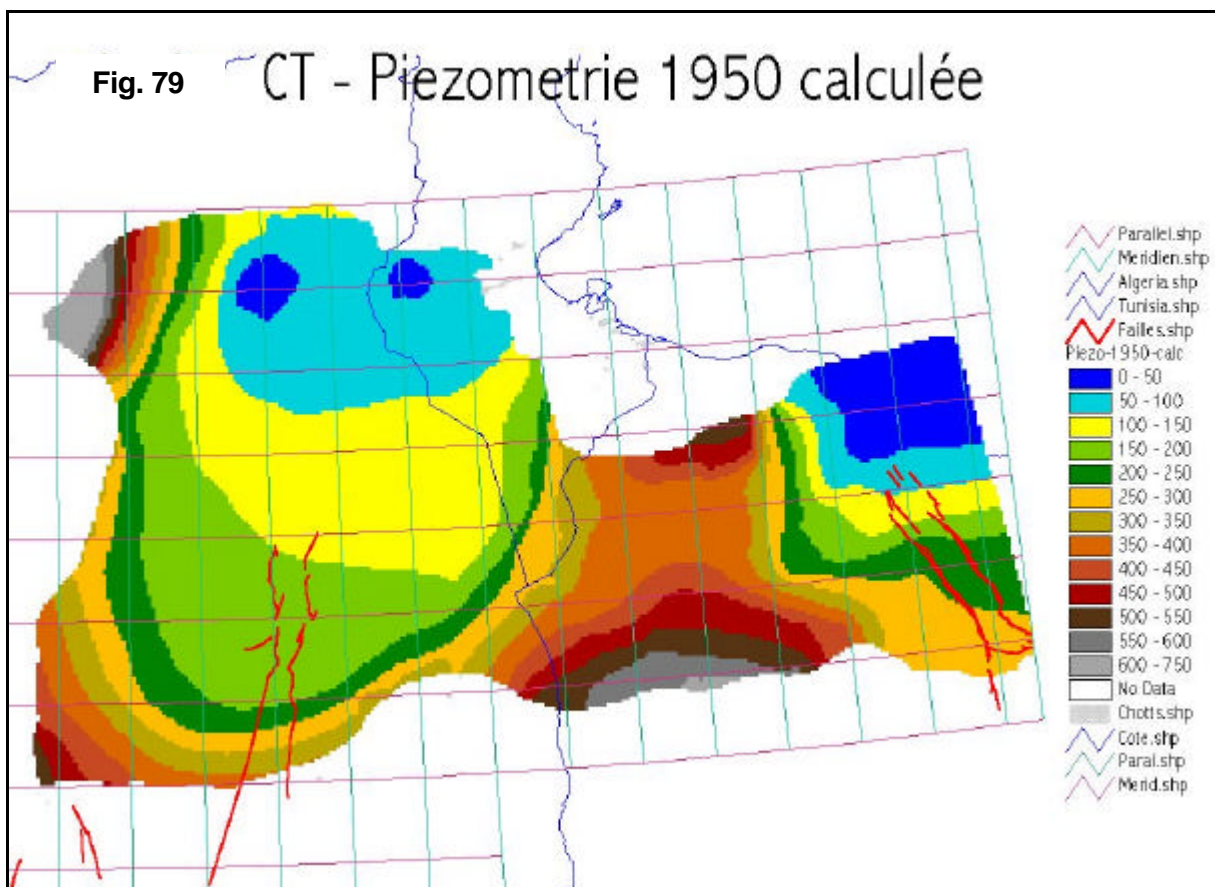
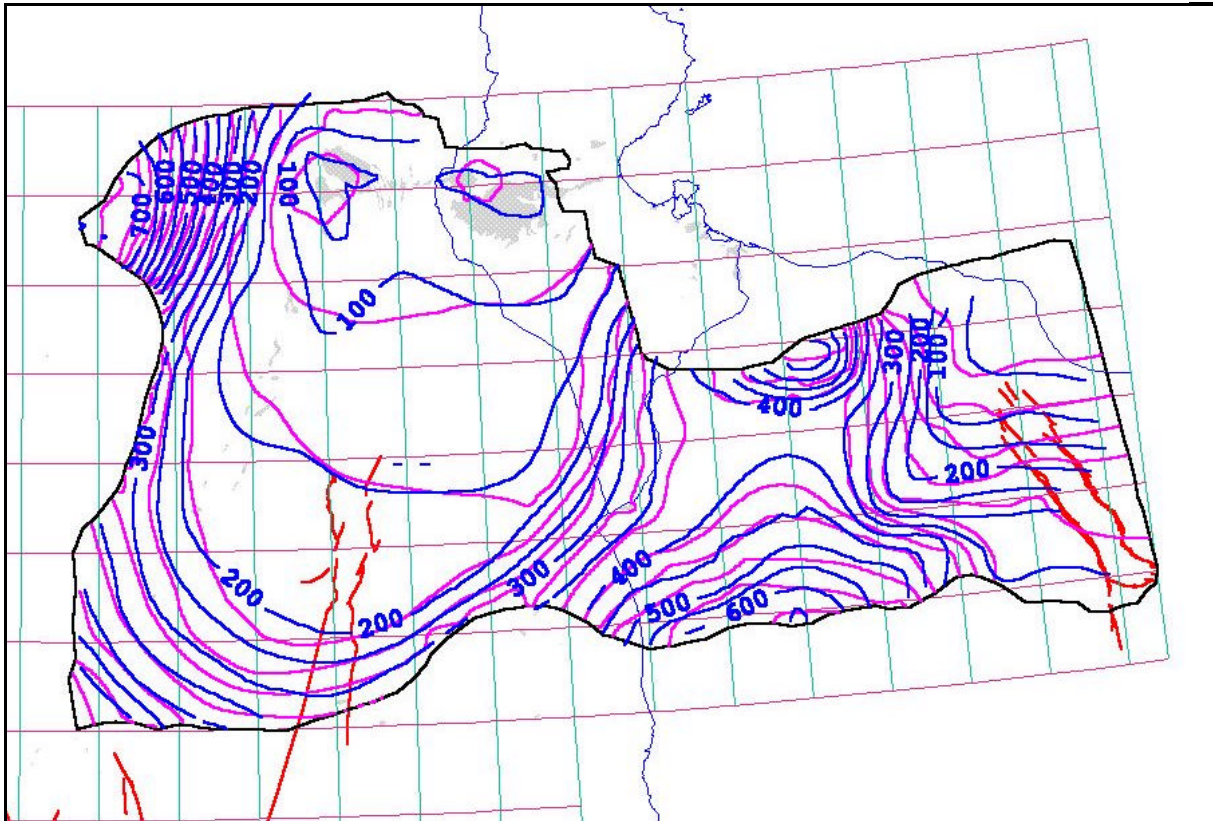


Fig. 80 : CT – Régime Permanent – Courbes piezometriques calculées (en mauve) et courbes de référence tracées (en bleu)



IV.4.2.2 - Dispersion spatio- temporelle des mesures

Dans le domaine algéro-tunisien, les données piézométriques s'étalent sur toute la période 1950-1970. Elles correspondent aux années 70-73 dans le secteur libyen, alors que le modèle est censé reconstituer un état observé en 1950. Une telle approximation peut être acceptée pour le CI dans la mesure où cette nappe était encore peu sollicitée par les prélèvements : cette période peut donc être considérée représentative d'un état stationnaire de la nappe. Quant à la nappe du CT, l'exploitation par forages y était déjà relativement élevée en 1950 ($\# 7.m^3/s$), et concentrée dans le secteur des Chotts algéro-tunisiens. Toutefois et faute de mesures ponctuelles antérieures à 1950, on pourra considérer que les données archivées ne reflètent pas d'abaissement piézométrique régional significatif. En Libye, le problème de la représentativité du régime permanent se pose avec moins d'acuité.

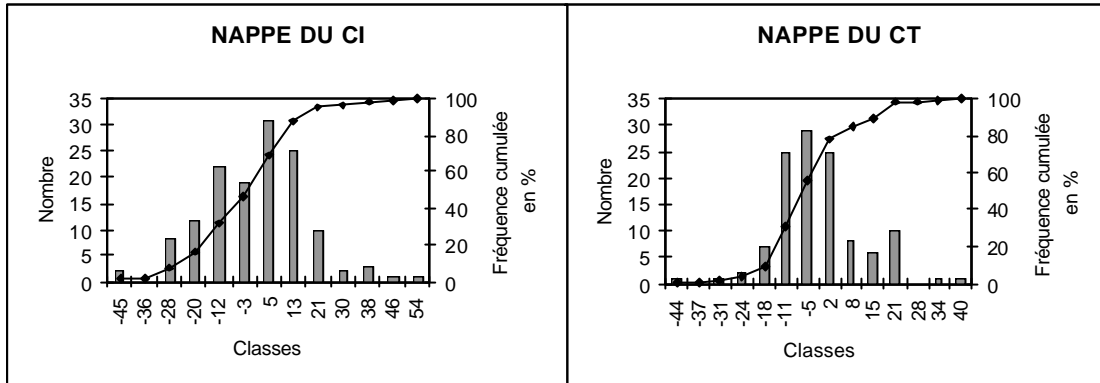
IV.4.2.3 - Analyse des écarts de calage sur les niveaux piezometriques ponctuels

La confrontation des résultats piézométriques calculés sur le Modèle avec les valeurs observées indique, respectivement pour les nappes du CT, du CI, et du Turonien, des écarts moyens de 0.4. m, 4.8. m et 9.5. m (Tableau 15). Les points où l'écart est inférieur à 10 m en valeur absolue représentent un effectif de 70 % pour le CT et 50% pour le CI. La concordance est moins bonne pour le Turonien où l'écart est supérieur à 10m sur 70% des points.

Tableau 15 – Ecart de calage en régime permanent

Aquifère	Nombre de points	Moyenne (m)
CI	136	4.8
CT	118	0.4
Turonien	23	9.5

Histogrammes de distribution des écarts de calage en régime permanent



IV.4.3 – Reconstitution des Débits des Sources et Foggaras

Tableau 16- Débits des émergences observés et calculés par le modèle en 1950

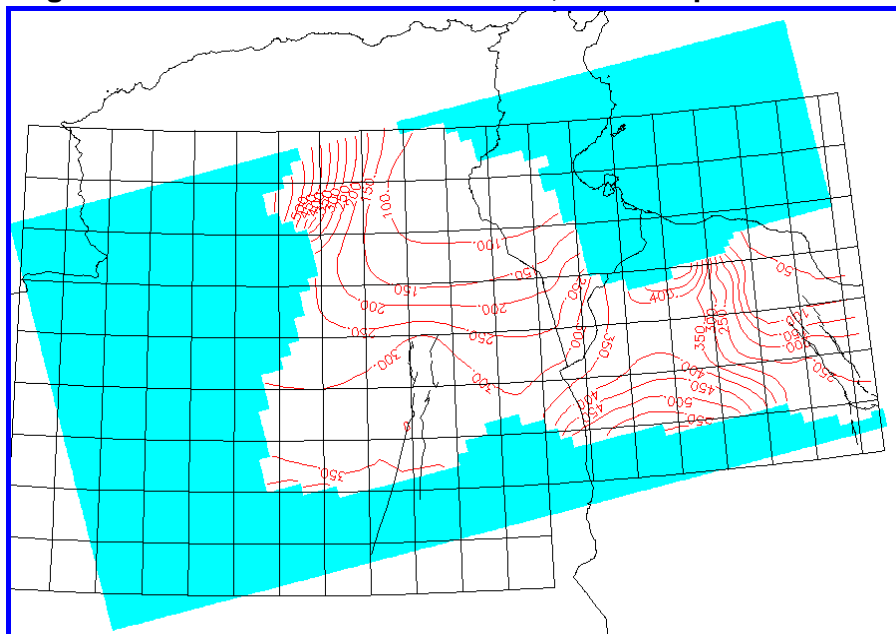
Nom	Débit observé (l/s)	Débit calculé (l/s)
Ain Tawergha	2130	1995
Wadi Kaam	360	269
Oued Tozeur	697	690
Corbeille de Nefta	543	569
El Hamma- El Oudiane	310	325
Nefzaoua	468	476
Foggaras	3665	3598

IV.5 - Résultats du Calage en Régime Permanent

IV.5.1 - L'allure générale des écoulements calculés par le modèle

Les fig 77 et 79 présentent les cartes calculées pour le CI et le CT. La fig 81 indique un premier essai de représentation des écoulements dans la nappe du Turonien (sorties PM5). Etant données les très fortes salinités dans certains secteurs du Turonien (au droit du champ de Hassi Messaoud notamment), toutes les charges hydrauliques sont ici exprimées en charges-équivalentes d'eau douce. A l'examen de cette carte, on peut remarquer que la position des isopièzes paraît acceptable en Libye. Dans le Sahara algérien et notamment à Hassi Messaoud unique valeur de référence disponible de la région : 187m (équivalent eau douce) pour 189.8m calculé par le modèle, le Turonien acquiert une configuration piézométrique intermédiaire entre le CI et le CT.

fig.81 : Piézometrie 1950 du Turonien, calculée par le modèle



IV.5.2 - Les Paramètres Hydrodynamiques du Modèle

Les fig. 82 et 83 indiquent la répartition des Transmissivités après calage dans le CI et le CT.

Fig. 82 : CI - Transmissivités ($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

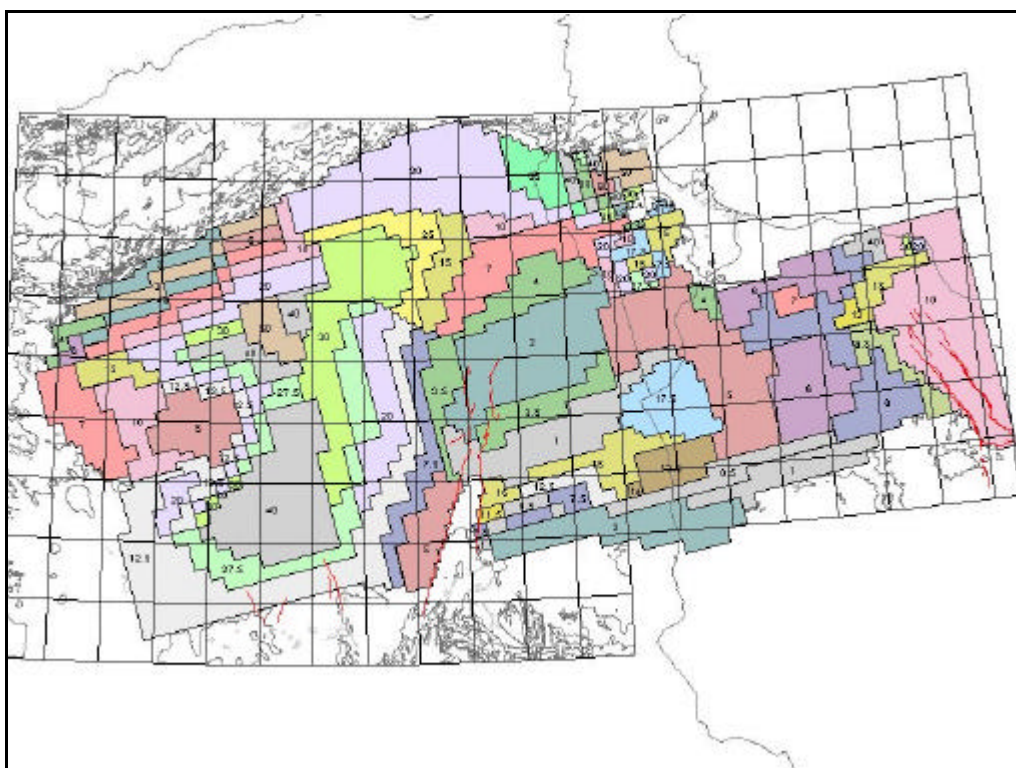
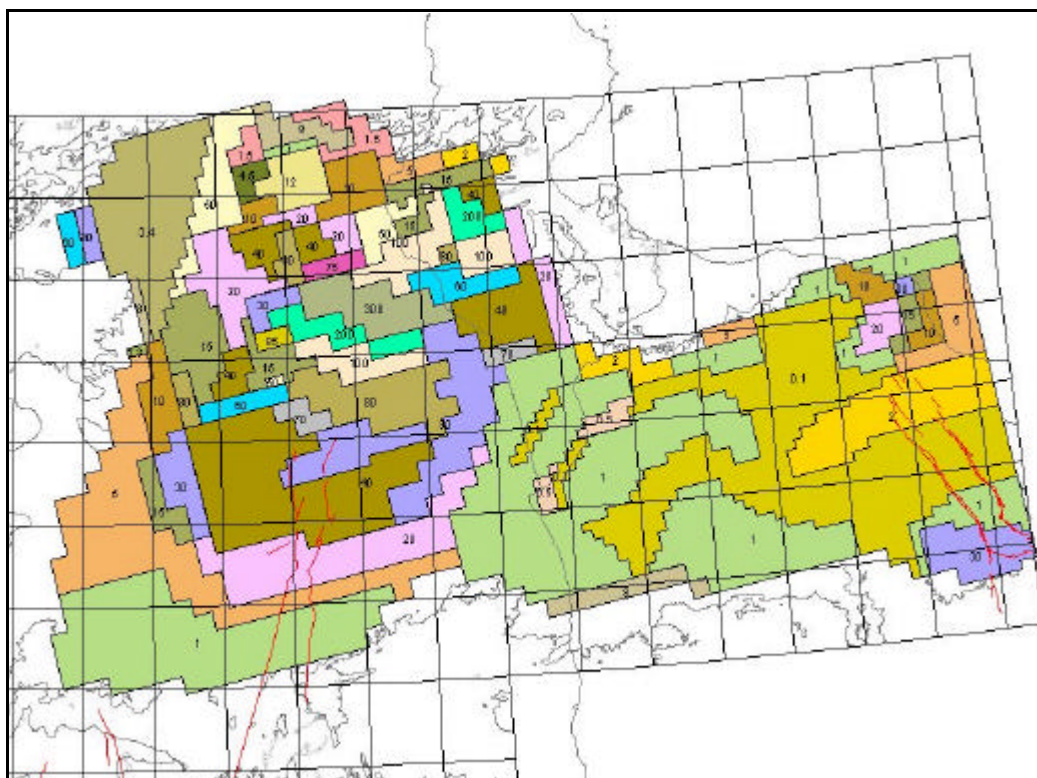


Fig. 83 : CT - Transmissivités ($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)



Les fig 84 et 85 indiquent la répartition des Coefficients de Drainance ($K_v/\text{épaisseur du semi-perméable}$) à travers respectivement : Le Sénonien Lagunaire (CT/Turonien) et le Cénomaniens (Turonien/CI).

Fig. 84 : coefficients de Drainance du Sénonien lagunaire [s^{-1}]

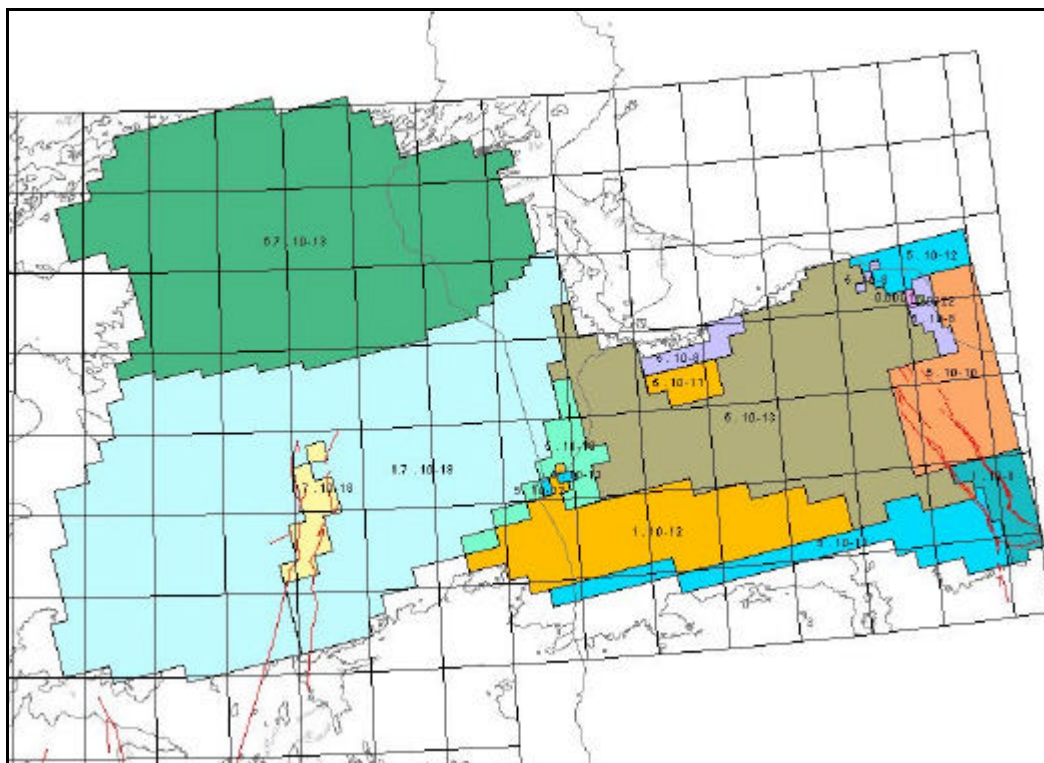
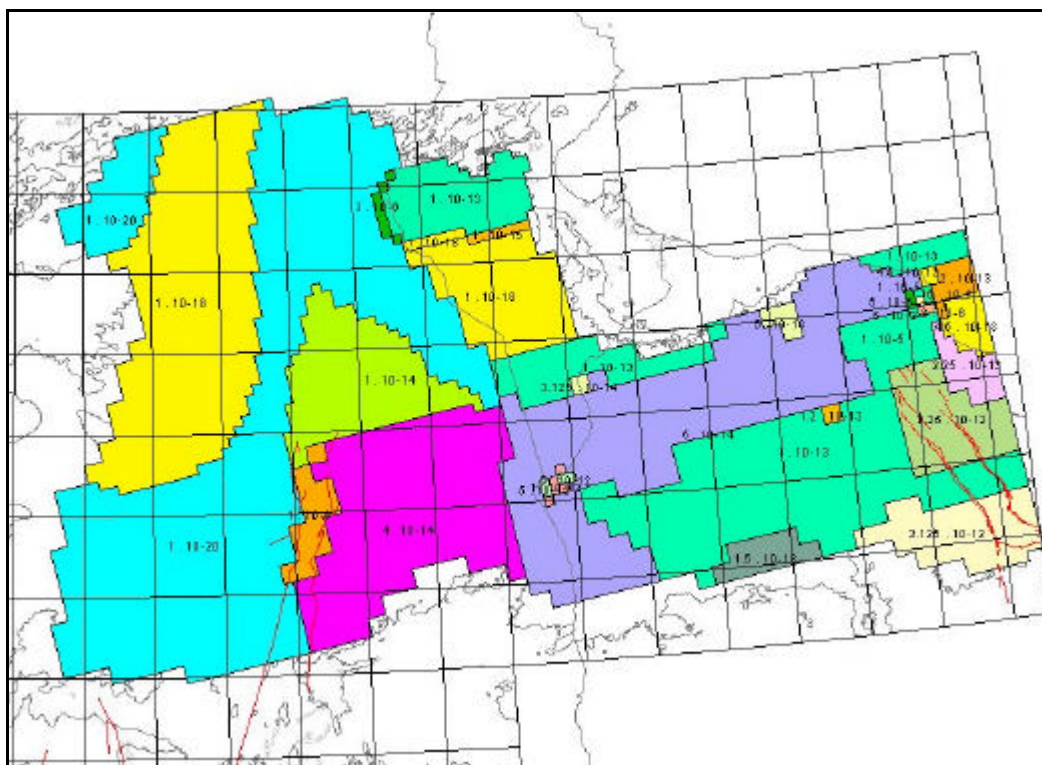


Fig. 85 : coefficients de Drainance du Cénomanien [s⁻¹]



IV.5.3 – Le Bilan en Eau du Multicouche Saharien

Les termes du bilan : alimentations par infiltration, exutoires naturels, échange vertical par drainance entre les différentes couches aquifères, pompages, sont présentés dans le tableau 17. On peut remarquer que les débits calculés aux exutoires naturels diffus, dont les valeurs sont difficilement mesurables (évaporation dans les chotts et les sebkhas, fuites à la faveur de failles, percolation profonde) sont du même ordre de grandeur que ceux calculés par les différents modèles antérieurs. L'évaporation des eaux du CT dans les chotts et sebkhas algéro-tunisiens (8.7m³/s) est comparable à celle calculée par le modèle ERESS (9m³/s). Le débit de l'exutoire tunisien, fixé aux alentours de 3.6m³/s par les études sur le bilan de la nappe de la Djeffara tunisienne (Unesco, 1972 ; Pnud, 1985) a également été reconstitué par le modèle. L'alimentation par infiltration est respectivement de l'ordre de 18m³/s et 10. m³/s pour les nappes du CT et du CI. Sa répartition régionale indique bien que l'essentiel de l'alimentation de la nappe du CI (Tableau 18) provient de l'Atlas saharien.

Tableau 17 – Bilan du SASS calculé en 1950 (m³/s)

	CT	CI	Grès Sup	SASS
Entrées m ³ /s				
Alimentation totale	18.2	9.4		27.6
Apport Cambro-Ordovicien		2.0		2.0
Drainance Haut	-	0.5		[0.5]**
Drainance Bas	5.4	-	0.4	[5.8]**
Total	23.6	11.9	0.41	35.9
Sorties m ³ /s				
Chotts & Sebkhas				
▷ Tunisie	5.95	-	0.26	6.2

	CT	CI	Grès Sup	SASS
▷ Algérie	2.7	0.2		2.9
▷ Libye	0.2	-		0.2
Golfe de Syrte	0.6	0.8		1.4
Exutoire tunisien	-	3.1		3.1
Sources ou Foggaras				
▷ Tunisie	2.0	-		2.0
▷ Algérie	-	3.6		3.6
▷ Libye	2.3	-		2.3
Pompages	7.5	0.5		8.0
Drainance Haut	-	3.7	0.15	[3.85]**
Drainance Bas	2.4	0.0		[2.4]**
Total	23.6	11.9	0.41	35.9

** la drainance représente des flux internes au système, flux à somme nulle

Au niveau des apports à la nappe du CT, la contribution des reliefs de la bordure occidentale (de l'Atlas saharien jusqu'au plateau du Tademaït) est importante. L'alimentation en provenance du Dahar et du Djebel Nafoussa représente plus du 1/3 des apports au CT.

Tableau 18 - Alimentations par infiltration en régime permanent

Nappe du CI	Débit calculé (l/s)
Atlas saharien	7540
Dahar et Dj.Nafussa	1580
Tinrhert et Adrar B.Drich	290
Total	9410
Nappe du CT	Débit calculé (l/s)
Atlas saharien	3775
Dahar et Dj.Nafussa	6705
Limite ouest	2450
Limite sud-ouest	980
Tademaït	2585
Sud Libye	1060
Nord des chotts algériens	305
Nord des chotts tunisiens	150
Contribution Calc.Eocènes	200
Total	18200

V - LE CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE

V.1 – Définition des Historiques de référence et des critères de calage du modèle

V.1.1 - Conditions initiales et aux limites et Historiques de référence

Les conditions initiales correspondent à l'état piézométrique calculé en 1950, représentant un régime permanent. Sur toutes **les limites d'alimentation, les conditions de potentiel**

imposé sont transformées en conditions de débit imposé, égal à celui calculé sur le modèle au cours du régime permanent initial.

En ce qui concerne la période de référence à adopter pour le calage du modèle en régime transitoire, il a été tenté dans une première phase d'effectuer le calage sur la période 1950-1981, puis de réaliser la validation du modèle sur la période restante 1982-2000. Malheureusement, ce protocole s'est très vite avéré difficile à réaliser, pour les raisons suivantes :

→ **Débits de prélèvements** : à la fin des années 70, ils représentent à peine le 1/3 des prélèvements actuels, et la plus forte accélération des débits se situe entre 1980 et 1995, aussi bien au CI qu'au CT (cf. fig. 56). Il aurait été certainement préjudiciable que le modèle ne pût être calé sur cette accélération précisément .

→ **Niveaux piezométriques** : c'est à partir des années 80 que l'on observe la plus forte densification des mesures de niveaux, notamment en Tunisie et en Libye. Quant à l'Algérie, c'est précisément au cours des années 90 qu'y furent réalisés les grands inventaires sahariens : étant donnée la rareté des mesures de niveaux enregistrées au préalable, ces inventaires ont permis d'acquérir le complément nécessaire à la constitution de séries piezométriques.

V.1.2- Les Paramètres structuraux d'initialisation du calage

Les cartes de répartition des valeurs initiales des coefficients d'emmagasinement sont déterminées comme suit :

→ Les zones où la nappe est libre sont déterminées à partir des cartes d'affleurements des formations géologiques du CI et du CT, ainsi que par « soustraction » entre la cote du toit de la nappe et la cote de la surface piezométrique. Ce dernier calcul, effectué par cartographie automatique, fournit les résultats fig. 42 et 43. A ces zones, une porosité située entre **8%** et **20%** est initialement attribuée, en cohérence avec les distributions calculées par les modèles antérieurs (ERESS, GEOMATH, GEFLI).

→ dans les zones où la nappe est captive, les valeurs obtenues par les modèles qui ont précédé le SASS ont été prises comme référence :

- **Nappe du CT** : coefficient d'emmagasinement initial égal à 10^{-3} en Libye, et en moyenne à 2×10^{-3} ailleurs sauf dans la région Nord des chotts algériens où il est égal à 5×10^{-3} .
- **Nappe du CI** : il varie entre 4×10^{-4} dans la région Nord des chotts algériens et 10^{-3} dans le secteur méridional du domaine algéro-tunisien. Il est égal à 10^{-4} en Libye sauf dans le secteur de Ghadamès où il prend une valeur de 10^{-3} .
- **Nappe du Turonien** : une valeur homogène de 1.5×10^{-4} est adoptée au démarrage pour l'ensemble du domaine.

V.1.3 - Les critères du calage en Transitoire

C'est d'abord la bonne restitution des séries de niveaux historiques de référence. Les rabattements (variations de niveaux) calculés et ceux observés dans les points de contrôles correspondants ont été comparés.

Les critères de calage consistent également à bien restituer les séries de débits mesurés aux exutoires : Sources du Djerid et Nefzaoua, Ain Tawargha et Kaam, débits des foggaras.

V.2 – Degré de connaissance des Historiques de Prélèvements

V.2.1 - Exploitation des Forages en Algérie, Tunisie et en Libye

La base de données du SASS rend compte des historiques individuels par forage (environ 3200 forages exploités ou ayant été exploités), historiques qui ne sont pas évidemment reproduits dans le présent rapport. La Libye forme un cas singulier, dans la mesure où les prélèvements n'ont pu être affectés individuellement à des forages mais à des Groupes de Pompages. Ceci entraîne parfois une forte concentration des pompages (et des rabattements en conséquence) dans des points singuliers et ce, malgré l'éclatement des groupes en sous-groupes dont la dimension ne dépasse pas celle d'une maille élémentaire du modèle.

V.2.2 - Débits des Sources et Foggaras

Le tab.19 présente l'évolution, sur la période 1950-2000, du débit des sources du Djérid et de Nefzaoua en Tunisie, ainsi que celui de Ain Tawargha en Libye.

Quant aux évolutions des débits des foggaras, les derniers inventaires réalisés par l'ANRH en 1998 laissent indiquer des variations (diminutions) significatives des débits des foggaras. En effet, l'ensemble des foggaras aujourd'hui actives totalisent un débit recensé égal à **2.7m³/s**, alors que l'inventaire effectué en 1960, cité par l'ERESS, recensait un débit total égal à **3.6 m³/s**. Cette évolution représente une baisse générale de **25%**.

Tableau 19 – Débit des Sources Observé²⁷ sur la période 1950-2000 (l/s)

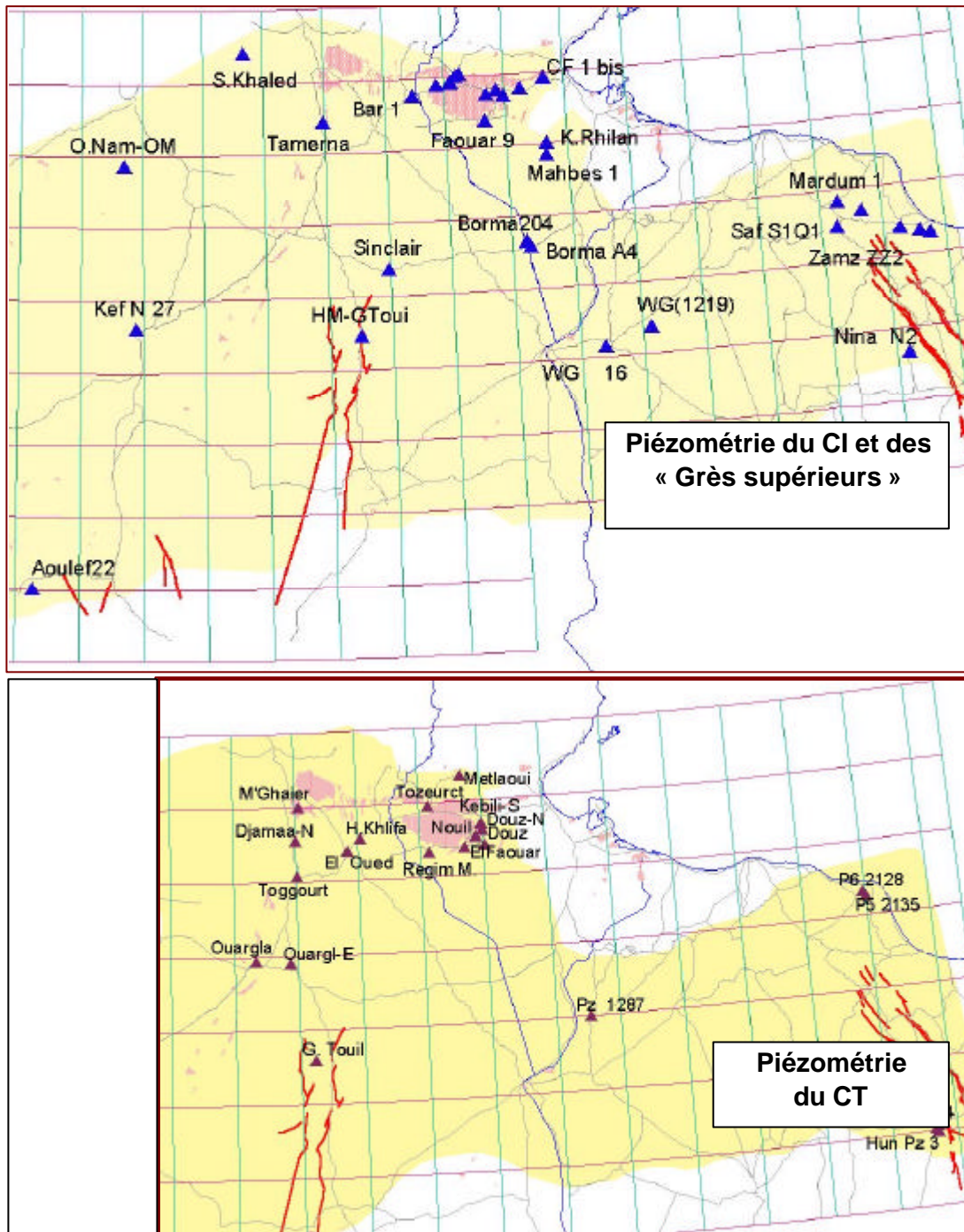
	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Sources Tunisie	2.02	1.76	1.52	0.76	0.02	0.01
Ain Tawargha	2.13	2.06	2.00	1.87	1.83	1.77
Foggaras	3.6					2.7

V.3 – Les chroniques de Niveaux Piezométriques de références

Les séries piézométriques reconstituées, et notamment celles retenues pour évaluer le calage du modèle, sont présentées en détail dans l'Annexe [Annexe : Table 3 & Table 4]. La partie évaluation du calage en transitoire développée plus loin s'y réfère. La carte de situation des points de contrôle retenus pour l'évaluation du calage est présentée fig. 86.

²⁷ les valeurs du tableau n'ont pas toutes été l'objet de mesures ; certaines ont dû être reconstituées.

**Fig. 86 : Piézométrie retenues pour le calage transitoire du CI,
des « Grès supérieurs » et du CT**



V.4 – Les étapes du calage en Transitoire

V.4.1 - Ajustement des paramètres du modèle

Les principales modifications auxquelles il a été procédé au cours du calage, notamment pour ce qui concerne le passage des coefficients d'emmagasinement initiaux à ceux retenus (cf. fig. 87 et 88) sont résumés ci-après:

- Réduction du coefficient d'emmagasinement nappe libre du CI de 0.2 à 0.05 dans la région d'Adrar (Sud-Ouest), qui accuse un abaissement piézométrique de 1 à 4.5 m (piézomètre Aoulef) et que le modèle n'arrivait pas à restituer.
- Adoption d'une faible valeur de S du CI (4×10^{-4}) au pied de l'Atlas saharien pour reconstituer l'abaissement observé au niveau du piézomètre Oued Mehéguène. Cette faible valeur (caractéristique de nappe captive) est en cohérence avec l'enfouissement du Continental Intercalaire, au pied de l'Atlas, sous le Cénomanien.
- Forte réduction de S dans le Djérid et dans le chott Fedjej pour restituer le rabattement observé dans ces régions.
- Adoption de fortes valeurs de S du CT et du Turonien dans le secteur libyen, au Nord-Est, essentiellement le secteur amont de Tawergha. Cette modification s'est rendue nécessaire pour obtenir un débit calculé de Ain Tawergha cohérent avec la valeur jaugée en 2000.
- Réduction de S du CT en nappe libre pour se situer entre 10^{-2} à 8×10^{-2} , les valeurs initiales qui atteignaient 0.15 dans la Nefzaoua sont élevées induisaient une sous-estimation du rabattement de la nappe.
- Augmentation de S du CT dans le secteur de Hun dans une fourchette de 2×10^{-3} à 7×10^{-3} pour atténuer le rabattement excessif calculé qui atteignait une centaine de mètres en 2000 alors que les piézomètres J3 et Pz 3, Pz4 et Pz5 indiquent un rabattement de 30 m en moyenne entre 1974 et 1990. Cette modification n'ayant pas été suffisante pour améliorer les résultats piézométriques, la transmissivité du CT a alors été augmentée à 3×10^{-2} m²/s dans cette zone. Cette forte valeur est compatible avec celles calculées par GEOMATH.

V.4.2 - Evaluation du Calage en Transitoire :

V.4.2.1- Restitution des Historiques Piezometriques

V.4.2.1.1- Continental Intercalaire en Algérie (fig.90)

Les évolutions piezometriques dans les huit points suivants ont été retenus et devant servir de critère final du calage en transitoire :

→ Kef n°27; → Sinclair; → Gassi Touil-Nezla ; → Tamerna
→ Bou Aroua; → Oued Mehéguène ; → Sidi Khaled ; → Aoulef 22

V.4.2.1.2- Continental Intercalaire en Tunisie (fig.89)

Les points de référence retenus sont :

→ El Borma A4 ; → El Borma 204 ; → Ksar Ghilane ; → Mahbes1
→ Chott Fedjaj CF1bis ; → Bhaier CI9 ; → Mansoura CI9 ; → EL Faouar 9

V.2.2.1.3 - Continental Intercalaire en Libye (fig.91)

Le réseau libyen du CI comprend les points

→ Sawfujin SIQ1; → Nina N2 ; → Mardum 1; → Zamzam ZZ2 ;
→ Tawurgha 3.83 ; → Bay el Kebir BAK3 ; → Ghadames MW1219 ; → Ghadames WG16

V.2.2.1.4 - Nappe des Grès Supérieurs (fig.92)

→ Tozeur1 ; → Tozeur2 ; → Degache3 ; → Nefta CI1 ;
→ Nefta CI2 ; EL Hamma CI1bis ; → EL Hamma CI2.

V.2.2.1.5 - Complexe Terminal en Algérie, Tunisie et Libye

Les fig 93 à 95 rendent compte des restitutions piézométriques après calage du modèle .
Les points retenus comme points de contrôle (ou encore Courbes de Synthèse d'un Groupe de Piézomètres) du calage transitoire du CT sont :

- **En Algérie :**

→ Djemaa Nord ; → M'Raier ; → Gassi Touil ; → Hassi Khlifa
→ EL Oued ; → Toggourt ; → Ouargla ; → Ouargla Est .

- **En Tunisie :**

→ Rejim Maatoug ; → Metlaoui ; → Tozeur ; → El Faouar
→ Douz Tarfaïet ; → Nouil ; → Douz EL Hsay ; → Kebili Sud

- **En Libye :**

→ PZ3, PZ4, PZ5, J3 dans le secteur de Soknah - Hun
→ Zamzam P5 2135 ; → Zamzam P6 2128.

V.2.3- Restitution des Débits des Sources

La bonne restitution de l'évolution du débit des sources : Sources de Tunisie, Ain Tawargha, Foggaras d'Adrar, constitue également un critère d'appréciation du calage du modèle, que l'on peut évaluer par l'examen du tableau suivant :

Restitution du Débit des Sources par le Modèle (m3/s)								
Sources Tunisie					Aïn Tawergha		Foggaras	
Année	Djerid	Nefzaoua	Tot.calculé	mesuré	calculé	mesuré	calculé	mesuré
1950	1.550	0.468	2.018	2.018	1.995	2.127	3.598	3.600
1955	1.554	0.460	2.014		1.996	2.095	3.598	
1960	1.531	0.446	1.976	1.764	1.997	2.063	3.603	
1965	1.509	0.441	1.949		1.997	2.032	3.618	
1970	1.424	0.418	1.842	1.521	1.996	2.000	3.608	
1975	1.219	0.374	1.593		1.989	1.902	3.618	
1980	1.021	0.298	1.318	0.764	1.964	1.873	3.634	
1985	0.668	0.214	0.882	0.020	1.876	1.841	3.582	
1990	0.167	0.084	0.251		1.750	1.832	3.495	
1995	0.074	0.000	0.074	0.010	1.663	1.810	3.334	
2000	0.012	0.000	0.012		1.613	1.775	3.151	2.700

VI - RESULTATS DU CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE

VI.1- Distribution des coefficients d'emmagasinement

Dans le Complexe Terminal

Le coefficient d'emmagasinement S d'après calage varie de 10^{-3} à $7 \cdot 10^{-3}$ en nappe captive et de 0.01 à 0.08 en nappe libre. En nappe captive, les plus faibles valeurs sont au Nord des chotts ($5 \cdot 10^{-4}$). Dans le Djérid, S est égal à 10^{-3} . Il est en moyenne de $5 \cdot 10^{-3}$ dans la vallée de l'oued Rhir. En Libye, il varie entre 10^{-3} et 0.01. De fortes valeurs sont affichées au niveau du secteur de Hun et dans le golfe de Syrte et les faibles valeurs se localisent à Hamada Al Hamra. Dans le secteur de Hun, S se situe entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $7 \cdot 10^{-3}$. Sur les affleurements de Tunisie (Dahar, extrême sud, Drâa Djérid), S varie de 0.02 à 0.025. Il est égal à 0.08 sur les affleurements de Djebel Nafoussa. Au niveau du Grand Erg occidental, S est égal à 0.025. A Gassi Touil le modèle rend compte d'une valeur de 0.002 à 0.01. Sur le piémont de l'Atlas et les monts du Mزاب, la valeur de S est égale à 0.025. Il varie entre $2 \cdot 10^{-3}$ et 0.03 dans la Nefzaoua.

Dans le Turonien

Le coefficient d'emmagasinement en nappe captive est égal à 10^{-6} dans le domaine algéro-tunisien. En Libye, il est égal à $1.5 \cdot 10^{-4}$ sur tout le domaine excepté le secteur de Hun (10^{-3}) et le bassin de Sirte ($6 \cdot 10^{-3}$). Sur les affleurements du Dahar et le Nord de la Libye où la nappe est libre, S est égal à 0.08.

Dans le Continental Intercalaire (fig. 88)

Le coefficient d'emmagasinement captif se situe en moyenne aux alentours de 10^{-3} dans les zones d'exploitation de Ouargla, El Oued et à Ghadames. Il est faible sur le territoire tunisien. Il se situe entre 10^{-5} et $2 \cdot 10^{-5}$ au Djérid et dans les champs captants du Fedjej. Il est égal à $5 \cdot 10^{-5}$ dans la Nefzaoua et l'extrême sud. En Libye, les faibles valeurs sont obtenues dans le secteur de Hun (10^{-5}). Le coefficient d'emmagasinement est également faible dans la région Nord des chotts tunisiens et algériens (10^{-5}). Au sud de l'Atlas saharien, il est égal à $4 \cdot 10^{-4}$. A Hamada Al Hamra, il est calculé à 10^{-4} . En nappe libre, les valeurs ajustées sur le modèle varient entre 0.001 à 0.2. Les valeurs les plus élevées se localisent dans le plateau de Tinrhert. Les faibles valeurs sont obtenues au pied du Dahar. Il est égal à 0.05 dans la région d'Adrar, du Gourara et de Timimoun ; et à 0.08 à Djebel Nafoussa. Il se situe entre 0.07 et 0.1 dans le Grand erg occidental. Dans les Grès Supérieurs, le coefficient d'emmagasinement est uniforme et égal à 10^{-5} .

Fig. 87 : CT – Coefficients d’emmagasinement après calage

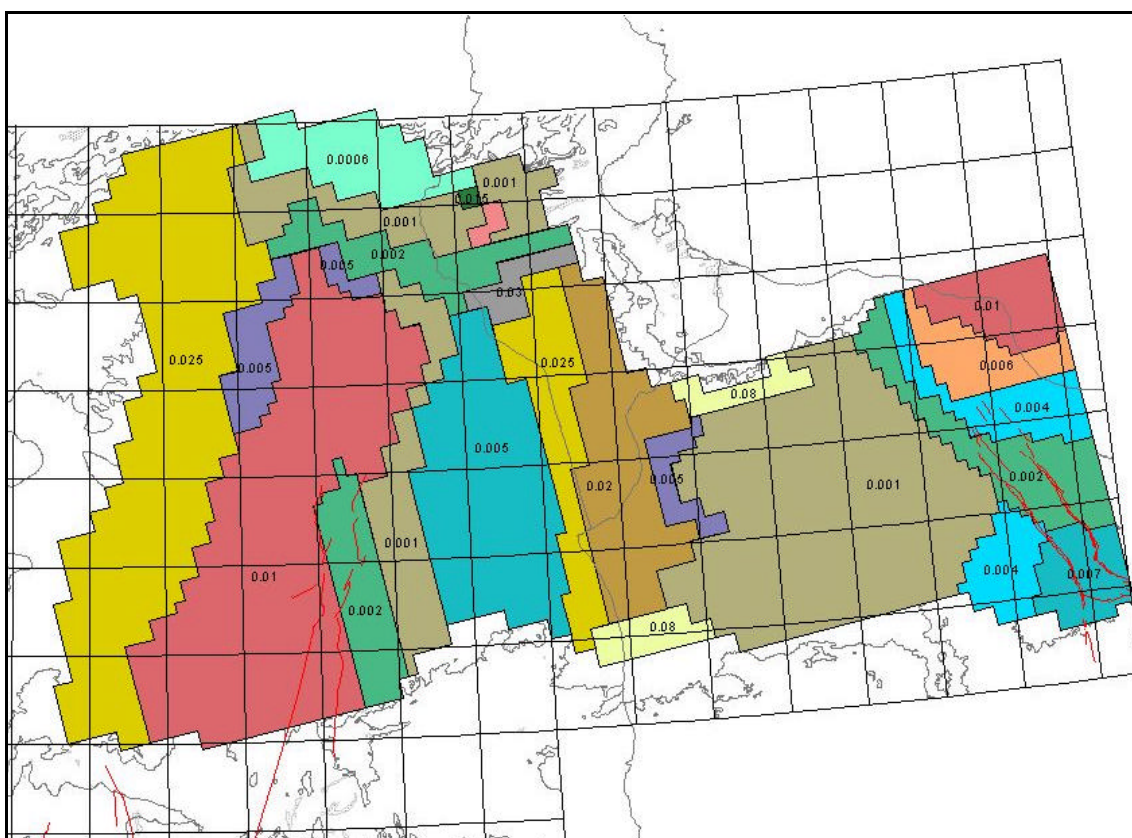


Fig. 88 : CI – Coefficients d’emmagasinement après calage

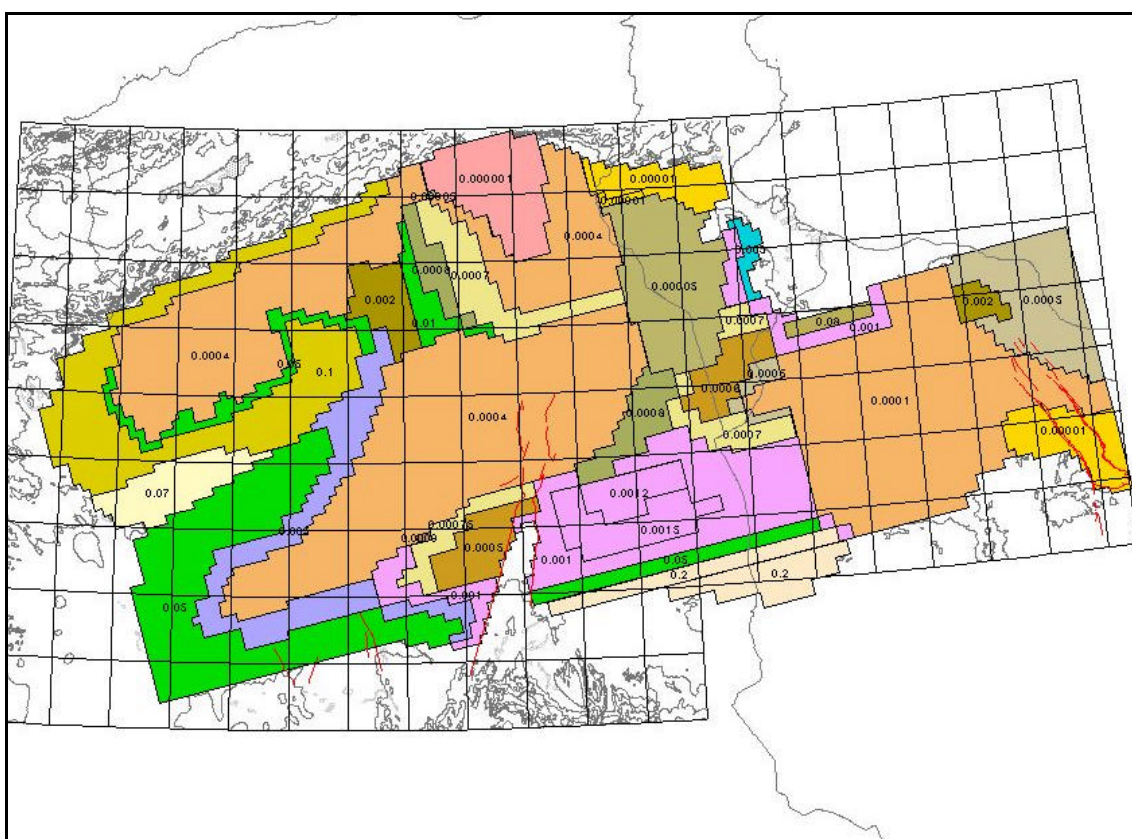


Fig. 89 : CI - Tunisie

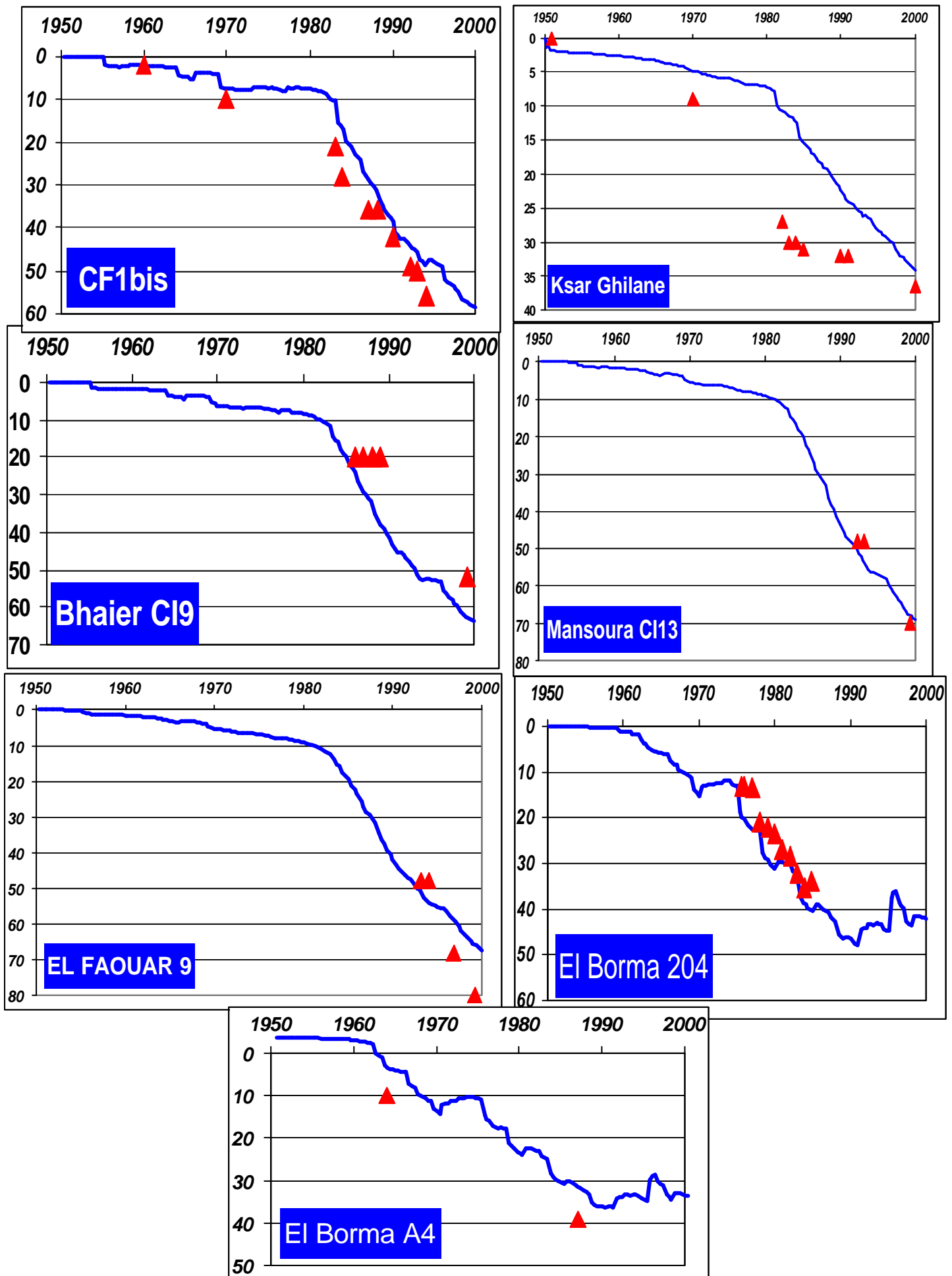


Fig. 90 : CI - Algérie

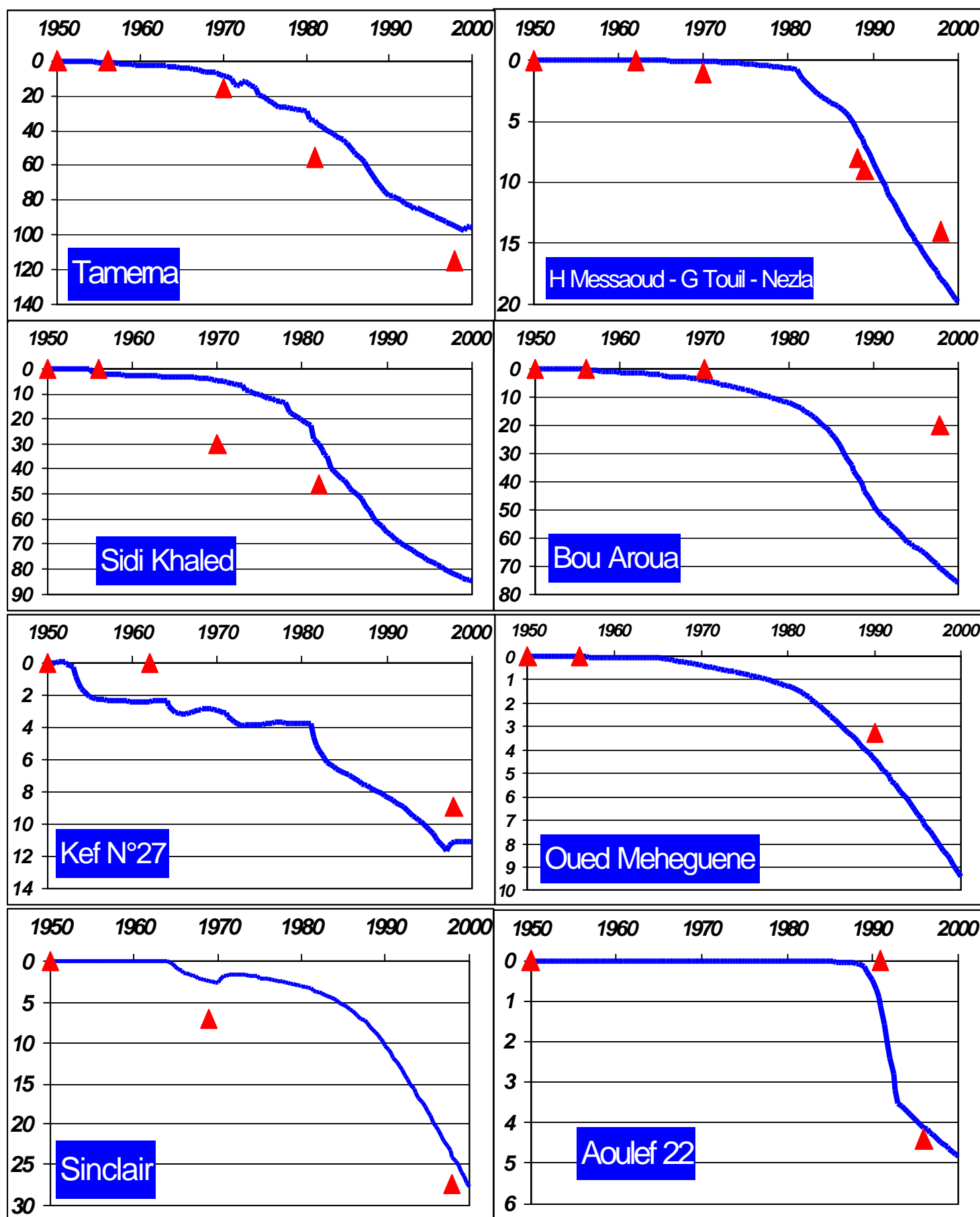


Fig. 91 : CI - Libye

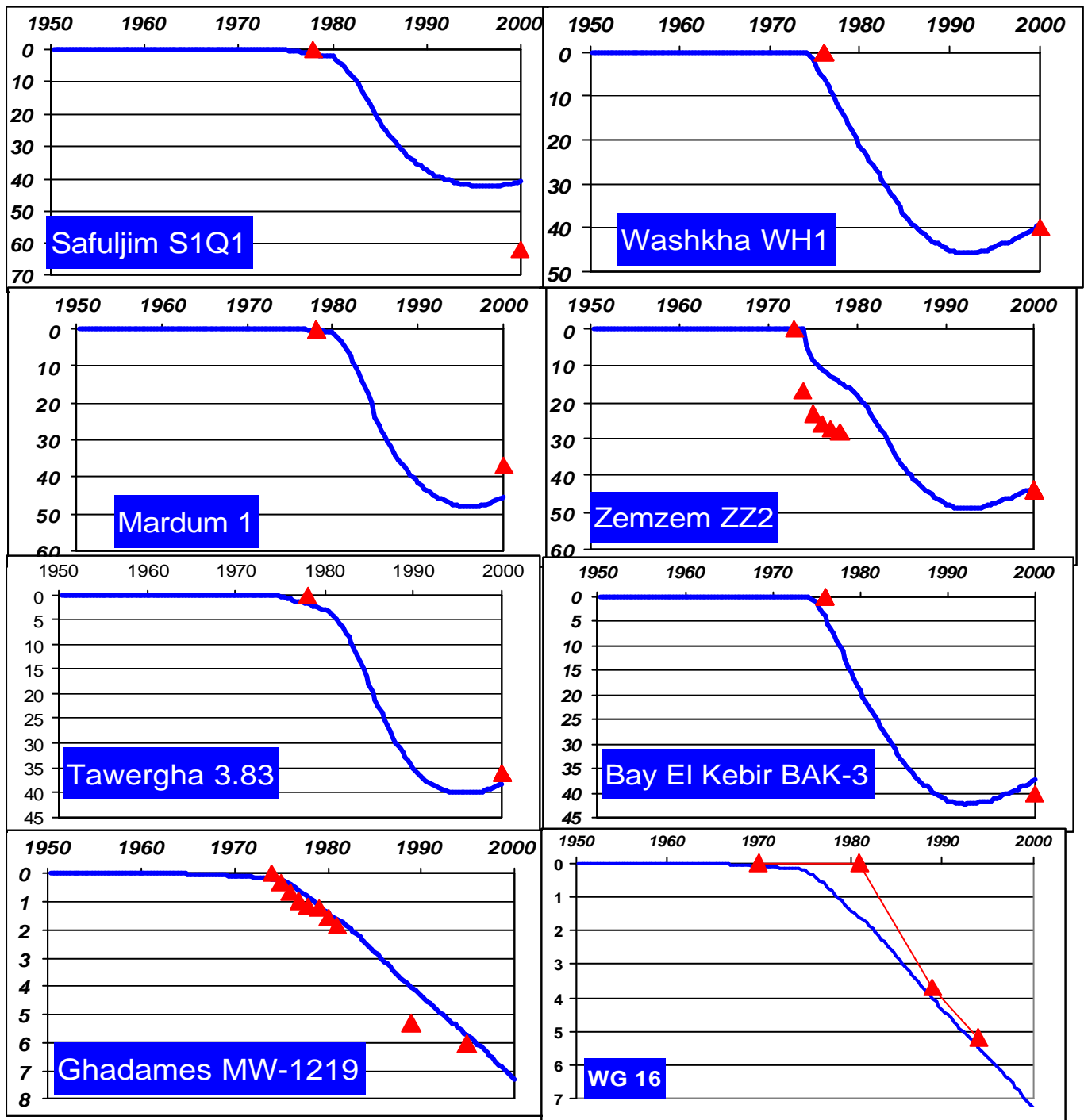


Fig. 92 : Grès Supérieurs

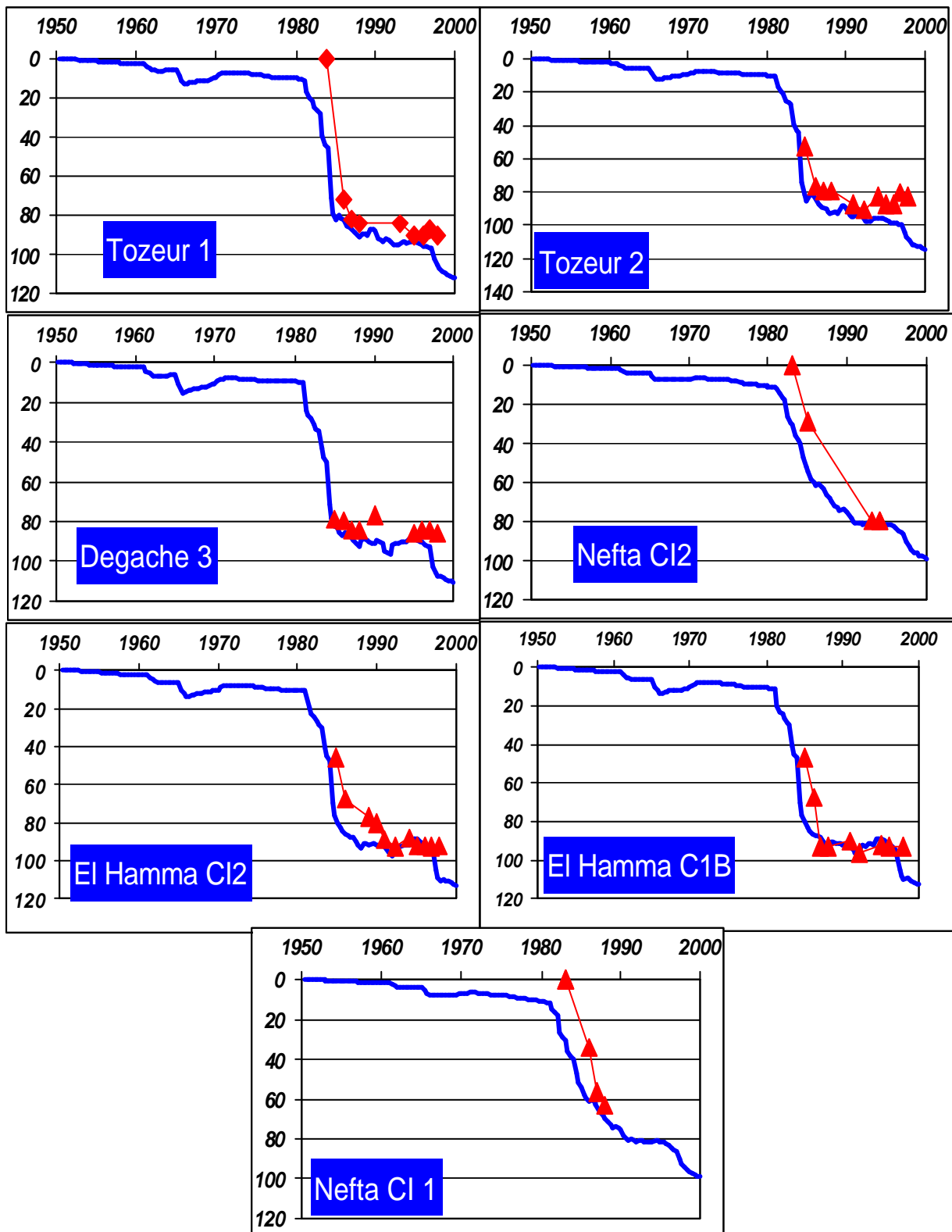


Fig. 93 : CT - Tunisie

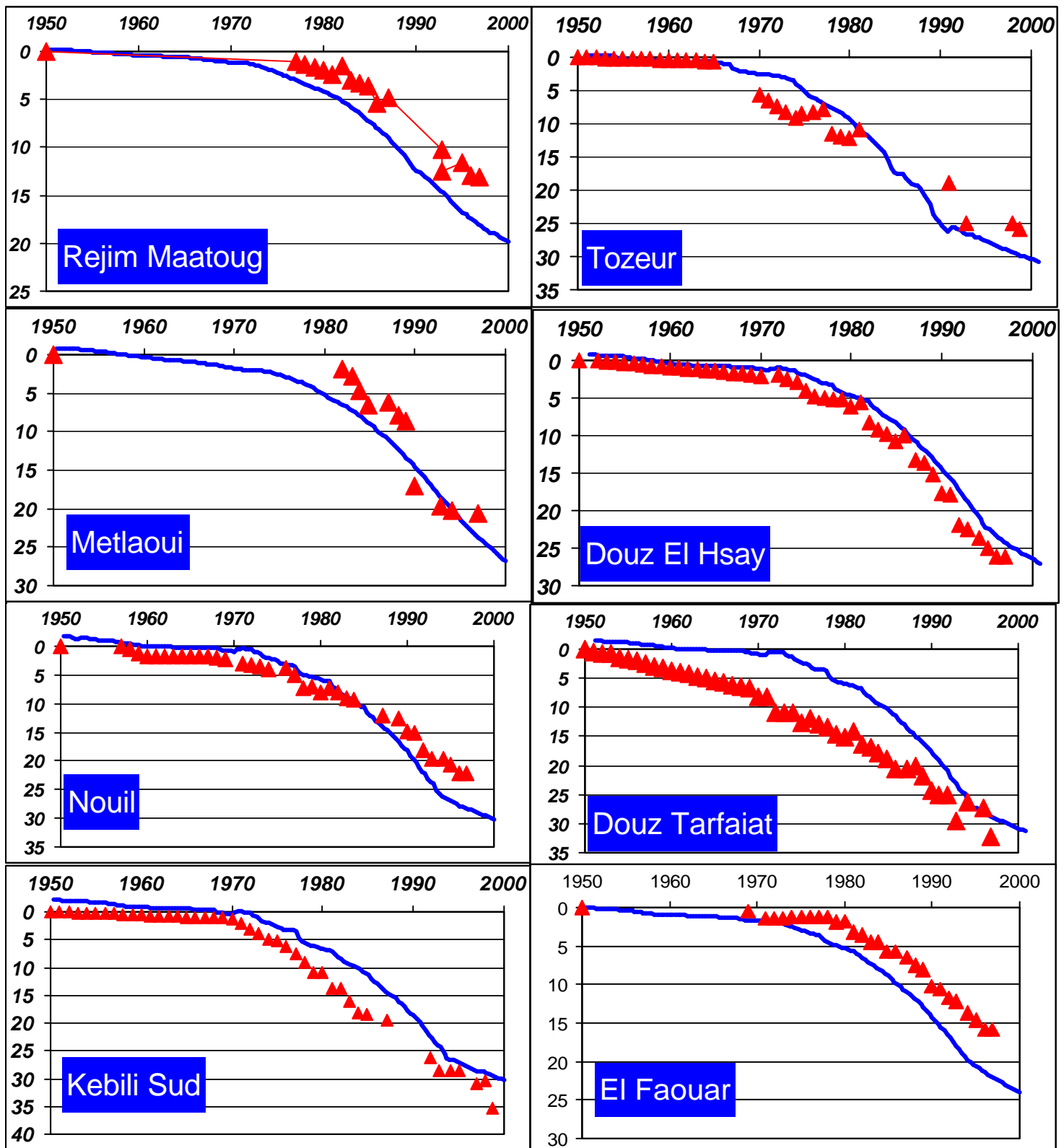


Fig. 94 : CT - Algérie

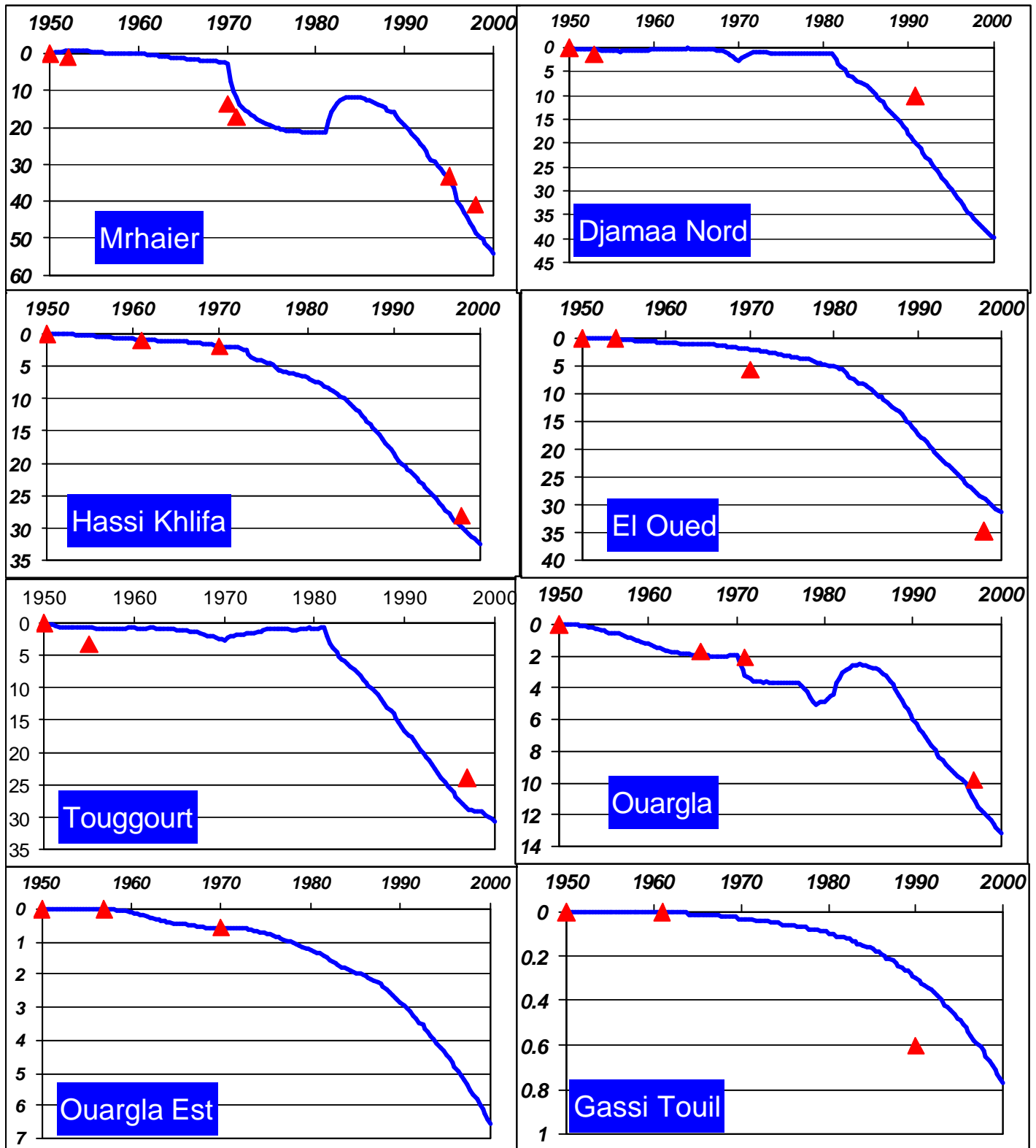
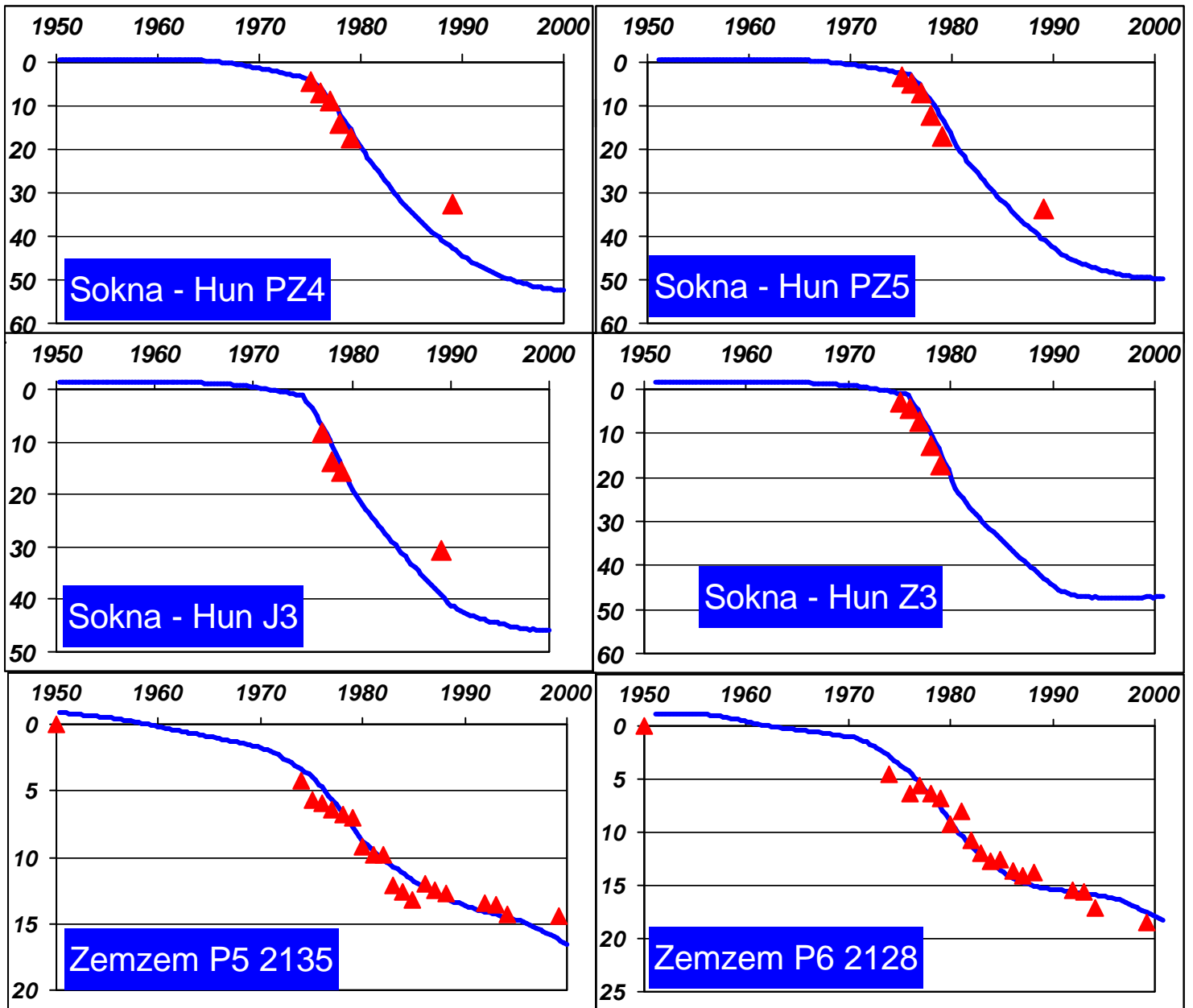
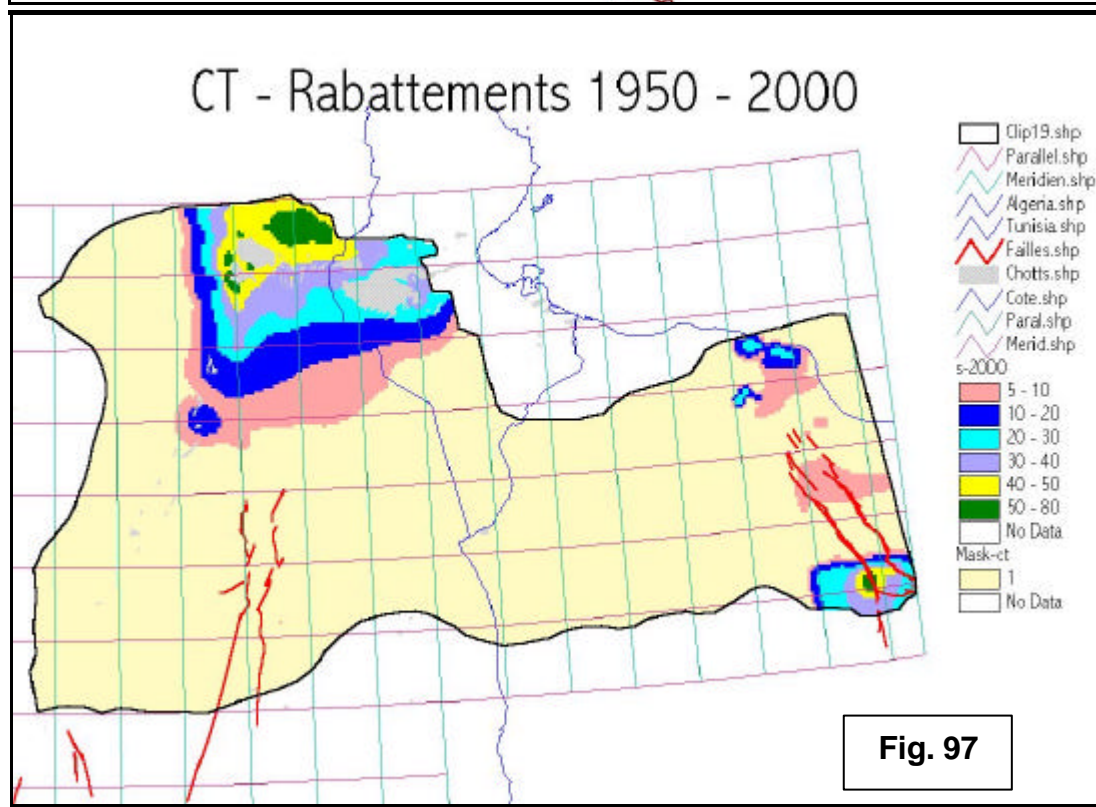
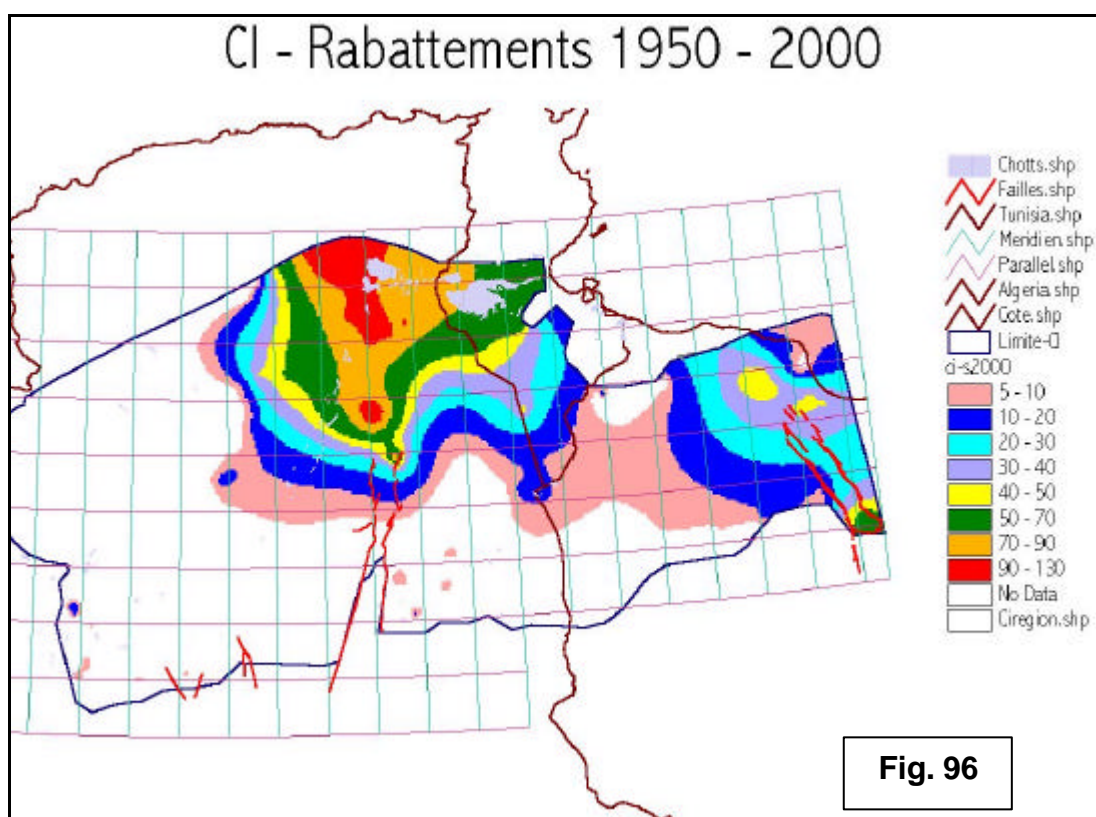


Fig. 95 : CT - Libye



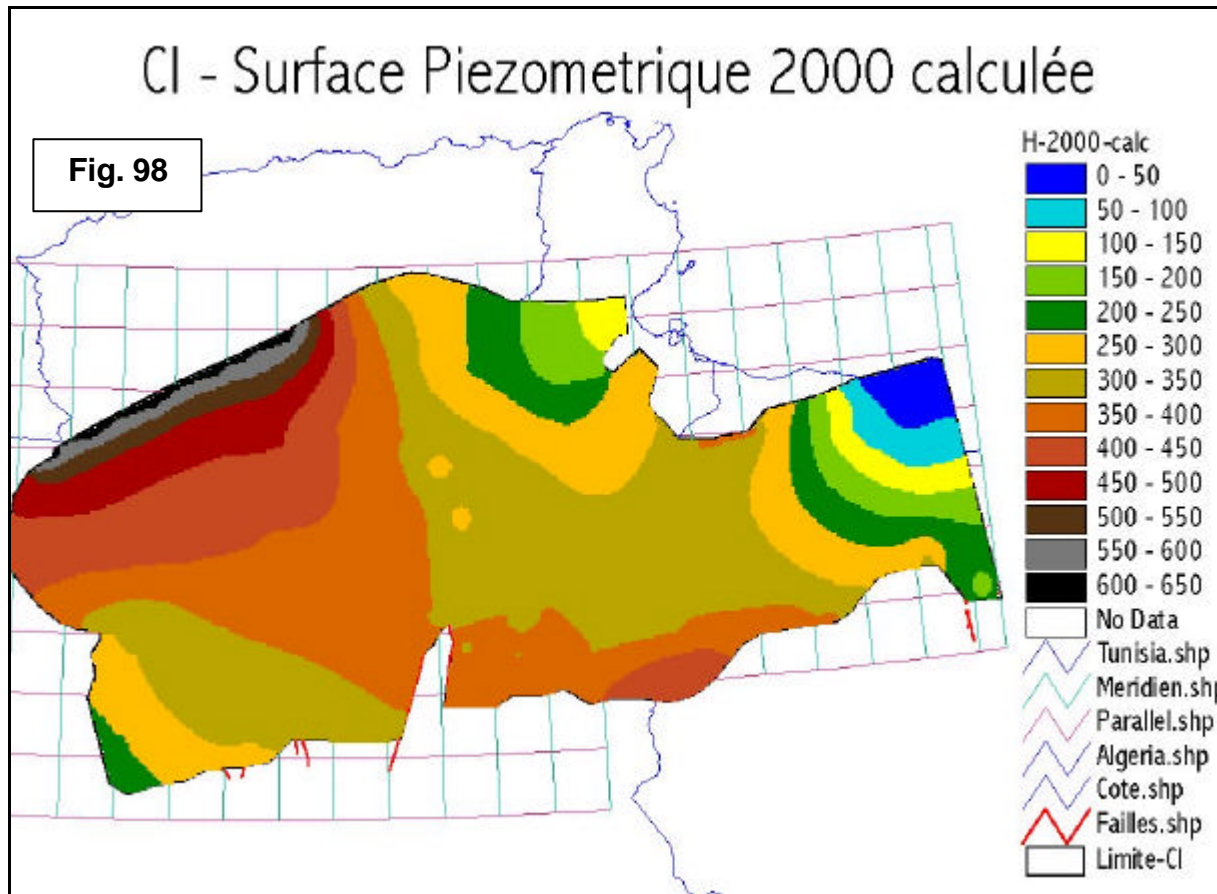
VI.2 - La Carte des Rabattements 1950-2000

Les cartes des fig 96 & 97 rendent bien compte de la distribution spatiale des rabattements calculés par le modèle respectivement au CI et au CT.



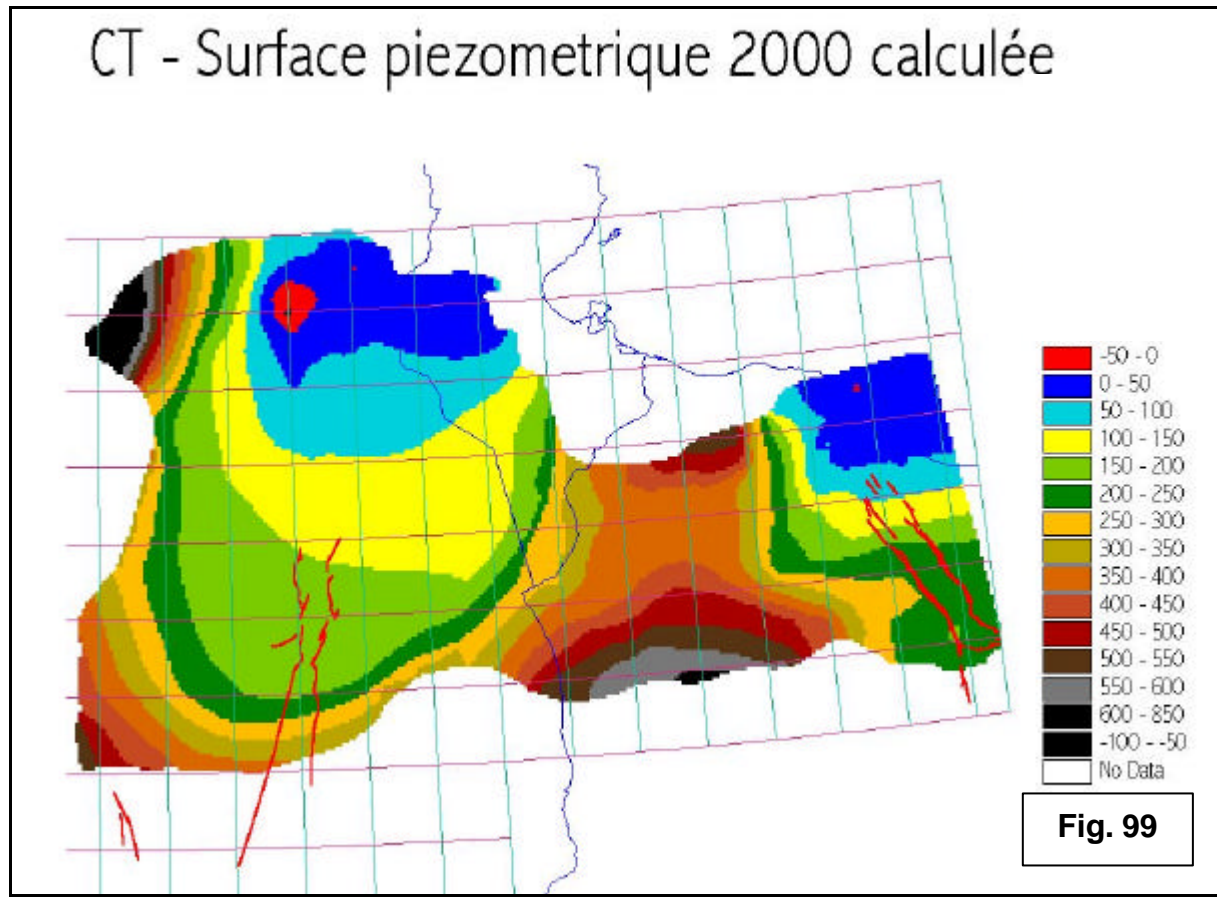
VI.3 - Les Cartes piézométriques calculées en 2000

Les importants rabattements calculés (et observés) 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. C'est la raison pour laquelle un intérêt particulier a été accordé à l'examen de la carte piézométrique calculée du Complexe Terminal en 2000, représentée fig 99, avec un zoom sur les chotts en fig. 100.



Les courbes isopièzes montrent que les lignes principales de l'écoulement sont conservées, en direction des chotts algériens et tunisiens et du golfe de Syrte. Néanmoins, il semble apparaître **un exutoire artificiel au Sud du Graben de Hun** : très forts rabattements induits par les importants prélèvements dans un secteur coincé entre deux limites étanches. Par ailleurs, l'écoulement est très fortement marqué par les pompages du Djérid, de la Nefzaoua et de la vallée de l'oued Rhir. La courbe isopièze 50 m qui se présentait initialement sous forme de deux courbes indépendantes centrées respectivement sur les chotts algériens et les chotts tunisiens, s'est élargie vers le Sud pour englober toute la région des chotts.

Etant donné qu'un rabattement excessif dans ce secteur (qui correspondrait à une piézométrie du CT plus basse que la cote des chotts), peut engendrer une éventuelle inversion des écoulements, la piézométrie calculée en 2000 a été comparée à la cote des chotts (fig 100-b). 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 (fig.100-a), 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, ce qui paraît difficile à faire accepter dans l'immédiat. 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 ».



VI.4 - Le Bilan 2000

Le tableau 20 rend compte du Bilan 2000 calculé pour l'ensemble du SASS. On peut y relever quelques indications intéressantes :

- la somme des recharges du système (y compris l'apport du COD par percolation profonde) totalise **30.3m³/s**, ce qui représente **43%** de l'ensemble des prélèvements par forages (**70.1m³/s**).
- L'ensemble des contributions des réserves (« apport par rabattement ») totalise **46.4m³/s** et représente **66%** des prélèvements par forages.

- A la lecture de ce qui précède et à l'examen de l'évolution des rabattements en fonction du temps (fig. 89 à 95), on peut d'ores et déjà prévoir que les rabattements continueront de progresser, même si l'on décidait de bloquer les pompages à leur niveau actuel²⁸. L'amplitude de cette progression, dans le temps et dans l'espace, reste à préciser. Ce calcul constituera précisément l'objet de la Simulation prévisionnelle Zéro, la première à envisager sur le modèle !

Par ailleurs, en comparant les Bilans 1950 et 2000, On peut noter que le **débit de l'Exutoire Tunisien accuse une diminution d'environ 52 %**. Notons également la très forte diminution des sorties du CT vers les chotts et les sebkhas : elles totalisent **2.2 m³/s** en 2000 contre 8.8 m³/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.

²⁸ Sauf à franchement diminuer les prélèvements, ce qui est très bien démontré avec le CI en Libye de 1990 à 2000 et la nette remontée des piézomètres de Washka, Zamzam, Mardum, Tawargha et Bay el Kabir .

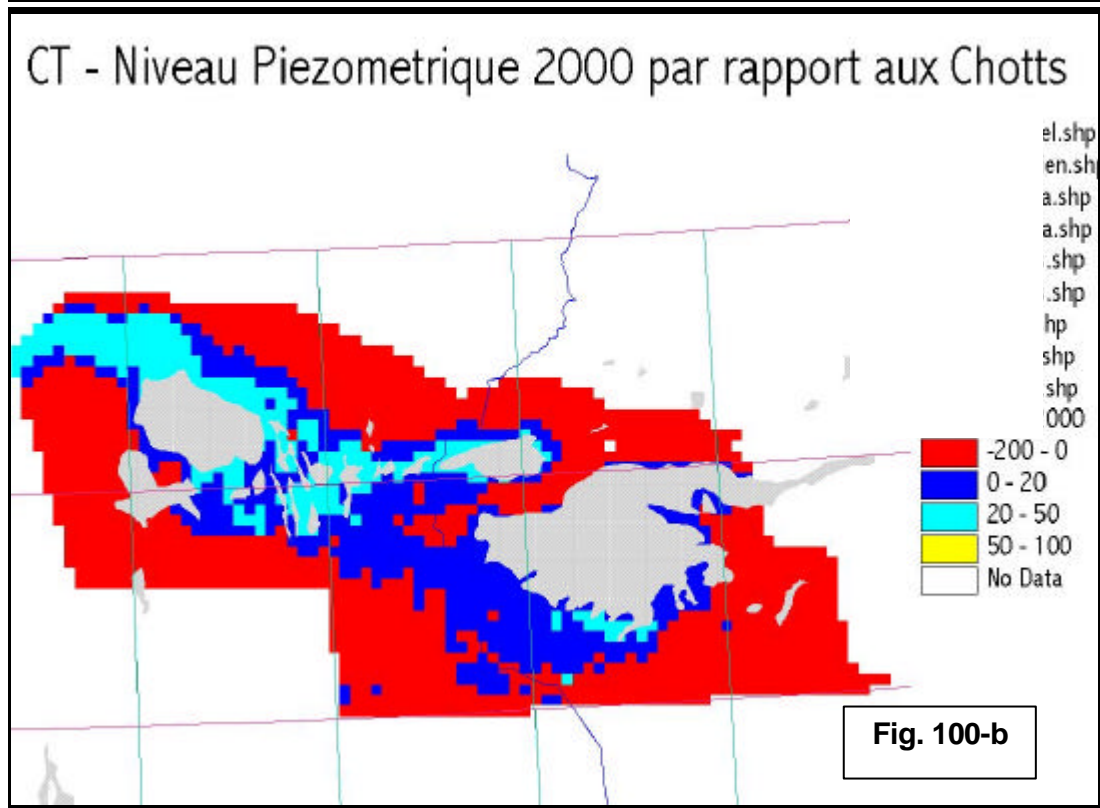
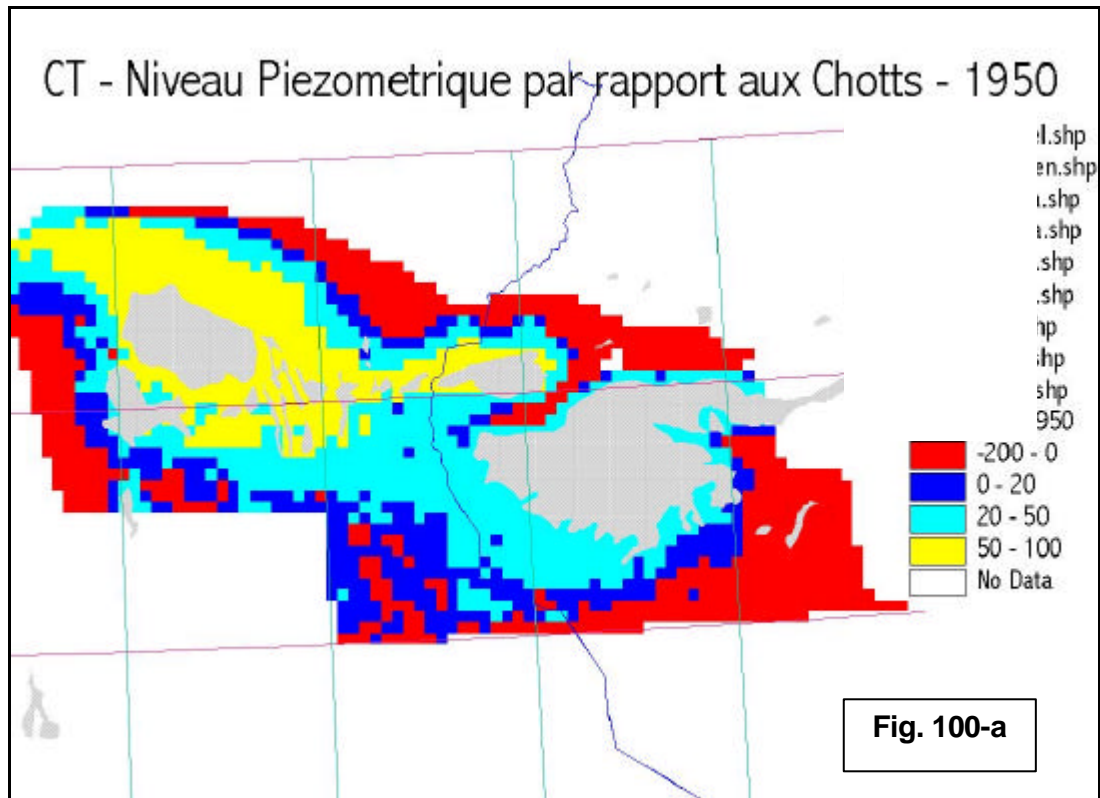


Tableau 20 : BILAN du SASS en 1950 et 2000

Complexe Terminal	1950	2000
Entrées (m³/s)		
Alimentation	18.2	18.2
Drainance Turonien	5.4	6.9
Contribution réserves	0.0	24.9
Total Entrées	23.6	50
Sorties (m³/s)		
Pompages	7.5	42.8
<i>Algérie</i>	<i>5.9</i>	<i>20.9</i>
<i>Tunisie</i>	<i>1.2</i>	<i>14.5</i>
<i>Libye</i>	<i>0.4</i>	<i>7.4</i>
Drainance Turonien	2.4	2.7
Source Ain Tawargha	2.0	1.6
Chotts Algérie-Tunisie	7.4	1.6
Sebkha Mjezem-Tawargha	0.2	0.2
Golfe de Syrte	0.6	0.6
Ain Kaam	0.3	0.1
Sources Nefzaoua Djrerid	2.0	0.0
Sebkhas Algérie	1.2	0.4
Total Sorties	23.6	50

Continental Intercalaire	1950	2000
Entrées (m³/s)		
Alimentation	9.4	9.4
Drainance Turonien	0.5	0.8
Drainance Grés Supérieur	0.0	0.0
Apport Cambro-Ordovicien	2.0	2.7
Limite Orientale	0.0	0.0
Contribution des réserves	0.0	21.5
Total Entrées	11.9	34.4
Sorties (m³/s)		
Pompages	0.5	26.8
Algérie		21.3
<i>Tunisie</i>		<i>2.2</i>
<i>Libye</i>		<i>3.3</i>
Drainance Turonien	3.3	1.7
Drainance Grés Supérieur	0.4	0.5
Saoura & S.Timimoun	0.2	0.2
Foggaras	3.6	3.1
Exutoire Tunisien	3.1	1.5
Golfe de Syrte	0.8	0.6
Total Sorties	11.9	34.4

GRES Supérieurs	1950	2000
Entrées (m³/s)		
Drainance Tur	0	0
Drainance CI	0.4	0.5
Réserves	0	0
Total Entrées	0.4	0.5
Sorties (m³/s)		
Pompage	0	0.46
Drainance Tur	0.15	0.04
Drainance CI	0	0
Chott Fedjej	0.26	0
Total Sorties	0.4	0.5

3^E PARTIE

REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES

Chapitre I : DEFINITION ET REALISATION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES

I - DEFINITION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES

L'objet de cette première partie consiste à définir les conditions de réalisation d'un certain nombre de simulations exploratoires destinées à évaluer la capacité du SASS à réaliser, sur un plan hydraulique, les objectifs de développement des ressources en eaux définis par les experts ayant œuvré au niveau de la demande à venir, cf. A.SALEM (Avril 2001) pour ce qui concerne l'Algérie, O.M. SALEM (Avril 2001) pour la Libye et M.S. BACHTA (Juin 2001) pour ce qui est de la Tunisie. Pour ce faire, il y aura à :

- 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 et ce pour chacun des aquifères du SASS. Chaque scénario, ou plan, fera 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.

Les conditions de calcul

L'objectif des simulations exploratoires est précisément d'explorer les possibilités du système, jusque dans ses dernières limites : 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 tout à fait illusoires en termes d'hypothèses de travail et à fortiori 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.

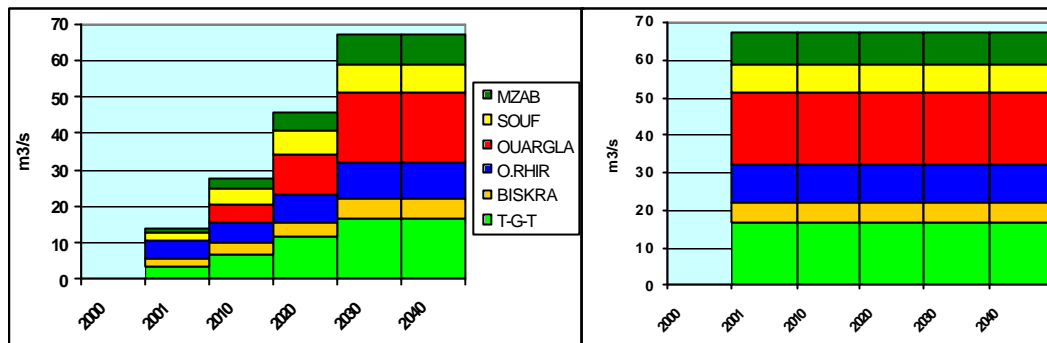
Une durée de simulation de cinquante ans paraît à cet égard raisonnable : *Les simulations exploratoires seront conduites sur 50 ans, l'état initial de référence étant l'état du système en l'an 2000, tel qu'il a été reconstitué par le Modèle.*

L'outil utilisé pour effectuer ces calculs est bien entendu celui correspondant à la dernière version du calage du Modèle SASS.

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 simulera un débit constant sur toute la période de calcul [01/01/2001 au 31/12/2050] et ce débit représentera le débit maximum envisagé par le plan ou le scénario considéré. Pour clarifier ce protocole, nous allons anticiper sur ce qui suit et considérer à titre d'exemple le scénario de l'hypothèse faible en Algérie, présentée dans le tableau 2. Ce scénario prévoit, pour chaque province,

un accroissement régulier des prélèvements additionnels jusqu'en 2030 (cf. partie gauche du schéma ci-après). La simulation exploratoire correspondante va considérer que les débits supplémentaires maxima, prévus à l'horizon 2030, sont appliqués dès l'année 2001 et demeurent constants jusqu'en 2050 (cf. partie droite du schéma). On introduit ainsi un niveau de forçage supplémentaire du système, qui a pour effet d'amplifier légèrement les effets attendus du scénario.

Fig. 101 : Simulation à débits gradués et simulation à débits constants



Les résultats attendus

A chacun des scénarios ou des plans de développement simulés seront associés les résultats suivants :

- La carte des Rabatements 2000-2050 calculés sur tout l'aquifère considéré
- Les courbes d'évolution du rabattement en fonction du temps (2000 à 2050), tracées en un certain nombre de forages-témoins, à raison de un forage-témoin par grande région hydraulique ou par grande région d'exploitation.
- Les principaux termes du Bilan 2050 et notamment le débit calculé aux trois principaux exutoires : Ain Tawargha, les Foggaras, l'Exutoire Tunisien .
- Une évaluation, en termes de rabattements supplémentaires, de l'impact du scénario simulé sur chacun des pays voisins susceptibles d'être influencés
- La carte des profondeurs du Niveau Piezometrique 2050 calculé par rapport au sol.
- La carte des profondeurs du NP sous la surface des Chotts algéro-tunisiens, que l'on pourra traduire en termes d'intensité de risque (de salinisation potentielle).

Le scénario de référence : maintien de l'actuel, ou simulation zéro

Ce scénario, (certes peu probable mais nécessaire à simuler si l'on désire comparer entre eux et apprécier en connaissance de cause, les effets des divers scénarios de développement envisagés), consiste à maintenir constants les prélèvements recensés en 2000 et à calculer l'évolution correspondante du système au cours des 50 prochaines années.

Les scénarios pour l'Algérie

Pour l'Algérie, A. SALEM (Avril 2001) a élaboré deux scénarios de développement des Ressources en Eau , que l'on peut résumer comme suit :

- L'horizon de Prévision est l'année 2030
- La demande en eau potable est liée à l'évolution démographique, la population de la région étant de 2.5 Mhab en 2000 et estimée à 5.3 Mhab en 2030. Les Normes de consommation actuelles adoptées sont de 100 à 200 l/j/hab selon la taille de l'agglomération, et de 80 l/j/hab pour l'habitat dispersé, avec une croissance de 1% l'an après 2000. L'Hypothèse Forte suppose le maintien du taux de pertes actuel dans les réseaux (**50%**) et l'Hypothèse faible suppose une réduction de ce taux à **20%**. Soit respectivement et en moyenne en 2030 :
 - 243 l/j/hab pour l'hyp.faible [= 88 m³/an/hab] → Q additionnel = 8.8m³/sec
 - 300 l/j/hab pour l'hyp.Forte [= 110 m³/an/hab] → Q additionnel = 12.5m³/sec
- La demande de l'Industrie Pétrolière est estimée à **290Mm³** en 2000, avec une croissance de **5Mm³/an**, soit un prélèvement additionnel en 2030 = 4.75m³/sec et ce quelle que soit l'hypothèse.
- La demande prévisionnelle de l'Agriculture suppose :
 - d'abord le comblement des déficits actuels et la réhabilitation des palmeraies existantes, ce qui nécessite la mobilisation de **13.9 m³/sec dès 2001**
 - la mise en valeur de nouveaux périmètres irrigués à raison de **2000 ha/an** pour l'hypothèse faible et de **4000 ha/an** pour l'hypothèse Forte [répartis sur l'ensemble du bassin].

Cela représente, respectivement pour chacune des deux hypothèses (**y compris le comblement des déficits**), des prélèvements d'irrigation additionnels pour l'horizon **2030** égaux à : **53.5 m³/sec** et **89. m³/sec**.

Tableau 21 : Hypothèses faible et forte en Algérie

Prélèvements Additionnels/2000, par Aquifère_ Horizon 2030 _ m ³ /sec			
REGION HYDRAULIQUE		H_faible	H_forte
GOURARA-TOUAT-TIDIKELT	CI	16.6	29.0
	CT		
	TOTAL	16.6	29.0
BISKRA	CI	1.1	1.4
	CT	-	-
	TOTAL	1.1	1.4
O.RHIR	CI	6.0	7.0
	CT	3.8	4.3
	TOTAL	9.8	11.3
OUARGLA	CI	2.0	4.0
	CT	17.3	29.5
	TOTAL	19.3	33.5
SOUF	CI	2.5	3.9
	CT	5.0	8.0
	TOTAL	7.5	11.9
MZAB	CI	8.2	14.3
	CT		
	TOTAL	8.2	14.3
TASSILI	CI	0.0	0.0
	CT		
	TOTAL	0	0
Total CI		36.4	59.6
Total CT		26.1	41.8
Total Général		62.5	101.4

- A l'horizon 2030, la **demande additionnelle globale** [Agriculture + AEP + Industrie Pétrolière, comptés par rapport à 2000] serait donc de :
 - **67. m³/sec pour l'hypothèse faible**
 - **106. m³/sec pour l'hypothèse forte**
- A l'intérieur de chacune des grandes régions hydrauliques, l'identification des points **d'implantation des nouveaux prélèvements** peut être effectuée sur la base des travaux de cartographie préliminaires des zones d'extensions possibles des aires d'irrigation du Sahara, figurant dans le rapport préparé par A. Khadhraoui en Octobre 2001 [« Zones irriguées au Sahara Septentrional : Etat actuel et possibilités d'extension »]¹.
- Pour ce qui concerne la région des ZIBANS (Biskra), nous avons supposé que la totalité des **prélèvements additionnels imputés au CT** étaient **affectés à la nappe de Tolga**, isolée du système SASS². Ces prélèvements ne sont pas représentés sur le Modèle du SASS : ceci explique l'absence de prélèvements additionnels dans le tableau précédent.

Scénarios pour la Tunisie

Le rapport préparé par M.S BACHTA (Juin 2001) prévoit les évolutions suivantes :

- Horizon de prévision = 2020
- Demande Domestique : elle est fonction de la population qui passe de 0.38Millions d'habitants (0,38M/hab) en 2000 à **0.6M hab en 2020**. Les normes de consommation sont fournies sur la base = **100 l/j/hab** y compris les pertes, constante soit **36.5m³/an/hab**, ce qui représente une demande additionnelle égale à : 0.22M/hab x 36.5 = **8 Millions m³/an en 2020**. [255.l/sec].
- Tourisme : la Demande passe de **1.5 à 2.8 M**, soit un accroissement de 1.3M = (soit 40 l/s à l'horizon 2020).
- Industries : aucune demande additionnelle n'est prévue.
- Agriculture : Les mesures d'incitations financières aux économies d'eau devraient faire passer la demande de l'irrigation de **450 Mm³/an en 2000** à un niveau de **400 Mm³/an à l'horizon 2015**. Parallèlement, il est prévu un certain nombre de créations de nouveaux périmètres :
 - 2000 ha à Regim Maatoug ; → 2000 ha à Nefta ; → 1000 ha à Gabès et Tataouine

¹ Pour les localisations de ces zones d'extensions ainsi que les débits simulés pour chaque région et chaque aquifère, voir le document « Définition et réalisation des simulations exploratoires, OSS, Nov 2001 »

² à l'époque de la construction et du calage du modèle (printemps 2001) , nous ne disposions pas des inventaires réalisés dans la wilaya de Biskra. Nous n'avions donc, par rapport à l'ERESS et au projet RAB, que très peu de données nouvelles sur cette région. C'est la raison pour laquelle, après avoir envisagé d'intégrer la nappe des calcaires éocènes dans le multicouche du SASS (cf. Rapport sur le Modèle Conceptuel, OSS, Juillet 2000), nous avons en définitive retenu, dans la région nord des chotts algériens, une représentation du Complexe Terminal identique à celle adoptée par le Modèle ERESS, sur lequel la nappe des calcaires éocènes de Tolga n'était pas explicitement représentée (cf. SASS : Construction et Calage du Modèle, Rapport de Phase, OSS, Mai 2001). Au moment de la rédaction du présent rapport, les inventaires de Biskra sont en cours d'analyse par les équipes de l'ANRH et l'équipe du SASS, et leurs résultats ne sont pas encore publiés.

M.S BACHTA estime que les économies réalisées par l'amélioration des efficacités de l'irrigation [représentant un « gain » de 50 Mm³/an en 2015] vont peu à peu estomper la demande additionnelle de ces nouveaux périmètres dont la mise en place devrait se faire progressivement durant la même période pour arriver à terme à l'horizon 2015. Une telle estimation tient si la demande de ces nouveaux périmètres peut, par des mesures adéquates d'économie d'eau, être limitée à 10.000 m³/an/ha. Dans ces conditions, la résultante de la demande agricole additionnelle serait strictement nulle entre 2000 et 2020. Un tel scénario est évidemment valable au niveau global de la Tunisie, mais moins si les évolutions spatio-temporelles des prélèvements additionnels (en plus ou en moins) pouvaient être précisées.

En définitive et au titre des simulations exploratoires, le scénario proposé par M.S.BACHTA pour la Tunisie répond au scénario de « maintien de l'Actuel, ou encore Simulation Zéro ». [à ce niveau, la demande additionnelle domestique et touristique paraît négligeable et en tous cas se fonde dans les fourchettes d'incertitudes sur les prélèvements actuels, notamment Agricoles].

Scénarios pour la Libye

Le document préparé par O.M.SALEM, relatif à la région d'étude [Present water exploitation and future demand in Hamada El Hamra Sub-Basin, Apr 2001] repose sur les données suivantes :

- Horizon de prévision : 2030
- Population en 2000 = 1.0 M hab → en 2030, passe à **2.32 M hab**
- Demande Domestique additionnelle à l'horizon 2030 = **113 M m³/an**
- Demande Industrielle additionnelle à l'horizon 2030 = **7 M m³/an**
- Demande Agricole additionnelle à l'horizon 2030 = **720 M m³/an**
- Demande TOTALE **additionnelle** à l'horizon 2030 = **840 M m³/an** ; soit **# 27. m³/sec**

La contribution du **GMRP³** aux besoins du Bassin de Hamada el Hamra en 2030 est estimée à **300 Mm³/an**. Il subsistera donc **un Déficit de 540 M m³/an à l'horizon 2030**. L'un des scénarios envisageables suppose la **résorption du déficit par l'accroissement de l'exploitation des aquifères du bassin** et ce au prorata des débits pompés actuellement.

Les conditions de réalisation de ce scénario, dénommé «**Scénario de résorption des déficits 2030**», ainsi que les résultats obtenus seront présentés dans la 3^e partie du rapport intitulée «**Définition et réalisation des simulations prévisionnelles**».

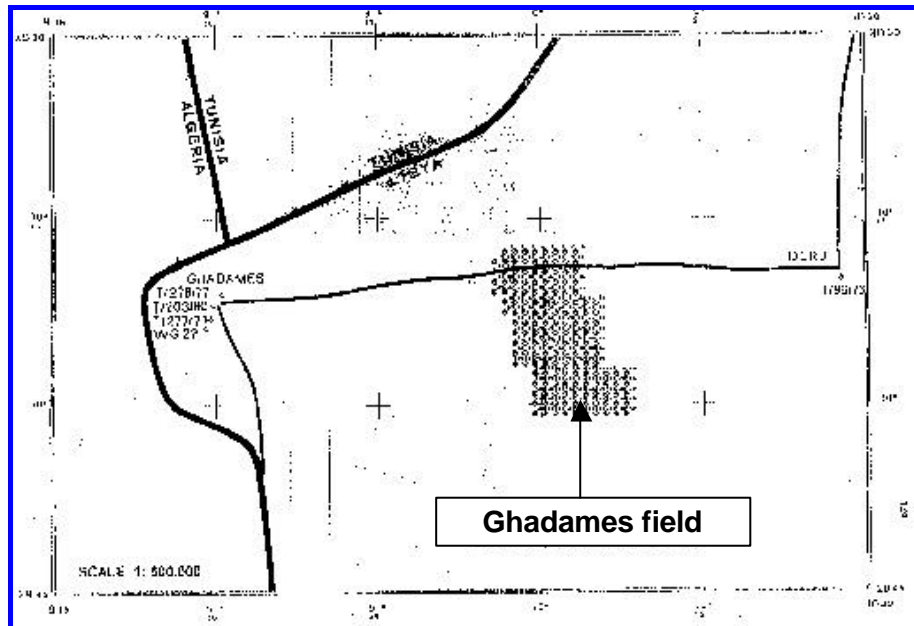
Simulations exploratoires en Libye

Les Simulations exploratoires présentées ci-après concernent les deux programmes suivants :

- Le Champ de Pompage prévu dans la région de Ghadamès-Derj, correspondant à la dernière phase du GMRP et où doit être mis en exploitation un débit additionnel de 90. Mm³/an [BRLi, 1997]. La localisation du champ captant est présentée fig. 102. Au niveau des simulations exploratoires et ainsi que nous en avons convenu plus haut, un pompage à ce régime sera mis en route dès 2001.

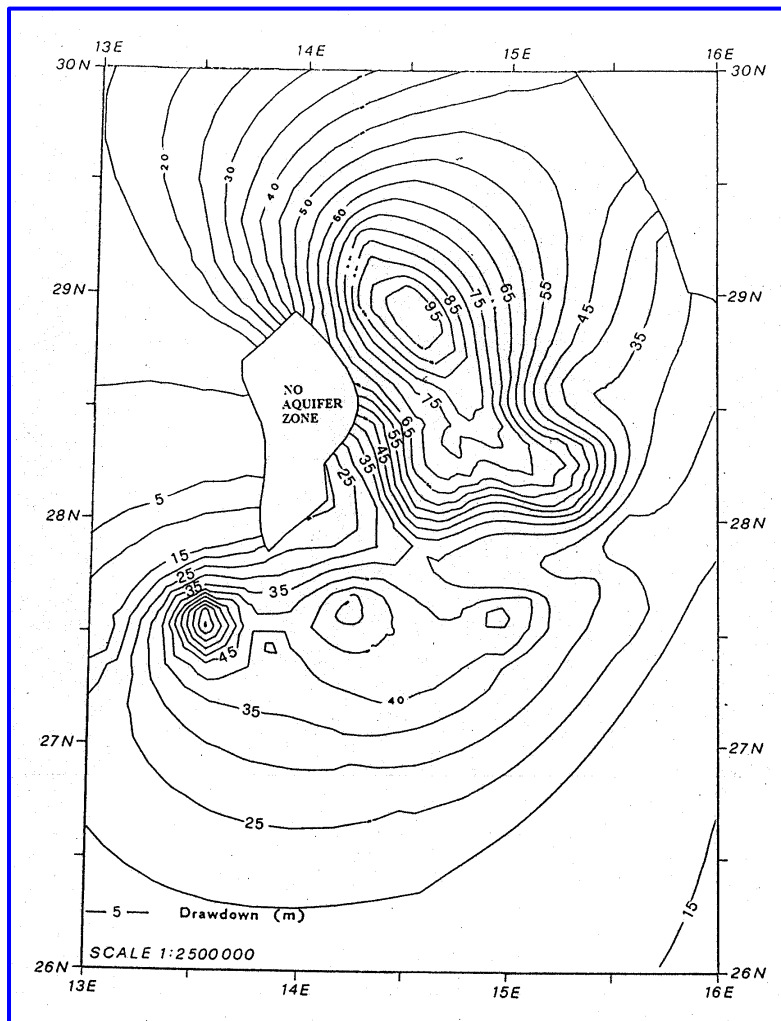
³ Great Man Made River Project.

**Fig.102 : Localisation du Champ captant de Ghadames field ;
BRLI, juin 1997**



- Le Champ captant du Djebel Hassaounah, où doit être mis en place un prélèvement, en régime de croisière, équivalent à **2.Mm³/jour**, [SPLAJ-GMRP, Brown & Root, final report, simulation N°6, GEOMATH, Dec.1994], soit un débit de près de **23.m³/sec**, par pompage sur la grande nappe des grès du Cambro-Ordovicien. Cette nappe n'est pas explicitement représentée dans notre modèle, mais nous l'avons figurée dès le début d'une manière indirecte par une couche de mailles dont les niveaux sont imposés avec la possibilité d'une variation dans le temps. La fig. 103, reproduite à partir du document GEOMATH, représente les rabattements dans l'aquifère Cambro-Ordovicien, calculés par le modèle Geomath à l'horizon 2046 au terme d'un calcul de 50 ans. C'est cette carte des rabattements qui sera utilisée pour déterminer les niveaux piezométriques à imposer dans le Cambro-Ordovicien du Modèle SASS et ce dès 2001 selon la convention de régime adoptée pour l'ensemble des simulations exploratoires.

**Fig. 103 : Troisième unité aquifère – rabattements calculés (m)
(dans la zone du projet supérieure à 2046)
[simulation n°6]
GEOMATH, 1994**



Récapitulatif des simulations exploratoires

En définitive, l'ensemble des Simulations Exploratoires à réaliser à cette première étape de l'étude du SASS sont résumés ainsi :

1. Maintien de l'actuel (prélèvements 2000) ou « Simulation Zéro », correspondant hypothèse initiale Tunisie
2. Algérie : Hypothèse faible
3. Algérie : Hypothèse forte
4. Libye : Ghadames field.
5. Libye : Impact des pompages de Jebel Hassaouna

Le tableau 22 suivant présente les Débits de Pompages à afficher sur le Modèle SASS pour chacune de ces simulations :

Tab. 22 : Récapitulatif des Simulations Exploratoires

Scenario	Forages CI m ³ /s	Forages CT m ³ /s	Total Forages SASS m ³ /s
Simulation Zéro			
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 débits simulés			
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

II - RESULTATS DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES

II.1 - Poursuite de l'Actuel : le SCENARIO ZERO

Il convient tout d'abord de pouvoir prédire l'état du système à l'horizon de référence (2050) dans le cas où l'on décidait de maintenir l'ensemble des prélèvements du SASS à leur niveau de l'an 2000.

Cette simulation constitue la référence incontournable pour pouvoir *estimer l'effet de tout prélèvement additionnel* envisageable sur le système: l'évaluation des résultats des Simulations Prévisionnelles ne peut se faire en connaissance de cause que par référence aux résultats obtenus sur le scénario zéro.

En maintenant les prélèvements 2000 constants, on calcule l'évolution du système jusqu'à l'horizon 2050. La simulation du maintien des prélèvements 2000 [valeurs affichées sur le Modèle en l'an 2000] sur une longue période permet d'éprouver la capacité prédictive du modèle. Cette simulation permet d'estimer l'impact à long terme [sur l'horizon 2050] d'un maintien des prélèvements du SASS à leur niveau actuel: impacts en termes de rabattements supplémentaires et de diminution du débit des exutoires naturels.

Tab. 23 : Débits du scénario Zéro

Débits des FORAGES _ 2000 _ affichés sur le Modèle_ m ³ /s				
<i>Nappe / Pays</i>	Algérie	Tunisie	Libye	<i>Total</i>
C.I	21.2	2.2	3.4	26.8
G.S	0	0.5	0	0.5
C.T	20.9	14.5	7.4	42.8
Total	42.1	17.2	10.8	70.1

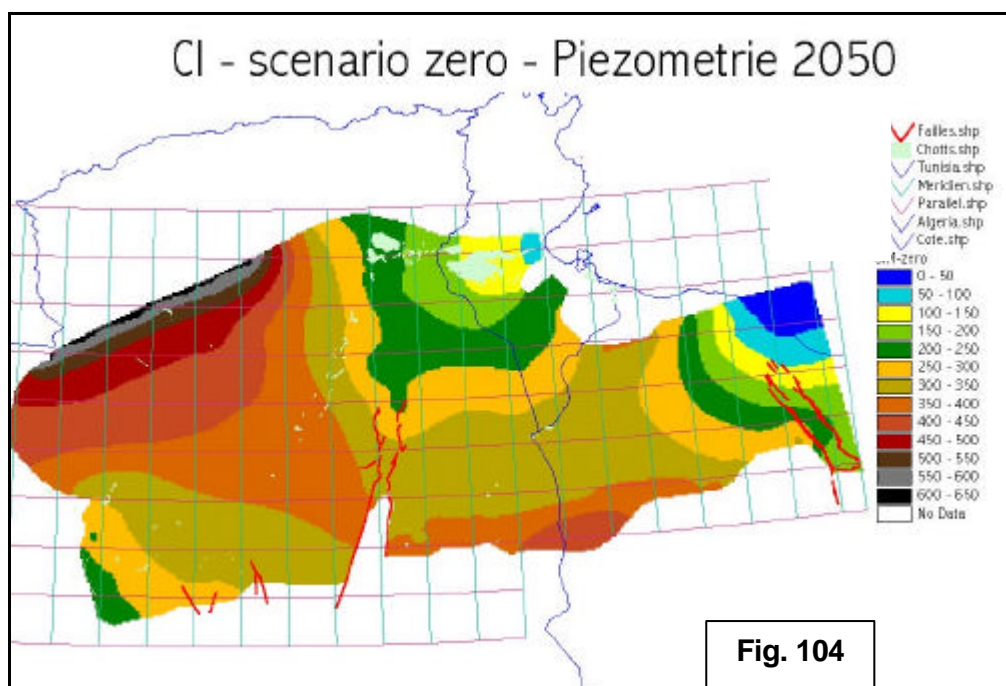
II.1.1 - Résultats en termes de Niveaux Piezométriques et de Rabattements 2050

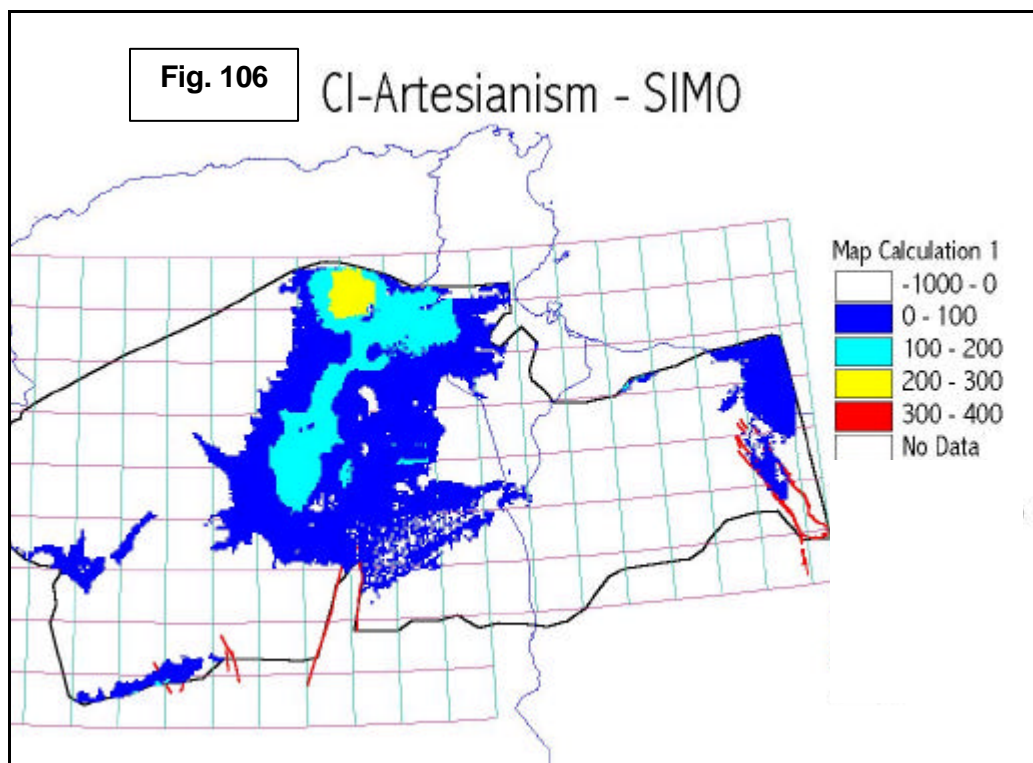
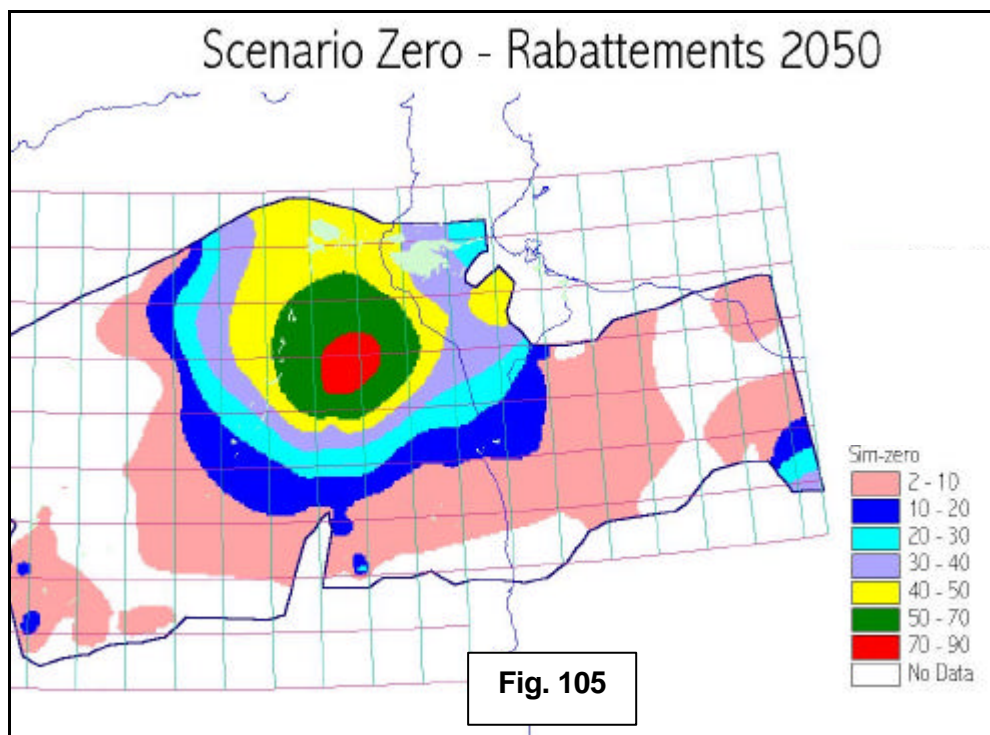
Dans ce qui suit et tout au long du présent document, les valeurs de Rabattements présentées sont calculées par référence aux Niveaux Piezométriques restitués par le Modèle en 2000.

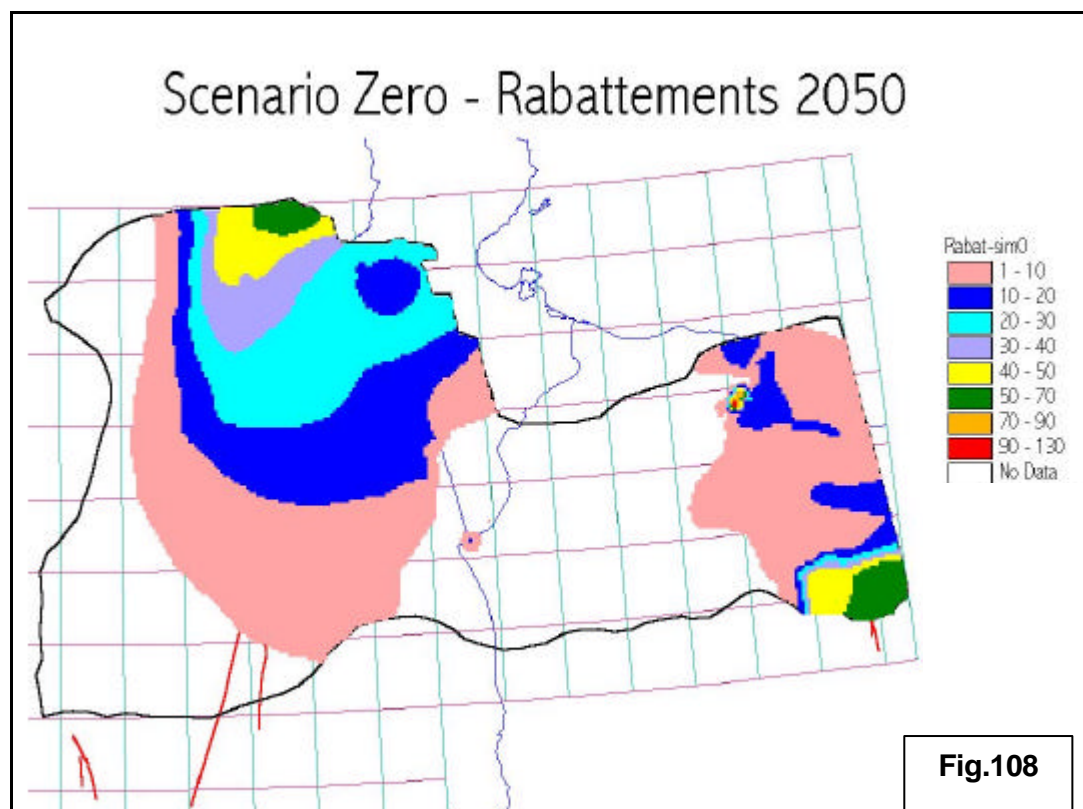
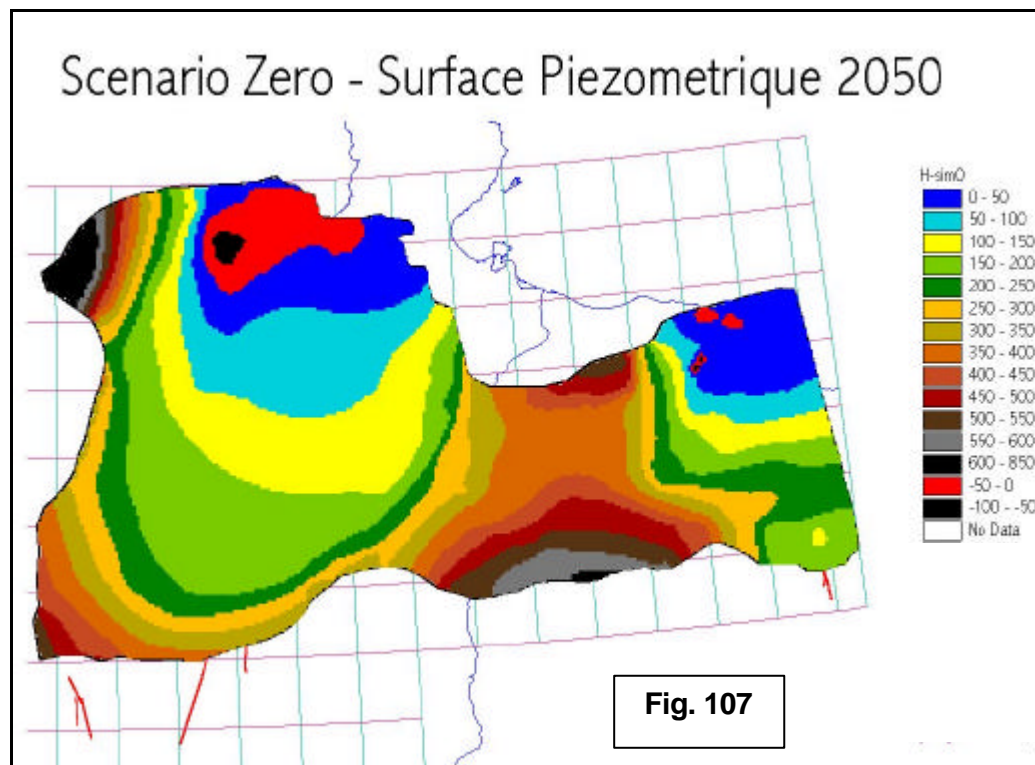
Les figures qui suivent présentent successivement :

- La carte des Niveaux Piézométriques 2050 au CI (fig.104)
- La carte des rabattements 2050 au CI (fig.105)
- La carte des zones d'artésianisme au CI en 2050 (fig. 106)
- La carte des Niveaux Piézométriques 2050 au CT (fig.107)
- La carte des rabattements 2050 au CT (fig.108)
- La carte des Profondeurs du N.P du CT en 2050 par rapport au niveau des Chotts (fig. 109).

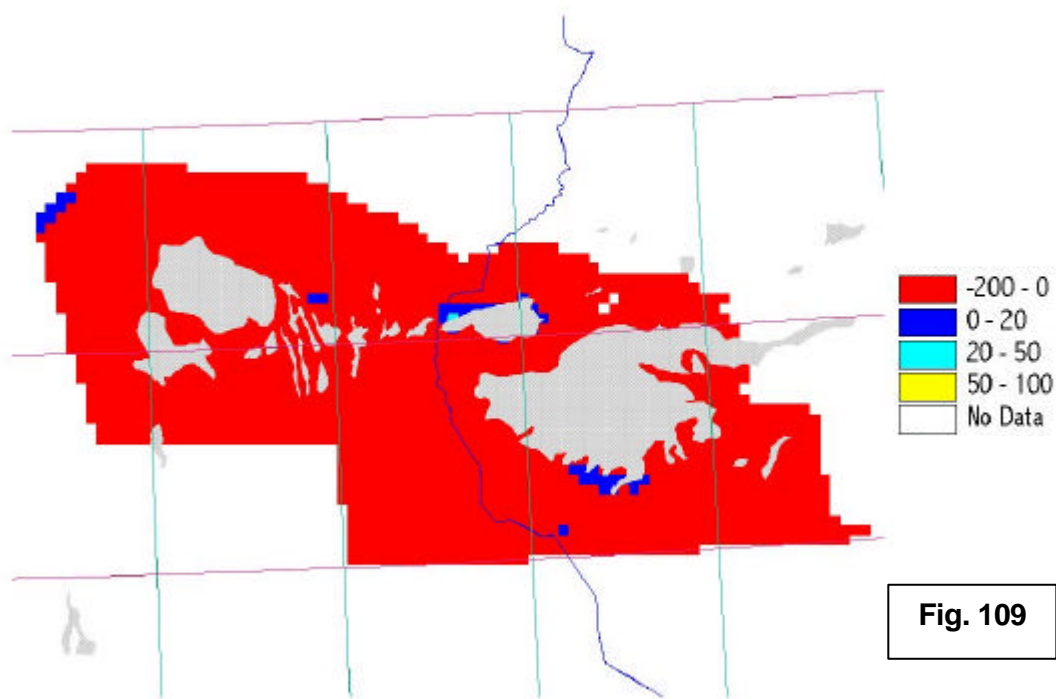
Continental intercalaire







CT - scenario zero : NP 2050 per rapport aux chotts



II.1.2 - Résultats en termes de Bilans calculés en 2050

Continental Intercalaire							
	1950	2000	SIM-0		1950	2000	SIM-0
Entrées (m³/s)				Sorties (m³/s)			
Alimentation	9.4	9.4	9.4	Pompages	0.5	26.8	26.8
<i>dont: Atlas-saharien</i>	7.5	7.5	7.5	<i>dont: Algérie</i>	0.5	21.2	21.2
<i>Sud-Libye</i>	0.3	0.3	0.3	<i>Tunisie</i>	0.0	2.2	2.2
<i>Neffoussa</i>	1.1	1.1	1.1	<i>Libye</i>	0.0	3.4	3.4
<i>Dahar</i>	0.5	0.5	0.5	Drainance Turonien	3.4	1.7	1.9
Drainance Turonien	0.5	0.8	0.7	Drainance Grés Supérieur	0.4	0.5	0.5
Drainance Grés Supérieur	0.0	0.0	0.0	Saoura & S.Timimoun	0.2	0.2	0.2
Apport Cambro-Ordovicien	2.0	2.7	3.0	Foggaras	3.60	3.15	1.95
Limite Orientale	0	0.003	0.008	Exutoire Tunisien	3.1	1.54	0.94
Contribution des réserves	0.0	21.5	19.8	Golfe de Syrte	0.9	0.6	0.6
				Limite Orientale	0.005	0	0
Total Entrées	12.0	34.4	32.9	Total Sorties	12.0	34.4	32.9

Complexe Terminal								
Entrées (m ³ /s)	1950	2000	SIM-0		Sorties (m ³ /s)	1950	2000	SIM-0
Alimentation	18.2	18.2	18.2		Pompages	7.5	42.8	42.8
dont : Atlas saharien	3.8	3.8	3.8		dont: Algérie	5.7	20.9	20.9
Limite Sud-Ouest	6.0	6.0	6.0		Tunisie	1.3	14.5	14.5
Sud libye	1.0	1.0	1.0		Libye	0.5	7.4	7.4
Nefoussa	0.6	0.6	0.6		Drainance Turonien	2.4	2.7	2.8
Dahar	6.1	6.1	6.1		Source Ain Tawargha	2.0	1.6	1.3
Nord des Chotts	0.7	0.7	0.7		Chotts Algérie-Tunisie	7.3	1.6	0.0
Drainance Turonien	5.4	6.9	7.2		Sebkha Mjezem-Tawargha	0.2	0.2	0.2
dont : Algérie	1.3	1.3	1.4		Golfe de Syrte	0.6	0.6	0.5
Tunisie	0.3	0.2	0.2		Ain Kaam	0.3	0.1	0.0
Libye	3.8	5.3	5.6		Sources Nefzaoua Djrerid	2.1	0.0	0.0
Contribution réserves	0.0	24.9	22.1		Sebkhas Algérie	1.2	0.4	0.0
Total Entrées	23.6	50.	47.5		Total Sorties	23.6	50.	47.5

Grès Supérieurs - 2050	SIM-0
Entrées (m ³ /s)	
Drainance Turonien	0
Drainance CI	0.47
Contribution réserves	0
Total Entrées	0.47
Sorties (m ³ /s)	
Total Sorties	0.47
Pompage	0.46
Drainance Turonien	0.01
Chott Fedjej	0

III - ALGERIE : HYPOTHESE FORTE

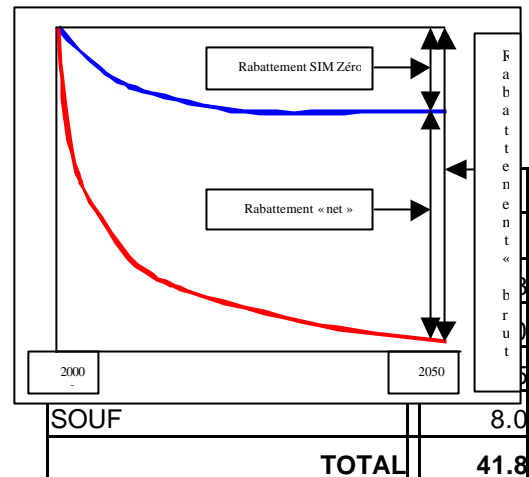
III.1 - Prélèvements Simulés et leur localisation

Algérie _ Hypothèse FORTE	
CI _ Q additionnels _ m3/s	
TOUAT-GOURARA-TIDIKELT	29.0
ISKRA	1.4
OUED RHIR	7.0
OUARGLA	4.0
SOUF	3.9
MZAB	14.3
TASSILI	0.0
Total	59.6

III.2 - Résultats en termes de Rabattements et Niveaux

Rabattements Bruts VS Rabattements Nets

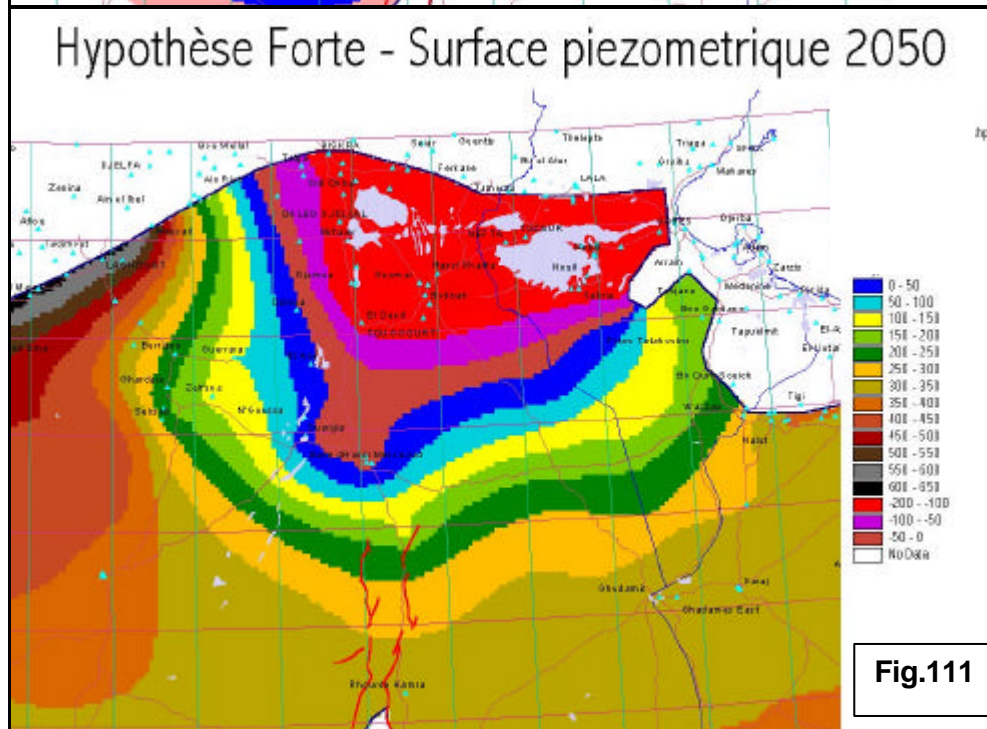
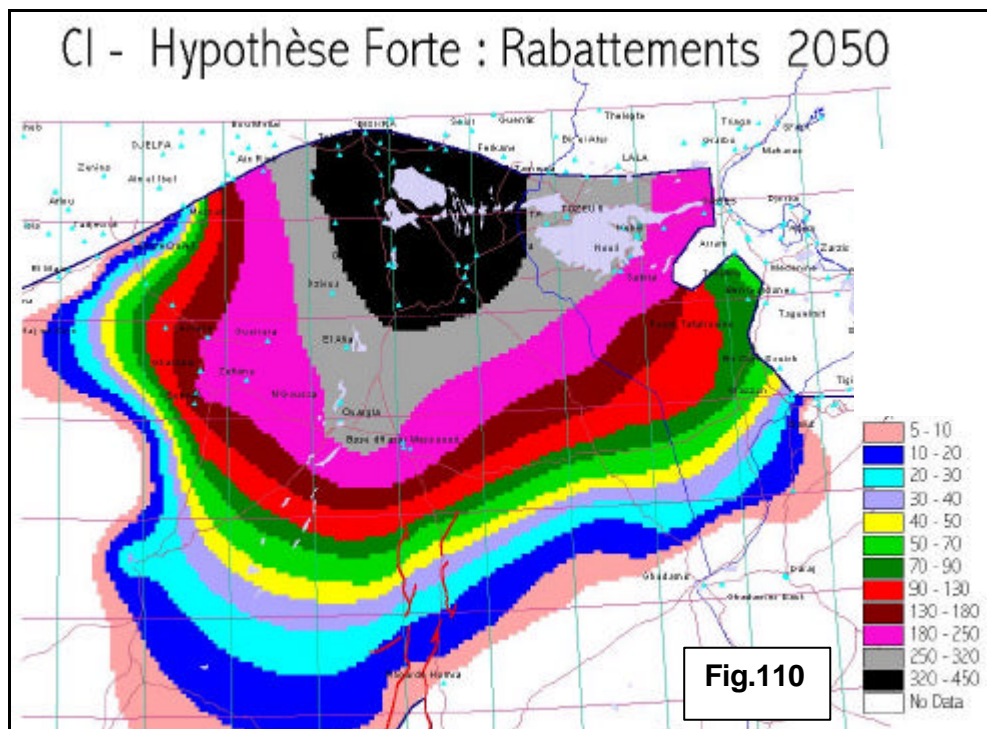
si en un point donné et à un instant donné, s_0 désigne le rabattement calculé en ce point et à cet instant lors de la simulation zéro, s_b désigne le rabattement brut ou rabattement en ce point et au même instant calculé lors de la simulation de l'hypothèse forte, alors s_n , tel que $s_n = s_b - s_0$, désignera le rabattement net au même point et au même instant correspondant à la même simulation de l'hypothèse forte.



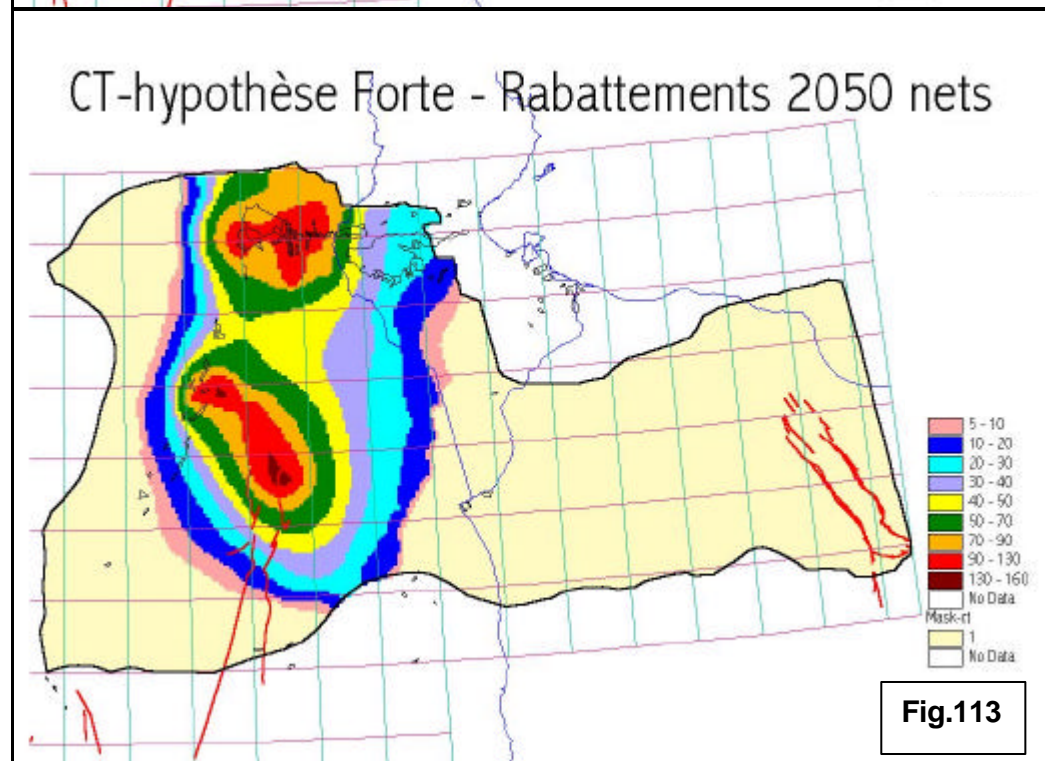
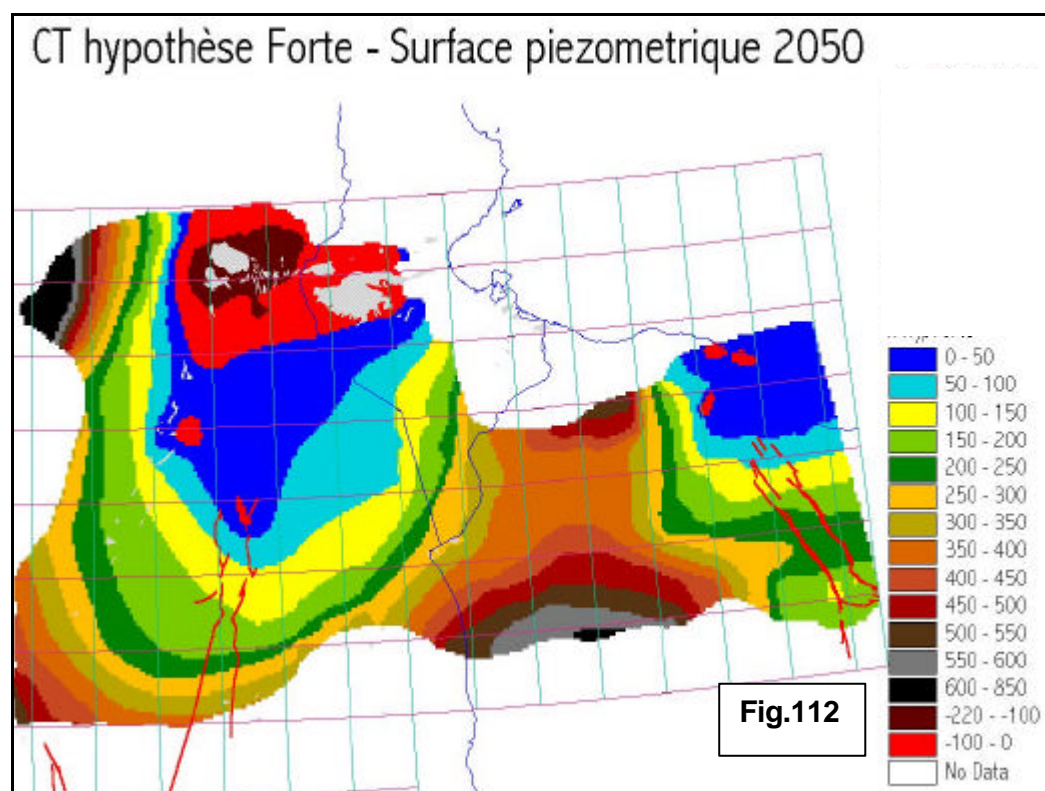
Les figures suivantes présentent respectivement :

- La carte des Rabattements 2050 au CI après déduction des rabattements de la Simulation Zéro (fig.110) et que nous appellerons « **rabattements nets** » (voir encadré)
- La carte des Niveaux Piézométriques calculés en 2050 au CI (fig. 111)
- La carte des Niveaux Piézométriques calculés en 2050 au CT (fig. 112)
- La carte des Rabattements nets 2050 au CT (fig. 113)
- Les rabattements du scénario zéro dans les Grès Supérieurs (fig. 114)
- La carte des rabattements bruts de l'hypothèse forte dans les Grès Supérieurs (fig. 115)
- La carte des rabattements nets de l'hypothèse forte dans les Grès Supérieurs (fig. 116)

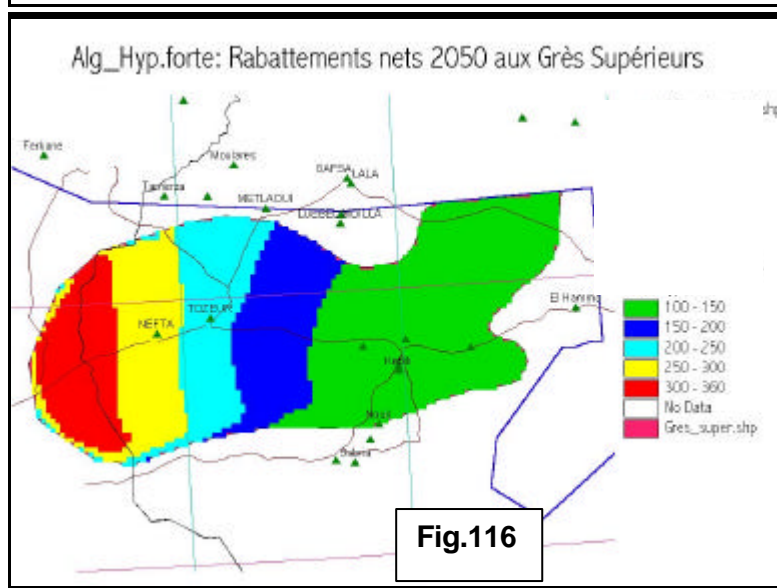
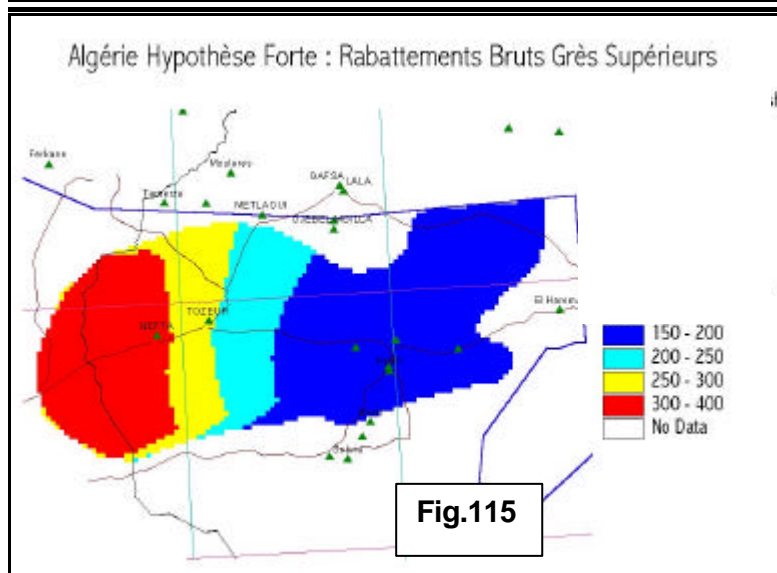
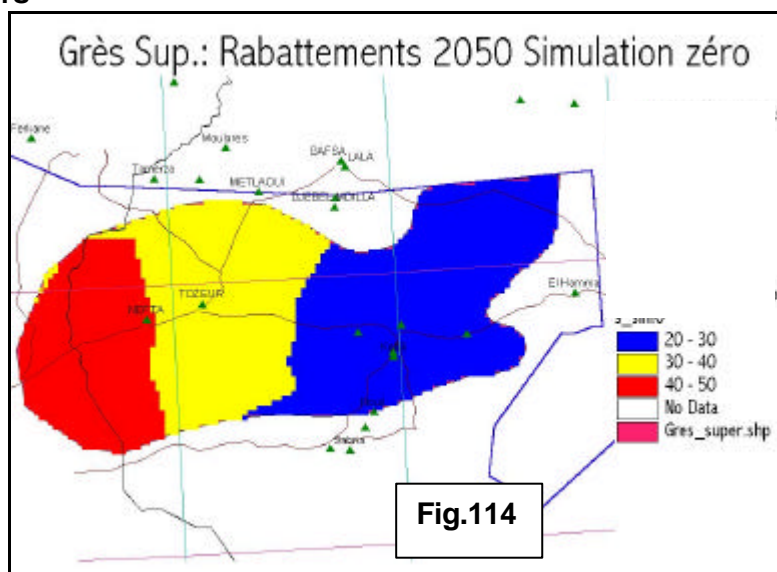
Continental Intercalaire



Complexe Terminal



Grès Supérieurs



IV – ALGERIE : HYPOTHESE FAIBLE

IV.1 - Rappel des Prélèvements Simulés

Algérie _ Hypothèse FAIBLE	
CI _ Q- additionnels _ m3/s	
TOUAT-GOURARA-TIDIKELT	16.6
BISKRA	1.1
OUED RHIR	6.0
OUARGLA	2.0
SOUF	2.5
MZAB	8.2
TASSILI	0.0
TOTAL	36.4

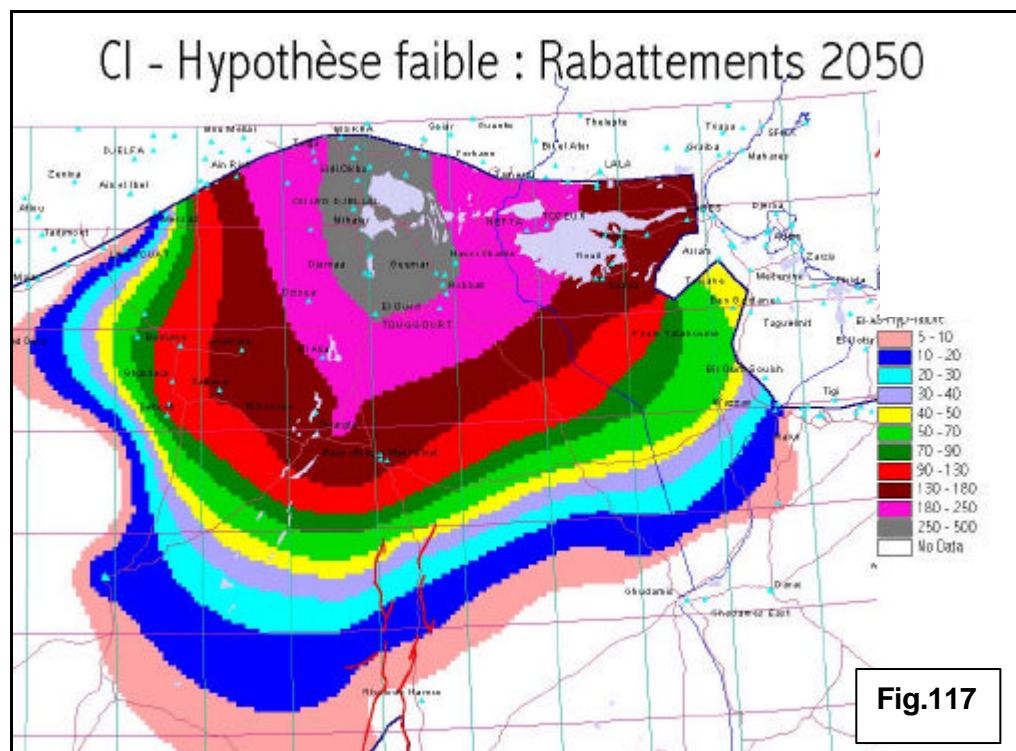
Algérie _ Hypothèse FAIBLE	
CT _ Q- additionnels _ m3/s	
O.RHIR	3.8
OUARGLA	5
H.MESSAOUD-G.TOUIL	12.3
SOUF	5.0
TOTAL	26.1

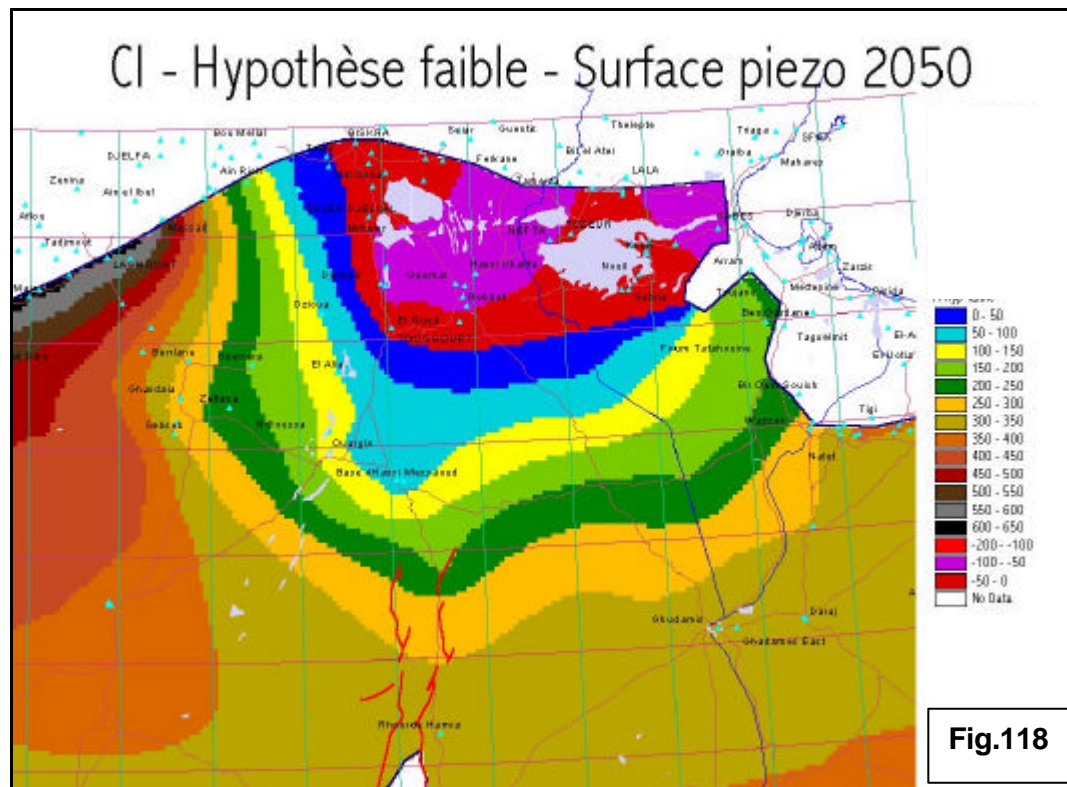
IV.2 - Résultats obtenus en termes de niveaux et rabattements

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus sous forme de :

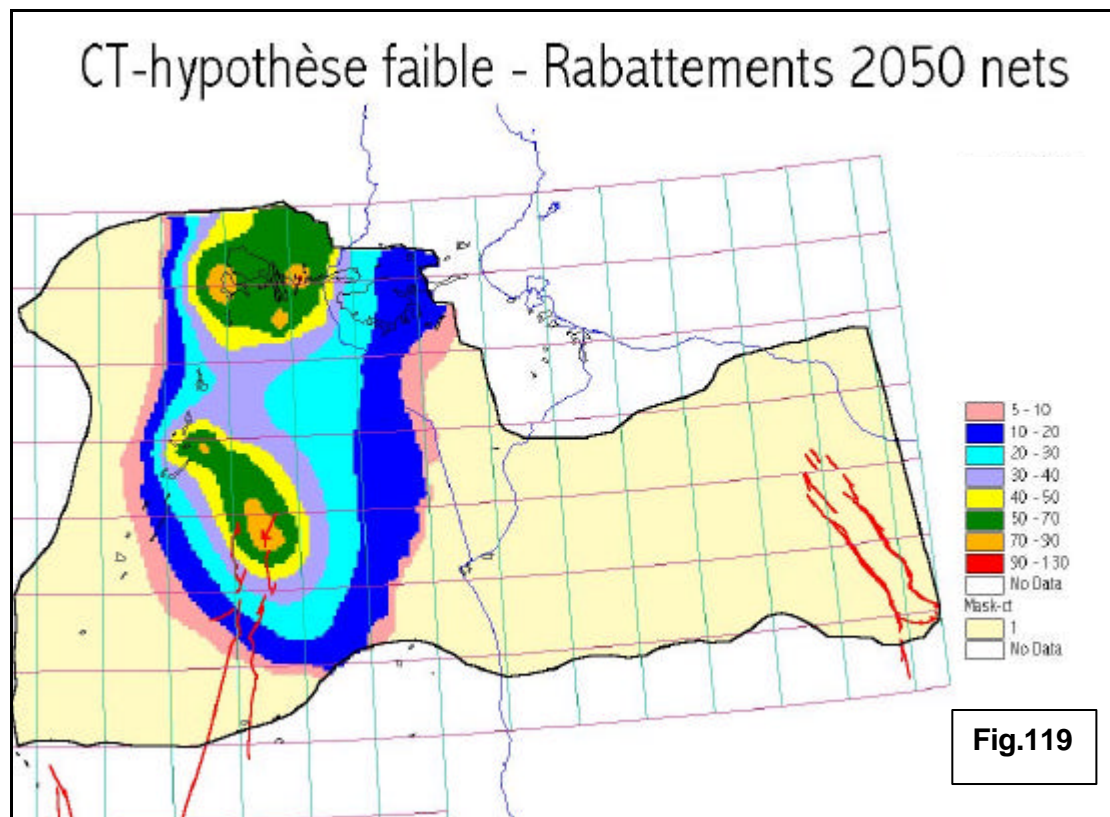
- Carte des rabattements 2050 nets au CI (fig.117)
- Carte des Niveaux Piezométriques 2050 au CI (fig. 118)
- Carte des rabattements 2050 nets au CT (fig. 119)
- Carte des Profondeurs de NP du CT en 2050 sous le niveau des Chotts (fig.120)

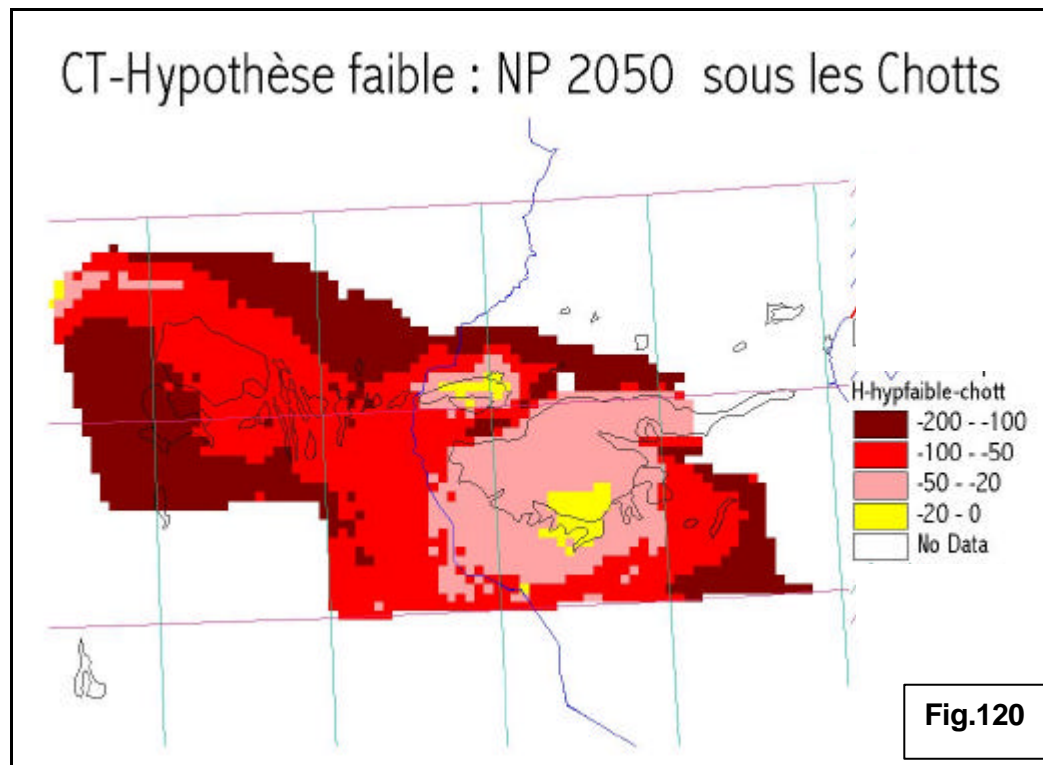
Continental Intercalaire





Complexe Terminal

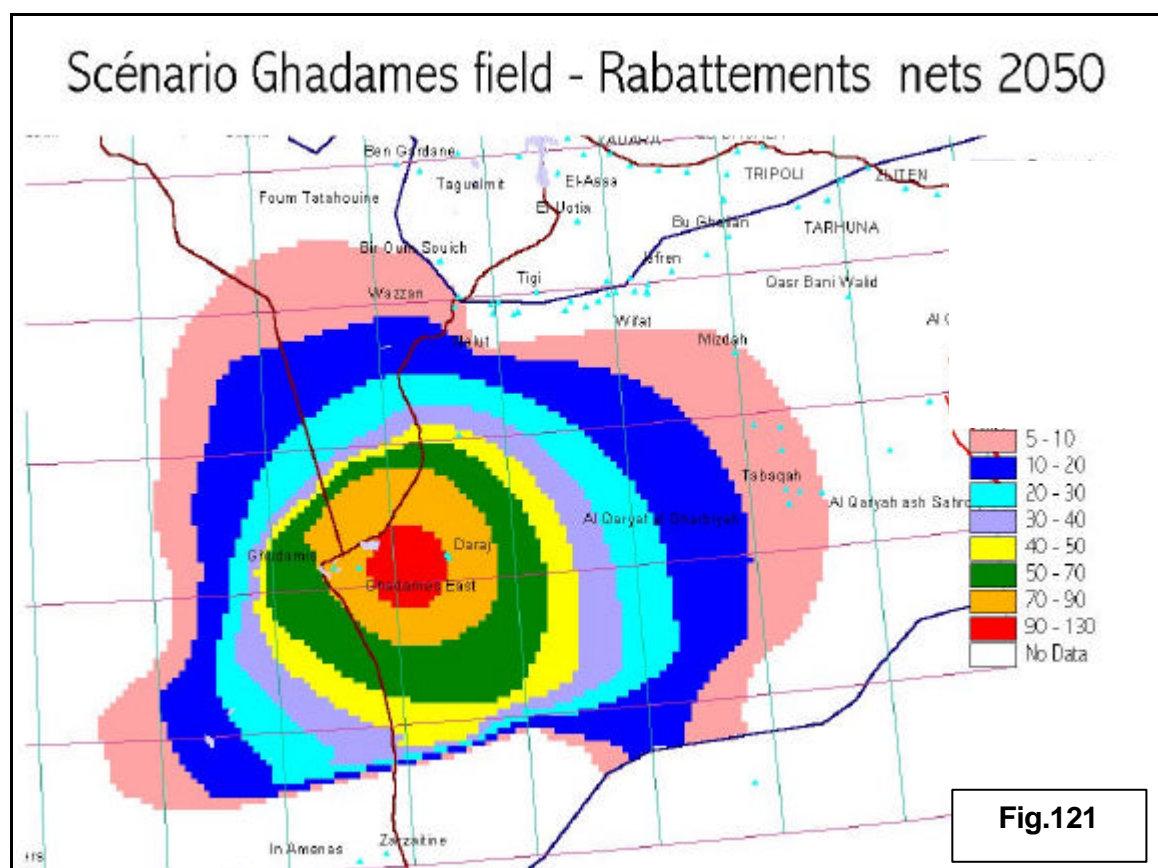




V – LIBYE : GHADAMÈS FIELD

Cette simulation représente le pompage continu d'un débit de **2.85m³/s** au champ captant de Ghadamès-Derj (Continental Intercalaire) de 2001 à 2050.

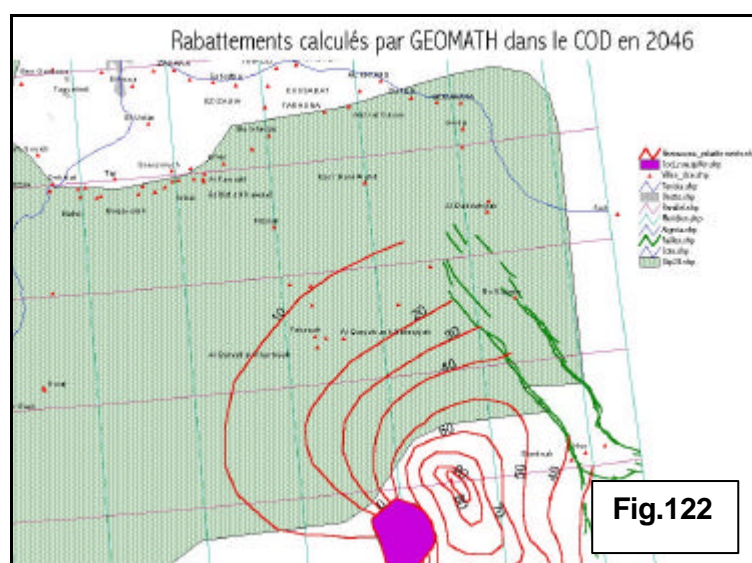
Les rabattements nets (impact spécifique au champ de Ghadamès, déduction faite des effets du maintien de l'actuel) sont présentés ci-après (fig. 121).

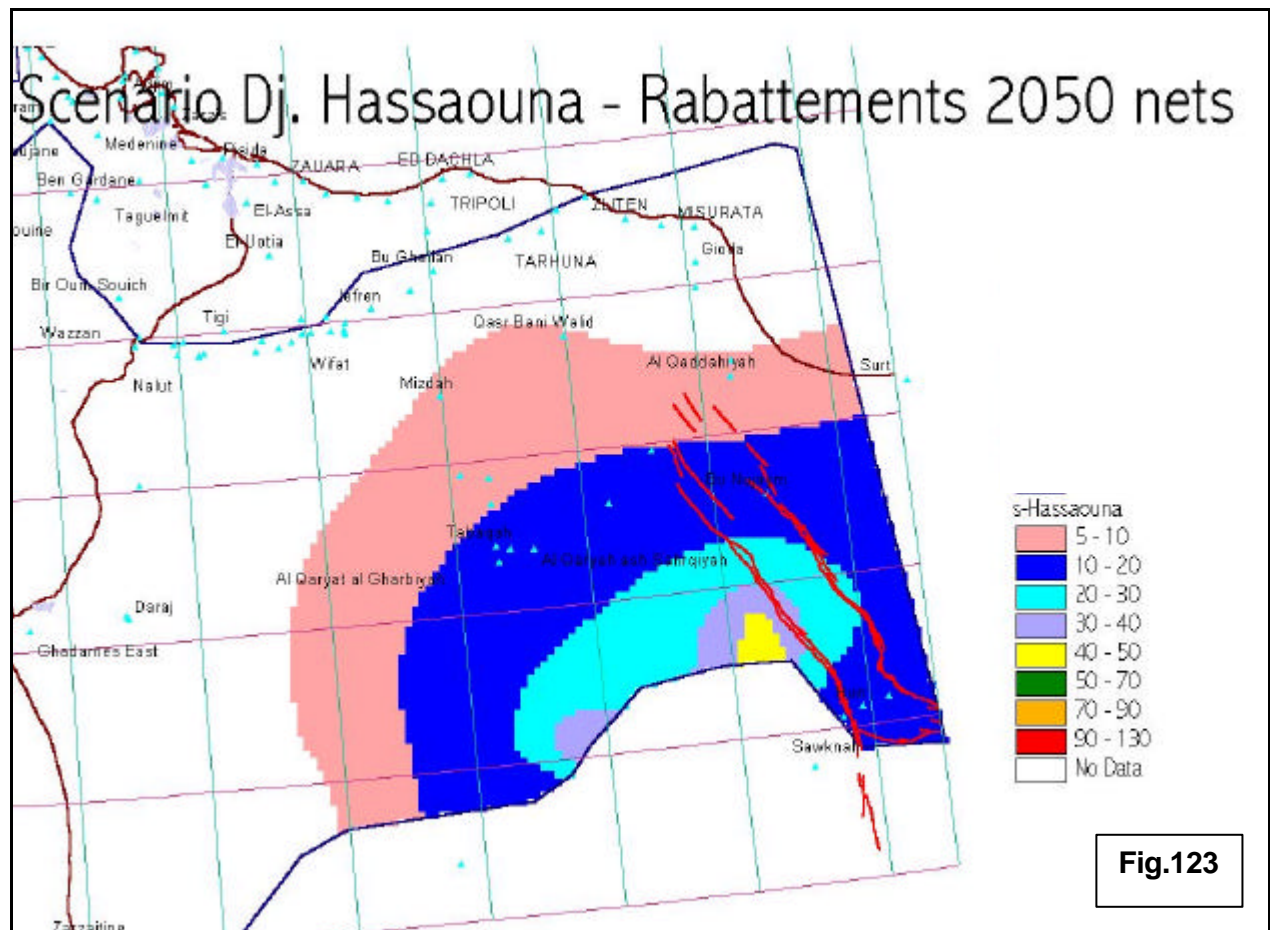


VI – LIBYE : DJ. HASSAOUNA FIELD

Les rabattements calculés par GEOMATH (fig.103 &122) ont servi à déterminer les potentiels de la nappe du Cambro-Ordovicien, imposés constants de 2001 à 2050.

Les résultats calculés, rabattements nets au CI calculés en 2050, (impact spécifique au champ captant du Dj. Hassaouna, déduction faite des effets du maintien de l'actuel) sont présentés ci-après (fig123).





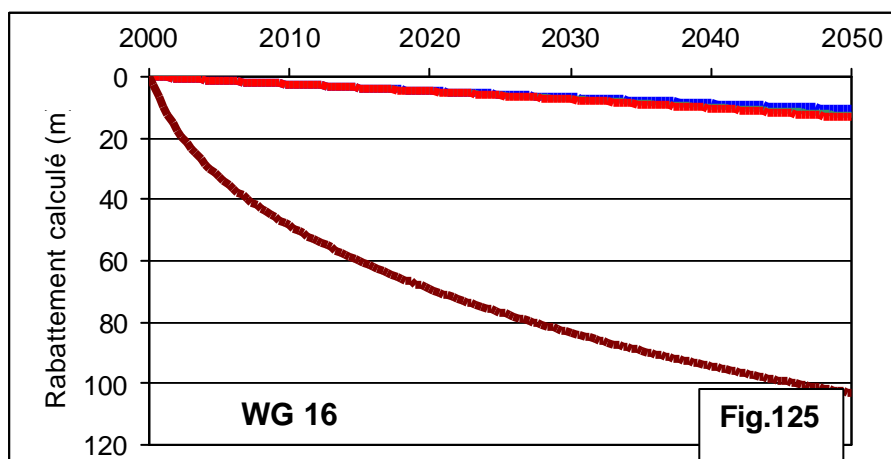
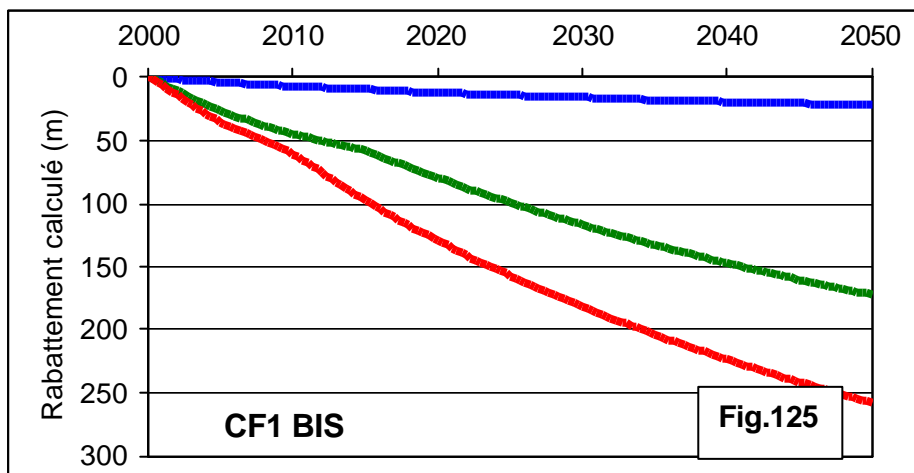
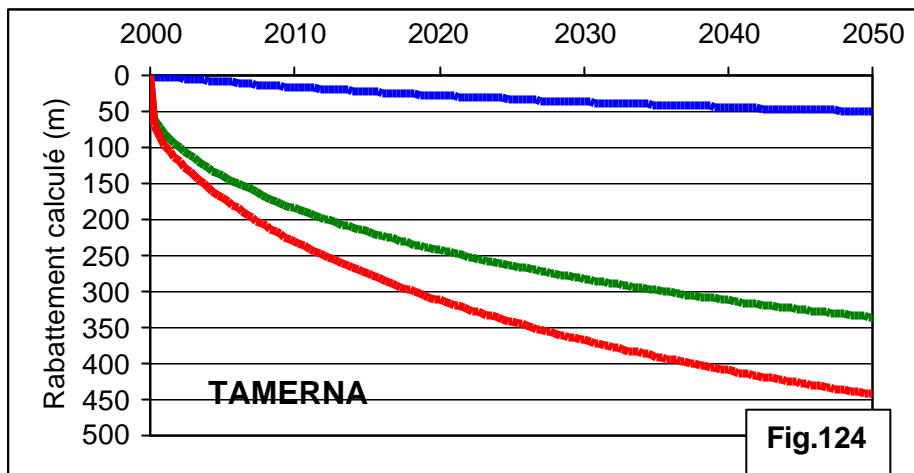
VII – EVOLUTION TEMPORELLE DES RABATTEMENTS

Les fig. 124 à 128 présentent les courbes des rabattements calculés entre 2000 et 2050. Les puits-témoins choisis ont servi au calage du modèle en régime transitoire et sont représentatifs de grandes régions hydrauliques au comportement homogène, régions fortement sollicitées par les simulations ou encore soumises à d'importantes influences exogènes. Ce sont :

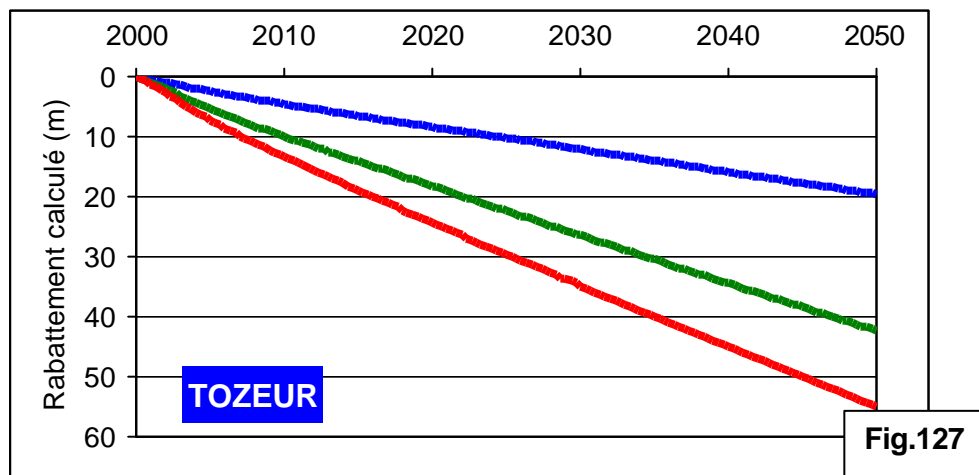
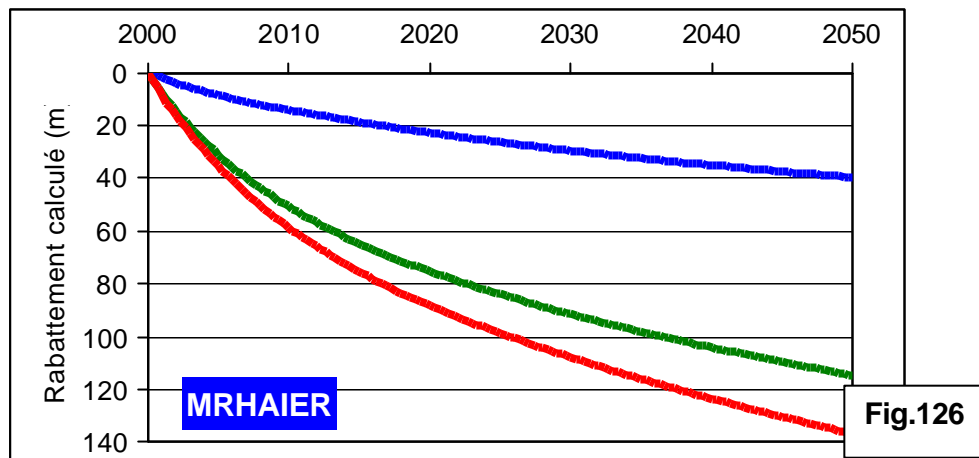
pour le CI : l'Oued Rhir (Tamerna), l'exutoire tunisien (CF), le bassin de Ghadamès (WG),
pour le CT : l'Oued Rhir (Mghaier), le Djerid (Tozeur).

- BLEUE → Simulation Zéro
- ROUGE → Algérie, Hypothèse Forte
- VERTE → Algérie, Hypothèse faible
- MARRON → Ghadamès field, en Libye

VII.1 - Continental Intercalaire – KIKLAH



VII.2 - Complexe Terminal



VIII – BILANS A L'HORIZON 2050

Les Bilans calculés en 2050 pour chacune des simulations effectuées sont présentés ci-dessous et pour chacun des aquifères du SASS : CT, CI et Grès Supérieurs. Pour permettre au lecteur de suivre l'évolution des différents termes du bilan au cours du temps, il est à rappeler, dans les premières colonnes de chaque tableau, les bilans du système calculés respectivement à l'état initial en 1950 et à l'état actuel en 2000.

Dans un dernier tableau, nous présentons l'évolution, pour chacune des simulations et depuis 1950, du débit des trois principaux exutoires naturels du Bassin Saharien :

- La source de Tawargha,
- L'Exutoire tunisien,
- Les Foggaras.

Simulations CT BILAN 2050 m ³ /s	Etat initial 1950	Etat actuel 2000	Simulation Zéro	Alg_Hyp faible	Alg_Hyp forte	Libye Hassaouna	Libye Ghadamès
Entrées (m³/s)							
Alimentation	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2
Drainance Turonien	5.4	6.9	7.2	7.2	7.4	7.0	7.1
Contribution réserves	0	24.9	22.1	48.3	64.0	22.4	22.3
Total Entrées	23.6	50.	47.5	73.8	89.6	47.6	47.6
Sorties (m³/s)							
Pompage	7.5	42.8	42.8	68.8	84.6	42.8	42.8
Drainance Turonien	2.4	2.7	2.8	3.0	3.1	2.9	2.9
Sources & Sebkhas	13.7	4.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Total Sorties	23.6	50.	43.7	73.7	89.6	47.6	47.6

Simulations_CI _ BILANS 2050 m ³ /s	1950	2000	Sim Zero	Hyp faible	Hyp forte	Dj Hassa	Libye Ghad
Entrées (m ³ /s)							
Alimentation	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
Drainance Tur	0.5	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
Drainance G.sup	0	0	0.0	0.0	0.05	0.0	0.0
Apport COD	2.0	2.7	3.0	3.0	3.0	2.3	3.1
Contr.réserves	0	21.5	19.8	53.7	76.5	19.9	22.2
Limite Orientale	0	0.003	0.008	0.008	0.008	0.009	0.008
Total Entrées	12.0	34.4	32.9	66.9	89.8	32.5	35.7
Sorties (m ³ /s)							
Pompage	0.5	26.8	26.8	63.2	86.4	26.8	29.7
Drainance Tur	3.4	1.7	1.9	1.9	1.9	1.6	1.9
Drainance G.sup	0.4	0.5	0.5	0.2	0.1	0.5	0.5
Sources-Sbkhas	7.7	5.4	3.7	1.6	1.4	3.6	3.6
vers COD	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0
Total Sorties	11.6	35	32.9	66.9	89.8	32.5	35.7

Grès Sup BILANS 2050 m ³ /s	1950	2000	Sim Zero	Hyp faible	Hyp forte	Libye Hassa	Libye Ghad
Entrées (m³/s)							
Drainance Tur	0	0	0	0.3	0.4	0	0
Drainance CI	0.4	0.5	0.5	0.2	0.1	0.5	0.5
Réserves	0	0	0	0	0	0	0
Total Entrées	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sorties (m³/s)							
Pompage	0	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Drainance Tur	0.15	0.04	0.01	0	0	0.01	0.01
Drainance CI	0	0	0	0	0.05	0	0
Chott Fedjej	0.26	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Total Sorties	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

IX – ANALYSE DES RESULTATS DES SIMULATIONS

IX.1 - Effets de la poursuite de l'actuel

IX.1.1 - au Continental Intercalaire

La simple poursuite des prélèvements actuels devrait entraîner d'ici à **l'horizon 2050 d'importants rabattements** (mesurés par référence aux niveaux 2000) **dans tout le Bas Sahara algérien, supérieurs à 40 m sur une aire de près de 200.000 Km²**, centrée approximativement sur un axe El Oued-Hassi Messaoud. Ailleurs en Algérie et notamment dans les zones d'affleurement du CI, les rabattements demeurent faibles, notamment dans la Wilaya d'Adrar où le maximum est de l'ordre de **15m** dans le Touat.

En Tunisie, les rabattements sont partout supérieurs à 20m. Ils dépassent **40m** dans le secteur de Ksar Ghilane et sont de l'ordre de **25m** autour du Chott Fedjej.

En Libye, les rabattements sont d'environ 25m sur une bande de 100 km x 300 Km entourant les 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.

La détermination des profondeurs des Niveaux Piezométriques (fig.106) montre que les limites d'artésianisme calculées en 2050 ne sont pas très éloignées des limites actuelles : la perte d'artésianisme se trouve limitée aux secteurs d'El Borma et de Ghadamès. Nous devons toutefois noter que dans ces régions qui se situent sur des limites de basculement (limite à 0m de profondeur), nos résultats dépendent beaucoup de la précision altimétrique du Modèle Numérique de Terrain que nous utilisons, ainsi bien entendu que de la précision sur le calcul des niveaux piezométriques de notre propre modèle : cette dernière peut être évaluée par les « écarts de calage » admis sur la situation piézométrique initiale du système, calculée par le modèle en 1950.

IX.1.2 - sur la nappe des Grès Supérieurs

Les rabattements 2050 varient entre 20m à l'Est (à proximité du Chott Fedjej) et 50m à la limite Ouest de l'aquifère.

IX.1.3 - au Complexe Terminal

En Algérie, les rabattements 2050 dépassent 30m dans toute la vallée de l'Oued Rhir au Nord de Toggourt ; ils atteignent 60m au nord des chotts.

En Tunisie, les rabattements se situent 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, par comparaison à la situation actuelle, 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.

Sur cet éventuel phénomène, nous n'en savons pas plus aujourd'hui qu'il y a quelques années. En effet, s'il existe bien une source potentielle de contamination saline majeure de la nappe du CT, c'est bien des Chotts algériens et tunisiens qu'elle peut provenir en priorité.

Une modélisation précise des liens entre la nappe du CT et les chotts nécessite une analyse fine et une prise en compte des mécanismes régissant les échanges entre ces deux entités.

Cette analyse, qui n'a pas encore été abordée à l'échelle locale et sous-régionale, ne peut évidemment pas se concevoir sérieusement à l'échelle du SASS dans l'immédiat. Dans notre modèle, la liaison s'effectue à travers une simple perméabilité verticale et les transferts de matière seraient instantanés s'ils arrivaient à être activés.

En pratique, la version actuelle du Modèle SASS a abandonné toute liaison directe entre CT et Chott en cas de dénoyage de celui-ci. En effet, les quelques historiques de salinités disponibles dans la Base de Données SASS et la disposition des forages correspondants autour des Chotts ne permettent pas de conclure que les augmentations constatées puissent être imputables à une arrivée de sel en provenance du Chott.

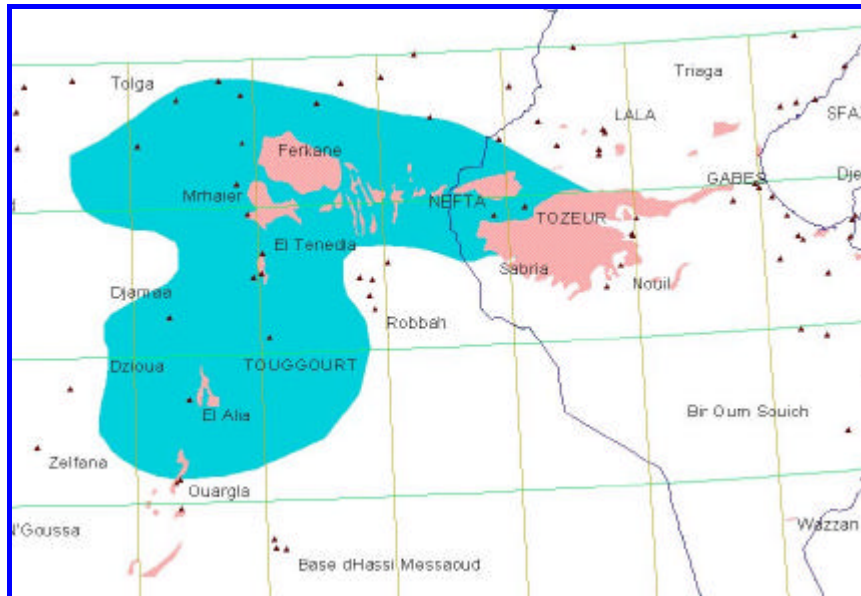
En réalité, on ne possède pas encore d'observations scientifiquement validées permettant de décrire en connaissance de cause les relations et les écoulements entre les Chotts et la nappe du CT. Ces deux entités ne se trouvent du reste généralement pas en contact direct.

En effet, en Algérie la zone des chotts correspond à une zone d'effondrement où se développent les formations imperméables de l'Eocène évaporitique (cf. fig. 59 et 129).

En Tunisie, les formations du CT se trouvent à très grande profondeur sous le Chott Djerid, ce dernier ayant été le siège d'une forte subsidence MioPliocène ; mais cette série se biseaute brusquement autour du Chott et des communications préférentielles, dans les deux sens, ne sont pas à exclure notamment au Sud-Est dans la Nefzaoua et au Nord vers le secteur du Djerid.

En vérité, les importants écoulements de la nappe du CT vers les chotts pourraient bien se limiter à une simple spéculation hydrodynamique, certes fortement suggérée par la piézométrie régionale, s'il n'y avait les « aiouns » du Chott Djérid, dont l'important débit initialement estimé entre 3 et 5 m³/s ne peut provenir que de la nappe du CT.

**fig. 129 : limite d'extension de l'Eocène évaporitique
sous le MioPliocène (d'après Bel et Demargne)**



Vis à vis des aquifères du CT, les chotts représentent un risque majeur, dans la mesure où d'importants rabattements de nappe à proximité des chotts peuvent induire des arrivées d'eaux sur-salées et provoquer ainsi une dégradation irréversible de la ressource en eau.

Le Modèle permet de calculer précisément le moment à partir duquel peut survenir une éventuelle réalimentation de la nappe par le chott. Le premier indicateur permettant d'évaluer l'éventualité d'un tel risque est fourni par la position du niveau piezométrique de la nappe relativement à la côte du Chott.

**fig. 130 : sources artésiennes du Chott Djerid, les « Aiouns »,
photo Berkaloﬀ, (in M. Gosselin, 1952)**



Les fig. 100-a, 100-b et 109 (profondeurs calculées du NP sous le sol) montrent bien l'évolution reconstituée au cours des 50 années écoulées et **l'évolution prévisible de cet indicateur au cours des 50 prochaines années.**

Alors qu'en 2000 subsiste encore une zone d'artésianisme non négligeable notamment sur la rive sud du chott Djérid et le nord du Melhir (fig. 100-b), en 2050, l'artésianisme a totalement disparu de la région des Chotts, et l'on peut même observer (fig. 109) que des secteurs comme la Presqu'île de Kebili, la Nefzaoua, le Djerid, les Chotts Merouane et Melhir, paraissent sérieusement menacés dans la mesure où les NP de la nappe du CT s'y trouve systématiquement sous le niveau 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, mais pas complètement disparu. Il en reste encore en 2050 quelques îlots et notamment dans la zone côtière qui constitue la zone la plus exposée au risque d'inversion des écoulements.

IX.2 - Effets de l'Hypothèse Forte en Algérie

IX.2.1 - au Continental Intercalaire

Si l'on considère les rabattements « nets »⁴ calculés en 2050, on peut noter des valeurs **extrêmement fortes** autour des principaux champs captants : Ghardaia, Oued Rhir, El Oued, Ouargla, où elles sont de **l'ordre de 300 à 400m**. Dans l'Adrar, les rabattements nets dépassent **50m**, notamment dans le Touat et le Tidikelt, ce qui ne manquera pas de se répercuter sur le débit des Foggaras.

La carte des profondeurs du NP sous le sol (fig.131) indique une disparition totale de l'artésianisme de la nappe Albienne dans le Bas Sahara algérien. Une poche limitée d'artésianisme subsiste toutefois sur la moitié sud de la Wilaya de Ouargla ainsi que dans le Tidikelt. Ailleurs et dans toute la vallée de l'Oued Rhir, les profondeurs de pompage se situent entre 100m et 300m.

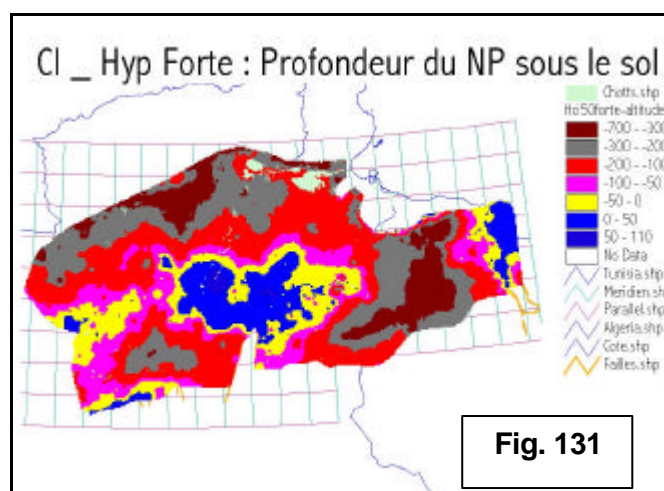


Fig. 131

⁴ calculés après déduction des Rabattements correspondant à la simulation zéro

Si la Libye n'est pratiquement pas touchée par ce scénario, la Tunisie se trouve quant à elle très fortement influencée (en termes de rabattements nets, cf. fig.110) par la réalisation d'une telle hypothèse :

- **Rabattements entre 200 et 300 m** dans les secteurs des principaux champs captants
- **Profondeurs de Pompages de 100 à 300 m** dans les zones d'exploitation principales
- **Extinction Générale de tout artésianisme**
- **Disparition totale de l'Exutoire Tunisien**

IX.2.2 - sur la nappe des Grès Supérieurs

Les rabattements bruts calculés sont considérables : ils varient entre **150m à l'Est et 400 m à l'Ouest**. Quant aux **rabattements nets**, qui traduisent l'influence propre au scénario, ils varient de **100m à 350m**.

IX.2.3 - au Complexe Terminal

En Algérie même, ce scénario provoque de très importants rabattements additionnels (ou encore rabattements nets), autour notamment des champs de prélèvements additionnels les plus intenses situés :

- dans l'Oued Rhir [$4\text{m}^3/\text{s}$] et le Souf au Nord [$10\text{m}^3/\text{s}$]
- à Ouargla [$10\text{m}^3/\text{s}$] et Hassi Messaoud-Gassi Touil au Sud [$19,5\text{m}^3/\text{s}$]

Les rabattements additionnels calculés là vont de **70 à 150 m**.

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 20 à 40m dans la Nefzaoua**
- Tous les Chotts (Djerid et Rharsa) sont en position de réalimentation vis à vis de la nappe 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 Melrhir et Merouane et atteint 200m à Mghaier et Djamaâ.

IX.3 - Effets de l'Hypothèse Faible en Algérie

IX.3.1- au Continental Intercalaire

En Algérie, comparés à ceux de l'hypothèse forte les **rabattements sont légèrement moins étendus** dans l'espace et en amplitude, mais demeurent très importants : de l'ordre de **300m à El Oued-Biskra en « brut » et de 250m en « net »**. L'artésianisme a également disparu de tout le Bas Sahara et les profondeurs de pompage y sont de l'ordre de 100m.

En Tunisie, l'artésianisme a totalement disparu et les rabattements nets induits varient entre 100m et 200m dans les principaux champs captants. Quant à l'Exutoire Tunisien, il est complètement tari.

IX.3.2 - au Complexe Terminal :

Les rabattements sont encore très élevés, aussi bien en Algérie qu'en termes d'influence sur la Tunisie. Les Chotts sont partout en position de réalimentation potentielle vis à vis de la nappe du CT : **la différence de niveau y est de l'ordre de 100m sous les chotts Melrhir et Merouane et varie entre 20 et 60 m sous les chotts Rharsa et Djerid.**

IX.4 - Effets du scénario « Ghadamès field »

Sur le CT, les rabattements induits par cette simulation sont négligeables. Quant au niveau du Continental Intercalaire, les rabattements nets calculés sont de l'ordre de **100m** dans le champ captant de Ghadamès-Derj. Ils diminuent progressivement en s'en éloignant pour **pratiquement s'annuler dans un rayon de 200 à 300 km. Tout l'extrême Sud tunisien est influencé** par les prélèvements de Ghadamès : les rabattements induits varient de 10m (à 200km au Nord du champ captant) à 80 m à Borj el Khadhra. **Dans la région de Debdeb en Algérie les rabattements induits sont de l'ordre de 60 m.**

IX.5 - Effets du scénario « Dj. Hassaouna field »

Au CT, les rabattements nets induits par les captages du Dj. Hassaouna sont faibles, présentant un maximum de 10 à 20 m au centre du graben de Hun .

Au CI, l'influence du Dj. Hassaouna 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.**

CHAPITRE II : MINIATURISATION DU MODELE POUR L'INVESTIGATION DU RESERVOIR

I – POURQUOI UN MODELE MINIATURE ?

La conduite des simulations exploratoires et l'analyse des résultats obtenus ont explicitement mis en exergue un certain nombre de nuisances et de « **risques** » auxquels est exposée la ressource en eau du simple fait de son propre 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 ; 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 des solutions acceptables .

Les techniques de **simulation** permettent au décideur de choisir, parmi les différents scénarios de développement des eaux souterraines envisageables et simulés par le modèle, la solution la plus adéquate, qui répond à des critères formulés au préalable. Dans ce type d'approche, les paramètres du système (transmissivité, coefficient d'emménagement et conditions aux limites) ainsi que les débits de pompage sont connus : les cotes piézométriques et le débit des exutoires sont calculés par le modèle. Les débits de pompage définis par leur intensité et leur position sont les « **variables de décision** ». L'analyse des résultats de chacune des simulations réalisées permet d'orienter le choix du décideur.

Mais lorsque le nombre de solutions envisageables devient élevé :

- c'est le cas lorsque les plans de développement de la ressource ne sont pas établis avec précision,
- ou encore lorsque plusieurs sources d'approvisionnement concurrentes se présentent,
- ou bien encore lorsque des limites précises en termes de risques encourus (« les contraintes ») ont pu être fixées et que la multiplicité de ces contraintes a pu être établie
- ou bien enfin lorsque l'on assigne au modèle de simulation un objectif d'investigation des capacités de production du réservoir aquifère indépendamment de la définition de besoins en eau,

La simulation devient fastidieuse et il vaut mieux alors recourir aux techniques d'**optimisation**. Dans ce cas, les variables d'état (cotes piézométriques, débit des exutoires) sont inconnues, mais les variables de décision (intensité des débits et leurs emplacements) le sont également. On recherche les variables de décision permettant d'obtenir, parmi les solutions envisageables, la solution optimale qui vérifie les critères de choix. Ces derniers définissent la fonction «objectif».

Il peut exister plusieurs fonctions objectif.

Si l'on désigne par **f** la fonction objectif et **q** la variable de décision, le problème de l'optimisation peut être formulé par :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser (ou maximiser) :} \quad & f = \sum_{j=1}^n q_j \\ \text{Sous les contraintes :} \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} q_j \geq b_i \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Les coefficients **a_{ij}** et **b_i** sont des données alors que les **q** sont les variables de décisions inconnues. Les coefficients **a_{ij}** informent sur la réponse de l'aquifère suite à une modification apportée aux prélèvements effectués. On les appelle «**coefficients d'influence**⁵». Le couplage entre les deux approches : simulation et optimisation, est réalisé par le biais de ces coefficients. En effet, ces derniers sont déterminés à partir du modèle de simulation.

Les coefficients d'influence renferment la même quantité d'information que les modèles dont ils sont issus. Ils peuvent être utilisés soit pour formuler des problèmes d'optimisation, soit pour miniaturiser⁶ un modèle de simulation, soit encore pour réaliser une combinaison de ces deux possibilités. C'est cette dernière approche : **un couplage miniaturisation-optimisation**, qui a été privilégiée dans ce qui suit pour la recherche des meilleures solutions envisageables pour la poursuite de l'exploitation des nappes du CI et du CT.

II - FONCTIONS D'INFLUENCE ET COEFFICIENTS D'INFLUENCE

Echelon unitaire de prélèvement et Fonction d'influence

Partant d'un état donné de la nappe [le 31 Décembre 2000 fixé à priori par le SASS : date de fin de l'historique transitoire de référence, état calculé par le modèle], on applique dans une maille **i** un prélèvement égal à l'unité de débit et maintenu constant pendant toute la durée de la simulation [soit jusqu'au 31/12/2050] et l'on calcule le rabattement dans chacune des mailles du modèle (Cf. fig.132). Ce calcul peut être répété pour toutes les mailles. On aboutit à une matrice d'influence à **n²** si **n** est le nombre total des mailles du modèle. Cette matrice est symétrique, en vertu du principe de réciprocité des flux dans le milieu souterrain [**a_{ij} = a_{ji}**].

Soit **a_{ij}(t)** le rabattement provoqué en **j**, et au temps **t**, par l'échelon unitaire de prélèvement en **i**, si l'hypothèse de linéarité de l'écoulement peut être appliquée (ce qui est réalisé en nappe captive loin de conditions aux limites non linéaires), le rabattement (**r**) provoqué en **j** par un pompage quelconque **Q_i** effectué en **i** est égal à :

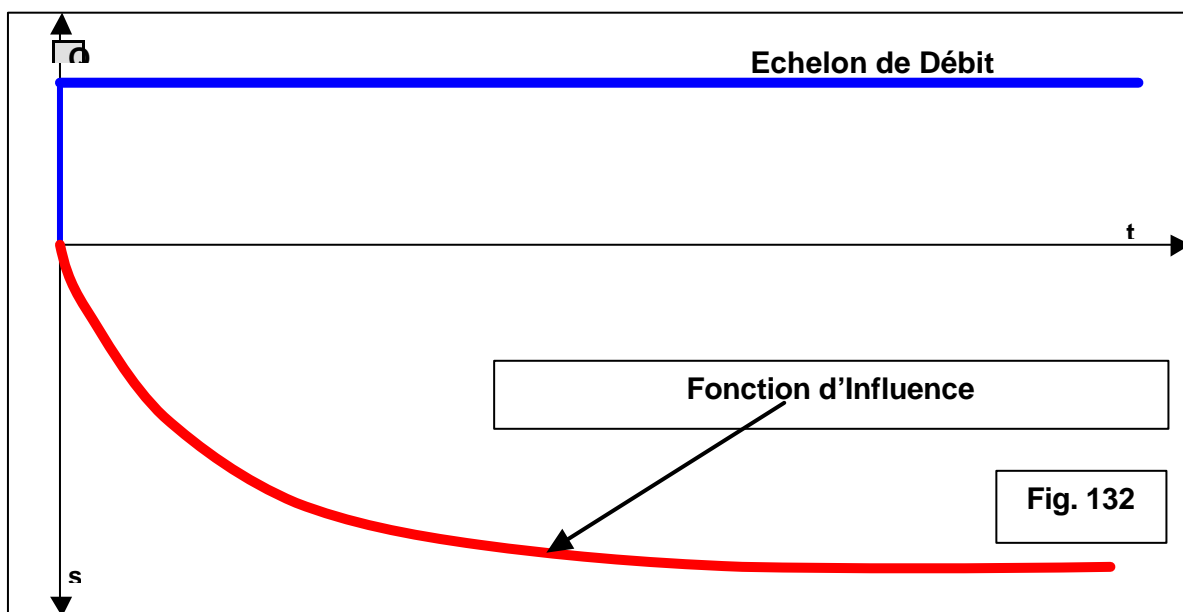
$$r_{ij}(t) = a_{ij}(t) Q_i$$

⁵ P. Hubert : *Eaupuscule*, une introduction à la gestion de l'eau, Ellipses, 1984

⁶ P. Hubert et J. Leon : Miniaturisation des modèles d'écoulement souterrain; c.r. symp. Coblence; UNESCO-IAH ; vol.2, pp 829-841; 1983

La connaissance des coefficients a_{ij} est donc suffisante pour déterminer les rabattements (ou les cotes piézométriques) correspondant à une répartition quelconque des pompages à l'intérieur du système aquifère.

La définition de chaque fonction a_{ij} 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) n'étant pas appelées à devenir peu ou prou des mailles de pompage, ni par ailleurs des endroits où il est nécessaire ni utile de disposer d'une information précise sur les rabattements, il paraît plus commode et efficace de devoir limiter les calculs strictement aux mailles devant servir un jour à réaliser des pompages d'une part et à observer leurs effets d'autre part. Nous pouvons aboutir ainsi à des matrices de coefficients d'influence de dimension « visuelle », que l'on puisse manipuler et dont on puisse immédiatement mesurer les réactions, sur une simple calculatrice programmable ou encore une simple feuille de tableur sur l'écran d'un micro-ordinateur.



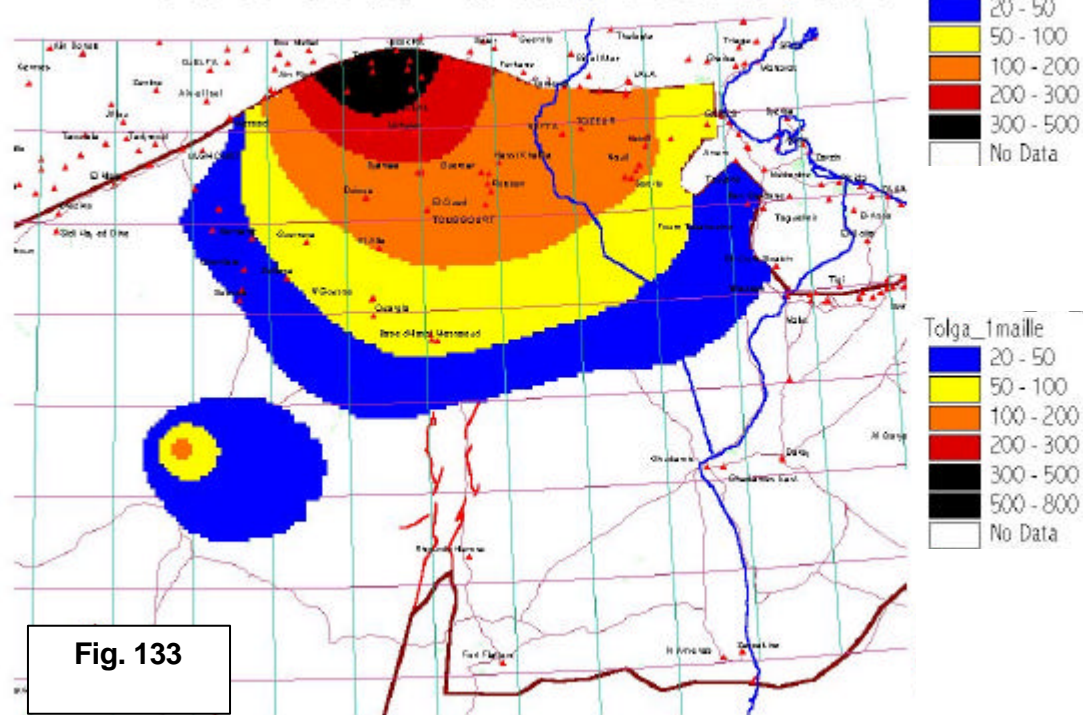
III - PROPRIETES, HYPOTHESES ET APPROXIMATIONS

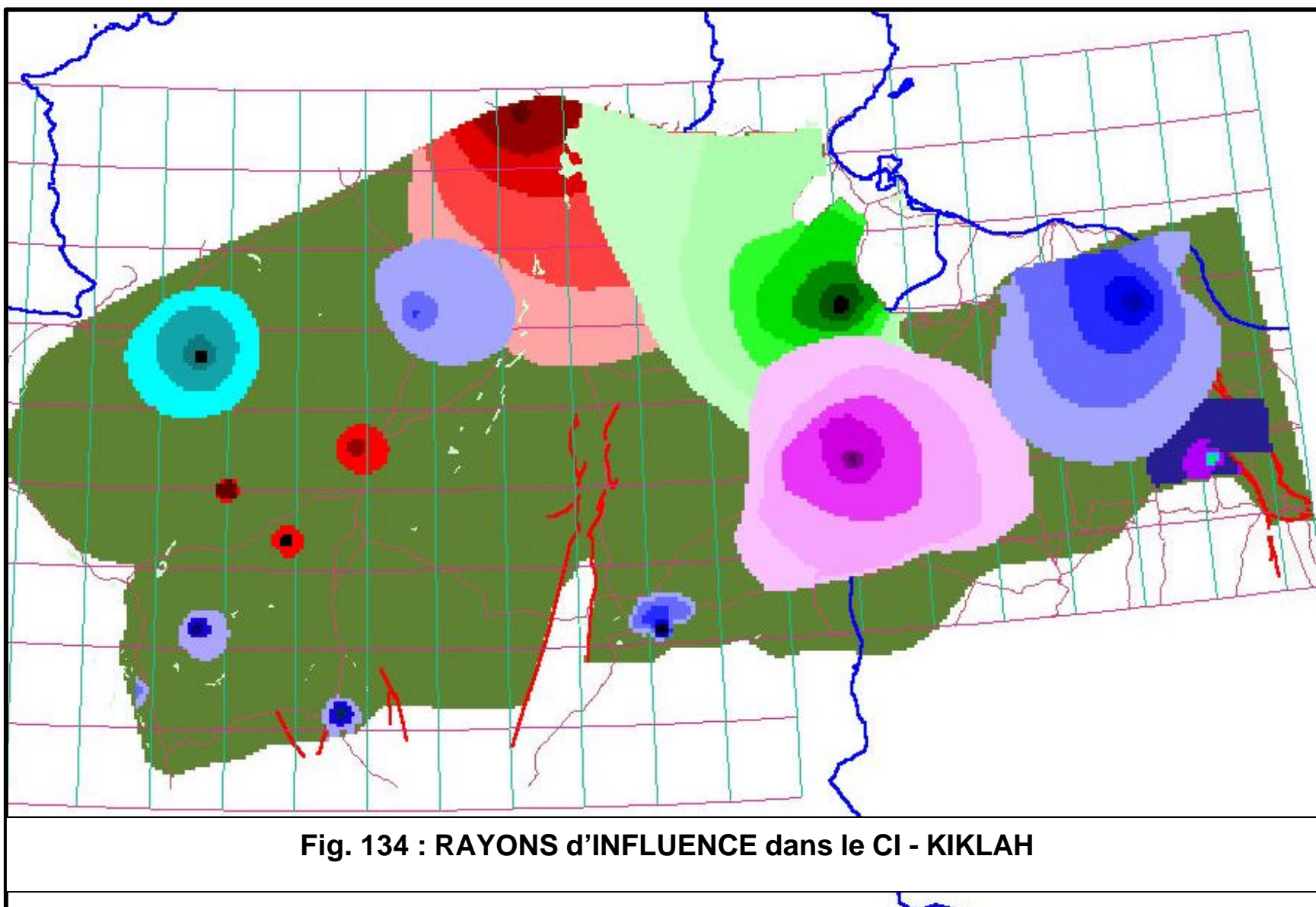
III.1 - Conditions et horizon du calcul

Tous les Calculs sont conduits sur une période de 50 ans allant du 1^{er} janvier 2001 au 31 décembre 2050. Durant cette période, on calcule, dans chacune des mailles sélectionnées pour être des « **mailles-témoins** », une Fonction d'Influence en imposant un débit de pompage constant, égal au « **débit nominal** », dans respectivement chacune des mailles choisies pour constituer les « **mailles-puits** » du SASS.

Nous avons fixé le débit nominal de pompage à $10 \text{ m}^3/\text{s}$, valeur forte certes, mais qui permet, étant donnée la dimension du système aquifère et les distances à considérer en termes d'influence, d'obtenir des valeurs de rabattements significatives à une certaine distance du puits. (Cf. fig. 133).

RAYONS d'INFLUENCE





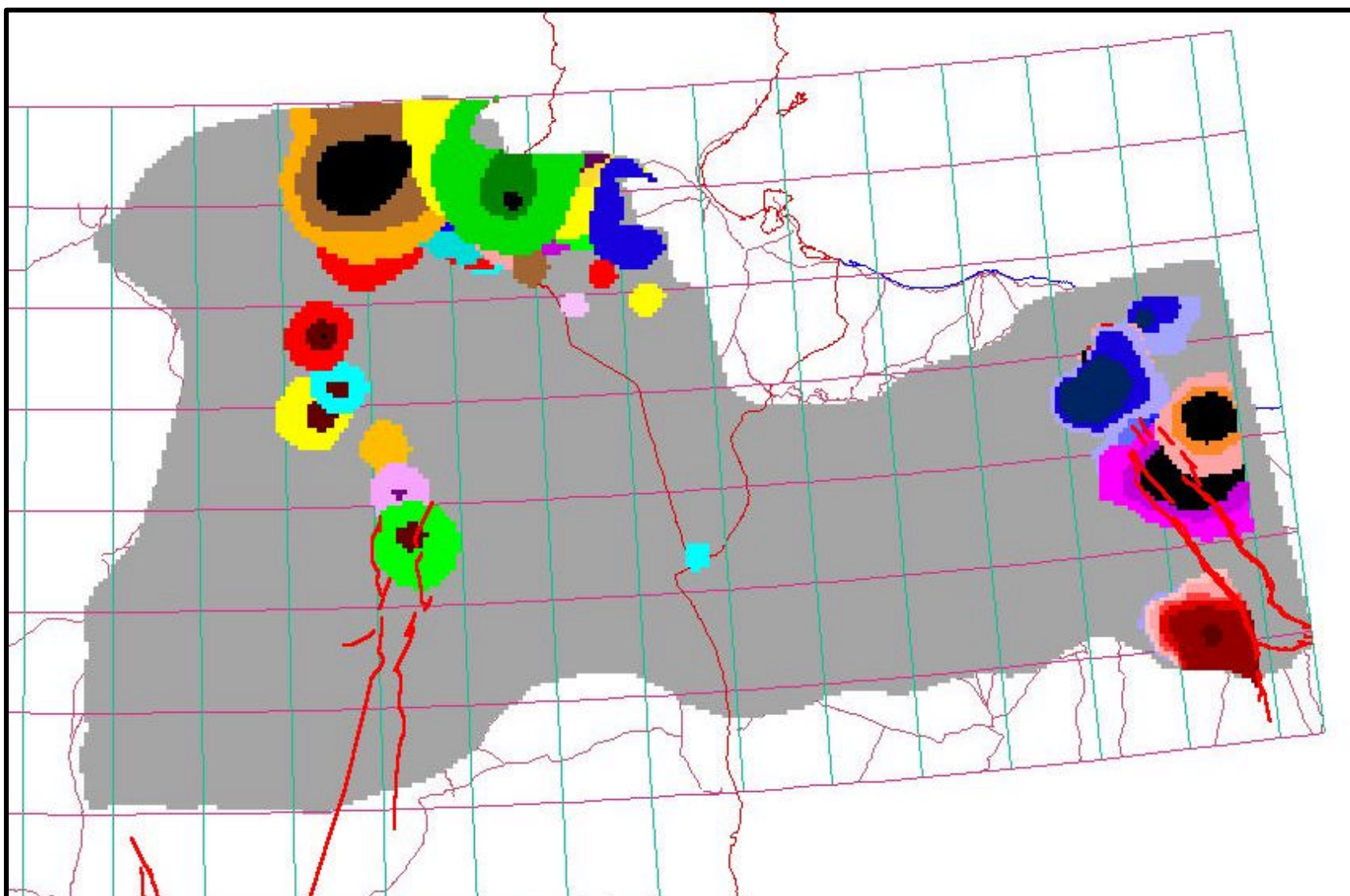


Fig. 135 : RAYONS d'INFLUENCE dans le Complexe Terminal

III.2 - Linéarité des écoulements

L'équation générale de l'écoulement dans le multicouche, qui constitue le Modèle Mathématique du SASS, est donnée par l'expression suivante⁷ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_H + q_B = S \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

$$q_B = K_v \frac{H_B - H_C}{e_B}$$

où :

$$q_H = K_v \frac{H_H - H_C}{e_H}$$

T_x est la Transmissivité de l'aquifère selon Ox

T_y est la Transmissivité de l'aquifère selon Oy

q_H est le Flux spécifique de Drainance vers le Haut

q_B est le Flux spécifique de Drainance vers le Bas

h est la Charge hydraulique dans l'aquifère

H_H est la charge hydraulique dans l'aquifère supérieur

H_B est la charge hydraulique dans l'aquifère inférieur

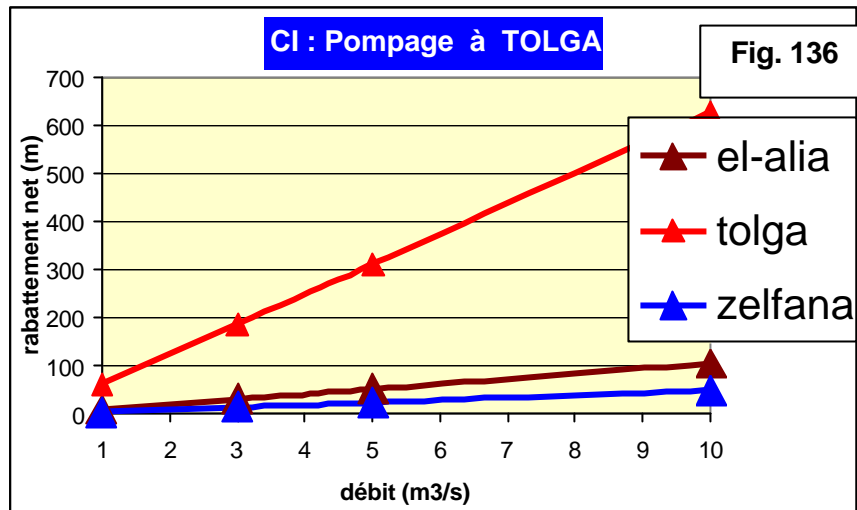
K_v est la perméabilité verticale de la couche semi-perméable

L'équation du multicouche est linéaire, et cette linéarité autorise d'utiliser le « **principe de superposition** », qui énonce que :

- Si h_1 est une solution particulière de l'équation, et h_2 une autre solution particulière, alors $h_1 + h_2$ sera aussi solution de l'équation, avec des conditions appropriées aux limites du domaine.
- Et, d'une manière générale, toute combinaison linéaire à coefficients constants : $h = \alpha h_1 + \beta h_2 + \dots + \gamma h_n$, de solutions $h_1, h_2 \dots h_n$, sera également solution de cette équation. On pourra donc déterminer de nouvelles solutions en combinant des solutions connues.
- Par ailleurs, on pourra superposer les rabattements dus à un système de puits multiples. De la même manière, et encore du fait de la linéarité de l'équation et de l'additivité des solutions, **si à un pompage q correspond un rabattement, alors, à un pompage $\lambda.q$ correspondra un rabattement.**

Cette dernière propriété est évidemment **fondamentale pour valider la miniaturisation du Modèle du SASS**. Elle a été vérifiée sur le Modèle de simulation, sur l'exemple du pompage à Tolga, avec des débits de pompage respectivement à 10m³/s, 5m³/s, 3m³/s, et 1m³/s. La (fig. 136) permet de constater effectivement la proportionnalité des rabattements aux débits.

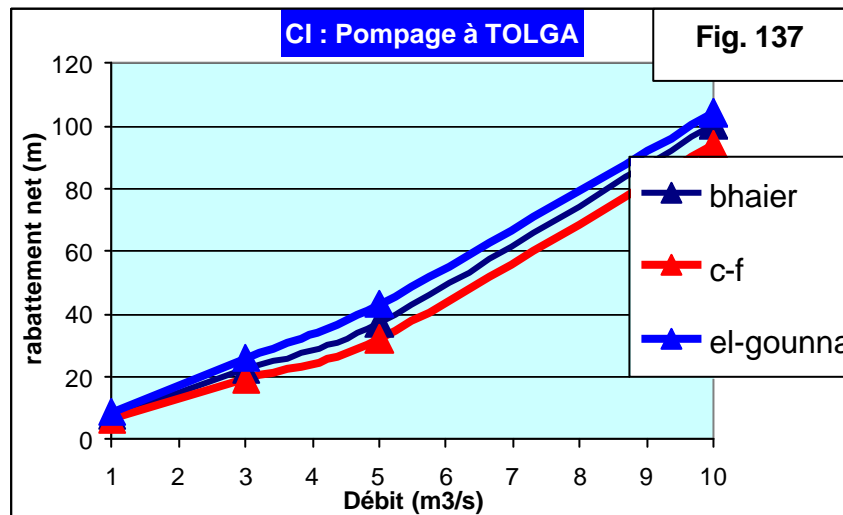
⁷ voir Deuxième Partie : « Discrétisation de l'espace et Modèle mathématique »



Toutefois, **cette propriété n'est pas vérifiée à proximité d'une condition de « Drain » à niveau imposé**, notamment à partir de l'instant où le Drain se trouve «dénoyé». Ce dénoyage marque en effet le passage abrupt, au niveau du drain, d'un régime de «niveau imposé» vers un régime déconnecté (équivalent à un flux nul).

Il est donc naturel qu'une telle condition puisse entraîner de fortes non linéarités dans son voisinage immédiat et au passage entre les deux régimes. C'est ce que l'on peut vérifier sur l'exemple des réactions de la région de Chott Fejej, où l'exutoire tunisien est figuré par une condition de drain (toujours dans le cas du pompage à Tolga : fig. 137).

Cependant, et étant donné le caractère tout à fait local de ces non-linéarités, limitées au voisinage du Chott Fejej et aux foggaras pour le CI, à Ain Taouargha et aux Chotts pour le CT, nous admettrons par la suite l'hypothèse de linéarité sur l'ensemble du domaine du SASS.



III.3 - Allure des Fonctions d'Influence

La fig. 138 montre l'allure de quelques fonctions d'influence, pour un pompage à Chott Fejej. Sur la fig. 139 où le temps est représenté sur une échelle logarithmique, on peut réaliser que la pseudo-stabilisation des rabattements de la fig. 138 n'était due qu'à la représentation de l'axe des abscisses sur une échelle arithmétique.

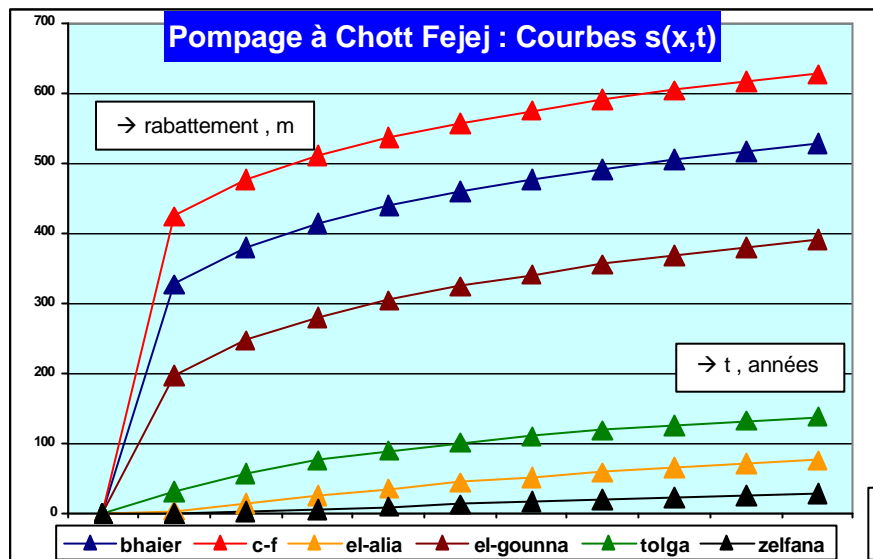


Fig. 138

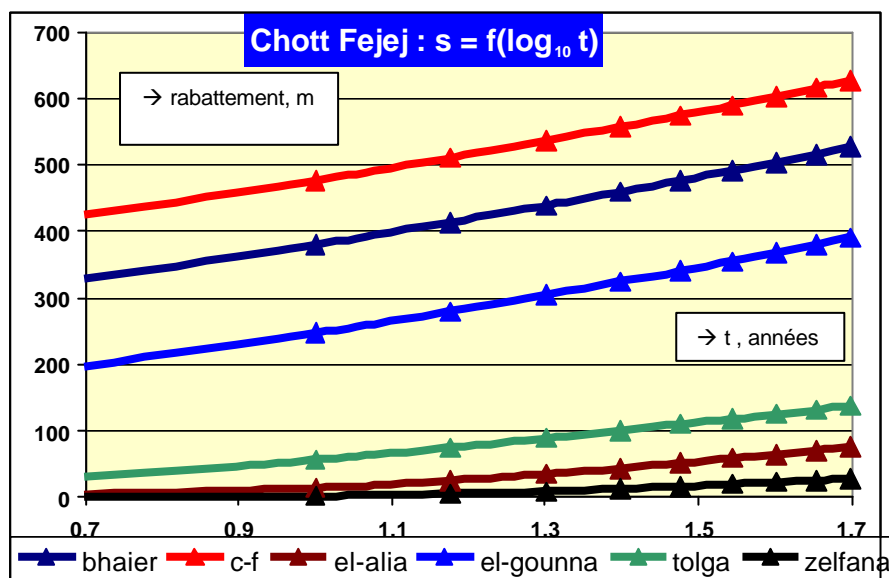


Fig. 139

III.4 - Pompages concentrés VS répartis

Au terme des premiers résultats obtenus, les valeurs des rabattements calculées au centre de certaines mailles avec le débit nominal retenu de **10m³/s** (notamment là où les paramètres hydrauliques sont particulièrement défavorables) nous ont paru excessives. Les débits 2000 affichés sur chacune des mailles du modèle ont été revus, pour constater que, en pratique, les valeurs maximales par maille pour le CI (excepté les forages libyens qui sont provisoirement réunis en « groupes de pompages ») tournaient autour de 400 l/s.

Pour le CT, le constat ci-dessus reste valable, sauf dans la Nefzaoua où nous avons de très fortes valeurs probablement issues de la réunion des « **groupes de sondes à main** ».

En tout état de cause, il a été considéré que le débit nominal de **10m³/s** serait, dans la pratique, non pas concentré au centre d'une maille de pompage unique, mais réparti sur un groupe de mailles voisines à raison de **400 l/s** par maille, soit un groupe de 25 mailles (cf. fig. 140). Dans ces conditions, les quelques calculs réalisés indiquent que le rabattement dans la maille centrale se limitait à **environ 40% en moyenne**⁸ de ce qu'il serait si le débit total y était concentré (fig. 141).

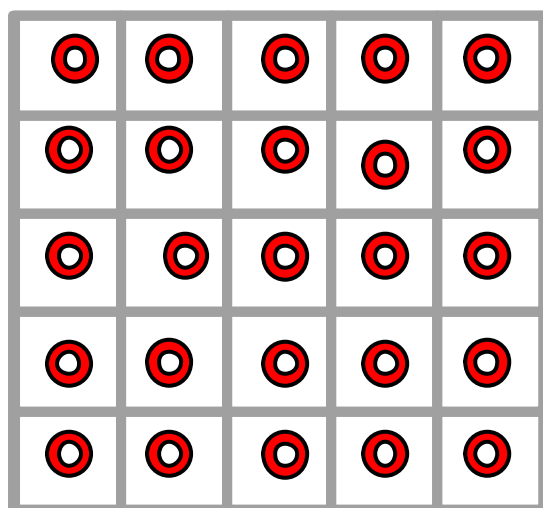


Fig. 140

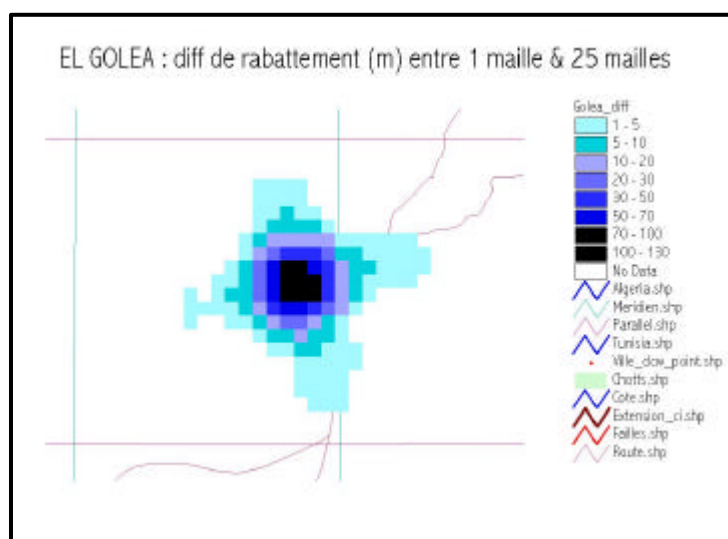


Fig. 141

III.5 - Pompage constant VS graduellement varié

Ainsi qu'il a déjà été procédé pour la conduite des simulations exploratoires et afin que le système aquifère puisse être exploré jusqu'à ses plus extrêmes capacités et dans une optique de « durabilité », il a été simulé un débit constant sur toute la période de calcul, qui va du 1/1/2001 au 31/12/2050. On introduit ainsi un niveau de forçage supplémentaire du système, qui a pour effet d'amplifier les effets attendus du prélèvement affiché. On peut estimer cette amplification en notant l'évolution au cours du temps des valeurs du rabattement obtenues à débit constant. Nous pouvons ainsi observer que, dans la maille pompée, 80% du rabattement total de 50 ans sont atteints dès la dixième année et que cette proportion diminue naturellement à mesure que l'on s'éloigne de la maille de pompage. (fig.142 et 143).

⁸ pour rendre compte des calculs effectués, cette valeur est de 30% à EL Golea et de 50% à Tolga

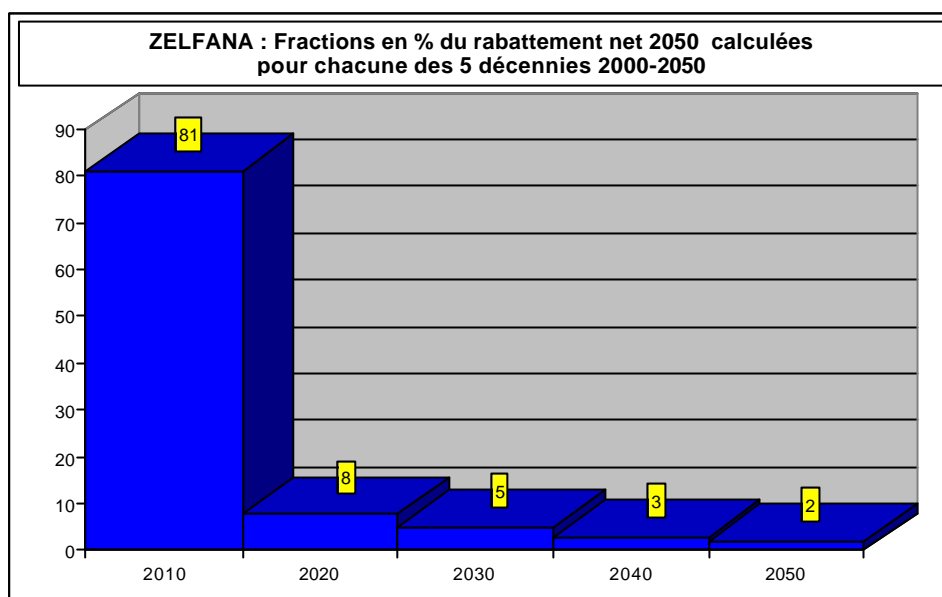


Fig. 142

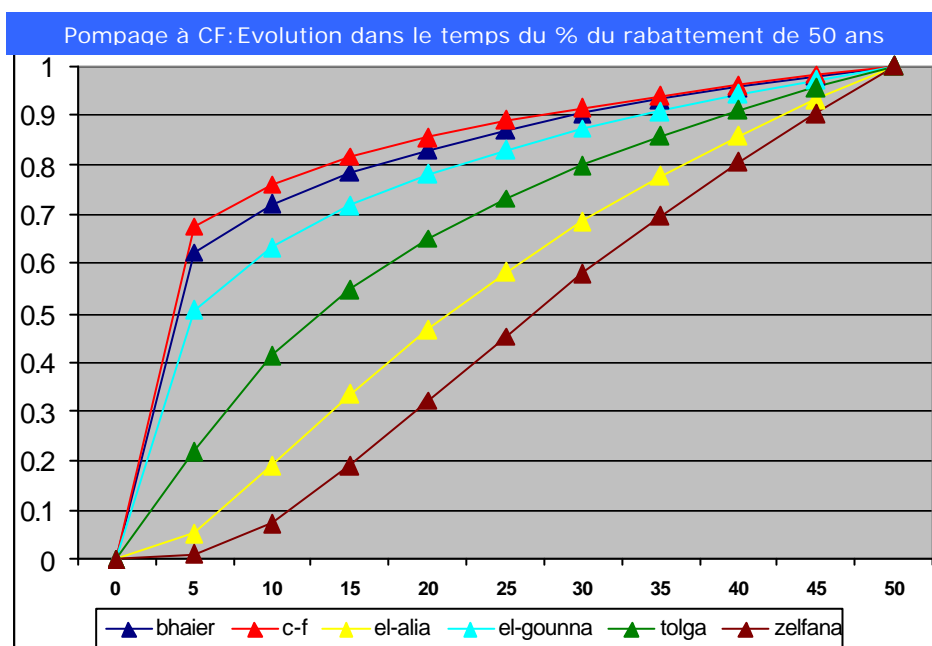


Fig. 143

IV - MATRICE DES COEFFICIENTS D'INFLUENCE

IV.1 - Identification des champs captants et dimension du problème

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, certes, 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 bien évidemment à inventorier dans les deux principales nappes tous les sites de pompages potentiels. Cet inventaire a pu être réalisé pays par pays.

■ Inventaires des sites en Algérie

CI			CT	
ADRAR-MENIA	1	titaf	1	Hassi-messaoud-nord
	2	Akabli	2	Hassi-messaoud
	3	timimoun	3	Gassi-touil
	4	in-salah	4	Ouargla
	5	el-golea	5	N'goussa
DEBDEB	6	fort-flatters	6	El-alia
	7	Deb-deb	7	Taleb-el-arbi
OUED RHIR - EL OUED	8	Ouled-djellal	8	M'ghaier
	9	Tolga	9	El-oued
	10	El-oued	10	Douar-el-maa
	11	Djemaa	11	Ben-geucha
	12	M'ghaier	12	Djemaa
	13	Taleb-el-arbi		
	14	Ben Guecha		
GHARDAIA	15	Douar El Ma		
	16	Sebseb		
	17	Guerrara		
OUARGLA	18	Zelfana		
	19	El-alia		
	20	N'goussa		
	21	Ouargla		
	22	Hassi-Mess-nord		
ERG OCCIDENTAL	23	Timimoun-2		
	24	Erg-occ-1		
	25	Oued-seggeur		
	26	Tiberrhamine		
	27	Ain-guettara		
	28	Erg-occ-2		
	29	Erg-occ-3		
	30	Oued-el-gharbi		

42 sites de pompages potentiels ont pu être inventoriés en **Algérie par l'ANRH, 30 au CI et 12 au CT**, qui correspondent en majorité aux zones de développement agricoles utilisées lors des simulations exploratoires, mais d'autres sites potentiels ont été identifiés, notamment ceux apparentés à l' "erg occidental", et dont l'objectif déclaré était d'investiguer pour la première fois les capacités de production du CI dans ce secteur à priori « éloigné » de toute demande précise pour le moment et voué à l'exportation, si toutefois les résultats du modèle s'y avéraient favorables : l'extension importante que le Modèle du SASS a opérée en direction de ces dernières régions permet précisément de s'adonner à ce type d'exercice.

■ Inventaire des sites en Tunisie

CI			CT	
C. FEJEJ	1	C-F	1	Dhafria
	2	Bhaier	2	Segdoud
NEFZAOUA	3	Sabria	3	Segui
	4	El-gounna	4	Htam
	5	Ghoumrassen	5	Bir-roumi
EXT-SUD	6	Bordj-Bourguiba	6	Tozeur
	7	Bir-zar	7	R-maatoug
	8	Tiaret	8	Zaafrane
DJERID	9	Borjel-khadra	9	Djemna
	10	Hazoua	10	Tembain
	11	Degache-hamma	11	El-ouar
	12	PIK	12	Bordj-el-khadra

24 sites de champs captants potentiels ont pu être identifiés par la DGRE : 12 au CI et 12 au CT .

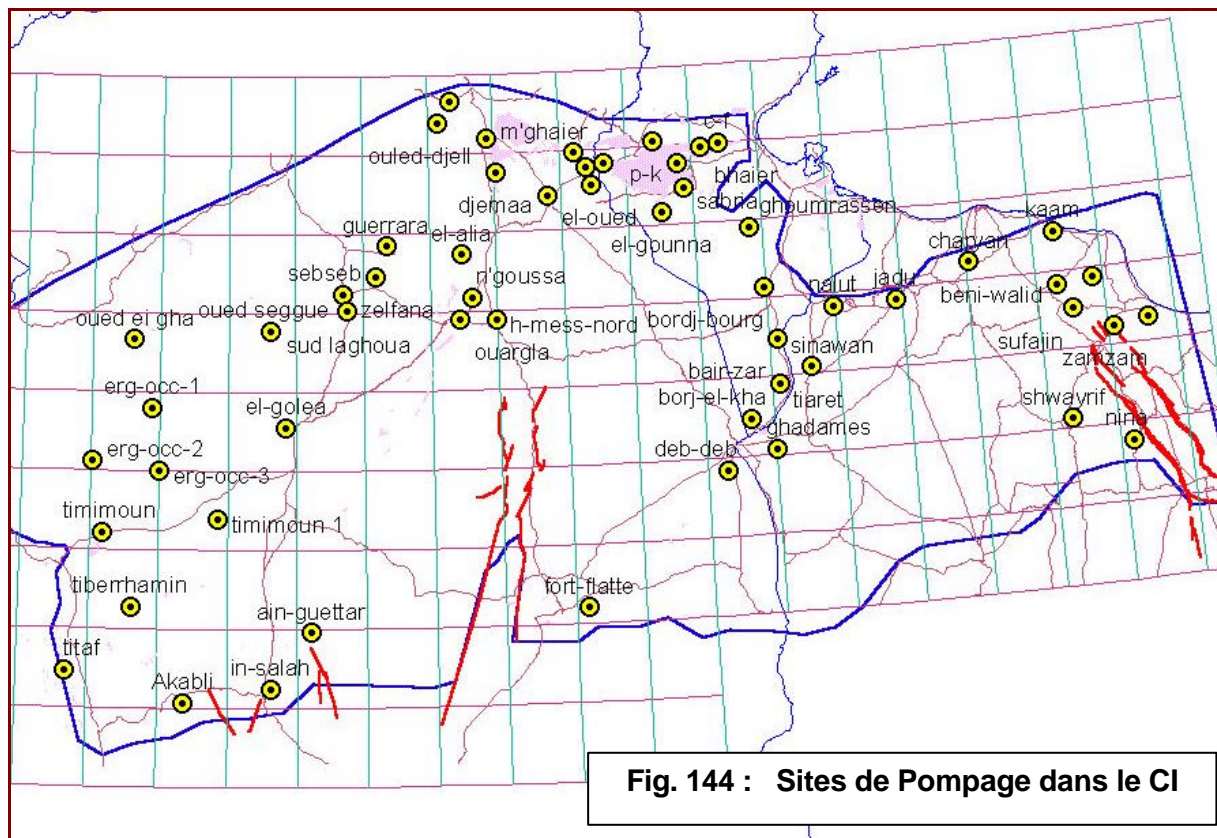
■ Inventaire des sites en Libye

CI			CT	
Bassin ORIENTAL	1	nina	1	ferjan
	2	shwayrif	2	hammam
	3	zamzam	3	abou-njaim
	4	washkha	4	zamzam
	5	sufajin	5	washkha
	6	beni-walid	6	beni-walid
	7	kaam	7	maymoun
	8	mardum	8	kararim
NEFUSA	9	jadu	9	Soknah
	10	gharyan	10	Waddan
	11	Nalut		
GHADAMES	12	Sinawan		
	13	Ghadames		

23 sites sont arrêtés en Libye : 13 au CI et 10 au CT, qui correspondent à des regroupements des sites actuellement en activité recensés par la GWA

IV.2 - La Matrice des Coefficients et le Convertisseur Débits-Rabattements

89 sites de pompages potentiels au total ont été identifiés sur l'ensemble du SASS : **55 au CI** (fig. 144) et **34 au CT** (fig.145). Chacun de ces sites aura 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, dont les plus proches peuvent être regroupés pour simplifier la représentation des sites de pompage.



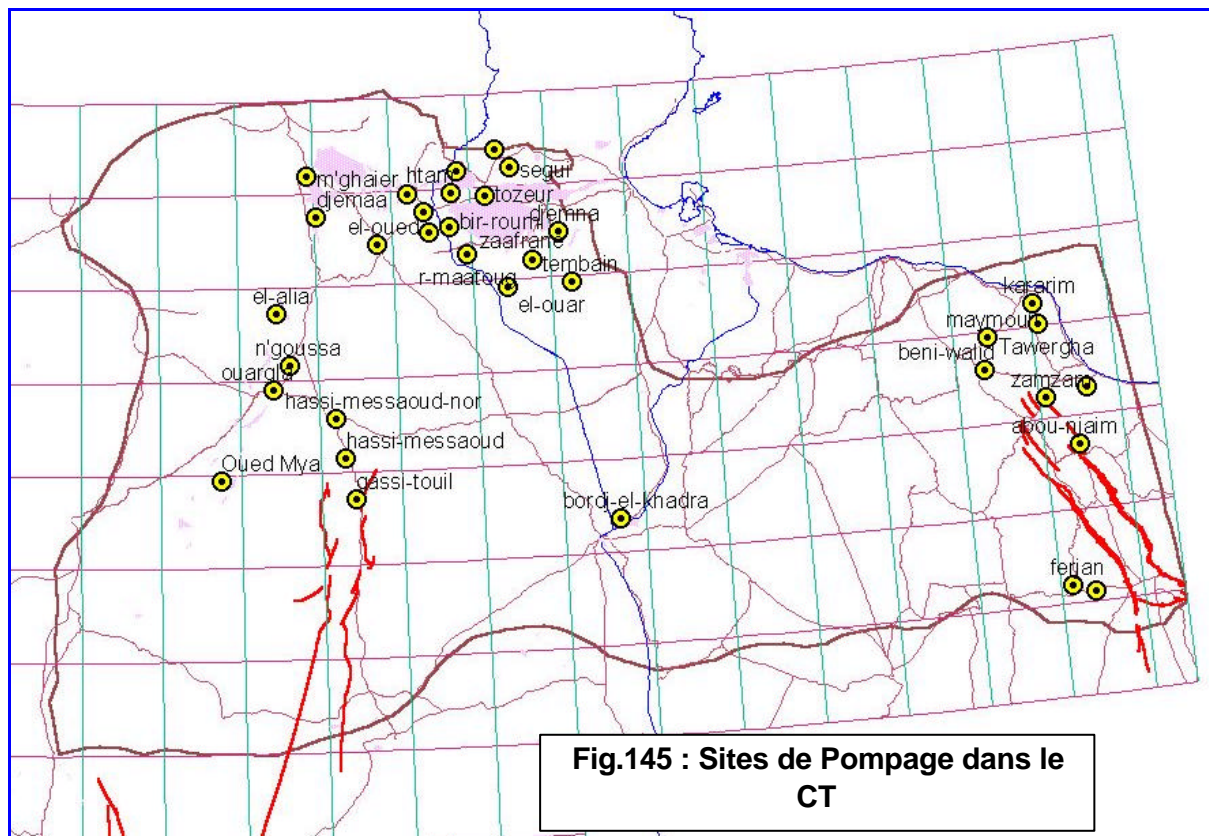
Pour chacune des deux nappes, la dimension de la matrice des coefficients d'influence est devenue trop importante et notamment pour le CI où l'on obtient une taille de 55x55, taille qu'il devient impossible d'afficher dans une fenêtre unique sur écran.

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 (cf. fig. 146).

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 de 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 (fig. 146), et d'autre part l'ensemble du bassin des chotts pour ce qui concerne le CT.



V - OBJECTIFS ET CONTRAINTES DE L'EXPLOITATION DU SASS

V.1 - Objectifs : Maximiser la Production et Préserver la Ressource

Etant données les conditions du climat saharien, les formations du SASS sont faiblement alimentées : environ **1Milliard m³/an** au total, infiltrés essentiellement aux piedmonts de l'Atlas Saharien en Algérie, ainsi que sur le Dahar et le Dj. Nefoussa en Tunisie et Libye.

Cependant, l'extension du système et l'épaisseur des couches ont favorisé l'accumulation de réserves considérables, quoique d'une qualité par endroits plutôt préoccupante : le sel dans ces régions constitue un risque qu'il faut gérer en connaissance de cause.

La question se trouve alors posée, de savoir jusqu'à quel point les nappes sahariennes peuvent elles être sollicitées, certes bien au delà de leur taux de réalimentation actuel, par puisage dans les réserves accumulées, **dans l'optique d'un développement durable** ?

L'évolution passée de cette exploitation 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 faudra-t-il tout d'abord inventorier les risques encourus par la ressource 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.

Fig. 146 : Convertisseur Débits-Rabattements dans la zone d'interférences du CI

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	Rabattemnt-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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	7	37	88	0						
25	Bir-Zar	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	26	22	9	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	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	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	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	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	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	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	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	65	163	154	0						
34	Total Algerie				11.5		Total Tunisie		2.5		Total Libye		3.0		Débit exutoire tunisien (m3/s)										0.50												
Erg-Occidental / Coef2 / TUNISIE / ALGERIE / Alg+Tun+Lib / Coeff / initiale /																																					

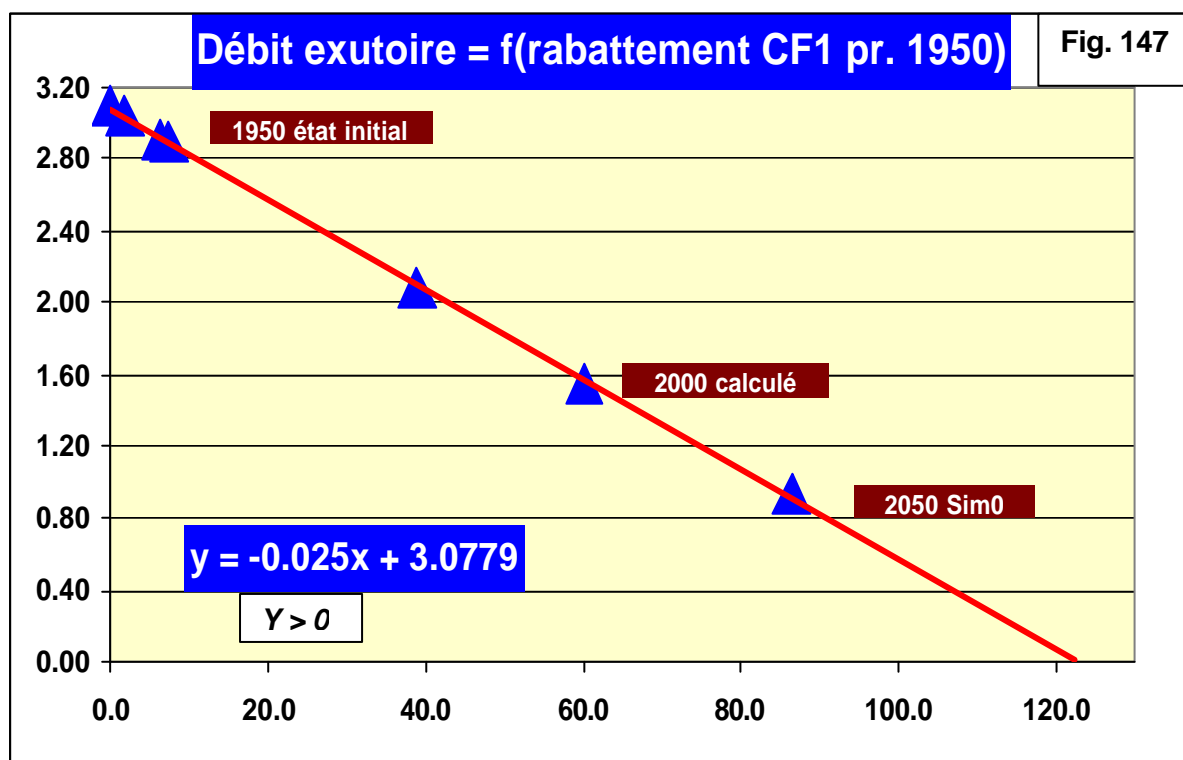
V.2 - Les Contraintes et la Gestion des Risques

Rappelons ci-après les risques majeurs auxquels la poursuite de l'exploitation du SASS et à fortiori son intensification, devra être confrontée :

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

Il s'agit donc dès à présent de quantifier, autant que faire se peut, ces risques afin de pouvoir préciser les contraintes à respecter.

V.2.1 - La Fonction « Exutoire Tunisien »



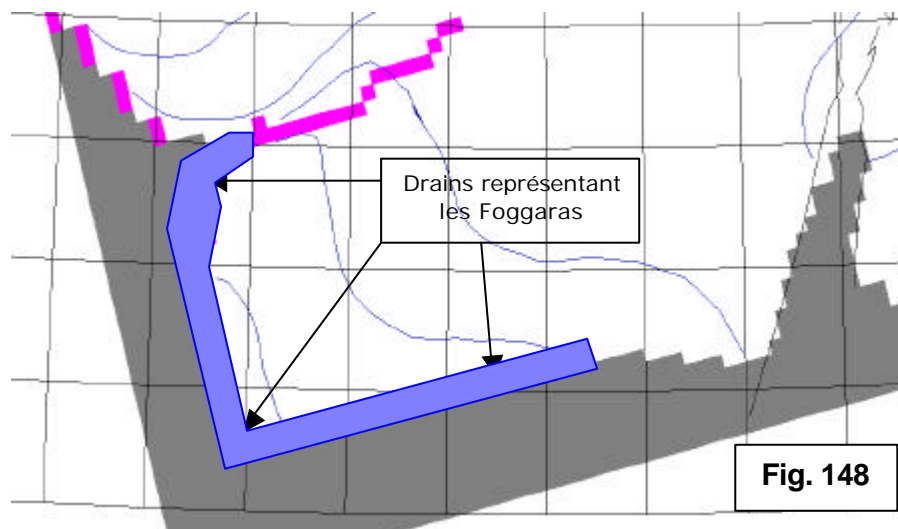
La Fonction « débit-rabattement » de l'exutoire tunisien (ET) a été construite par points, sur l'emplacement du forage CF1, utilisant les résultats des calculs effectués sur le modèle notamment en régime permanent sur 1950 puis en régime transitoire sur les états 2000, sur le régime du scénario zéro en 2050, ainsi que sur certains états intermédiaires calculés.

Tous les points s'alignent parfaitement sur une droite, qui traduit bien le comportement d'un réservoir linéaire dont le débit est proportionnel à la charge. **Cette Fonction permettra de prédire⁹ les situations postérieures à 2000.**

⁹ il s'agit d'une prédiction « rapide » au niveau du micro-modèle.

Le point correspondant à l'horizon 2050 de la simulation zéro est important à souligner. Rappelons que le débit correspondant de l'Exutoire Tunisien, calculé par le modèle numérique, y est estimé à **0.94 m³/s**. Ce débit va constituer la valeur de référence pour l'ensemble des simulations à venir portant sur le développement du CI.

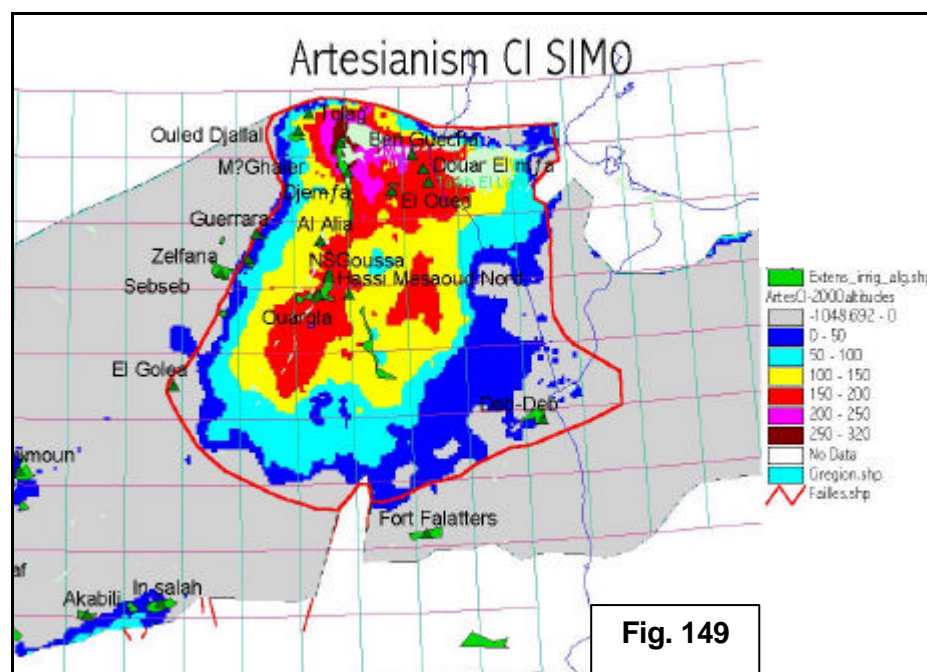
V.2.2 - Les Foggaras Algériennes



Les Foggaras constituent des émergences très dispersées : on peut estimer que 700 foggaras actives occupent un front de 700 km linéaires ; soit une foggara / km en moyenne !

Cette configuration n'est pas pour faciliter la micro-modélisation du système et il paraît difficile d'envisager une relation simple liant le débit total des foggaras à un rabattement moyen de la nappe du CI. Le seul moyen d'estimer le débit des foggaras demeure donc la simulation sur le modèle numérique.

V.2.3 - Maintien de l'Artésianisme



La fig.149 indique le déplacement de la limite d'artésianisme du CI entre 2000 (relevé en 1998) et l'horizon 2050 en scénario zéro. On ne peut évidemment pas envisager de maintenir l'artésianisme partout ; mais il paraît tout à fait possible de maintenir des pressions au sol de l'ordre de la centaine de mètres dans toute la vallée de l'Oued Rhir à condition d'y **exiger des rabattements 2050 inférieurs à 100 m.**

V.2.4 - Minimiser les Hauteurs de Pompes régionalisées

Cette contrainte ne peut être généralisée partout au même niveau. En effet, si dans la vallée de l'Oued Rhir il paraît difficile de se passer de l'artésianisme, dans d'autres régions, le Dj. Nefusa par exemple, des hauteurs de pompage importantes sont d'ores et déjà appliquées, certes pour des forages d'AEP. **Il paraît raisonnable de se limiter à des hauteurs de pompes régionalisées** (au niveau d'un ensemble de mailles du modèle numérique) **de l'ordre de la centaine de mètres.**

V.2.5 - Protection de la nappe du CT vis à vis des Chotts

Vis à vis des aquifères du CT, les chotts représentent un risque majeur, dans la mesure où d'importants rabattements de nappe à proximité des chotts peuvent induire des arrivées d'eaux sur-salées et provoquer ainsi une dégradation irréversible de la ressource en eau.

Le Modèle numérique permet de calculer précisément le moment à partir duquel peut survenir une éventuelle réalimentation la nappe par le chott.

Le premier indicateur permettant d'évaluer l'éventualité d'un tel risque est fourni par la position du niveau piézométrique de la nappe relativement à la côte du Chott.

Rappelons les résultats obtenus par la simulation du scénario zéro, de poursuite de l'actuel : **« Alors qu'en 2000 subsiste encore une zone d'artésianisme non négligeable notamment sur la rive sud du chott Djérid et le nord du Melrhir, en 2050, l'artésianisme a totalement disparu de la région des Chotts** et l'on peut même observer que des secteurs comme la Presqu'île de Kebili, la Nefzaoua, le Djerid, les Chotts Merouane et Melrhir, paraissent sérieusement menacés dans la mesure où les NP de la nappe du CT s'y trouve systématiquement sous le niveau 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** ».

Dans ces conditions, très restrictives, **il conviendra donc de minimiser sous les chotts tout rabattement additionnel lors de la conception des simulations prévisionnelles.**

V.2.6 - Le Champ des Interférences

Un examen de la répartition spatiale des points d'eau indique au CT, dans la région des chotts algéro-tunisiens, **une concentration de forages peu commune, scellant un destin définitivement commun pour les régions de l'Oued Rhir, du Souf, du Djérid et de la Nefzaoua.**

Il est donc à observer que dans cette région, les interférences Algérie-Tunisie seraient dorénavant déterminées par la nécessité de se protéger localement contre les chotts.

Au CI, les régions de l'Oued Rhir, El Oued, le Sillon des Chotts et la Nefzaoua forment une même province hydraulique et sont donc très fortement solidaires en termes d'influences réciproques.

Entre les trois pays du SASS, Algérie, Tunisie et Libye, **le seul champ d'interférences commun se trouve dans le bassin de Ghadamès** au sens large, au CI, qui inclut la région de Debdeb et l'extrême sud tunisien.

CHAPITRE III - DEFINITION ET REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES

I - ATELIER DES 1 & 2/04/02 : CHOIX DES SCENARIOS D'EXPLOITATION DU SASS

Les manipulations réalisées sur le micro-modèle au cours de l'Atelier de Tunis des 1^{er} et 2 Avril 2002, avec les Directeurs Généraux des institutions des trois pays 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, présentés dans le détail par la suite et résumés dans le tableau ci-après, seront simulés sur le modèle numérique qui donne des résultats plus complets et permettra à posteriori de mesurer le degré d'atteinte des objectifs et le niveau de respect des contraintes.

Prélèvements Additionnels au Continental Intercalaire m ³ /s								
SCENARIO	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5	CI-6	CI-7	CI-8
ALGERIE	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					
SCENARIO	CT-1	CT-2	CT-3	CT-4	CT-5
ALGERIE	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.

Alors que les échanges par drainance entre CI et CT peuvent être considérés comme négligeables [relativement aux principaux termes du bilan] en Algérie et en Tunisie, il n'en est rien en Libye où les échanges entre Mizda, Nalut et Kikla prédominent dans le Bassin Oriental. En conséquence, les simulations [en termes de prélèvements additionnels] concernant exclusivement l'Algérie ou la Tunisie ont été conduites indépendamment pour ce qui est des deux aquifères CI et CT : c'est le cas des scénarios **CI-1, CI-2, CI-3, CI-4, CI-5, CI-6** et des **CT-1, CT-2**.

Par contre, les scénarios où la Libye est [en termes de prélèvements additionnels] impliquée, ont fait l'objet de simulations conjointes CI-CT, c'est le cas des scénarios **CI-7 couplé à CT-4** et du scénario **CI-8 couplé à CT-5**.

II - SIMULATION DES SCENARIOS D'EXPLOITATION SUR LE MODELE NUMERIQUE : PRINCIPAUX RESULTATS

II.1 – Le Continental Intercalaire

Simulation 1 : Le Bas Sahara Algérien

CI - 1 – débits additionnels			
Groupe	Q m³/s	Groupe	Q m³/s
Ouled-djellal	0.2	Zelfana	2.0
El-oued	0.2	El-alia	0.1
Djemaa	0.1	N'goussa	0.2
Mghaier	0.2	Ouargla	0.2
Sebseb	2.0	H-Messaoud-nord	0.3
Guerrara	1.0	Deb-deb	2.0
Total		8.5	

Les principes directeurs qui ont présidé à la réalisation de ce scénario sont notamment :

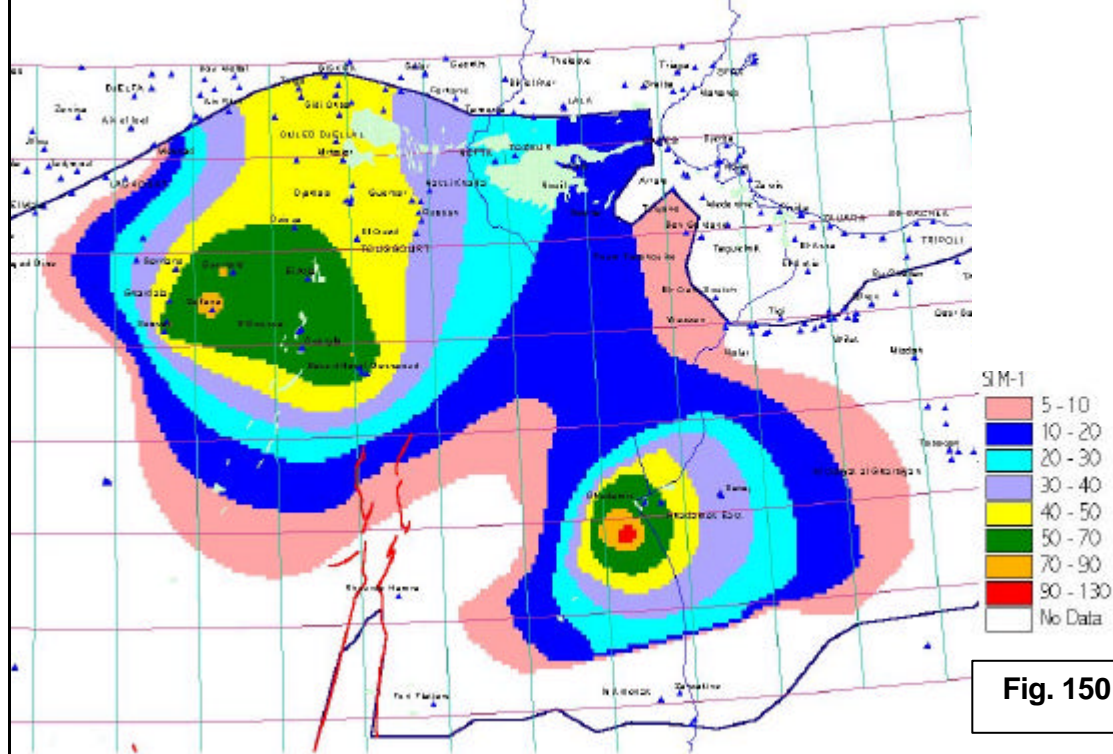
- Simulation de prélèvements additionnels exclusivement algériens, afin que l'incidence éventuelle sur chacun des deux autres pays puisse en être évaluée avec précision
- Soutirages maxima tout en respectant les contraintes suivantes
- Maintien de l'artésianisme dans toute la vallée de l'Oued Rhir et à El Oued
- Minimisation des interférences sur la Tunisie en termes de rabattements et de diminution du débit de l'Exutoire Tunisien par référence au scénario zéro
- Exploration des possibilités d'exploitation de la nappe du CI dans la région de Debdeb, lesquelles n'avaient pas été reconnues lors de la réalisation des simulations exploratoires.

Tous calculs faits, le Bilan du SASS à l'horizon 2050 s'établit comme suit :

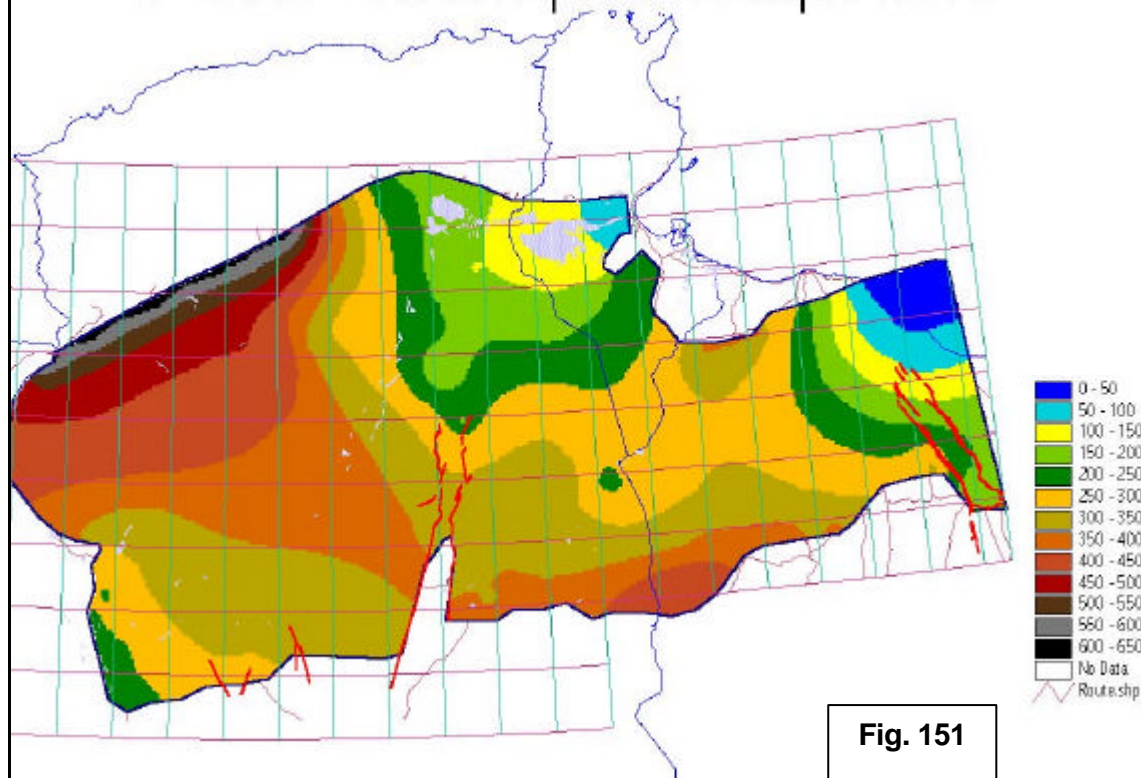
	Entrées (m³/s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Grès Supérieur	Apport Cambro-Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m³/s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Grès Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-1		9.4	0.8	0.0	3.0	0.0	27.7	40.9		35.3	1.9	0.4	0.2	1.95	0.60	0.6	40.9
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.0	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9

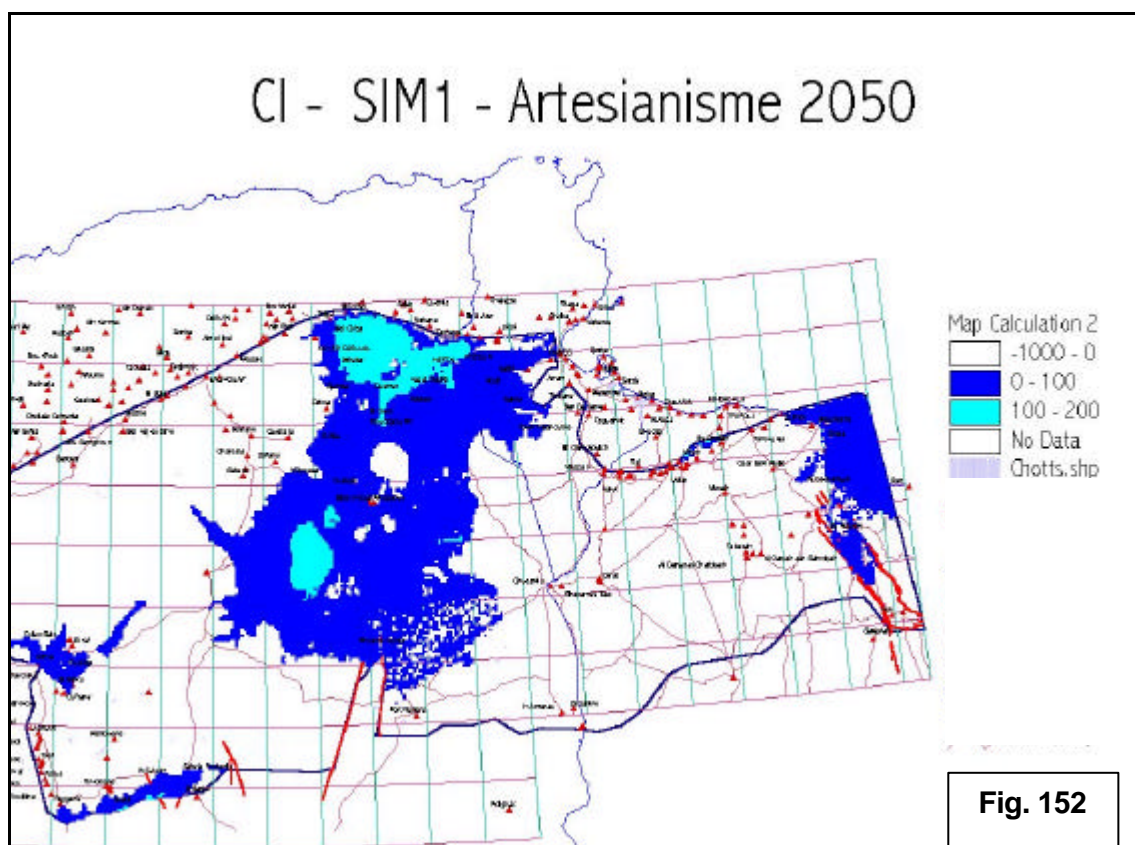
Les résultats de cette simulation sont présentés ci-après sous forme d'une carte des rabattements « nets » 2050, une carte piezométrique et une carte de l'artésianisme.

CI - Simulation n°1 - Rabattements nets 2050



CI - SIM1 - Surface piezometrique 2050





Simulation 2 : Le CI en Tunisie

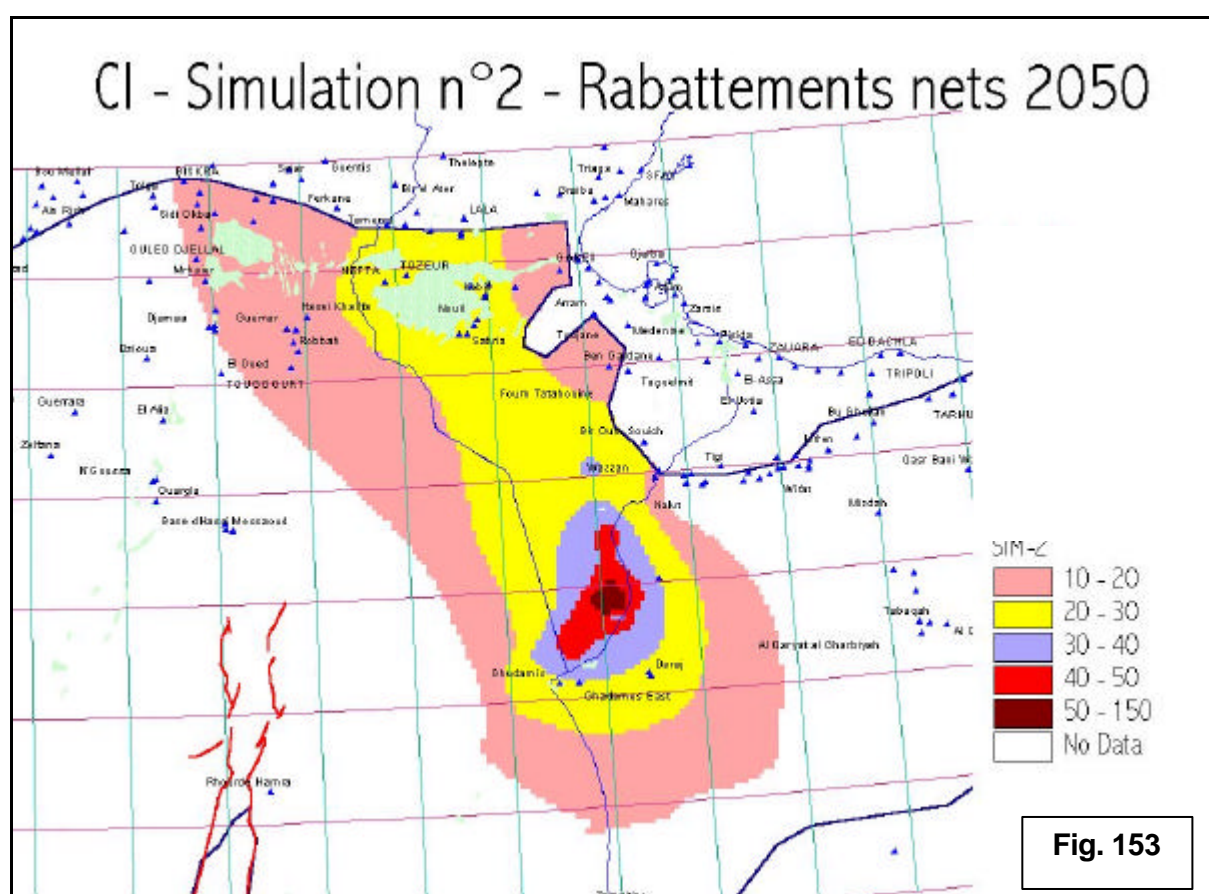
CI - 2- débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Chott Fejej	0.2	Bordj-Bourguiba	0.2
Hazoua	0.3	Bir-zar	0.2
Degache-hamma	0.1	Tiaret	0.5
PIK	0.2	Borj-el-khadra	0.5
Total		2.2	

Les principes de cette simulation sont les suivants :

- Débits additionnels exclusivement localisés en Tunisie afin que l'on puisse en mesurer l'incidence sur chacun des deux autres pays
- Soutirages maxima en respectant les contraintes suivantes.
- Eloignement du champ des Chott Fedjej afin de Garantir le minimum d'influence sur le débit de l'exutoire tunisien
- Conserver l'artesianisme en minimisant les rabattements

Le Bilan de cette simulation s'établit ainsi :

	Entrées (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Appoint Camaro-Oudovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-2		9.4	0.8	0.0	3.0	0.0	21.4	34.6		29.	1.9	0.4	0.2	1.95	0.5	0.6	34.6
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.0	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9



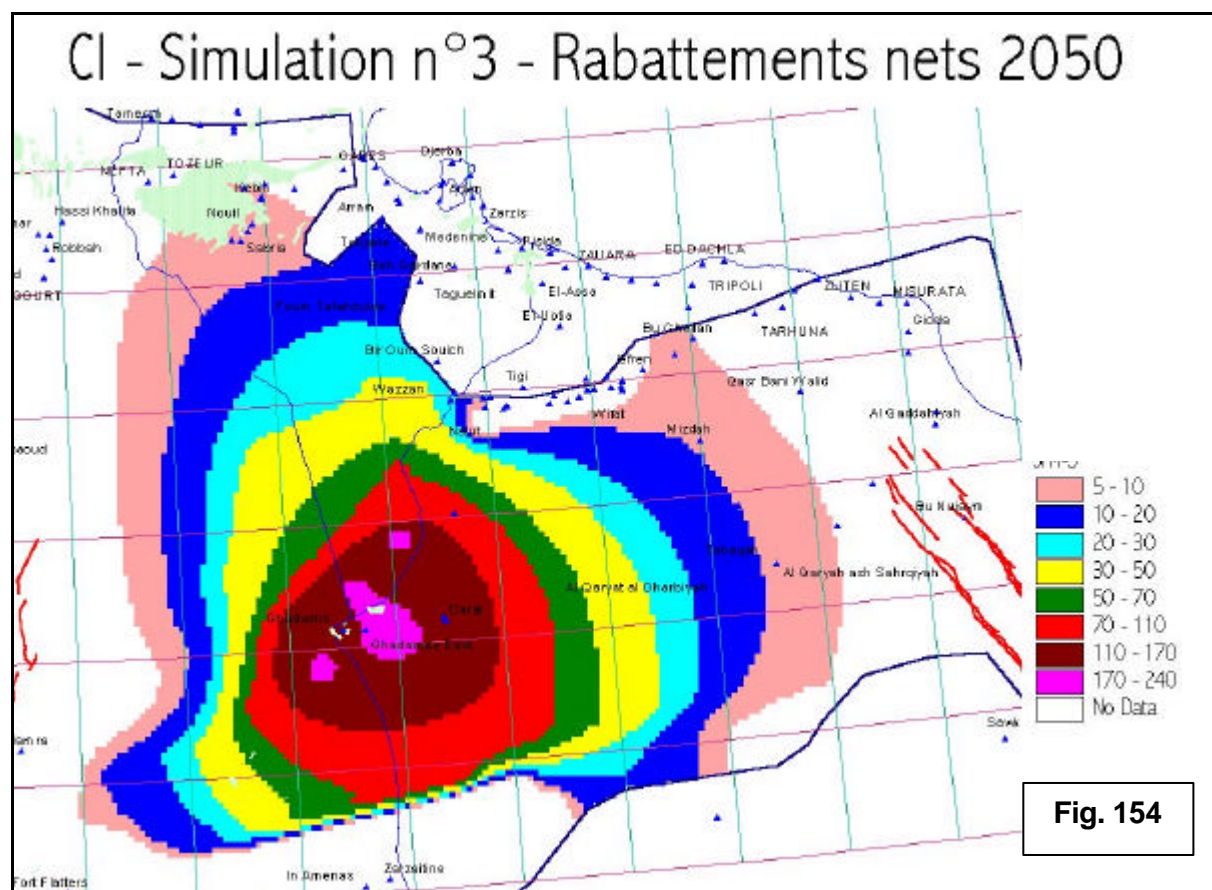
Simulation 3 : Le Bassin de Ghadamès

CI - 3- débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Ghadames	2.85	Bordj-Bourguiba	0.2
Deb-deb	2.0	Bir-zar	0.2
Borj-el-khadra	0.5	Tiaret	0.5
Total		6.3	

L'objectif de cette simulation est de mesurer l'impact d'un cumul éventuel de tous les prélèvements additionnels susceptibles d'être soustraits dans le Bassin de Ghadamès : le champ de « Ghadamès field » en Libye, la région de Debdeb en Algérie et l'Extrême Sud Tunisien, dont le total en régime de croisière atteint les 200 Millions m³/an.

Le Bilan de la simulation est le suivant :

		Entrées (m³/s)	Alimentation Draïance Turonien	Draïance Gres Supérieur	Apport Campro- Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées		Sorties (m³/s)	Pompage Draïance Turonien	Draïance Gres Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-3		9.4	1.2	0.0	3.2	0.0	25.2	39.		33.1	1.9	0.4	0.2	1.95	0.84	0.6	39.
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.0	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9



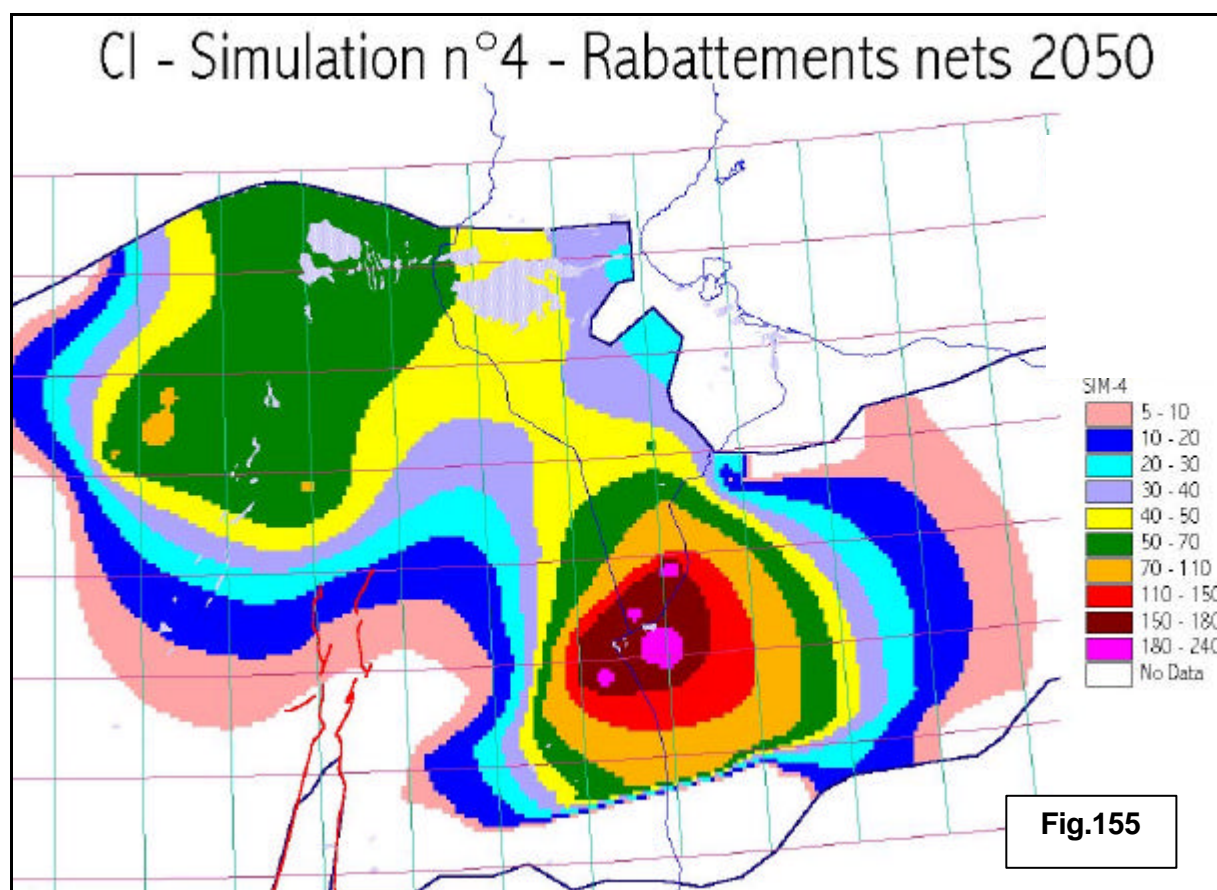
Simulation 4 : Le CI dans l'ensemble du Bassin Central

CI - 4– Prélèvements additionnels			
Groupe	Q m³/s	Groupe	Q m³/s
Deb-deb	2.0	C-F	0.2
Ouled-djellal	0.2	Bordj-Bourguiba	0.2
El-oued	0.2	Bir-zar	0.2
Djemaa	0.1	Tiaret	0.5
M'ghaier	0.2	Borj-el-khadra	0.5
Sebseb	2.0	Hazoua	0.3
Guerrara	1.0	Degache-hamma	0.1
Zelfana	2.0	PIK	0.2
El-alia	0.1		
N'goussa	0.2	Ghadamis	3.10
Ouargla	0.2	Sinawan	0.02
H-Mess-nord	0.3	Nalut	0.52
Total		14.3	

Cette simulation regroupe l'ensemble des prélèvements additionnels du bassin central du SASS. Elle représente l'union des simulations 1 et 2, auxquelles s'ajoutent les débits du champ de Ghadames, « Ghadames field » et d'autres débits (Ghadames, Sinawen, Nalut) correspondant à l'hypothèse de « résorption des déficits 2030 » en Libye (Cf. plus loin Simulation CI7).

Le bilan de cette simulation est le suivant :

	Entrées (m³/s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Apport Cambro-Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m³/s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-4		9.4	1.3	0.0	3.2	0.0	32.2	46.1		41.	1.9	0.4	0.1	1.95	0.13	0.6	46.1
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.0	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9



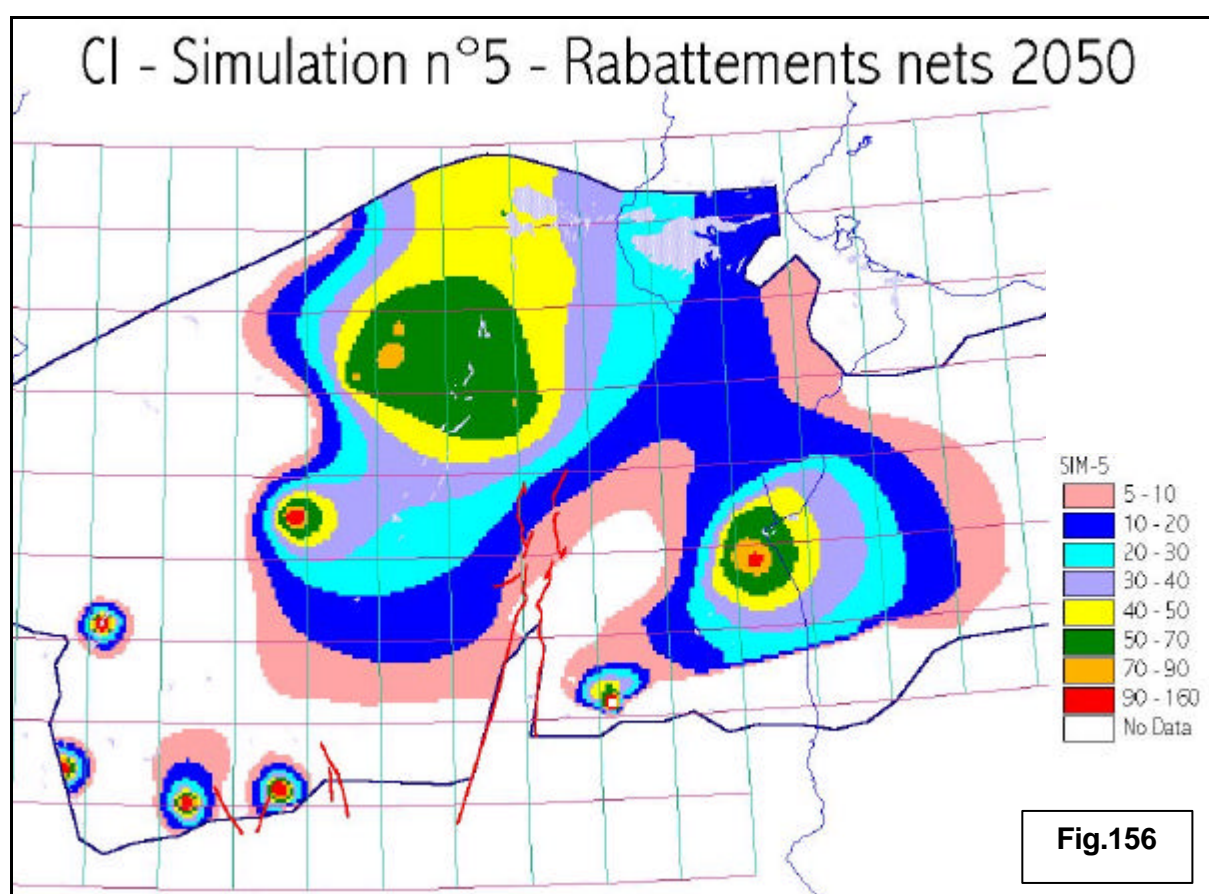
Simulation 5 : Le Bas Sahara Algérien et l'Adrar

CI - 5- débits additionnels			
Groupe	Q m³/s	Groupe	Q m³/s
Ouled-djellal	0.2	Ouargla	0.2
El-oued	0.2	H-Messaoud-nord	0.3
Djemaa	0.1	Deb-deb	2.0
M'ghaier	0.2	titaf	5.0
Sebseb	2.0	Akabli	5.0
Guerrara	1.0	timimoun	5.0
Zelfana	2.0	in-salah	5.0
El-alia	0.1	el-golea	8.0
N'goussa	0.2	fort-flatters	2.0
Total		38.5	

C'est encore une simulation prélevant exclusivement en Algérie : à la simulation n°1 s'ajoutent l'ensemble des prélèvements additionnels de la Wilaya d'Adrar (20 m³/s), ainsi que d'importants prélèvements à El Goléa (8m³/s) et Fort Flatters (2m³/s). Ce scénario, qui découle d'une investigation approfondie sur le « micro-modèle », représente le maximum de ce qui peut être encore prélevé en Algérie sans causer de nuisances majeures.

Le Bilan de cette simulation est le suivant :

	Entrées (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Apport Campro-Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-5		9.4	0.8	0.0	3.0	0.0	57.0	70.2		65.3	1.8	0.4	0.2	1.32	0.59	0.6	70.2
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.0	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9



Avec cette simulation, on voit émerger un phénomène particulier aux secteurs nouvellement explorés [Adrar, El Golea, Fort Flatters] : malgré l'intensité des débits affichés [8 m³/s, 5m³/s] et la durée de la simulation, les cônes de rabattements n'ont qu'une très faible extension latérale et ont tendance à se « creuser » sur place. Ce phénomène est propre aux régions à faible diffusivité [T/S] qui propagent mal les perturbations. Cela correspond précisément aux zones où la nappe est à surface libre ou à proximité immédiate, l'essentiel des soustractions étant prélevé sur les réserves locales de l'aquifère.

Simulation 6 : Exploitation des Réserves du Bassin Occidental

CI - 6 – débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Erg-occidental-1	10	Tiberrhamine	10
Erg-occidental-2	10	Timimoun-2	10
Erg-occidental-3	10	Oued-el-gharbi	10
Oued-seggueur	10	Ain-guettara	10
Total		80.0	

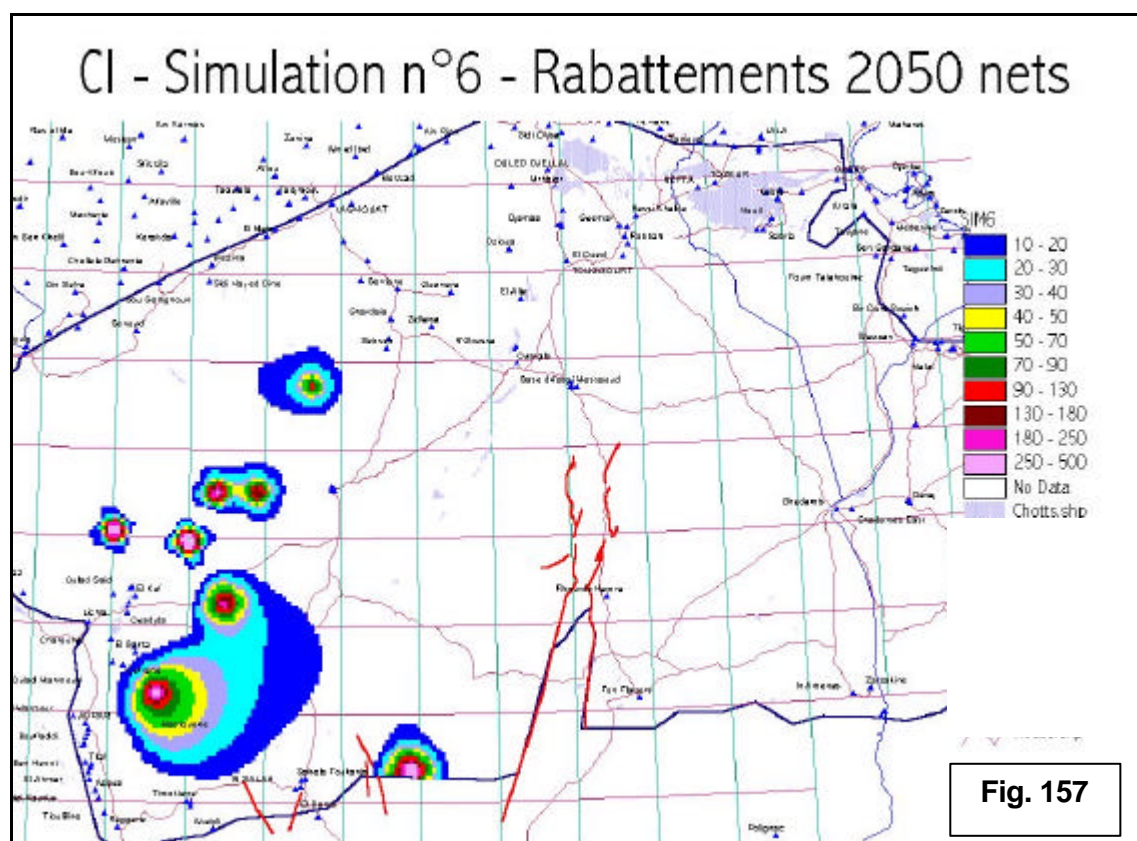
Cette simulation a pour objet d'explorer les propriétés « **capacitives** » du Continental Intercalaire dans sa partie à surface libre, en mettant en exergue le phénomène de « non diffusion » des rabattements mis en évidence lors de la simulation n°5 .

Il s'agit ici d'explorer une région encore assez mal connue, mais dont on peut raisonnablement escompter qu'elle puisse notablement contribuer à puiser une partie des réserves immenses accumulées dans ce gigantesque réservoir du CI. La région du Grand Erg Occidental, qui repose sur de grandes étendues où la nappe du CI est à surface libre, répond précisément à cette définition. Il a été simulé un prélèvement de 80m³/s (**2,5Milliards m³/an**) répartis sur huit champs captants à raison de 10 m³/s chacun. Bien sûr, ces débits ne correspondent pas à des besoins locaux : **il s'agit ici d'un scénario de pur transfert.**

Le bilan de cette simulation s'établit comme suit :

	Entrées (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Grès Supérieur	Apport Cambro-Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Grès Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-6		9.4	0.7	0.0	3.0	0.008	99.6	112.7		106.8	1.9	0.5	0.2	1.78	0.94	0.6	112.7
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.008	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9

Ce qui paraît intéressant à signaler dans ce bilan, c'est la part prise par la « contribution des réserves » à la production totale, que l'on peut exprimer par le rapport « contr. réserves/pompage ». Ce rapport est égal à **74% pour SIM0** et à **93% pour SIM-CI6**. Mais si l'on raisonne en termes de superposition d'écoulements, on pourra constater que entre SIM0 et SIM6, l'accroissement de la contribution des réserves a été de **79.8m³/s** ce qui représente **99.8% des pompes additionnels**, lesquels puisent donc intégralement dans la réserve.



Simulation 7 : Résorption des Déficits en Libye

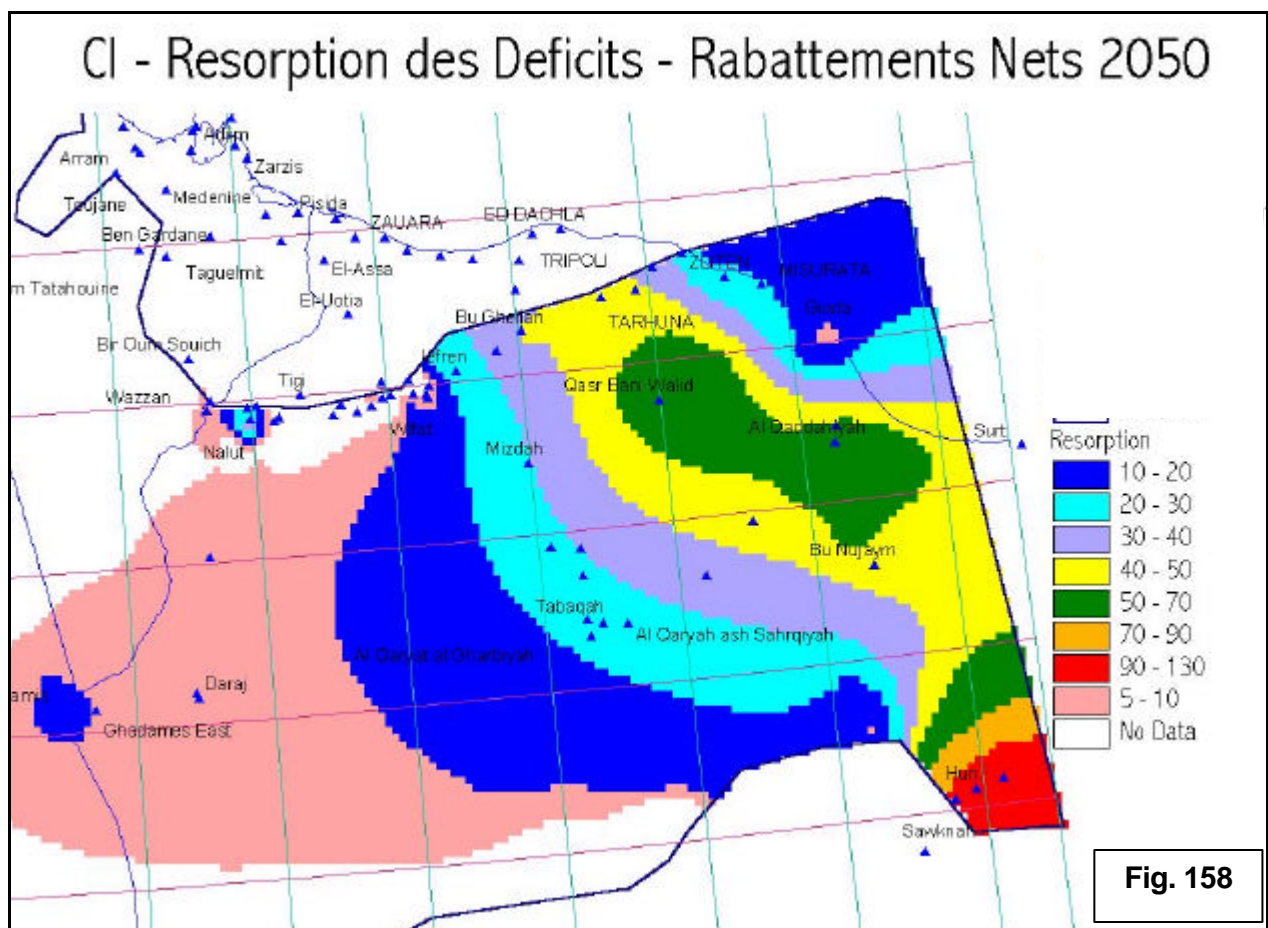
Pour subvenir à la demande de l'ensemble des secteurs de l'eau, la partie libyenne du SASS aura besoin, à l'horizon 2030, d'une quantité additionnelle estimée à **840Mm³/an**¹⁰. La contribution du GMRP à cette échéance étant estimée à **300Mm³/an**, il est prévu de faire appel aux aquifères du SASS pour résorber les déficits 2030, soit donc un prélèvement supplémentaire (par référence à 2000) de **540Mm³/an** ou encore **17. m³/s**. Sur chacun des Groupes de pompage recensés, ce débit additionnel sera réparti au prorata des prélèvements 2000. Cela représenterait un total d'environ **5.4 m³/s au CI** et **11.6 m³/s au CT**.

CI - 7 – débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Wadi Maymun	0.16	Wadi Mardum	0.42
Wadi Ninah	0.41	Abu Njaym	0.10
Wadi Sufajjin	0.30	Ayn Tawurgha	0.31
Wadi Zamzam	0.80	Bani Walid	0.42
Yafrin	0.03	Bay al Kabir	0.26
Zintan	0.13	Buwayrat-al-Hasun	0.03
Derj	0.05	Gharyan	0.06
Ghadamis	0.22	Jadu	0.08
Sinawan	0.02	Mrach-Wishkah	0.33
Nalut	0.52	Waddan	0.63
Total		5.2	

¹⁰ voir « Définition et Réalisation des Simulations Exploratoires », doc. SASS-OSS , Nov. 2001

Le bilan de cette simulation s'établit comme suit :

	Entrées (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Apport Cambro-Ordovicien	Limite Orientale	Contribution des réserves	Total Entrées	Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Drainance Gres Supérieur	Saoura & S.Timimoun	Foggaras	Exutoire Tunisien	Golfe de Syrte	Total Sorties
CI-7		9.4	1.7	0.0	4.2	0.020	21.3	36.6		32.	0.8	0.5	0.2	1.95	0.93	0.26	36.6
CI-SIM-0		9.4	0.7	0.0	3.0	0.008	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9



Simulation 8 : Exploitation d'Ensemble du CI

CI - 8 : Exploitation d'ensemble du CI – débits additionnels								
Région	Groupe	Q m³/s	Région	Groupe	Q m³/s	Région	Groupe	Q m³/s
ERG OCCID	Timimoun-2	10	GHARDAIA	Sebseb	2.0	BASSIN ORIENT	Abu Njaym	0.10
	Erg-occ-1	10		Guerrara	1.0		Ayn Tawurgha	0.31
	Oued-segheur	10		Zelfana	2.0		Bani Walid	0.42
	Tibrrhamine	10	OUARGLA	El-alia	0.1		Bay al Kabir	0.26
	Ain-guetera	10		N'goussa	0.2		BuwayratHasun	0.03
	Erg-occ-2	10		Ouargla	0.2		Gharyan	0.06
	Erg-occ-3	10		H-Mess-nord	0.3		Jadu	0.08
	Oued-el-gharbi	10	C. FEJEJ	C-F	0.2		Mrah-Wishkah	0.33
ADRAR-MENIA	titaf	5.0		Bhaier	0.0		Waddan	0.63
	Akabli	5.0	EXT-SUD TUN	Bordj-Bourguiba	0.2		Wadi Mardum	0.42
	timimoun	5.0		Bir-zar	0.2		Wadi Maymun	0.16
	in-salah	5.0		Tiaret	0.5		Wadi Ninah	0.4 1
	el-golea	8.0		Borjel-khadra	0.5		Wadi Sufajjin	0.30
DEBDEB	fort-flatters	2.0	JERID	Hazoua	0.3		Wadi Zamzam	0.80
	Deb-deb	2.0		Deguache-hamma	0.1		Yafrin	0.03
OUED RHIR	Ouled-djellal	0.2		PIK	0.2		Zintan	0.13
	El-oued	0.2	GHADAMES	Ghadamis	3.10		Derj	0.05
	Djemaa	0.1		Sinawan	0.02	TOTAL	129	m³/s
	M'ghaier	0.2		Nalut	0.52			

Ce scénario regroupe l'ensemble des débits additionnels simulés en Algérie, Tunisie et Libye. Si l'on inclut les prélèvements actuels, cela représente une production pour le seul CI, de **155 m³/s**, soit près de **5. Milliards de m³/an**. Par pays, les débits affichés sur le modèle sont récapitulés dans le tableau ci-après :

Débits Simulés	2000	SIM-8	total
Algérie	21.2	118.5	139.8
Tunisie	2.2	2.2	4.4
Libye	3.4	8.3	11.6
Total	26.8	129.	155.8

Le Bilan de la simulation s'établit comme suit :

	Entrées (m³/s)																
	Alimentation																
	Drainance Turonien																
	Drainance Grés Supérieur																
	Apport Cambro-Ordovicien																
	Limite Orientale																
	Contribution des réserves																
	Total Entrées																
	Sorties (m³/s)																
	Pompage																
	Drainance Turonien																
	Drainance Grés Supérieur																
	Saoura & S.Timimoun																
	Foggaras																
	Exutoire Tunisien																
	Golfe de Syrte																
	Total Sorties																
CI-8	9.4	2.5	0.0	4.2	0.020	142.1	158.2		155.6	0.5	0.4	0.1	1.19	0.13	0.3	158.2	
CI-SIM-0	9.4	0.7	0.0	3.0	0.008	19.8	32.9		26.8	1.9	0.5	0.2	1.95	0.94	0.6	32.9	

CI - SIM8 - Rabattements nets 2050

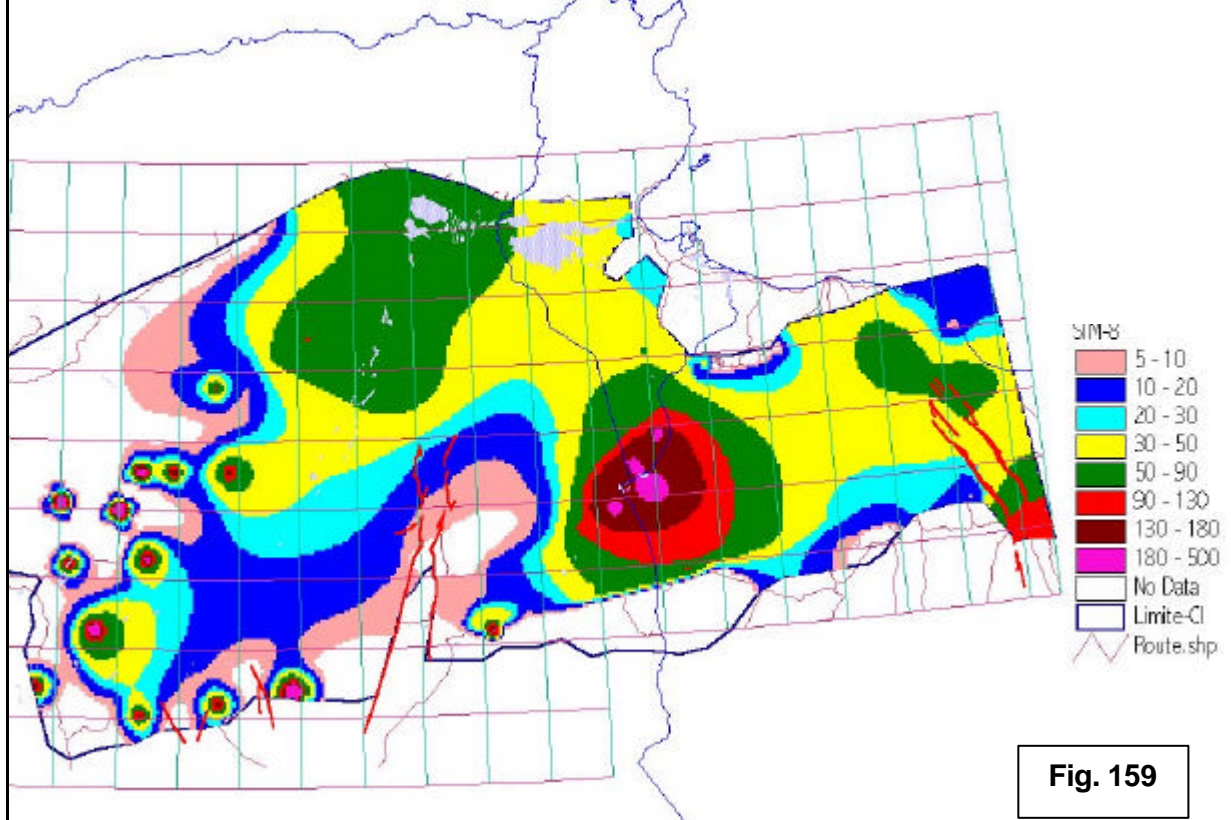


Fig. 159

CI - Simulation n°8 - Artésianisme en mètres

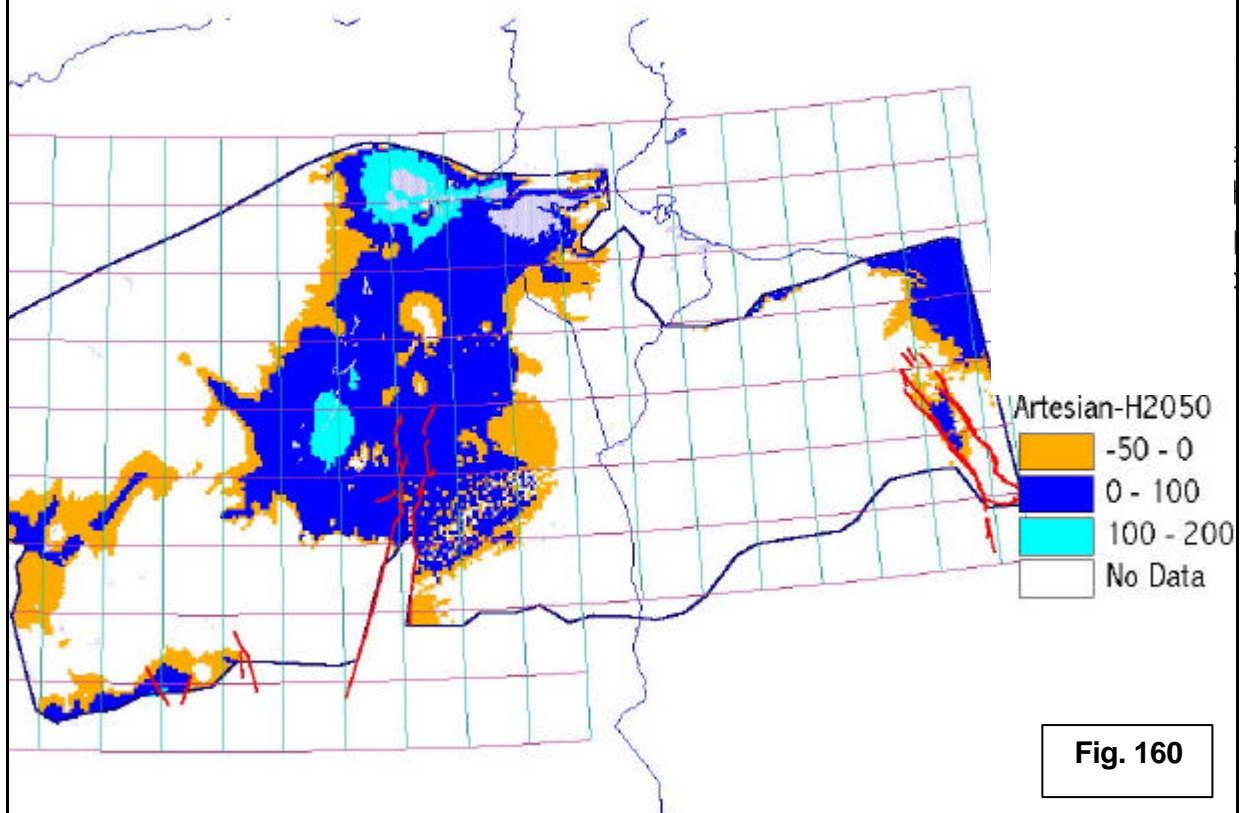


Fig. 160

Cas d'un Pompage graduellement varié : la Simulation CI-3bis

Afin de mesurer l'impact réel, sur les rabattements calculés, de l'effet d'amplification dû à l'imposition d'un débit de prélèvement constant sur toute la période de simulation adoptée (soit 50 ans de 2000 à 2050), une simulation a été refaite en faisant progresser les débits de pompage d'une manière graduelle. Pour cet exercice la Simulation n°3 a été choisie [Ghadamès Field ; Deb Deb ; Extrême Sud tunisien] celle-ci, parmi les simulations réalisées, produit les rabattements du SASS les plus importants tant en amplitude qu'en extension régionale.

L'évolution des débits de pompage suit le protocole schématisé fig.161: de 2000 à 2010, on garde le même débit qu'en 2000, puis on répartit à parts égales sur les quatre décennies suivantes le débit additionnel que l'on veut simuler : la quatrième tranche débute en 2040, date à partir de laquelle le débit final est imposé jusqu'en 2050.

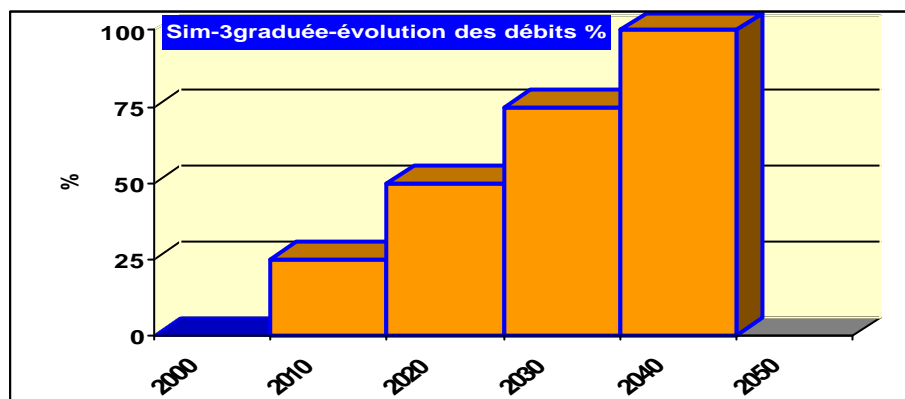


Fig. 161

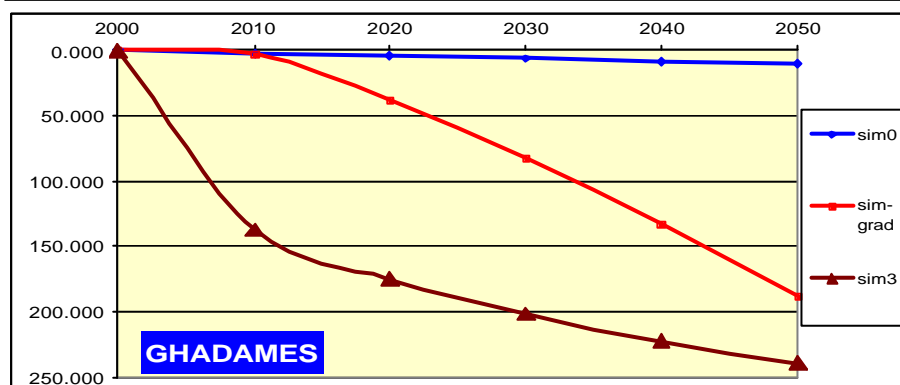


Fig. 162

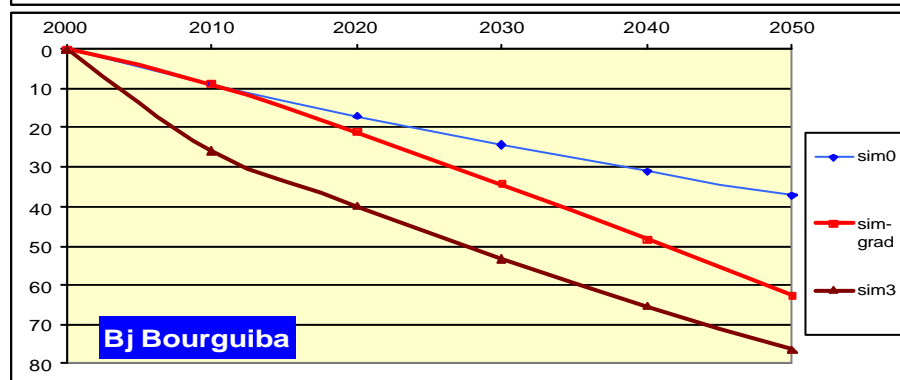


Fig.163

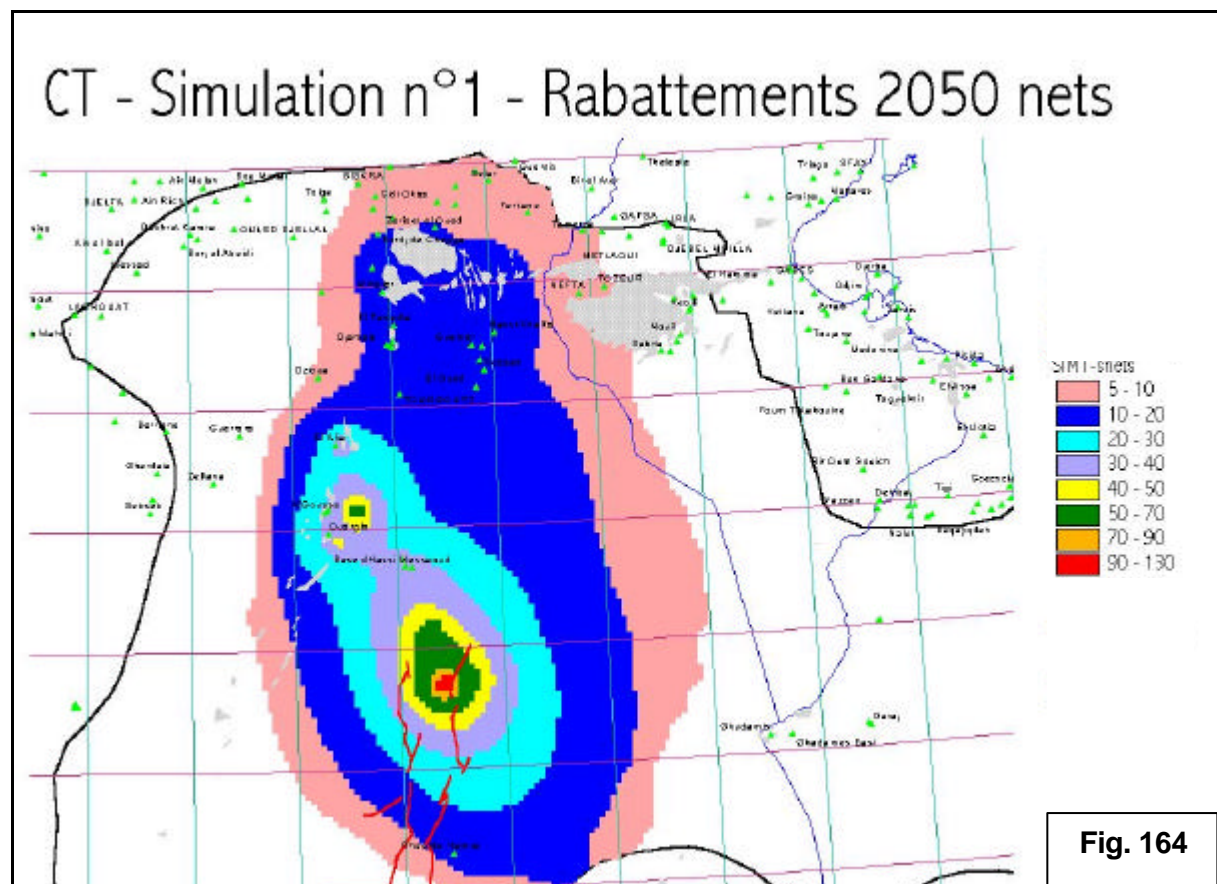
L'évolution des rabattements calculés en deux points, l'un au centre du champ captant (Ghadamès), l'autre en périphérie (Bj. Bourguiba), indique clairement qu'il suffit de 10 années de pompage à un régime donné pour atteindre des rabattements de l'ordre de **80%** [au centre du champ et **60%** en périphérie] de ceux calculés au bout de 50 ans au même régime. Ce dernier résultat vient conforter l'option prise de simuler systématiquement des débits de pompage constants sur la durée de la simulation.

II.2 – Le Complexe Terminal

Simulation 1 : Prélèvements additionnels en Algérie

CT - 1 – Algérie – débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Hassi-messaoud	3.0	Taleb-el-arbi	0.1
Gassi-touil	5.0	M'ghaier	0.1
Hassi-messaoud-nord	1.0	El-oued	0.1
Ouargla	1.0	Douar-el-ma	0.1
N'goussa	3.0	Ben-geucha	0.1
El-alia	1.0	Djemaa	0.2
Total		14.7	m ³ /s

Etant donné les risques identifiés à proximité des chotts, les débits additionnels sont fixés à minima dans l'Oued Rhir et El Oued et sont reportés vers le sud loin des chotts.



Le Bilan de la simulation s'écrit ainsi :

CT- 2 : Tunisie– débits additionnels			
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
Dhafria	0.2	R-maatoug	1.0
Segdoud	0.1	Zaafrane	0.5
Htam	0.1	Djemna	0.1
Bir-roumi	0.1	Tembain	0.5
Bordj-el-khadra	0.2	El-ouar	0.5
Total		3.3	m ³ /s

Simulation 2 : Prélèvements additionnels en Tunisie

Le même souci, de minimiser les débits additionnels autour des chotts, a permis de reconnaître des régions plus éloignées telles Tembain ou El Ouar (cf. localisations fig.14).

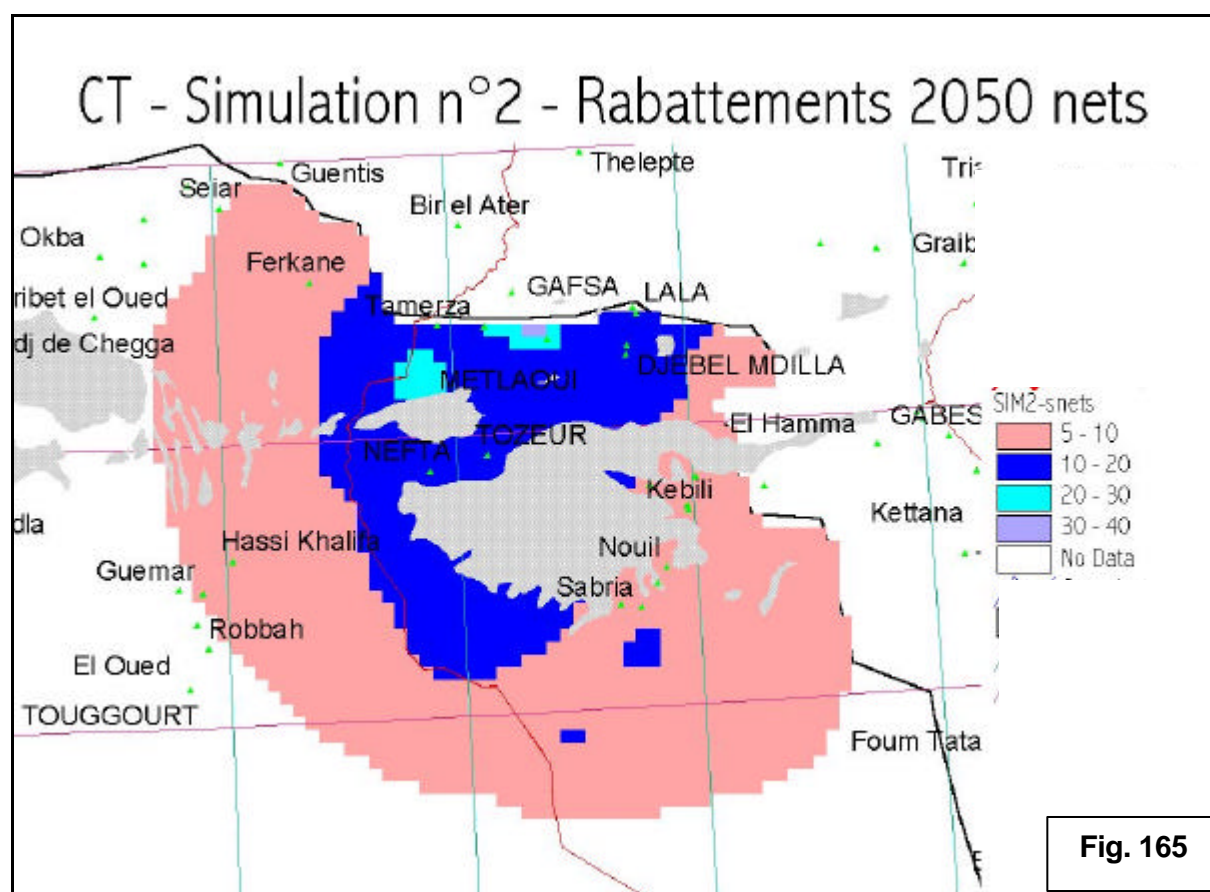


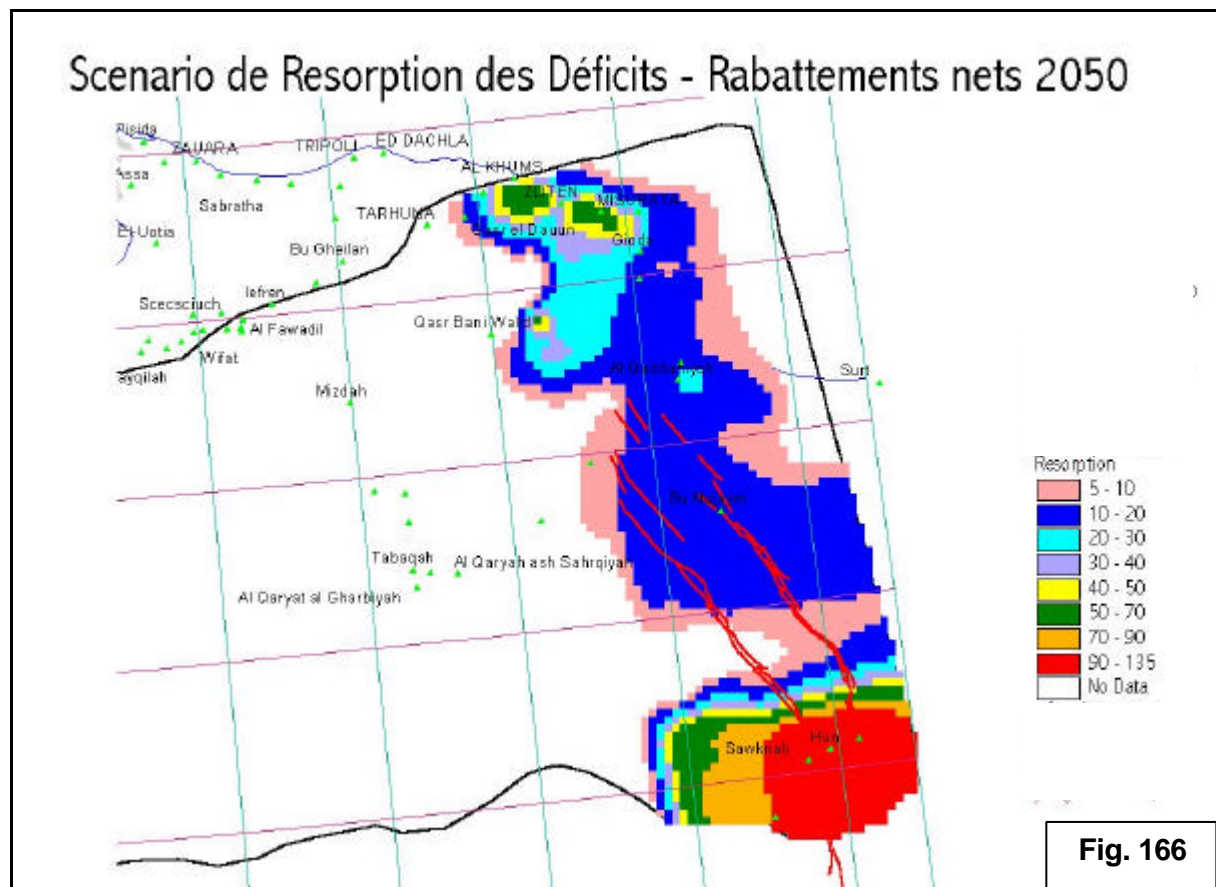
Fig. 165

Le bilan en eau de cette simulation est:

CT	Entrees (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Contribution réserves	Total Entrées Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Source Ain Tawargha	Algerie- Tunisie	Mjezem- Tawargha	Golfe de Syrte	Ain Kaam	Netzaoua	Djerid	Sebkhas Algérie	Total Sorties
SIM-1		18.2	7.3	36.7	62.2	57.5	2.8	1.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	62.2
SIM-0		18.2	7.2	22.1	47.5	42.8	2.8	1.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	47.5

Simulation 3 : Résorption des Déficits en Libye

CT - 3 – Libye – débits additionnels					
Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s	Groupe	Q m ³ /s
As Sikt - Misratah	0.5	Projet Wadi Kaam	0.5	Mrah- Wishkah	0.2
Bani Walid	0.0	Suknah	1.5	Projet Ferjan	0.8
Dafniyah	1.2	Tuminah	1.0	Projet Hammam	1.6
Hun	0.35	Waddan	1.2	Wadi Sufajjin	0.25
Kaam - Al Khums	0.15	Wadi Majir	0.2	Wadi Zamzam	0.4
Kararim	0.3	Wadi Mardum	0.2	Zliten	0.6
Total			11.	m ³ /s	



Le Bilan de la simulation est:

CT	Entrées (m ³ /s)	Alimentation	Drainance Turonien	Contribution réserves	Total Entrées	Sorties (m ³ /s)	Pompage	Drainance Turonien	Source Ain Tawargha	Chotts Algérie-Tunisie	Sebkha Mjezem-Tawargha	Golfe de Syrie	Ain Kaam	Sources Nefzaoua Djireid	Sebkhas Algérie	Total Sorties
CT-3		18.2	10.3	29.0	57.5		53.8	2.8	0.4	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	57.5
CT-SIM-0		18.2	7.2	22.1	47.5		42.8	2.8	1.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	47.3

Simulation 4 : Champ captant de Oued Mya

CT - 4 : Algérie– débits additionnels	
Groupe	$Q \text{ m}^3/\text{s}$
Oued Mya	18

Cette simulation vise à investiguer une région qui n'a jamais été reconnue. Une telle investigation est devenue possible sur le modèle du SASS ; en effet, le CT y a été étendu vers le Sud jusqu'aux limites des affleurements, permettant ainsi de mieux tenir compte des importantes réserves représentées par les volumes importants d'aquifères qui n'avaient pas été pris en compte par l'ERESS. Le Champ captant de l'Oued Mya a été choisi de façon à satisfaire aux critères suivants :

- S'éloigner au maximum de la région des chotts
- Exploiter les réserves du CT dans un secteur très étendu de nappe à surface libre
- Bénéficier de conditions hydrauliques favorables identifiées par le modèle numérique : NP-2000 proche du sol ou artésien, valeurs de T et S élevées.

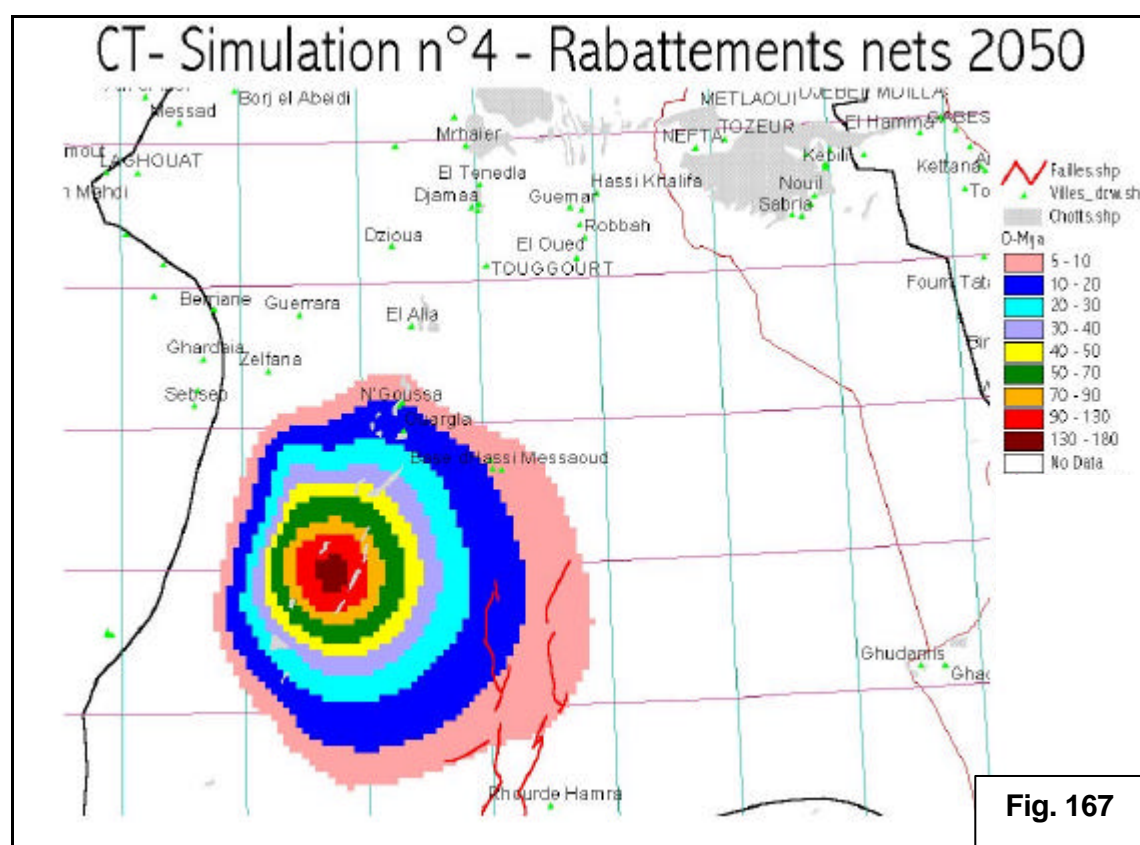


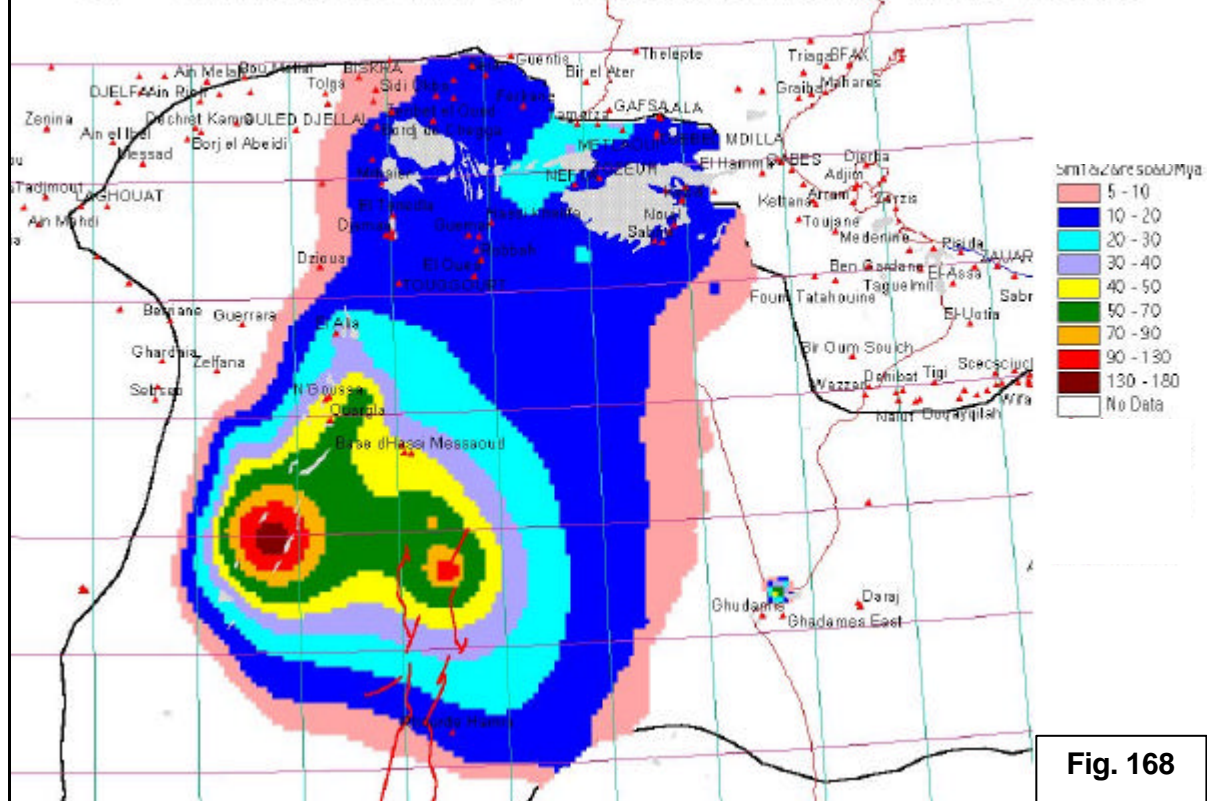
Fig. 167

CT	Entrées (m^3/s)	Alimentation	Drainance Turonien	Contribution réserves	Total Entrées	Sorties (m^3/s)	Pompage	Drainance Turonien	Source Ain Tawargha	Chotts Algérie-Tunisie	Sebkha Mjezem-Tawargha	Golfe de Syrte	Ain Kaam	Sources Nefzaoua Djireid	Sebkhas Algérie	Total Sorties
SIM-4		18.2	7.3	40.0	65.5		60.8	2.7	1.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	65.5
SIM-0		18.2	7.2	22.1	47.5		42.8	2.8	1.3	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	47.5

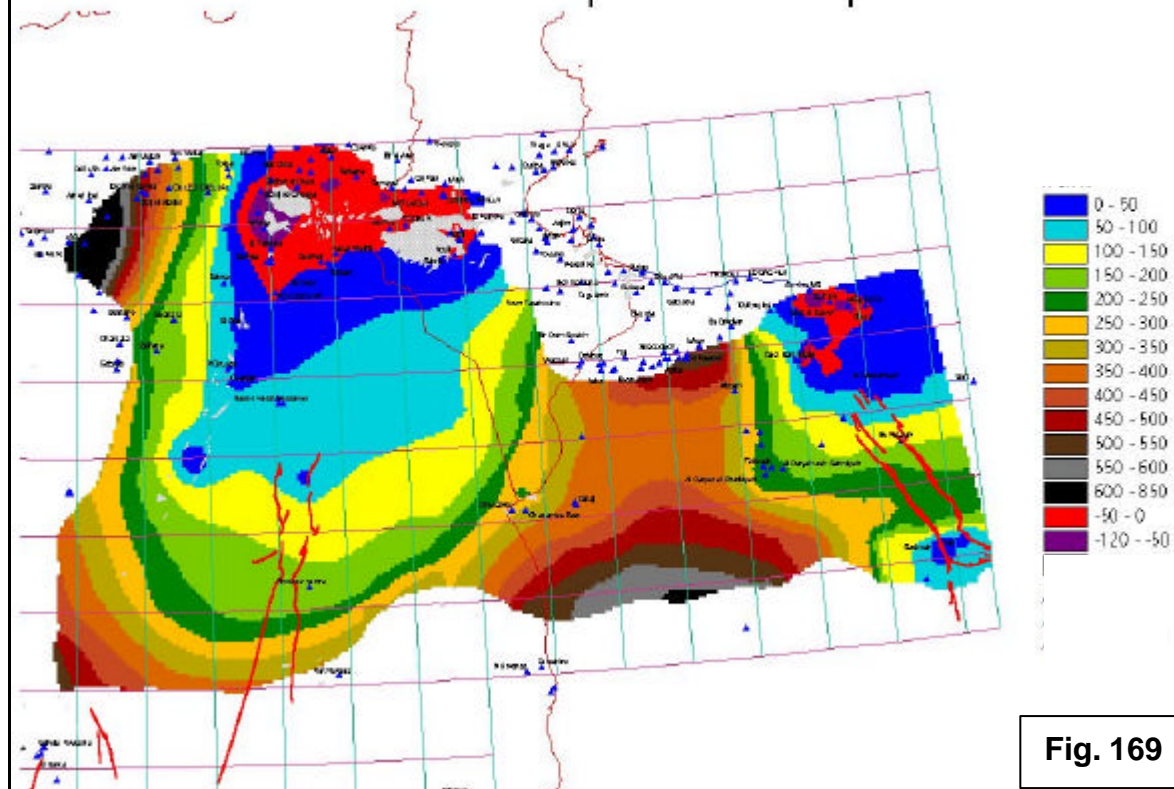
Simulation 5 : Exploitation d'Ensemble du CT

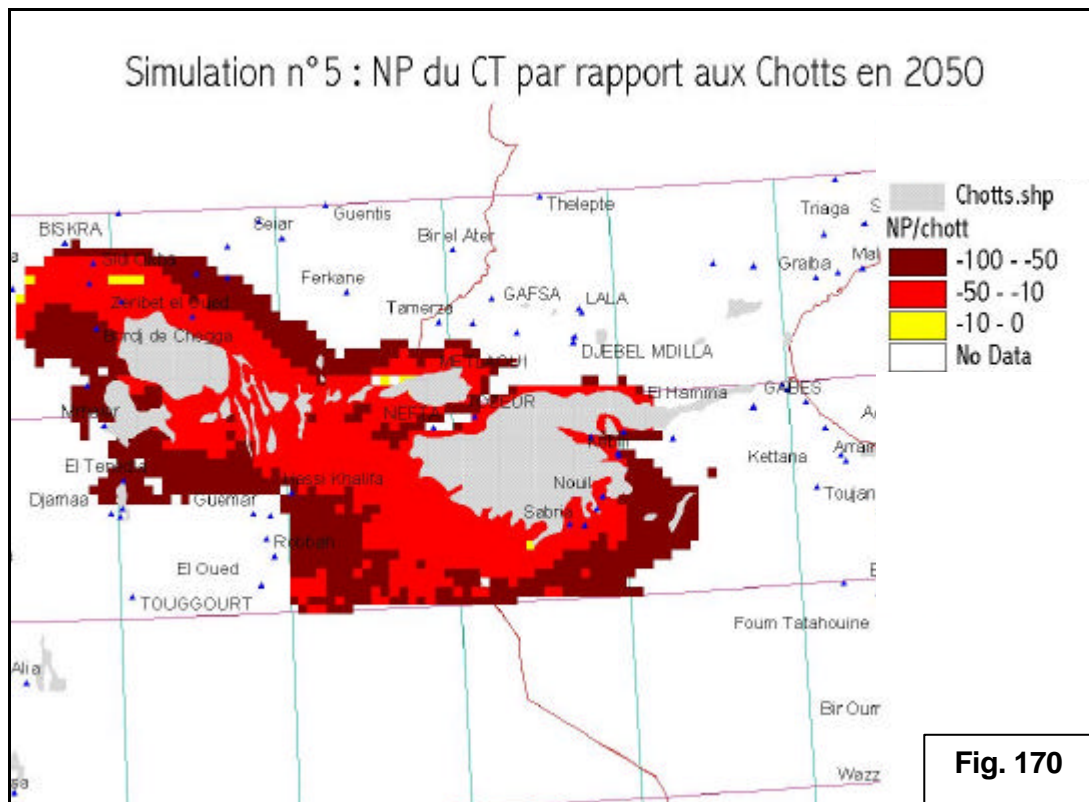
CT- 5 : Exploitation de l'ensemble du CT – débits additionnels											
ALGERIE	Groupe	Q m ³ /s	TUNISIE	Groupe	Q m ³ /s	LIBYE	Groupe	Q m ³ /s			
	Hassi-messaoud	3.0		Dhafria	0.2		As Sikt - Misratah	0.5			
	Gassi-touil	5.0		Segdoud	0.1		Bani Walid	0.			
	Hassi-messaoud-nord	1.0		Htam	0.1		Dafniyah	1.2			
	Ouargla	1.0		Bir-roumi	0.1		Hun	0.35			
	N'goussa	3.0		Bordj-el-khadra	0.2		Kaam - Al Khums	0.15			
	El-alia	1.0		R-maatoug	1.0		Kararim	0.3			
	Taleb-el-arbi	0.1		Zaafrane	0.5		Projet Wadi Kaam	0.5			
	M'ghaier	0.1		Djemna	0.1		Suknah	1.5			
	El-oued	0.1		Tembain	0.5		Tuminah	1.0			
	Douar-el-ma	0.1		El-ouar	0.5		Waddan	1.2			
	Ben-geucha	0.1		Total	3.3		Wadi Majir	0.2			
	Djemaa	0.2					Wadi Mardum	0.2			
	Oued Mya	18.0					Mrah- Wishkah	0.2			
	Total	32.7					Projet Ferjan	0.8			
					Projet Hammam	1.6					
					Wadi Sufajjin	0.2					
					Wadi Zamzam	0.3					
					Zliten	0.6					
					Total	11.					
Total Simulation:											
47.			m ³ /s								

CT - Simulation n°5 - Rabattements nets 2050



CT - SIM-5 : Surface piezometrique 2050





III - ANALYSE DES RESULTATS DES SIMULATIONS

III.1 – Au Continental Intercalaire

Simulation n°1 ;CI-1 :Le Bas Sahara Algérien

Les résultats des simulations prévisionnelles peuvent être comparées et évaluées à la lumière d'un certain nombre d'indicateurs. Pour chacune des simulations réalisées, sont examinés successivement et systématiquement les résultats obtenus vis à vis des indicateurs suivants :

- ***au niveau des rabattements nets***¹¹

Les rabattements nets présentent deux cônes très distincts : le plus important, de **50 à 70m** d'amplitude, forme une auréole d'environ **20000km²** centrée autour des secteurs de Zelfana-Ouargla ; l'autre cône correspond au champ de Debdeb, avec une pointe à 100 m au niveau du champ lui-même.

- ***au niveau des interférences en rabattements***

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 field**, ainsi du reste que dans l'**extrême sud tunisien** : **50m à Bj el Khadhra** et **30 m à Tiaret**.

¹¹ rabattements desquels ont été déduits ceux du scénario zéro calculés à la même période

- **au niveau du débit des exutoires**

L'impact de cette simulation est strictement nul sur les Foggaras, dont le débit demeure inchangé. Quant à l'**Exutoire Tunisien**, son **débit 2050** est passé à **0.6 m³/s**, alors qu'il aurait été de **0.94 m³/s** dans le cas du scénario zéro.

- **au niveau de l'artésianisme**

En Algérie, il y a **disparition de l'artésianisme à Hassi Messaoud** ; il est vrai que nous sommes ici au cœur de la zone des plus forts rabattements : soit **70 m de rabattements nets qui se surajoutent aux 70 m déjà calculés en 2050** pour le scénario zéro. 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. En Libye, l'artésianisme est encore présent dans le Graben au niveau de Bou Nujaym, de l'ordre de **50m** et sur la zone côtière à l'Est d'El Quaddahyah.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

On peut estimer à la lecture du Bilan et par comparaison avec le bilan du scénario zéro en 2050, que les débits de prélèvements additionnels (**8.5 m³/s**) proviennent à raison de :

- **7.9 m³/s** par contribution des réserves (**soit 93%**),
- à **0.34 m³/s** par récupération sur l'exutoire tunisien (**4%**),
- à **0.2m³/s** sur la drainance (Turonien en augmentation et Grès Sup. en diminution; soit **2,5%**).

Simulation n°2 ; CI-2 : Le CI en TUNISIE

- **au niveau des rabattements nets**

Les rabattements les plus importants, de l'ordre de **130m**, s'observent dans l'extrême sud et notamment au champ de Tiaret. Ailleurs, les rabattements nets sont relativement faibles : **20m** dans la Nefzaoua et **15 m** à Chott Fedjej.

- **au niveau des interférences en rabattements**

Dans la partie septentrionale du domaine, les influences sur l'Algérie sont faibles : **10m** à Biskra et Mghaier, **8m** à Toggourt, **13m** à El Oued, **22m** à Taleb El Arbi. Dans la partie sud, les pompages de l'extrême sud tunisien provoquent un rabattement net de **25m** à Debdeb en Algérie et de **30m** sur le Champ de Ghadames field en Libye.

- **au niveau du débit des exutoires**

Le débit de l'Exutoire Tunisien est ramené à **0.5 m³/s**, soit par rapport au scénario zéro une réduction de **0.44 m³/s** (47%) du seul fait des débits additionnels simulés en Tunisie.

- **au niveau de l'artésianisme**

Excepté l'extrême sud tunisien, les rabattements induits sont faibles et n'ont qu'une incidence minime sur l'artésianisme.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Par comparaison avec le scénario zéro, on peut considérer que le débit additionnel simulé ($2.2\text{m}^3/\text{s}$) provient : a) des réserves de la nappe du CI ($1.6\text{m}^3/\text{s}$) soit **73%**, b) de l'exutoire tunisien ($0.44\text{m}^3/\text{s}$) soit **20%**, c) de la drainance au Turonien ($0.1\text{m}^3/\text{s}$) et aux Grès Sup. ($0.1\text{m}^3/\text{s}$).

Simulation n°3 ; CI-3 : Le Bassin de GHADAMES

- **au niveau des rabattements nets**

Loin des champs de pompage, aussi bien vers le Nord que vers l'Est, la perturbation se propage assez peu : **3m** de rabattements supplémentaires en **50 ans** aussi bien à Chott Fejej, à El Oued qu'à Gasr Bani Walid (à tout de même 450km de distance !). Mais dans le secteur des champs captants simulés, les rabattements attendus sont relativement très élevés : de l'ordre de **180m à 200m** à Ghadames, Debdeb, Tiaret ; et le cercle à **110m** de rabattement possède un rayon de 100km.

- **au niveau des interférences en rabattements**

Cette simulation ne permet pas de mesurer les influences mutuelles, les prélèvements étant effectués simultanément dans les trois pays.

- **au niveau du débit des exutoires**

L'Exutoire Tunisien passe à $0.84\text{m}^3/\text{s}$, soit un abattement de $0.1\text{m}^3/\text{s}$ (**10%**)

- **au niveau de l'artésianisme**

Nous sommes loin des zones d'artésianisme traditionnelles et les rabattements induits y sont négligeables.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Les débits additionnels ($6.3\text{m}^3/\text{s}$) sont fournis respectivement par :

- contribution des réserves ($5.4\text{m}^3/\text{s}$) soit **86%**,
- la drainance du Turonien ($0.5\text{m}^3/\text{s}$) soit **8%**,
- le Cambro-Ordovicien ($0.2\text{m}^3/\text{s}$) soit **3%**,
- l'exutoire tunisien ($0.1\text{m}^3/\text{s}$) soit **1.5%**.

Simulation n°4 ; CI-4 : Le CI dans l'ensemble du Bassin Central

- **au niveau des rabattements nets**

Cette simulation correspond, à peu de chose près, au cumul des débits affichés dans les trois simulations précédentes ; il est donc naturel, et en vertu du principe de superposition, que les rabattements y représentent la somme des rabattements des simulations 1, 2 et 3.

- **au niveau des interférences en rabattements**

Les trois pays participent au pompage : il ne peut donc y avoir d'estimation des effets réciproques.

- **au niveau du débit des exutoires**

L'Exutoire Tunisien passe à $0.13\text{m}^3/\text{s}$ sous l'effet conjugué des prélèvements tunisiens et algériens.

- **au niveau de l'artésianisme**

Il existe peu de différence avec la simulation n°1.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Le débit total de pompage simulé ($14.3\text{ m}^3/\text{s}$) est fourni respectivement par :

- les réserves du CI (87%),
- l'exutoire tunisien ($0.8\text{m}^3/\text{s}$) soit 5.5%,
- la drainance du Turonien ($0.6\text{m}^3/\text{s}$) soit 4%,
- le Cambro Ordovicien ($0.2\text{ m}^3/\text{s}$),
- la drainance des Grès Sup ($0.1\text{m}^3/\text{s}$).

Simulation n°5 ; CI-5 : Le Bas Sahara Algérien et l'Adrar

- **au niveau des rabattements nets**

C'est la simulation n°1 à laquelle on a ajouté un prélèvement à Fort Flatters, mais également et surtout une forte sollicitation du Bassin Occidental notamment dans l'Adrar, In Salah et El Goléa. Tous ces nouveaux prélèvements se situent dans (au sein même ou à proximité immédiate) les zones à surface libre de la nappe du CI ; les rabattements se concentrent en des cônes localisés : très profonds en leur centre (**150 m**) mais qui se propagent très peu (le rabattement tombe à **10m** à moins de 50km du centre).

- **au niveau des interférences en rabattements**

Les influences sur la Tunisie et la Libye sont très précisément les mêmes que lors de la simulation n°1.

- **au niveau du débit des exutoires**

Le débit de l'exutoire tunisien reste identique à celui calculé dans simulation n°1. Ici, c'est le débit des Foggaras qui est influencé (influence faible en regard des débits additionnels soutirés à proximité) qui passe à **$1.32\text{ m}^3/\text{s}$** , alors qu'il était de **$1.95\text{m}^3/\text{s}$** lors de la simulation du scénario zéro.

- **au niveau de l'artésianisme**

Ce sont pratiquement les mêmes résultats que pour la simulation n°1.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Les débits additionnels simulés ici sont de **$38.5\text{ m}^3/\text{s}$** . Ils proviennent de :

- la contribution des réserves du CI (**$37.2\text{ m}^3/\text{s}$**) soit **97%**,
- des foggaras (**$0.63\text{ m}^3/\text{s}$**) soit 1.5%,
- l'exutoire tunisien (**$0.35\text{ m}^3/\text{s}$**),
- la drainance : Turonien et Gres Sup. (**$0.2\text{ m}^3/\text{s}$**)

Simulation n°6 ; CI-6 : Exploitation des Réserves du CI dans le Grand Erg Occidental

- ***au niveau des rabattements nets***

Cette simulation confirme et consolide les résultats de la simulation précédente sur les rabattements du CI dans sa zone à surface libre :

- localement intenses (**100 à 180m** aux centres, mais qui peuvent atteindre des valeurs très fortes : jusqu'à **400 et 500m** dans certains sites. De tels rabattements ne sont évidemment pas admissibles ni envisageables. Les débits simulés, trop concentrés à raison de **10m³/s** par champ captant, ne sont manifestement pas adaptés dans ces derniers cas et il conviendrait de les éclater en plusieurs champs de pompage pour en diminuer les rabattements induits) ;
- se propageant très peu latéralement : **1m** à El Goléa qui se trouve dans un cercle de 100km et pratiquement rien (**quelques cm**) à Hassi Messaoud et Ouargla après **50 ans** de pompages.

- ***au niveau des interférences en rabattements***

Les influences sur la Tunisie et la Libye sont rigoureusement nulles à l'horizon 2050.

- ***au niveau du débit des exutoires***

Le débit des Foggaras est passé à 1.78 m³/s , soit une baisse de 0.17 m³/s par référence au scénario zéro.

- ***au niveau de l'artésianisme***

Cette simulation n'a aucune incidence sur l'artésianisme.

- ***au niveau du bilan en eau 2050***

Les prélèvements additionnels (**80m³/s**) sont fournis par :

- la contribution des réserves (**79.8m³/s**) soit **99.75%**,
- la diminution du débit des foggaras (**0.17m³/s**) soit **0.22%**.

Simulation n°7 :Résorption des Déficits 2030 en LIBYE

- ***au niveau des rabattements nets :***

Deux secteurs s'individualisent nettement :

- Soknah-Hun au sud où les rabattements nets atteignent **110m** [ils étaient déjà de **30 à 40m** pour le scénario zéro] ;
- 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 et des rabattements diminuant progressivement vers l'Ouest à mesure que l'on s'éloigne des champs captants.

- ***au niveau des interférences en rabattements***

Les influences sur L'Algérie et la Tunisie se limitent à l'extrême sud tunisien et à la région de Debdeb : les rabattements induits y varient de **5 à 8 m**.

- **au niveau du débit des exutoires**

La percolation dans le Golfe de Syrte passe de **0.6 m³/s** dans le scénario zéro à **0.3 m³/s** ici. Par ailleurs, le débit de la source de Ain Tawargha passe de **1.3 m³/s** (cas du scénario zéro) à **0.4 m³/s**¹²

- **au niveau de l'artésianisme**

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.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Les prélèvements additionnels (**5.1 m³/s**) proviennent respectivement de :

- la contribution des réserves (**1.5 m³/s**) soit **29%** ;
- la drainance du Turonien (**2.1 m³/s**) soit **41%** ;
- le Cambro-Ordovicien (**1.2 m³/s**) soit **24%** ; le reste provient d'une réduction du débit des exutoires (Golfe de Syrte, Ain Tawargha). Il convient de noter que l'apport de la Limite Orientale [potentiels imposés à travers une résistance, qui est susceptible de simuler l'apport de la partie saumâtre du réservoir] qui était de **0.008m³/s** pour la CI-SIM0, passe à **0.02m³/s** dans le cas de la présente simulation.

Simulation n°8 ; CI-8: Exploitation d'ensemble du CI

- On retrouve bien l'union des rabattements, des débits aux exutoires et de l'artésianisme respectifs correspondant aux simulations composant la SIM8, soit les SIM2, SIM5, SIM6 et SIM7.
- **Au niveau du bilan en eau 2050** : Les prélèvements additionnels représentent **129m³/s**, dont **118.5 pour l'Algérie**. Ces débits supplémentaires devraient 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 (**1.2m³/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 **2.25m³/s**) soit **1.5%**.

III.2 – Au Complexe Terminal

Simulation n°1 ; CT-1 :Prélèvements additionnels en ALGERIE

Les critères d'évaluation des résultats des simulations prévisionnelles diffèrent légèrement de ceux adoptés pour le CI. Pour chacune des simulations réalisées au Complexe Terminal, nous examinerons systématiquement les résultats obtenus vis à vis des critères suivants¹³ :

¹² attention, il s'agit du résultat de la simulation « résorption » conjuguée **CI-7 & CT-3** : dans la diminution du débit de la source, on peut attribuer en première analyse un poids équivalent aux prélèvements additionnels affichés dans chacun des deux aquifères.

¹³ Exception faite pour la Libye où le problème des Chotts ne se présente pas de la même manière qu'en Algérie-Tunisie.

- ***au niveau des rabattements nets***

Les maxima, de l'ordre de 70 à 100 m, 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 Melrhir, où ils sont de 10 m .

- ***au niveau des interférences en rabattements***

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 strictement 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 n°1 nous serions donc, selon le critère des chotts, dans une situation encore un peu plus risquée.

- ***au niveau du bilan en eau 2050***

Les débits additionnels sont de 14.7 m³/s. Ils proviendraient pour 14.6 m³/s (soit 99.3%) des réserves du CT et pour 0.1 m³/s du Turonien par drainance (0.7%).

Simulation n°2 : Prélèvements additionnels en TUNISIE

- ***au niveau des rabattements nets***

Ils sont de 25m au Nord du Rharsa, de 10m partout ailleurs sous les chotts tunisiens et entre 5 et 10m dans toute la Nefzaoua.

- ***au niveau des interférences en rabattements***

La frontière algérienne décrit globalement la courbe des rabattements de 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***

Cette position 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%.

Simulation n°3 : Résorption des Déficits en LIBYE

- ***au niveau des rabattements nets***

On peut noter des rabattements nets (auxquels il faudra ajouter ceux du scénario zéro) 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 Khoms-Zliten.

- **au niveau des interférences en rabattements**

Aucune interférence en Tunisie et Algérie.

- **au niveau du débit des exutoires**

Le débit de Ain Tawargha passe de 1.3 (scénario zéro) à $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ¹⁴ et la drainance dans le Golfe de Syrte passe de 0.5 à $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

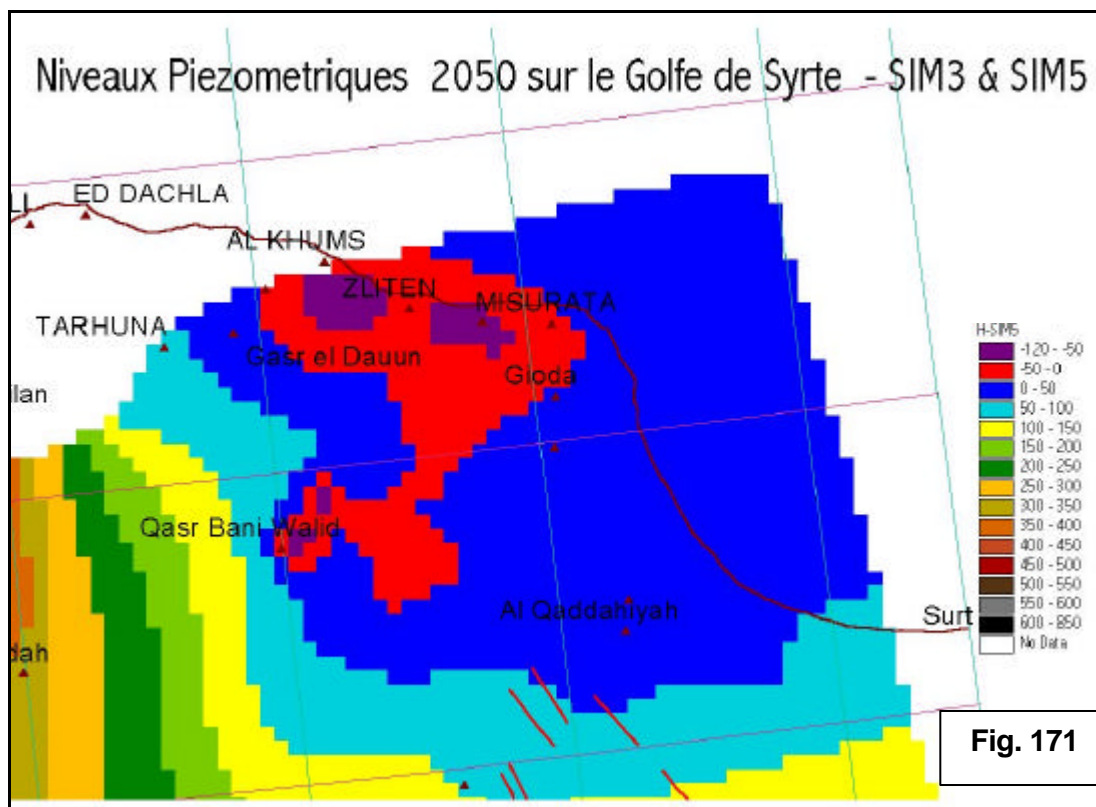
- **au niveau de l'artésianisme**

Les champs captants de la zone côtière [Al Khums, Zliten, Misurata] accusent des niveaux piezométriques particulièrement bas, atteignant même des côtes inférieures à -50m sur le littoral.

- **au niveau du bilan en eau 2050**

Le débit additionnel est de $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est fourni essentiellement par :

- les réserves du CT à raison de $6.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (59%),
- la drainance du Turonien à raison de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (32%). Le reste est récupéré sur le débit des exutoires.



¹⁴ Nous avons admis que cette baisse était due pour moitié au CI et pour moitié au CT (voir SIM CI-7).

Simulation n°4 : Le Champ captant de l'Oued MYA

- ***au niveau des rabattements nets***

Ils sont circonscrits autour du champ, de l'ordre de 150m au centre de ce dernier.

- ***au niveau des interférences en rabattements***

Aucune incidence sur la Tunisie et la Libye.

- ***au niveau de la position du NP de la nappe par rapport aux chotts***

Les rabattements induits par cette simulation sur la région des chotts sont quasiment nuls (10 à 20 cm). Ce scénario n'entraîne, par rapport aux chotts, aucune modification vis à vis du scénario zéro.

- ***au niveau du bilan en eau 2050***

Les débits additionnels, soit $18\text{m}^3/\text{s}$, sont fournis par les réserves du CT à raison de $17.9\text{m}^3/\text{s}$.

Simulation n°5 :Exploitation d'ensemble du CT

Les débits additionnels simulés représentent la somme des débits affichés lors des quatre simulations précédentes. Les effets seront globalement équivalents à la somme des effets décrits précédemment ; les plus notables sont les suivants :

- 10 à 15 m 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, on doit noter, sur les volumes soutirés, l'omnipotence de la contribution des réserves du CT.

4^E PARTIE

REPRESENTATIVITE DU MODELE DU SASS ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

Préambule

Au terme des étapes de conception, de construction et d'exploitation du modèle du SASS, un certain nombre d'incertitudes, d'insuffisances, ou d'interrogations subsistent, que ce soit au niveau des hypothèses qui ont présidé à l'élaboration des paramètres déterminants du modèle, que ce soit au niveau de :

- la connaissance des données introduites,
- la nature et des caractéristiques des conditions aux limites adoptées,
- la structure même du modèle,

La levée de ces incertitudes contribuera sans doute à améliorer davantage la représentativité du modèle et la fiabilité des résultats des simulations effectuées.

La présente note traite des plus importantes questions que l'on peut se poser aujourd'hui sur la représentation du modèle et de son impact sur les résultats obtenus mais aussi de celles qui méritent d'être approfondies soit par la recherche scientifique soit par la consolidation de la fiabilité des données.

I - TRANSMISSIVITES ET DEBIT DE L'EXUTOIRE TUNISIEN

La conjugaison de la nouvelle configuration du CI dans le sud tunisien [adjonction de l'aquifère des Grès Supérieurs et absence d'aquifère sur le Mole du Melab] avec les transmissivités du Modèle de Tripoli, lesquelles représentent à peu de choses près en Tunisie les Transmissivités du Modèle ERESS, a fourni une première estimation du débit de l'Exutoire Tunisien (ET) du CI, soit $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$, valeur incompatible avec les estimations classiquement adoptées qui le fixent à $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Modèle du 20 Août 2001 (M20-8) : Pour obtenir une telle augmentation, il a fallu aménager un tube de courant d'environ **100 km** de large allant de **Toggourt à la faille d'El Hamma**, où les transmissivités du CI sont portées à **$2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** , les augmentations de transmissivités les plus fortes (jusqu'à dix fois celles de l'ERESS) étant localisées dans la région de l'Erg Oriental. Le SASS n'est pas le premier à devoir augmenter sensiblement les transmissivités dans ce secteur : GEOMATH (in BRL, 1997) a de son côté dû aussi adopter au même endroit, de fortes transmissivités ($2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). Avec ces modifications, le débit de l'ET passe à **$2.75 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Modèle du 10 Septembre 2001 (M23-9) : Réajustement du champ des transmissivités du CI, qui sont de 20 à 25% plus élevées. Le débit de l'Exutoire Tunisien passe à **$3.3 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Modèle du 23 Septembre 2001 (M23-9) : Alors que la carte des transmissivités de l'ERESS pouvait se prévaloir d'une légitimité litho-sédimentologique (épaisseurs « utiles » et mesures de perméabilités), le tube de courant Toggourt-El Hamma s'éloigne de cette logique et ne repose sur aucune légitimité géologique¹ confirmée. Suite au débat issu de l'atelier d'évaluation du 17 Septembre 2001 et en l'absence, dans la région concernée, de valeurs récentes déduites d'essais de pompages, il a été admis de revenir sur les transmissivités de l'ERESS. Au terme d'un calage en régime permanent, le débit de l'Exutoire Tunisien s'établit à $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'on se trouve, à ce stade de l'étude, devant un grave dilemme. Nous voici en possession de deux modèles : le M10-9 et le M23-9, très différents par la structure du champ des transmissivités du CI et présentant des gammes de valeurs de transmissivités très différentes, qui peuvent tous deux être considérés comme calés si l'on se réfère :

- aux mesures piezométriques disponibles aux points de contrôle, aussi bien en permanent qu'en transitoire,
- aux mesures des débits connus aux exutoires naturels du système.

Le comportement à long terme de ces deux modèles est sensiblement différent de l'un à l'autre, notamment dans les zones de prélèvements importants. Il importe donc de se prononcer sur la « plausibilité » de chacun de ces modèles.

Comment pourrait-on se prononcer sur une telle plausibilité ?

Nous disposons pour ce faire de deux principaux critères, que l'on peut ériger en contraintes :

¹ ce couloir pourrait représenter la (nécessaire) continuation en Algérie du « Sillon des Chotts » mis en évidence par les géologues tunisiens, sillon qui se situe précisément sur le tracé de ce couloir.

- la première a trait à la structure des transmissivités et à sa légitimité géologique. Il semble [et malgré une ébauche de recoupement du Sillon des Chotts avec le couloir de fortes valeurs de transmissivités du M10-9 El Hamma-Toggourt **qui demande à être approfondi**] que, en l'état actuel de l'analyse on doive de ce point de vue privilégier nettement le **M23-9**, dont le champ des transmissivités est conforme aux cartes de l'ERESS, lesquelles n'ont pas encore pu être démenties par des données plus récentes de pompages d'essais.
- la seconde a trait à la valeur du débit de l'exutoire tunisien de la nappe du CI se déversant dans la Djeffara. C'est une contrainte plus délicate à appliquer : il n'existe pas d'évaluation très précise de ce débit, mais un certain nombre d'estimations qu'il paraît utile de passer en revue dans l'encadré qui suit.

SCG- BURGEAP (Déc.1963)

... La valeur du débit qui traverse l'exutoire tunisien s'établit... à **3.2m³/s**. Cette valeur concorde avec l'évaluation du débit des nappes de la région de Gabès.

GEOPETROLE (Juillet 1964)

... Avant la création de nouveaux soutirages, ... le débit à l'Exutoire Tunisien est égal à **4.7m³/s**...

M. BORELLI et R. ROUATBI (ERESS, 1970)

Le débit exploité dans le CT de la Djeffara (exutoires naturels et artificiels) est de **4 m³/s**. Si l'on y ajoute les pertes en mer, on peut estimer le débit total exhauré de Gabès Nord à Zarzis à **5m³/s**... les apports directs à la nappe de la Djeffara sont estimés à **1.5 m³/s**... le déficit du bilan actuel de la nappe de la Djeffara est égal à **3.5 m³/s**. C'est donc cette quantité qui devrait être fournie par la nappe du CI.

FRANLAB (ERESS, Mars 1972)

- *Première phase d'étalonnage _ **étanchéité du dome de Médenine** :*

... Le débit disponible à l'exutoire tunisien, avec les meilleures transmissivités (celles de Geopetrole), ne dépasse pas **3 m³/s** en y incluant la percolation dans le Chott Fedjej. Celui obtenu avec les transmissivités de notre étude atteint, tout compris, la valeur de 1.5 m³/s. Le débit obtenu avec les transmissivités de SCG a été proche de cette dernière valeur. La principale discordance entre les trois cartes de transmissivités considérées se manifeste dans la zone centrale du Grand Erg Oriental entre Hassi Messaoud et El Borma où les transmissivités de Geopetrole atteignent 20 à 30 fois les nôtres...

- *Deuxième phase d'étalonnage _ **Non-étanchéité du dome de Médenine** :*

... FRANLAB avait attiré l'attention sur la non-étanchéité hydraulique possible du dôme de Médenine (malgré la disparition du CI). ...il fut décidé d'y imposer un débit de 3.5 m³/s.

P. PALLAS (PNUD, 1984)

L'alimentation propre de la Djeffara est de l'ordre de **1m³/s** ... le total exploité en 1950 est de **2.4m³/s**. Concernant la contribution du CI, trois valeurs ont été testées, soit respectivement : **3.6m³/s**, **2.7m³/s** et **4.5m³/s** ...Cependant...les transmissivités utilisées... pencheraient en faveur de l'hypothèse **CI=3.6 m³/s**.

B. ABIDI (DGRE , Octobre 2001)

Le seuil d'El Hamma est constitué par un segment de 36 km de long...En se basant sur les gradients piezométriques déduits des mesures 2000, sur la largeur du seuil, et sur une transmissivité moyenne estimée à **4.10⁻²m²/s**, le débit traversant le seuil peut être aujourd'hui estimé à **2.3 m³/s**.

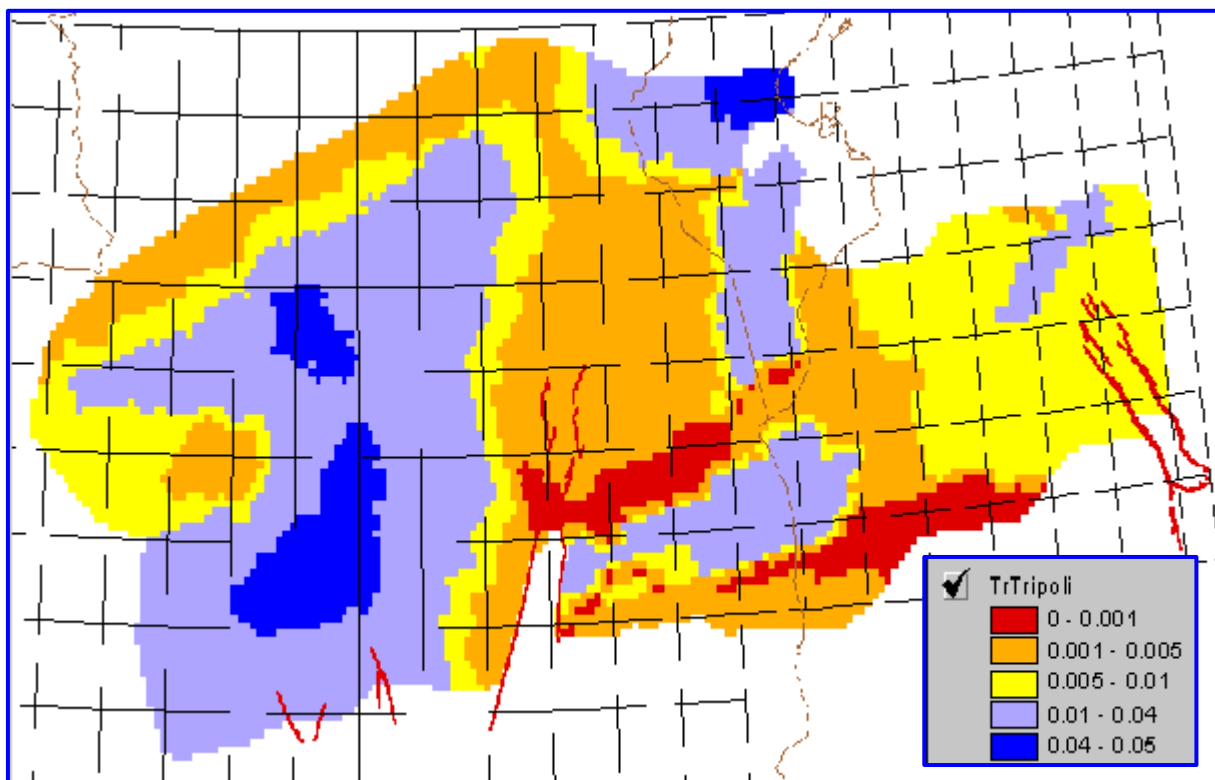
Tous ces écrits semblent converger vers la valeur de **3.5 m³/s** comme constituant le débit du seuil d'El Hamma vers les années 50. Ce débit serait aujourd'hui de l'ordre de **2 m³/s**. Il paraissait donc raisonnable de devoir réviser la version **M23-9** du Modèle, en faveur d'une nouvelle version plus plausible au sens des deux contraintes énoncées plus haut.

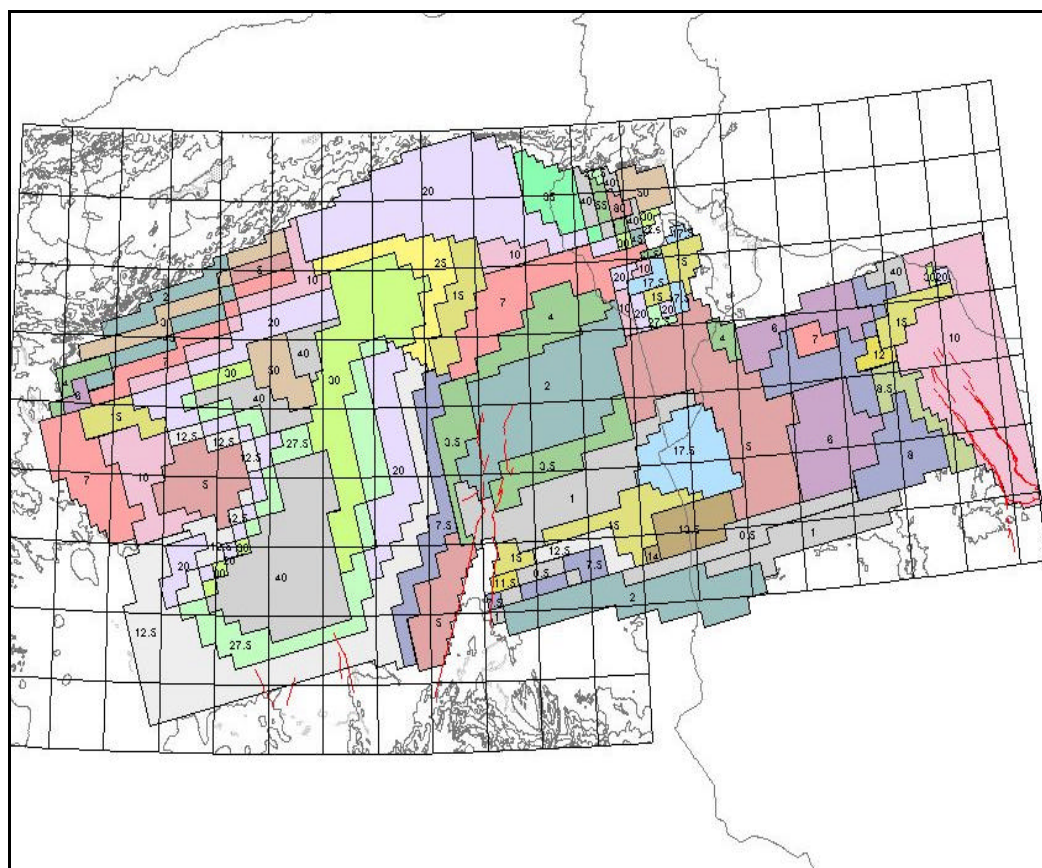
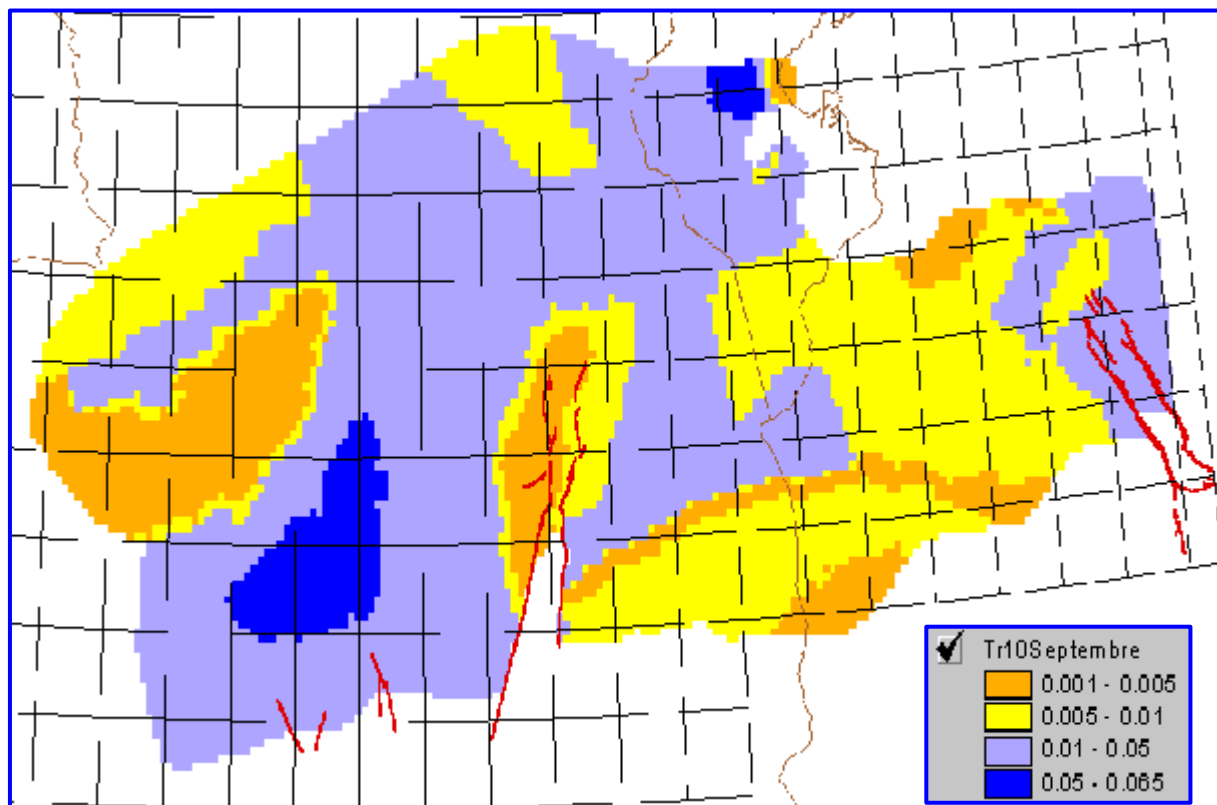
Modèle du 30 Septembre 2001 : La carte des transmissivités au CI du modèle M23-9, qui est à peu de chose près celle de l'ERESS et du modèle de Tripoli, est reprise telle quelle, sauf que sur le bassin-versant de l'exutoire tunisien [soit un quartier de cercle limité vers le sud à Toggourt et Regim Maatoug], on admet des augmentations de valeurs initiales des transmissivités allant jusqu'à 100%. Cette augmentation était évidemment nécessaire si l'on voulait que le débit de l'exutoire tunisien fût lui-même sensiblement relevé. Les résultats du calage en régime permanent de ce nouveau modèle, le **M30-9**, indiquent un débit de l'exutoire tunisien en 1950 égal à **3.1 m³/s**.

Si l'on doit commenter ce dernier modèle du point de vue des deux contraintes énoncées plus haut, à savoir :

- la structure du champ des transmissivités ,
- la valeur du débit de l'exutoire tunisien du CI,

Le modèle du 30 Septembre, sans les satisfaire à 100%, paraît devoir **constituer le meilleur des compromis**. C'est ce modèle-là qui répond le mieux à l'ensemble des critères et des contraintes imposées au calage, c'est celui qui est le mieux indiqué pour la réalisation des simulations prévisionnelles de développement des ressources en eau du SASS.





II - EMMAGASINEMENT EN NAPPE LIBRE

- Sur le **Modèle du 20 Août**, la simulation du maintien des prélèvements 2000 constants jusqu'à l'horizon 2050 indique clairement que les niveaux piézométriques de la nappe du CT sont « **maintenus** » autour des chotts. Entre autres facteurs, ce phénomène peut être dû à une surestimation des coefficients d'emmagasinement adoptés dans les zones de nappe libre. C'est notamment en partant de cette hypothèse qu'il a été décidé de procéder au développement d'une nouvelle version du modèle dans laquelle le calage des historiques de niveau en régime transitoire doit laisser la possibilité d'une diminution substantielle des coefficients d'emmagasinement en « **nappe libre** », notamment dans les secteurs du Complexe Terminal où les valeurs précédentes ont été jugées excessives dans de très larges plages sans aucune mesure ni essai de pompage (notamment dans le Grand Erg Oriental).

Ce degré de liberté supplémentaire adopté à cette étape du calage se justifiait par l'absence de valeurs de référence dans ces régions.

Il paraît utile ici de rappeler les critères adoptés par le modèle ERESS pour l'affectation des valeurs du coefficient d'emmagasinement dans les secteurs à surface libre (voir encadré).

« La nature du réservoir aquifère a conduit à distinguer deux cas :

- les roches à porosité inter-granulaire... pour lesquelles une valeur moyenne de $150 \cdot 10^{-3}$ a été adoptée comme coefficient d'emmagasinement.
- Les roches fissurées ... pour lesquelles une valeur plus faible a été adoptée, comprise entre 100. et $150 \cdot 10^{-3}$ » [ERESS, plaquette 3 : Nappe du CT, p37]

- **Modèle du 10 Septembre 2001** : Il se distingue notamment par une réduction substantielle des coefficients d'emmagasinement dans les zones à surface libre du CT. Cette réduction, s'inspirant de ce qui a déjà (Cf. Modèle de Tripoli, Modèle BRL-Ecole des Mines, simulations prévisionnelles du projet RAB-80), a été opérée au niveau du Continental Intercalaire dans l'ADRAR, soit une réduction faisant passer **S de 20% à 5%** pour restituer les rabattements (certes faibles et parfois peu significatifs) observés dans ce secteur.

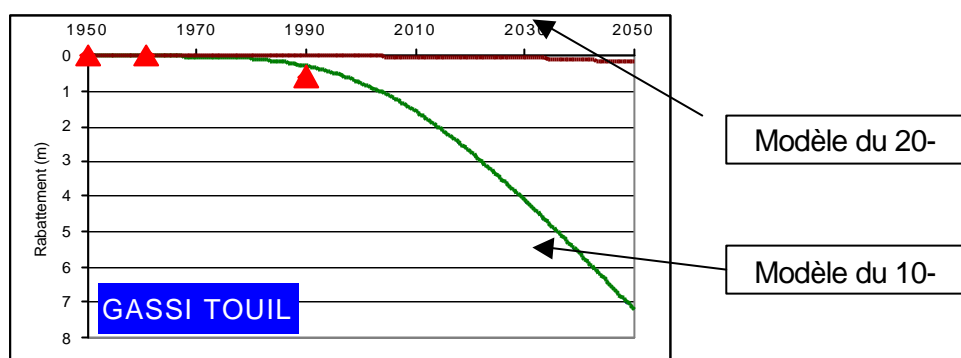
Malheureusement, dans le Complexe Terminal, on ne disposait :

- ni de valeurs mesurées du coefficient d'emmagasinement en nappe libre,
- ni de points de contrôle en nombre suffisant et fiables qui auraient permis, comme au CI, de conforter les valeurs de S par calage en se fondant sur des rabattements historiques.

Dans le CT, le seul et unique point de contrôle piézométrique en zone libre, se trouve à Gassi-Touil : il est représenté par une mesure unique, post-1970, datée de 1990.

Sur le modèle de Tripoli, ce point était très bien calé sur l'historique des prélèvements de l'époque. Par la suite, les prélèvements dans tout le secteur Gassi-Touil ont été mis à zéro au terme de la révision des historiques de débits en Algérie effectuée en **Mai 2001**. Avec ces nouveaux historiques, il devenait quasiment impossible d'y retrouver le rabattement de référence (soit 60 cm en l'espace de 20 ans) si l'on gardait les ordres de grandeur de S en nappe libre adoptés par l'ERESS (cf. encadré).

Par contre, si l'on réduit substantiellement ces valeurs → passant de **10×10^{-2} à 1×10^{-2}** [ce qui représente des coefficients d'emmagasinement nappe-libre 10 fois plus faibles dans les secteurs de l'Oued Mya-Gassi-Touil et du Sud-Nefzaoua], on se rapproche très sensiblement du rabattement de référence (cf. fig. ci-dessous). C'est la solution qui a été adoptée.



III - POIDS DU COMBRO-ORDOVICIEN COD

Le Cambro-Ordovicien (COD) constitue un immense réservoir en liaison avec le CI dans la partie Sud-Est du bassin. Il était donc essentiel de représenter cette couche dans le modèle, d'autant plus qu'un programme important de prélèvement prévu dans le Jabal Hassawnah (Libye) doit être simulé sur le modèle pour en prévoir les effets à long terme.

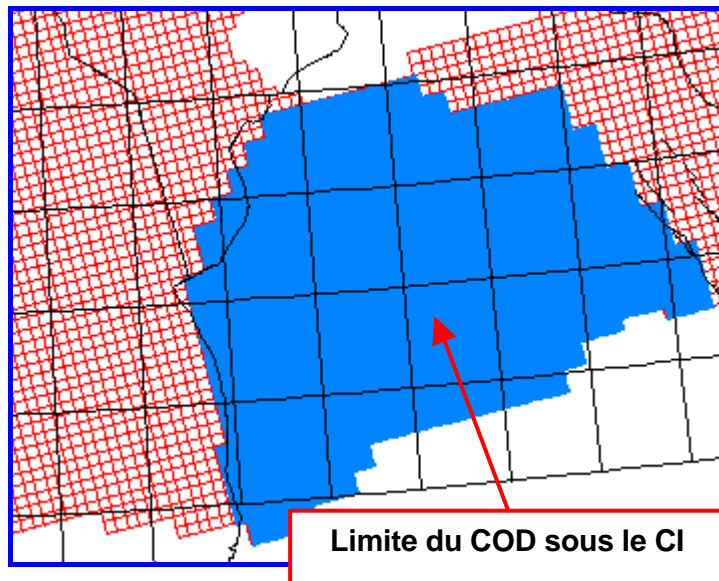
Les limites du Cambro-Ordovicien, (COD), sont celles adoptées par GEOMATH tronquées au Sud en correspondance de la limite du CI. Les rapports COD/CI sont régis par la drainance sur l'ensemble de la couche COD à travers les aquitards constitués par les formations dévoniennes et carbonifères. Il existe cependant plusieurs endroits où le CI repose directement sur le COD, les couches semi-perméables du Paléozoïque moyen et supérieur n'existant pas.

Variation de certains termes du bilan du SASS en Libye

Horizon de calcul	Simulation	Recharge Nefussa-Sud Libye	Pompages CI-SASS m ³ /s	Pompages CI-LIBYE m ³ /s	Apport du COD au CI m ³ /s
1950	Calage Permanent	1.4	0.5	0.0	2.0
2000	Calage Transitoire	1.4	26.8	3.4	2.7
2050	CI-SIM-0	1.4	26.8	3.4	3.0
2050	Dj. Hassaouna	1.4	26.8	3.4	2.3
2050	CI-7	1.4	32.0	8.5	4.2

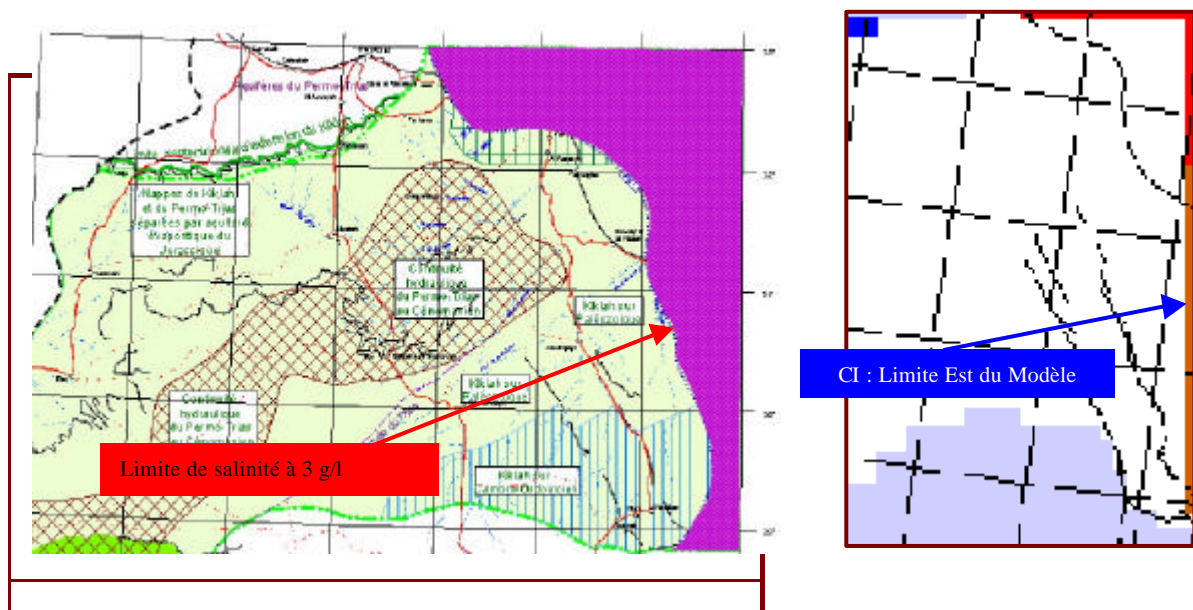
Au stade actuel de l'étude, le mode de représentation du Paléozoïque adopté pour le modèle paraît valable (charge imposée fixe), mais à terme, il faudrait envisager de le représenter par une couche aquifère active, en raison notamment de :

- sa mise à contribution pour compenser une partie des prélèvements additionnels du CI en Libye (voir tableau ci-dessus) ;
- du risque de diminution de cette contribution sous l'effet des prélèvements du DJ. Hassaouna.



IV - LIMITE ORIENTALE

La limite orientale du CI est la seule du modèle qui ne soit pas une limite naturelle. En réalité, les formations aquifères du Crétacé inférieur se poursuivent bien à l'Est du graben mais présentent de faibles transmissivités et une forte salinité. Il n'existe donc pas de limite hydraulique précise à cet endroit. Le modèle est limité par une condition de potentiels imposés à travers une résistance. Cette formule autorise l'estimation des échanges du CI avec son prolongement oriental saumâtre.



Les résultats obtenus indiquent tout d'abord des échanges à l'état naturel extrêmement limités à travers cette limite [**Entrée de 8 l/s**] en raison d'une très mauvaise liaison avec le potentiel imposé. Ceci résulte du calage de transmissivités et de hauteurs piezométriques très mal connus sur cette limite.

En simulation (voir tableau ci-dessous), cette situation demeure inchangée y compris en **2050** pour le scénario zéro. C'est seulement pour la simulation **CI-7** de résorption des déficits en Libye que l'on voit passer le débit d'entrée d'eau saumâtre à **20 l/s**, ce qui reste dérisoire certes mais indique malgré tout, une tendance à l'activation des apports en eau salée sous l'effet de fortes sollicitations.

En conclusion, on ne peut manquer de recommander de **pousser un peu plus les investigations dans ce secteur pour mieux reconnaître la distribution des hauteurs piezométriques, des transmissivités et des salinités.**

Horizon	Simulation	Entrée CI par Limite Orientale m ³ /s
1950	<i>Permanent</i>	0.008
2000	<i>Transitoire</i>	0.008
2050	<i>CI-SIM-0</i>	0.008
2050	<i>CI-7</i>	0.020

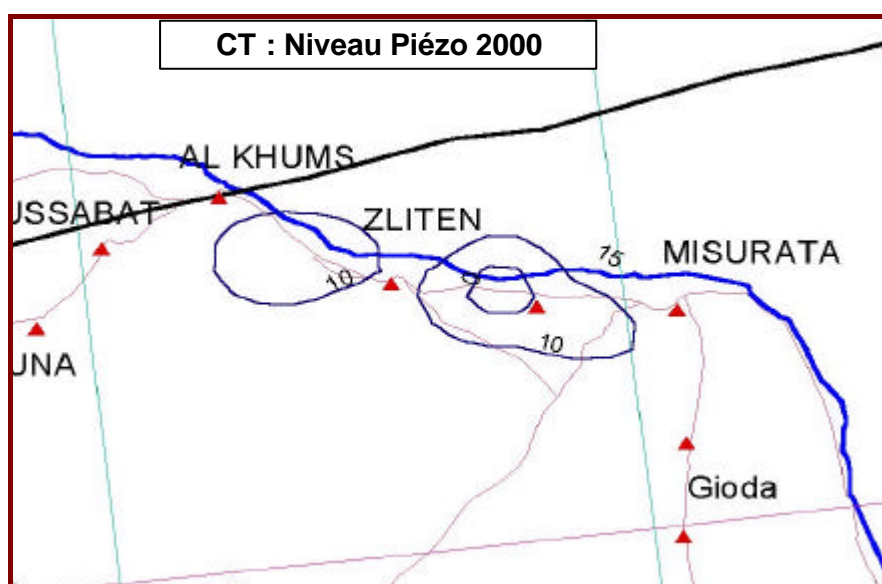
V - GOLFE DE SYRTE

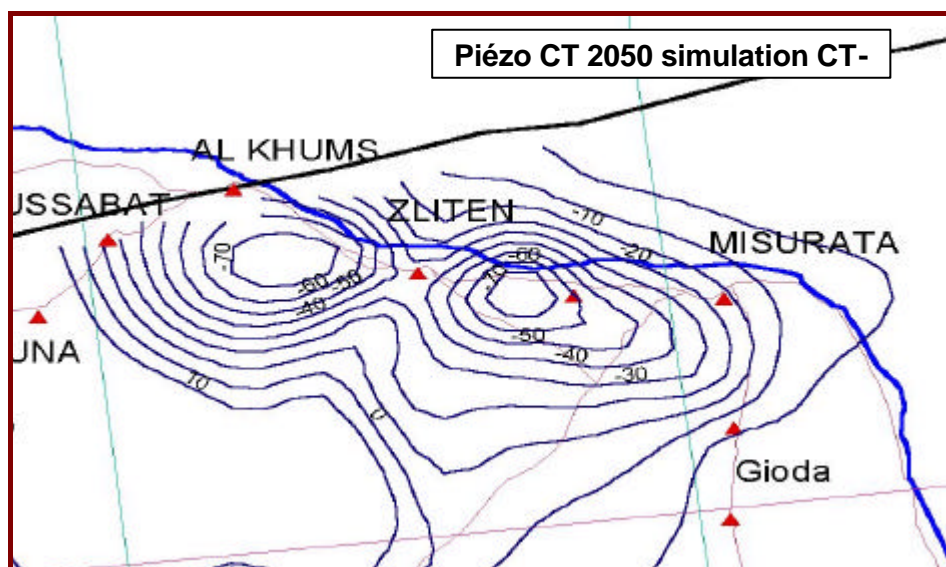
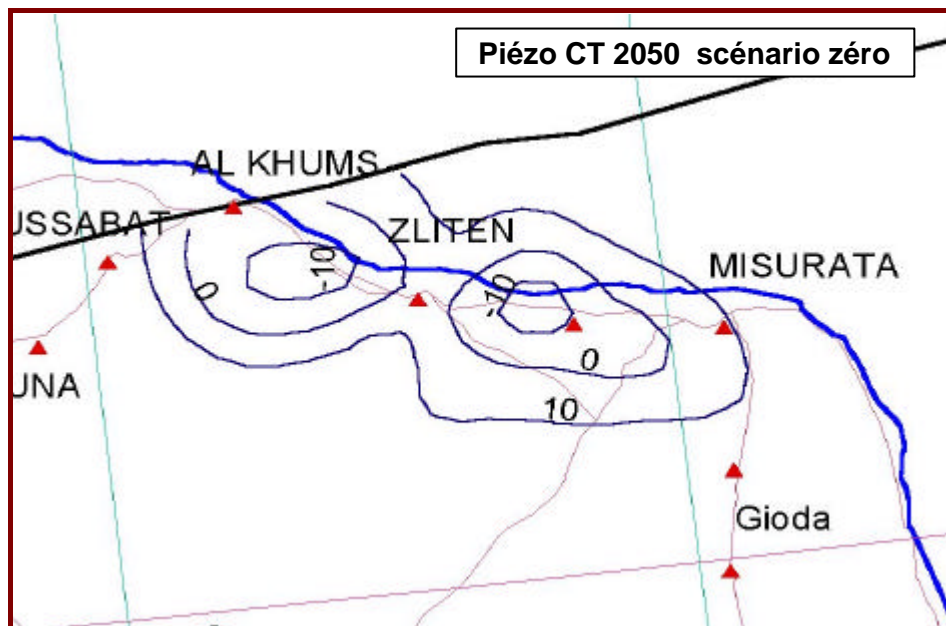
Percolation dans le Golfe de Syrte m ³ /s					
Horizon	Simulation	CT	CI	Total percol	Ain Tawargha
1950	Permanent	0.6	0.8	1.4	2.0
2000	Transitoire	0.6	0.6	1.2	1.6
2050	SIM0	0.5	0.6	1.1	1.3
2050	CI7 & CT3	0.4	0.26	0.66	0.4

Le débit de Ain Tawargha passe de **1.3** (scénario zéro) à **0.4 m³/s** pour le scénario de résorption des déficits et dans le même temps la drainance en mer [CI+CT] passe de **1.1** à **0.66 m³/s** : les exutoires naturels perdent au total **1.33 m³/s** soit près de 60% de leur débit du scénario zéro .

Si pour le scénario de résorption [**CI7 & CT3**] le Continental Intercalaire continue de bénéficier en 2050 d'une charge respectable (**15 à 20 m**) sur le littoral, il n'en est pas de même pour le Complexe Terminal, dont le niveau piézométrique est en **2000** déjà à Zéro entre Zliten et Misrata et dont la situation serait gravement préjudiciable dans l'hypothèse du scénario **CT3** où le niveau serait à **-70 m** sur le littoral à l'horizon 2050.

Un tel scénario catastrophe justifie amplement que des investigations approfondies soient consenties pour une connaissance plus précise de l'hydrogéologie de la zone littorale précisément ainsi qu'un monitoring serré dans le secteur.



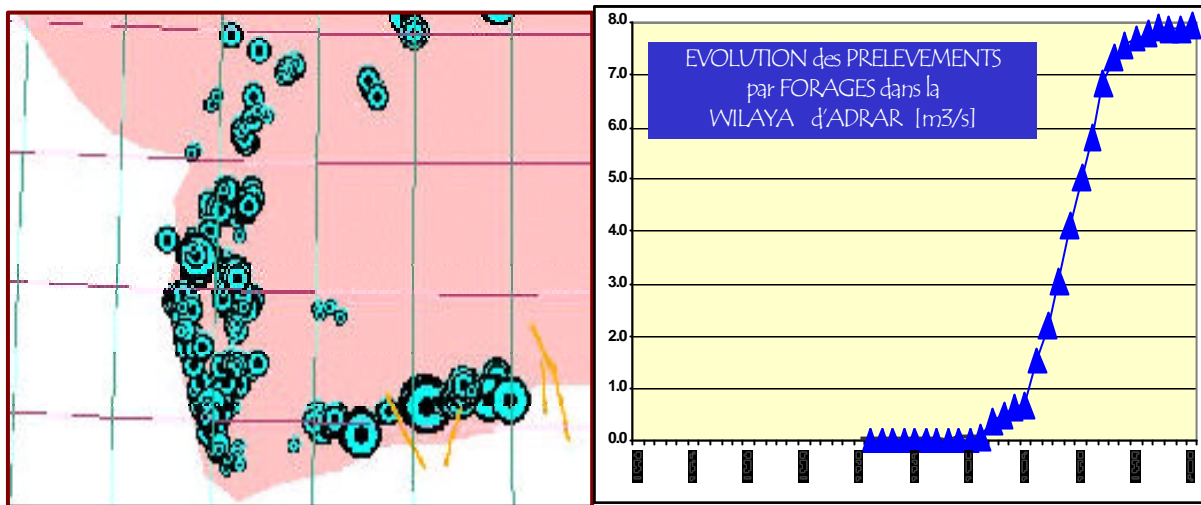


VI - LES FOGGARAS

Les Foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt constituent le principal exutoire naturel de la nappe du Continental Intercalaire. Leur recensement très précis, représente un enjeu à double titre :

- Avec l'explosion des forages dans la région depuis une vingtaine d'années (cf. carte de position des forages et graphique d'évolution des débits extraits), ces émergences vont de plus en plus difficilement supporter la compétition et seront appelées à disparaître à plus ou moins long terme. La connaissance précise de leur régime actuel permettra de mieux appréhender une telle évolution, en autorisant la mise au point d'outils fiables capables de prédire et donc d'anticiper en connaissance de cause les régimes à venir.
- Les foggaras constituent l'une des plus importantes « sorties », la seule « sortie visible » et donc « mesurable » du Modèle du Continental Intercalaire en Algérie.

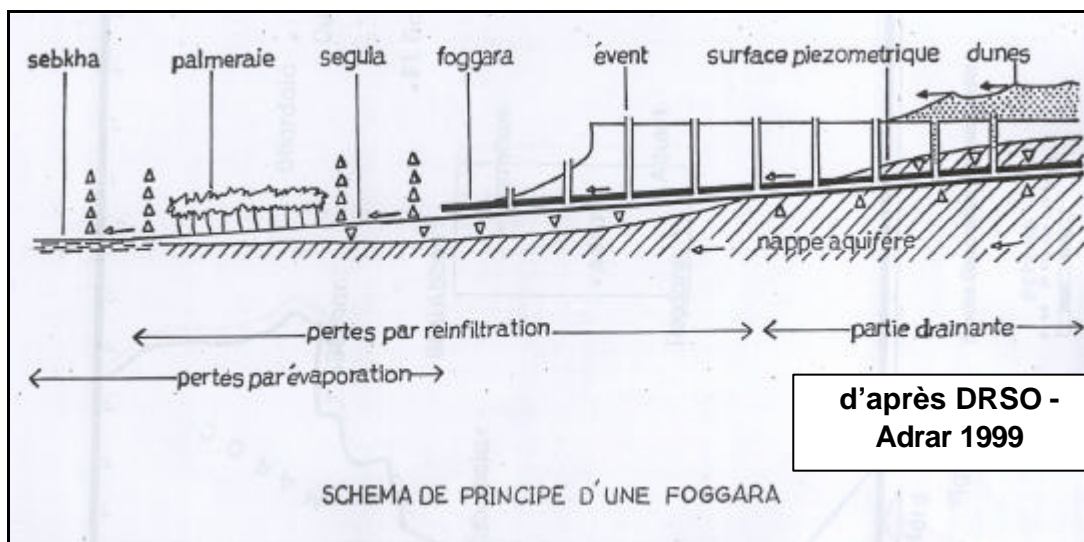
Le calage du modèle dans la région et sa représentativité, dépendent d'une bonne connaissance de la localisation et du débit actuel des foggaras et de la qualité de l'observation de son évolution passée.



Or, à l'échelle de l'étude du SASS et du maillage adopté pour le modèle de 12,5x12,5 km, il n'était **pas question** de s'attacher à une **hydrogéologie fine des foggaras**, laquelle **reste à faire**.

La représentation actuelle des foggaras sur le modèle, sous forme de drains de **156 km²**, est certes loin d'être satisfaisante même si globalement le modèle arrive à restituer correctement les débits des émergences sommés par grande région. Mais à la décharge du modèle, on doit préciser que les estimations historiques du débit des foggaras (inventaires de 1960 et de 1998) ne fournissent que des évolutions globales : **il n'existe pas d'historique individuel par foggaras, ni même par groupe de foggaras ou par palmeraie**, ce qui est **préjudiciable à une modélisation fine du système**.

Par ailleurs, **les centaines de foggaras actives ne sont pas rattachées à des coordonnées précises**. Il est vrai que le point d'émergence ne constitue que la partie visible d'un système de drainage souterrain très complexe et très étendu (parfois plusieurs km) et que ce point d'émergence peut se déplacer après des travaux de réfection. **L'Hydrogéologie fine des foggaras comporte une composante topographique, cartographique et piézométrique très importante**.



VII - LES CHOTTS

CT - Sorties (m ³ /s)	1950	2000	SIM-0
Pompages	7.5	42.8	42.8
Chotts Algérie-Tunisie	7.3	1.6	0.0
Sources Nefzaoua Djrerid	2.1	0.0	0.0
Sebkhas Algérie	1.2	0.4	0.0

Rappelons les résultats auxquels avait abouti la simulation du scénario zéro : à l'horizon 2050, **c'est la disparition totale de tout artésianisme dans la région des Chotts algéro-tunisiens**. Les Chotts Merouane et Melrhir se trouvent «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, peut impliquer comme risques de « réalimentation » de la nappe du CT par les eaux des Chotts...

Une modélisation précise des liens entre la nappe du CT et les chotts nécessite une analyse fine et une prise en compte **des mécanismes régissant les échanges entre ces deux entités**. Cette analyse, qui n'a pas encore été abordée à l'échelle locale et sous-régionale, ne peut évidemment pas se concevoir sérieusement à l'échelle du SASS dans l'immédiat. Dans notre modèle, la liaison s'effectue à travers une simple perméabilité verticale et les transferts de matière seraient instantanés s'ils arrivaient à être activés.

En pratique, la version actuelle du modèle SASS a abandonné toute liaison directe entre CT et Chott en cas de dénoyage de celui-ci. En effet, les quelques historiques de salinités disponibles dans la base de données SASS et la disposition des forages correspondants autour des Chotts ne permettent pas de conclure que les augmentations constatées puissent être imputables à une arrivée de sel en provenance du Chott.

En réalité, on ne possède pas encore d'observations validées permettant de décrire en connaissance de cause, les relations et les écoulements entre les Chotts et la nappe du CT. Ces deux entités ne se trouvent du reste généralement pas en contact direct.

En effet, en Algérie la zone des chotts correspond à une zone d'effondrement où se développent les formations imperméables de l'Eocène évaporitique.

En Tunisie, les formations du CT se trouvent à très grande profondeur sous le Chott Djerid, ce dernier ayant été le siège d'une forte subsidence du MioPliocène ; mais cette série se biseaute brusquement autour du Chott et des communications préférentielles, dans les deux sens, ne sont pas à exclure notamment au Sud-Est dans la Nefzaoua et au Nord vers le secteur du Djerid. En vérité, les importants écoulements de la nappe du CT vers les chotts, reconstitués par le modèle, pourraient bien se limiter à une simple spéculation hydrodynamique, certes fortement étayée par la piézométrie régionale, s'il n'y avait les « aiouns » du Chott Djérid, dont l'important débit initialement estimé entre 3 et 5 m³/s ne peut provenir que de la nappe du CT.

Vis à vis des aquifères du **CT**, **les chotts représentent un risque majeur**, dans la mesure où d'importants rabattements de nappe à proximité des chotts peuvent induire des **arrivées d'eaux sursalées** et **provoquer ainsi une dégradation irréversible de la ressource en eau**.

Le modèle permet de calculer précisément le moment à partir duquel peut survenir une éventuelle réalimentation de la nappe par le chott.

Le premier indicateur permettant d'évaluer l'éventualité d'un tel risque est fourni par la position du niveau piézométrique de la nappe relativement à la côte du Chott.

L'évolution reconstituée au cours des 50 années écoulées et l'évolution prévisible de cet indicateur au cours des 50 prochaines années indiquent bien que des secteurs comme la **presqu'île de Kebili**, la **Nefzaoua**, le **Djerid**, les **Chotts Merouane** et **Melrhir**, **paraissent sérieusement menacés** dans la mesure où les NP de la nappe du CT s'y trouve systématiquement sous le niveau 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**.

Les quelques développements qui précèdent résument bien toutes les interrogations que l'on peut aujourd'hui formuler sur les relations entre les chotts et la nappe du CT. Toutes ces questions mesurent la modestie de notre connaissance actuelle du phénomène. **Elles justifient l'ampleur des recherches à entreprendre dans un avenir immédiat** pour que l'on ne soit pas amené encore, dans dix ou vingt ans, à enregistrer le même constat d'ignorance.

Ces questions justifient en outre l'urgence de la mise en place effective d'un système de monitoring des salinités dans la région : L'absence d'historiques significatifs d'évolution des salinités du CT autour des chotts serait catastrophique si elle devait se prolonger encore.

VIII - RECHARGE DES AQUIFERES

L'un des points faibles de tous les modèles réalisés dans le Sahara a été de **passer un peu trop rapidement sur la question de la Recharge des nappes**, lorsque cette dernière n'est pas complètement niée au profit d'une hypothétique paléorecharge.

Après les développements, certes encore préliminaires, de la première partie du présent rapport concernant l'estimation respectivement du ruissellement dans les oueds et la capacité d'infiltration des affleurements géologiques « utiles », il est possible de comparer les débits d'alimentation calculés par le modèle au terme du calage en régime permanent, avec les estimations des débits d'alimentation aux mêmes endroits estimés en faisant la somme :

- des infiltrations directes des précipitations aux affleurements (hypothèse retenue : coefficient d'infiltration = 2% de la pluie moyenne interannuelle),
- des infiltrations des crues d'oueds (hypothèse : 30% du ruissellement moyen s'infiltre).

CONTINENTAL INTERCALAIRE								
MODELE MATHEMATIQUE		INFILTRATION AFFLEUREMENTS			INFILTRATION OUEDS			
Limite Modèle CI	Calculé Modèle(l/s)	Affleurement	Cinf = 2% Mm3/an	L/s	Bassin	Cinf = 30% Mm3/an	L/s	Recharge Total L/s
Atlas saharien	7540	Atlas Saharien s.s.	100	3175	Atlas n.c. Djedi	110	3492	6667
		GrD Erg Occid.	66	2095			0	2095
Dahar	450	Dahar	3	95	Dahar	0	0	95
Nafoussa	1130	Nafoussa	3	95		0	0	95
Tinrhert et Adrar B.Drich	290	Tinrhert et Adrar B.Drich	8	254			0	254
TOTAL	9410	Total		5714			3492	9206
COMPLEXE TERMINAL								
MODELE MATHEMATIQUE		INFILTRATION AFFLEUREMENTS			INFILTRATION OUEDS			
Limite Modèle CT	Calculé Modèle(l/s)	Affleurement	Cinf = 2% Mm3/an	L/s	Bassin	Cinf = 30% Mm3/an	L/s	Recharge Total L/s
Atlas saharien	3775				O. Djedi	40	1270	1270
		Dahar Matmata	0.4	13	Dahar	15	476	489
Dahar	6085		46	1460			0	1460
Nafoussa	620	Tunisie-Libye		0			0	0
Limite ouest	2450		9	286			0	286
Limite sud-ouest	980	Mzab		0	Mzab	45	1429	1429
Tademait	2585	Tadmait	11	349			0	349
	1060	Sud Libye	1	32			0	32
Sud Libye		Tinrhert	16	508			0	508
Nord des chotts algériens	305		8	254			0	254
Nord des chotts tunisiens	150	Nord des chotts		0	Aurès-Gharsa	90	2857	2857
Contribution Calc.Eocènes	200	Contribution Calc.Eocènes		200			0	200
		Mioptocène , vc Grand Erg C	156	4952			0	4952
TOTAL	18200	Total		8054			6032	14086

Le tableau qui précède présente l'ensemble des résultats obtenus. On peut y noter que :

- avec les hypothèses retenues sur les coefficients d'infiltration, l'estimation de la recharge hydrologique de la nappe du Continental Intercalaire correspond à peu de chose près à celle calculée par le modèle numérique². Les apports des oueds représentent **40%** de la recharge et l'infiltration directe **60%**. Cette dernière n'est cependant pas reportée à la limite extérieure de la nappe comme c'est le schéma adopté par le modèle du SASS et l'on doit faire intervenir la surface infiltrante du Grand Erg Occidental pour pouvoir « boucler » le bilan.
- Pour le Complexe Terminal, les choses sont beaucoup plus compliquées :
 - d'abord le débit total d'alimentation toutes sources confondues, ne représente que **75%** de la valeur calculée par le modèle,
 - ensuite, si les parts respectives des oueds et de l'infiltration directe sont les mêmes que pour le CI, à savoir **40% et 60%**, leur répartition régionale est très déséquilibrée. Par les Aurès par exemple, les oueds « apportent » **3.m³/s** à la nappe alors que le modèle n'en calcule que **300 l/s³**.

² Ce résultat peut être considéré comme un artéfact dans la mesure où le coefficient d'infiltration directe retenu (2%) était précisément celui qui devait permettre de retrouver les estimations à priori de la recharge des nappes du CI et du CT. Un tel coefficient n'a toutefois rien d'exagéré et peut être considéré comme tout à fait raisonnable y compris au Sahara.

³ Avec ce point particulier se trouve précisément pointée la question de la représentation de la nappe de Biskra et celle de la représentativité du modèle du CT dans cette région .

- sur les autres limites, le modèle surestime, parfois d'une manière drastique, les apports : c'est notamment le cas dans le Tademaït (2500 vs 350 l/s), Sud Libye (1000 vs 30 l/s), le Mzab (3400 vs 1700 l/s), le Dahar-Nefussa (6600 vs 1400 l/s). Et ce sont les surfaces infiltrantes du MioPliocène (5000 l/s d'apport) qui permettront de se rapprocher du bilan calculé par le modèle.

IX - RESERVES DU BASSIN OCCIDENTAL

Les scénarios prévisionnels simulés sur le modèle ont laissé entrevoir de sérieuses possibilités d'exploitation des réserves du bassin du Grand Erg (G.E.O) Occidental, gisement privilégié des secteurs à surface libre de la nappe du Continental Intercalaire. Afin d'éprouver les capacités réelles de la région à supporter une telle exploitation, il a procédé à une simulation particulière spécifiquement consacrée à cette question. Cette simulation regroupe le scénario **CI-6** [80 m³/s ; « exploitation des réserves du bassin du G.E.O »], auquel ont été ajoutés certains débits du scénario **CI-5** [5m³/s dans chacun des sites d'Akabli, Timimoun, Titaï, In Salah ; et 8m³/s à El Goléa] ; soit un prélèvement additionnel total de **108 m³/s** ou encore **3,4 Milliards m³/an**. Bien sûr, ce prélèvement est inclus dans le scénario **CI-8** déjà simulé, mais étant donné le poids spécifique des débits additionnels du bassin occidental [90% des prélèvements de l'Algérie et 84% du SASS au CI], il était important de savoir estimer :

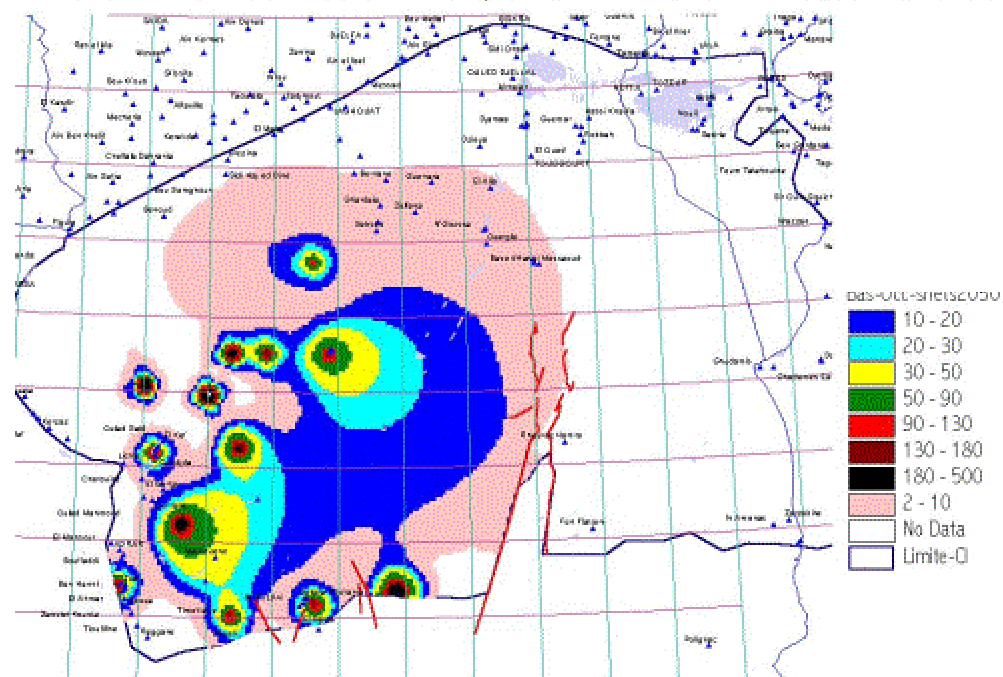
- quelles étaient les influences du Bassin Occidental sur le reste du SASS à l'horizon de prévision 2050 ?
- étant donnée l'importance des quantités mises en jeu et la participation exclusive des réserves du CI à la production de ces quantités, quels en seraient les impacts sur le très long terme (un siècle, deux siècles), dans le bassin lui-même et sur les autres régions, voire les autres pays sachant que Tunisie et Libye se trouvent à un millier de km ?

BILAN du BASSIN OCCIDENTAL m ³ /s								
	1950		2000		2050		2200	
	entrée	sortie	entrée	sortie	entrée	sortie	entrée	sortie
Alimentation	35		35		35		35	
Déstockage			127		1200		1188	
Echange horizontal	0,6			2,2		3,5		3,4
Forages		0,3		10,7		1187		1187
Drains		3,8		3,3		1,3		0,2

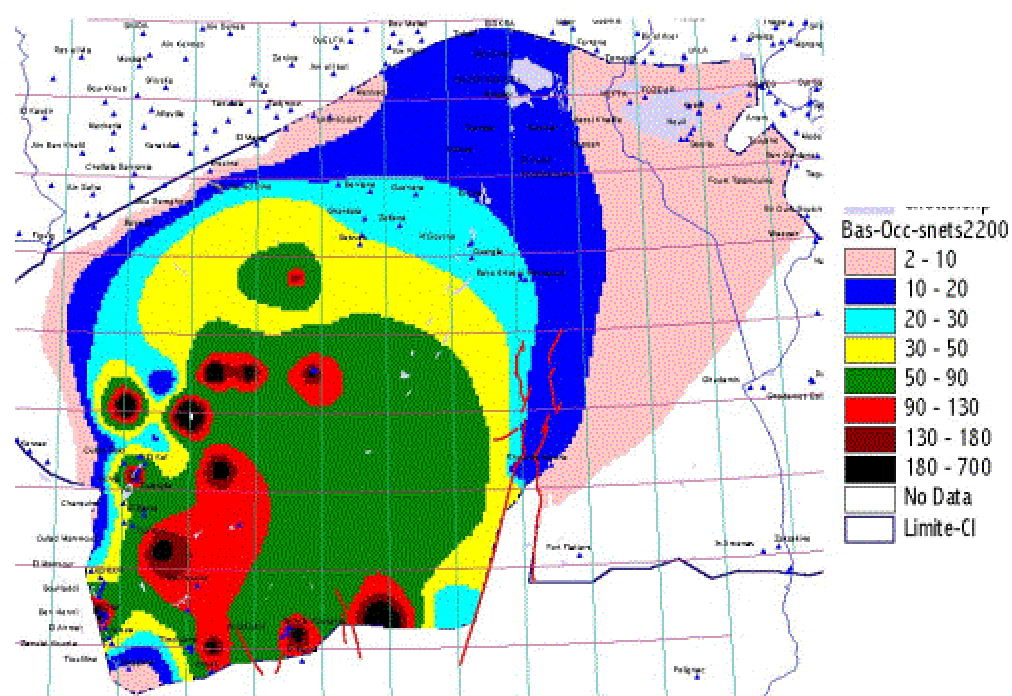
Le bilan calculé aux horizons 2050 et 2200 et les cartes **des rabattements nets**, indiquent les observations suivantes :

- les débits pompés sont fournis exclusivement par le déstockage des réserves de la nappe,
- les Foggaras qui conservaient un certain débit à l'horizon 2050, sont complètement tarées en 2200,
- à l'horizon 2050, les rabattements induits par les prélèvements additionnels (rabattements nets) restent cantonnés dans la région,
- en 2200, les influences en rabattement sont nettement marquées à l'extérieur de la région : 25m à Ouargla, 20m à Toggourt... et près de 10m en Tunisie, à 1000km du barycentre des prélèvements.

Bassin Occidental à 108 m³/s - Rabattements nets en 2050



Bassin Occidental à 108 m³/s : Rabattements nets en 2200



X - COMPARAISON DES MODELES

On peut caractériser les différentes versions du modèle SASS à l'aide des critères objectifs que sont les **paramètres structuraux du modèle** : Transmissivités et coefficients d'emmagasinement.

La répartition des transmissivités dans un domaine aussi vaste que le SASS peut être objectivement et efficacement décrite par un paramètre unique : **la Moyenne Harmonique de l'ensemble des valeurs de transmissivités**. C'est ce qui est fait tab.1, qui présente les moyennes des différentes versions du modèle SASS, mais **uniquement pour le Continental Intercalaire** car les transmissivités du CT n'ont pas fait l'objet de modifications depuis la fin du calage de Tripoli. On notera sur ce tableau que la **moyenne arithmétique constitue un moins bon indicateur** de la différence entre deux versions, alors que la moyenne harmonique offre des valeurs contrastées d'une version à l'autre.

Le tab. 2 donne les coefficients d'emmagasinements moyens [moyennes arithmétiques] du Complexe Terminal pour les différentes versions du modèle.

Tab. 1 : Transmissivités moyennes des différentes versions du modèle SASS, en m²/s

	MTRIPOLI	M20-8	M10-9	M30-9
MOYENNE ARITHMETIQUE	0.013	0.013	0.017	0.014
MOYENNE HARMONIQUE	0.004	0.007	0.009	0.005

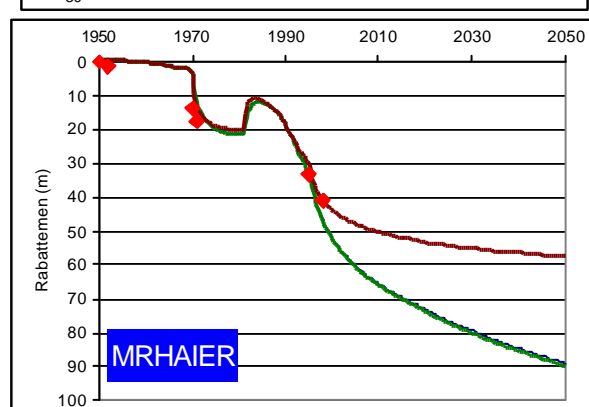
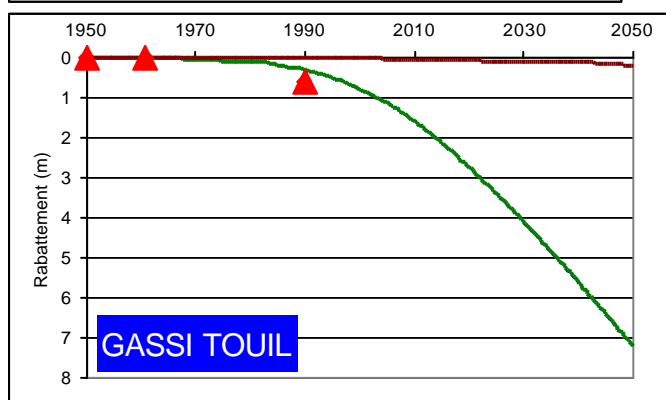
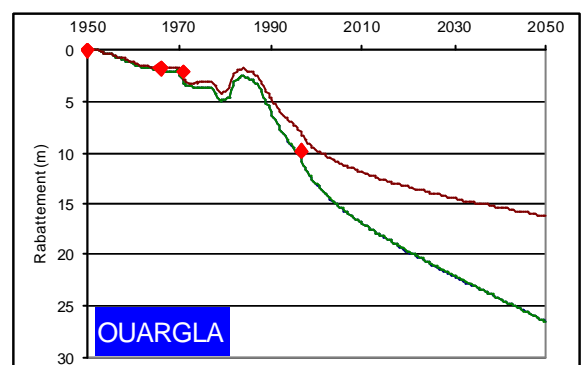
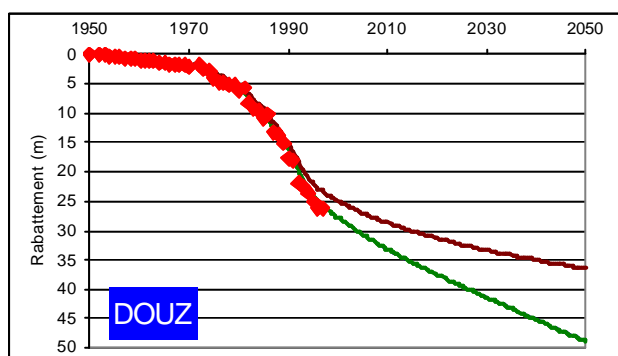
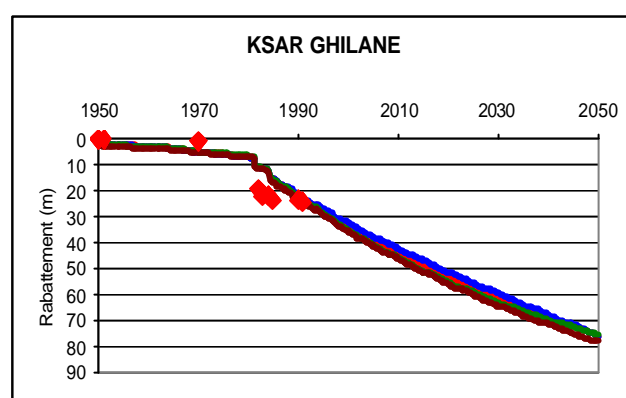
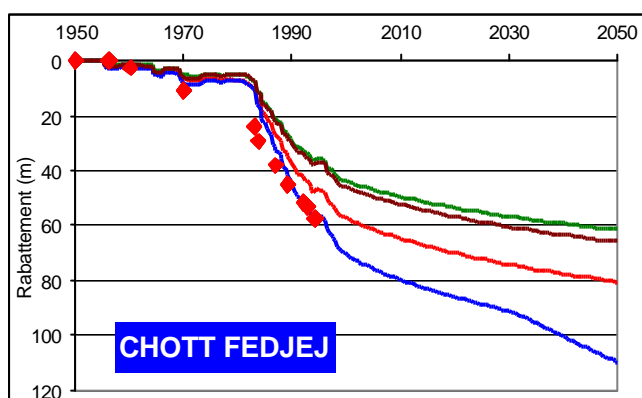
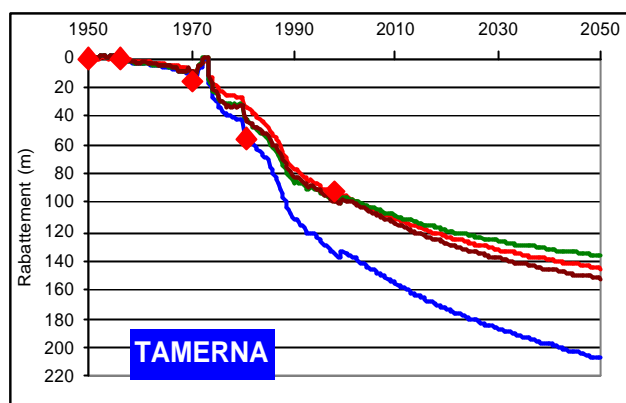
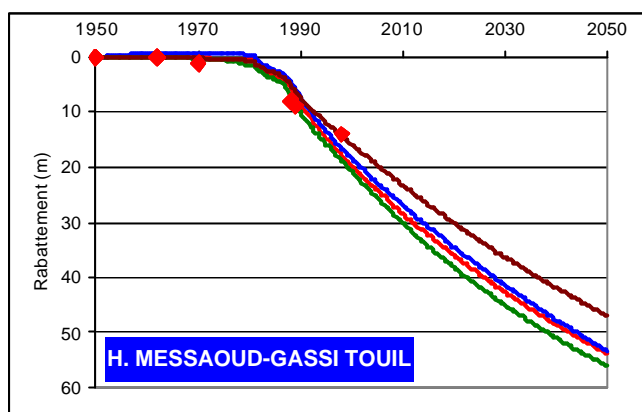
Tab. 2 : Coefficient d'Emmagasinement Moyen des Modèles SASS

Version	S Moyen (moyenne arithmétique)
TRIPOLI	2.85×10^{-2}
M20-8	2.85×10^{-2}
M10-9	1.0×10^{-2}
M23-9	1.0×10^{-2}
M30-9	1.0×10^{-2}

XI - SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES

Les différentes versions du modèle du SASS peuvent utilement servir la nécessaire étude de sensibilité aux paramètres déterminants en simulation. Pour apprécier une telle sensibilité, les huit figures. suivantes [les quatre premières au CI, les quatre dernières au CT] indiquent les rabattements 1950-2050 du scénario zéro calculés par les quatre dernières versions du modèle [post-Tripoli : celles qui intègrent la nouvelle conception de l'exutoire tunisien]. Ces figures expriment essentiellement que :

- les versions les plus pessimistes en Transmissivités (M23-9 et M30-9) donnent les rabattements au CI les plus sévères, notamment dans les champs de pompage,
- les secteurs où les transmissivités du CI n'ont pas été modifiées (H.Messaoud, Ksar Ghilane) demeurent insensibles au changement,
- les très importantes réductions des coefficients d'emmagasinement de nappe libre dans le CT ont des effets notables sur les rabattements des zones où sont concentrés les champs de pompes (Mghaier, Douz). Ces effets sont encore plus marqués sur les zones à surface libre (Gassi Touil).



Marron : version du 20 août
Vert : version du 10 septembre
Bleu : version du 23 septembre
Rouge : version du 30 septembre

XII - L'EMMAGASINEMENT DANS LES AQUITARDS

Ecoulement d'un fluide à travers un aquitard

Entre deux couches aquifères séparées par un aquitard, les écoulements verticaux par

drainance sont décrits par l'équation :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K_v} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

où S_s est le coefficient d'emménagement spécifique de l'aquitard, K_v est sa perméabilité verticale et $h=h(z,t)$ est la charge hydraulique, au temps t et en un point situé à la distance verticale z du toit de l'aquitard.

Lorsque le système est initialement à l'équilibre, si $H_0(t)$ est la charge hydraulique dans l'aquifère pompé et $H_1(t)$ celle dans l'aquifère adjacent, que H_0 est constant et $H_1=0$ pour $t>0$, la solution de l'équation (1) est :

$$h(z,t) = H_0 \left[1 - \frac{z}{b} \frac{2}{p} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n p z}{b}\right) \exp(-n^2 a t) \right] \quad (2)$$

où $a = \frac{p^2 K_v}{S_s b^2}$; Le flux vertical s'écrit : $q = -K_v \frac{dh}{dz}$ (3)

avec $\frac{dh}{dz}(z,t) = -\frac{H_0}{b} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n p z}{b}\right) \exp(-n^2 a t) \right]$ (4)

Au niveau des épontes de l'aquitard, on a :

$$\frac{dh}{dz}(0,t) = -\frac{H_0}{b} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2 a t) \right] \quad (5a)$$

$$\frac{dh}{dz}(b,t) = -\frac{H_0}{b} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 a t) \right] \quad (5b)$$

Dans le cas où $H_0=1$ et $b=1$, les équations (5a) et (5b) représentent respectivement le flux d'eau alimentant l'aquifère pompé et celui provenant de l'aquifère non pompé et rejoignant l'aquitard. La réponse d'un aquitard suite à une variation brusque de la charge hydraulique dans l'un de deux aquifères peut être décrite par trois phases :

- **Phase 1 de durée T_1** (fig. 2.a) : le flux de drainance rejoignant l'aquifère pompé provient du déstockage de l'aquitard. L'aquitard pouvant être considéré avoir une épaisseur infinie, l'interaction entre les deux aquifères est insignifiante. La charge hydraulique est donnée par :

$$h(z,t) = H_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{\sqrt{\frac{4 K_v t}{S_s}}} \right) \quad (6)$$

et $\frac{dh}{dz}(z,t) = -\frac{H_0}{\sqrt{\frac{p K_v t}{S_s}}} \exp \left(-\frac{z^2}{\frac{4 K_v t}{S_s}} \right)$ (7)

pour $\alpha t \leq T_1$ où αt est une variable adimensionnelle décrivant le temps

- **Phase 2 se prolongeant jusqu'à T_2** (fig. 2.b) : la réponse de l'aquitard se propage jusqu'à l'interface avec l'aquifère non pompé qui commence à réagir. L'interaction entre les deux aquifères commence à avoir lieu et le flux entrant dans l'aquifère pompé provient à la fois du déstockage de l'aquitard et de l'aquifère non pompé. On a :

$$h(z,t)=H_0\left[1-\frac{z}{b}-\frac{2}{p}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\left(\frac{n\pi z}{b}\right)\exp(-n^2\alpha t)\right] \quad (8)$$

$$\text{et} \quad \frac{dh}{dz}(z,t)=-\frac{H_0}{b}\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\cos\left(\frac{n\pi z}{b}\right)\exp(-n^2\alpha t)\right] \quad (9)$$

pour $T_1 < \alpha t < T_2$

- **Phase 3** (fig. 2.c) : l'état d'équilibre est établi dans l'aquitard. La totalité du flux de drainance en direction de l'aquifère pompé provient de l'aquifère non pompé. On a :

$$h(z,t)=H_0\left(1-\frac{z}{b}\right) \quad (10)$$

$$\text{et} \quad \frac{dh}{dt}(z,t)=-\frac{H_0}{b} \quad (11)$$

pour $\alpha t > T_2$

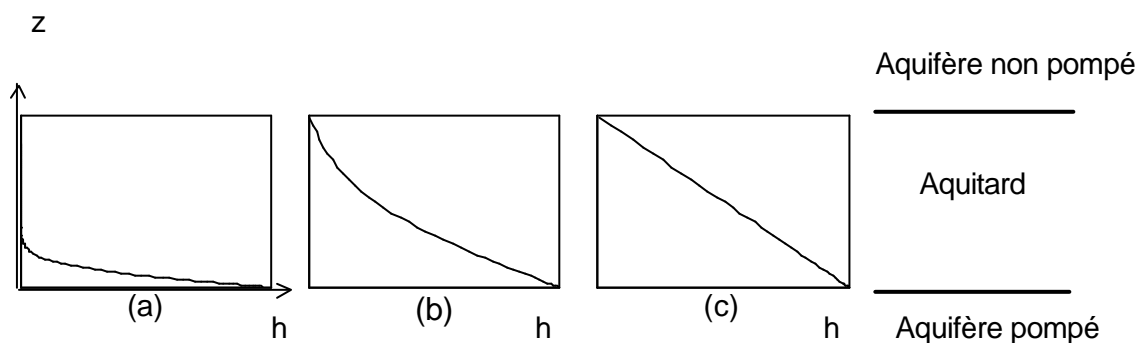


Fig. 2 – Les différentes phases caractérisant la réponse d'un aquitard

Les fonctions de réponse de l'aquitard au cours des trois phases, représentant la réponse de l'aquitard en régime transitoire par rapport au régime d'équilibre, peuvent être définies par :

$$g(z,t)=\frac{\left(\frac{dh}{dz}\right)_{i(i=1,2,3)}}{\left(\frac{dh}{dz}\right)_3} \quad (12)$$

En introduisant les paramètres adimensionnels $t=\frac{\alpha t}{p^2}$ pour le temps et $c=\frac{z}{b}$ pour la distance, les fonctions de réponse pour les trois phases sont alors :

$$g_1(c,t)=\frac{1}{\sqrt{pt}}\exp\left(-\frac{c^2}{4t}\right) \quad \tau \leq T_1 \quad (13a)$$

$$g_2(c,t)=1+2\sum_{n=1}^{\infty}\cos(n\pi c)\exp(-n^2\pi^2 t) \quad T_1 < \tau \leq T_2 \quad (13b)$$

$$g_3(c,t)=1 \quad \tau > T_2 \quad (13c)$$

avec $T_1 = \frac{aT_1}{p^2}$ et $T_2 = \frac{aT_2}{p^2}$ qui marquent respectivement le début d'influence d'un aquifère sur l'autre et le début d'établissement du régime permanent (fig. 3). Le régime permanent peut être défini par la condition :

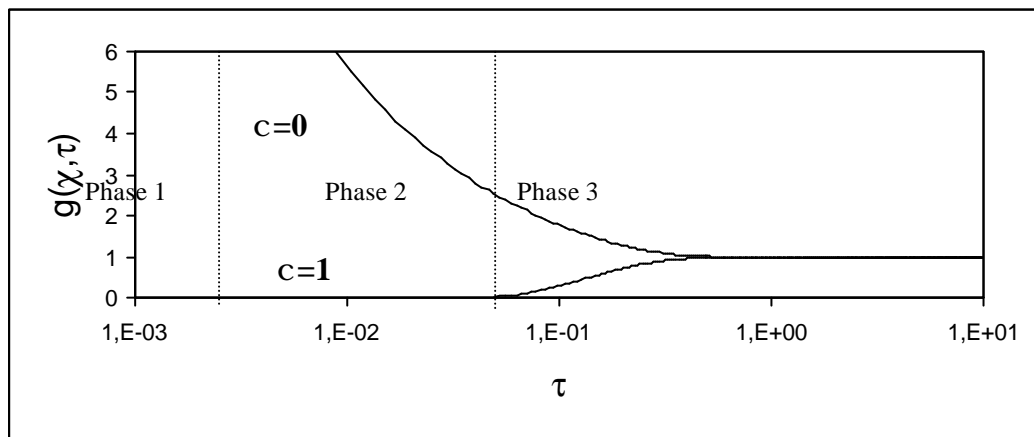
$$|g_2(1,t) - g_2(0,t)| \leq \varepsilon \quad \tau \geq T_2 \quad (14)$$

ε est l'erreur admissible sur l'approximation du comportement de l'aquitard. En pratique, on peut adopter $\varepsilon = 10^{-3}$ compte tenu des imprécisions du modèle liées entre autres à la discrétisation spatiale. Dans ce cas, on obtient $T_2 = 1$ et $T_1 = 0.0316$, soit :

$$t_2 = \frac{S_s b^2}{K_v} \quad (15a)$$

$$t_1 = 0.0316 \frac{S_s b^2}{K_v} \quad (15b)$$

Fig. 3 : Fonction de réponse d'un aquitard



Le temps t_2 dépend des caractéristiques physiques du semi-perméable. L'établissement d'un régime immédiatement permanent ou d'un très long transitoire est différent d'un aquitard à un autre.

Application au multicouche du SASS

Temps d'établissement du régime permanent dans les aquitards du SASS

Dans MODFLOW, l'écoulement dans les aquitards est supposé permanent et le flux à travers l'aquitard est calculé par la loi de Darcy :

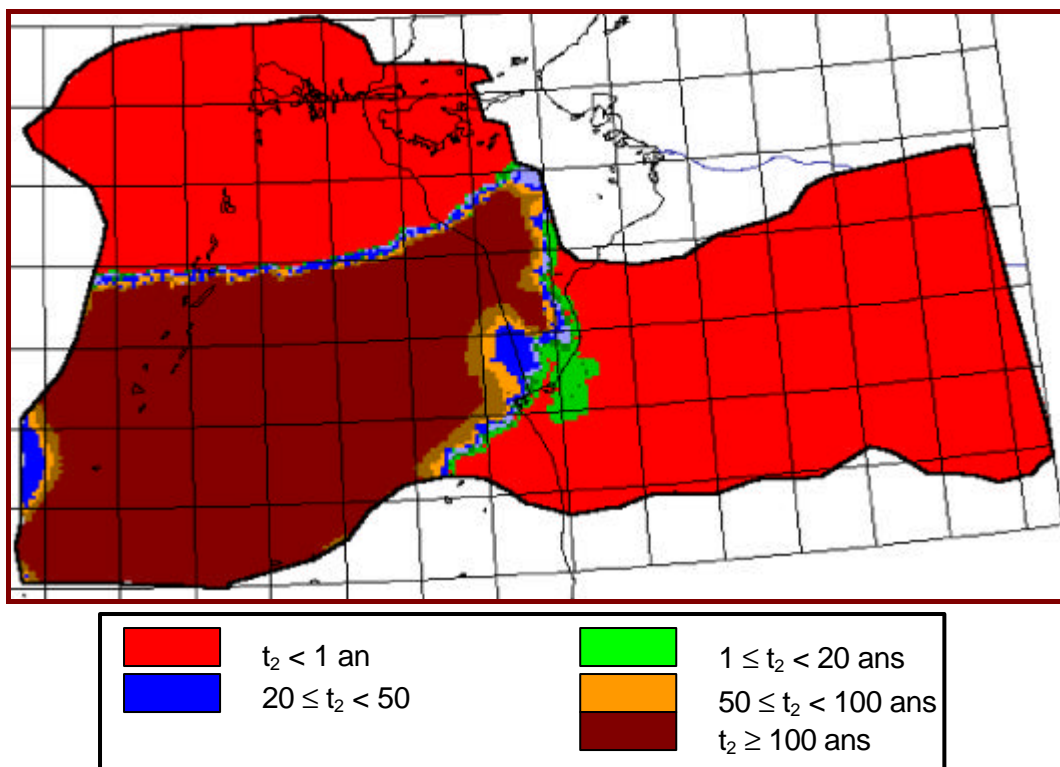
$$q = \frac{K_v}{b} \Delta H \quad (19)$$

Le déstockage des aquitards sous l'effet d'une perturbation dans l'un des deux aquifères est négligé. Pour vérifier la validité de cette hypothèse, il a été calculé le temps d'établissement d'un régime permanent dans les différents aquitards du système. Le calcul de t_2 (cf. équation 15a) nécessite la connaissance de la perméabilité verticale, de l'épaisseur et du coefficient d'emménagement spécifique. La perméabilité verticale résulte du calage du modèle. L'épaisseur est déduite de la base de données géologiques. L'emménagement spécifique peut être élevé pour les formations argileuses ou pratiquement nul s'il s'agit de couches incompressibles comme l'anhydrite. En se référant aux valeurs mentionnées dans la littérature saharienne (UNESCO, 1972 ; GEOMATH, 1994), il a été utilisé une valeur intermédiaire, $S_s = 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ qui caractérise une formation hétérogène englobant argile, sable, marne et anhydrite.

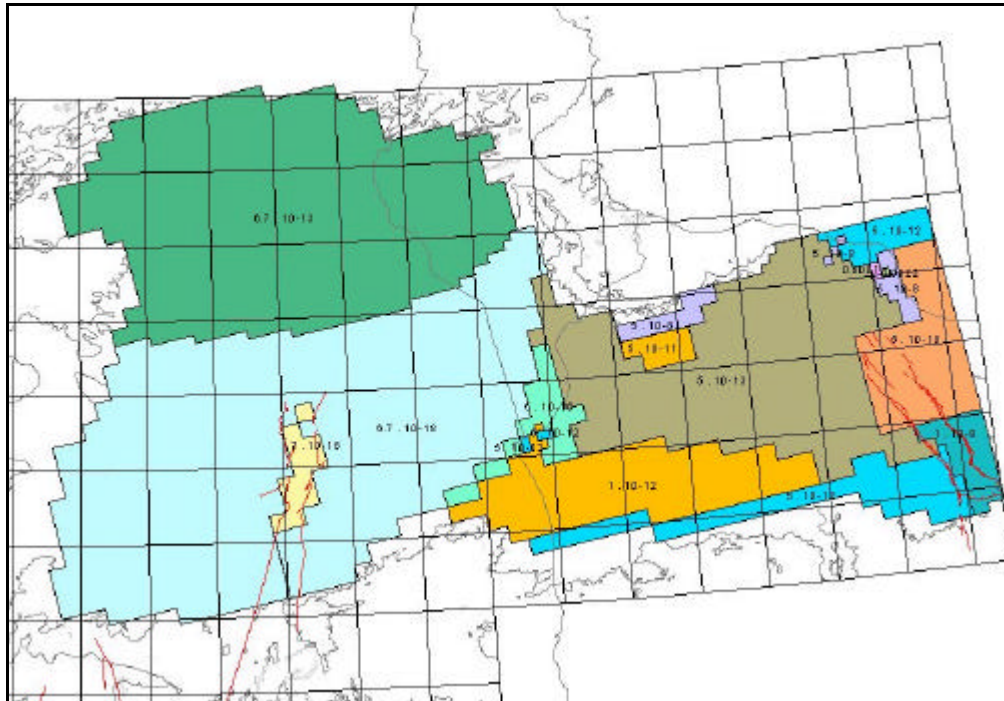
Dans le Sénonien lagunaire : t_2 est inférieur à 1 an en Libye et dans tout le bas-Sahara situé au Nord du 32^{ème} parallèle. Dans le tiers SW, il varie entre 100 et 1000 ans.

Dans le Cénomanien : t_2 est inférieur à 1 an dans le domaine des parallèles 29°-32° et des méridiens 6°-16°, soit toute la Libye, l'extrême sud tunisien, la wilaya d'Illizi (Algérie) et une partie de la wilaya de Ouargla. Ailleurs, t_2 est supérieur à 100 ans et peut atteindre des valeurs extrêmes comme 3. millions d'années au Nord du Chott Rharsa. Mais on a encore $t_2 < 1$ an dans le chott Fedjej et la presqu'île de Kébili.

Répartition de t_2 dans le Sénonien lagunaire



Sénonien lagunaire – coefficients de Drainance [s ⁻¹]	
1	0,000000
2	0,000000
3	0,000000
4	0,000000
5	0,000000
6	0,000000
7	0,000000
8	0,000000
9	0,000000
10	0,000000
11	0,000000
12	0,000000
13	0,000000
14	0,000000
15	0,000000
16	0,000000
17	0,000000
18	0,000000
19	0,000000
20	0,000000
21	0,000000
22	0,000000
23	0,000000
24	0,000000
25	0,000000
26	0,000000
27	0,000000
28	0,000000
29	0,000000
30	0,000000
31	0,000000
32	0,000000
33	0,000000
34	0,000000
35	0,000000
36	0,000000
37	0,000000
38	0,000000
39	0,000000
40	0,000000
41	0,000000
42	0,000000
43	0,000000
44	0,000000
45	0,000000
46	0,000000
47	0,000000
48	0,000000
49	0,000000
50	0,000000
51	0,000000
52	0,000000
53	0,000000
54	0,000000
55	0,000000
56	0,000000
57	0,000000
58	0,000000
59	0,000000
60	0,000000
61	0,000000
62	0,000000
63	0,000000
64	0,000000
65	0,000000
66	0,000000
67	0,000000
68	0,000000
69	0,000000
70	0,000000
71	0,000000
72	0,000000
73	0,000000
74	0,000000
75	0,000000
76	0,000000
77	0,000000
78	0,000000
79	0,000000
80	0,000000
81	0,000000
82	0,000000
83	0,000000
84	0,000000
85	0,000000
86	0,000000
87	0,000000
88	0,000000
89	0,000000
90	0,000000
91	0,000000
92	0,000000
93	0,000000
94	0,000000
95	0,000000
96	0,000000
97	0,000000
98	0,000000
99	0,000000
100	0,000000



CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS

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 Exploitablees 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 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, 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 2.2Milliards de m³ en 2000 [1.33 en Algérie, 0.55 en Tunisie, 0.34 en Libye], jusqu'à un niveau de 7.8Milliards 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.

RECOMMANDATIONS

Pour de nombreuses raisons, liées à la quantité et à la qualité des données disponibles, aux hypothèses et aux approximations adoptées lors de la conception, de la construction et du calage du modèle, un certain nombre d'incertitudes et d'indéterminations demeurent au terme de l'étude, qui se répercutent sur la fiabilité des résultats obtenus et qui peuvent être progressivement levées grâce à de nouvelles investigations à entreprendre pour une meilleure connaissance du système. Les points suivants rappellent les incertitudes les plus marquantes relevées au cours de l'étude et dressent quelques pistes de suivi. Ces pistes complètent bien entendu les recommandations à caractère « évident », qui concernent l'absolue nécessité d'un suivi régulier de l'évolution des débits de prélèvements, des niveaux piézométriques et des salinités.

Transmissivités et Débit de l'Exutoire Tunisien

Si l'on doit juger le modèle du SASS du point de vue des deux contraintes adoptées pour le calage :

- légitimité géologique de la structure du champ des transmissivités,
- valeur estimée du débit de l'exutoire tunisien du CI.

La version adoptée [modèle du 30 Septembre], paraît devoir *constituer le meilleur des compromis*. C'est celle qui est la mieux indiquée pour la réalisation des simulations prévisionnelles. Il n'en reste pas moins que les Transmissivités du SASS et notamment celles du CI, doivent faire l'objet de nombreuses autres nouvelles investigations, notamment sur les immenses étendues vierges que représentent encore les deux Grands Ergs : l'Oriental et l'Occidental.

Emmagasinement en nappe libre

Par rapport aux modèles précédents, celui du SASS se distingue par une réduction substantielle des coefficients d'emmagasinement dans les zones à surface libre du CT. Cette réduction s'inspire de ce qui avait déjà été opéré au niveau du Continental Intercalaire dans l'Adrar [réduction de 20% à 5%]. Dans le Complexe Terminal, un seul et unique point de contrôle piézométrique en zone libre se trouve à Gassi-Touil : pour se rapprocher du rabattement de référence, il faut y réduire substantiellement les valeurs de S en nappe libre passant de 10×10^{-2} à 1×10^{-2} . Ces nouvelles valeurs de S, malgré tout globalement pessimistes, demandent certainement à être confortées par de nouvelles investigations.

Poids du COD

Le Cambro-Ordovicien constitue un immense réservoir en liaison avec le CI dans la partie Sud-Est du bassin. Au stade actuel de l'étude, le mode de représentation du Paléozoïque adopté pour le modèle paraît valable (charge imposée fixe), mais à terme il faudrait envisager de le représenter par une couche aquifère active, en raison de sa mise à contribution pour compenser une partie des prélèvements additionnels du CI en Libye, et du risque de diminution de cette contribution sous l'effet des prélèvements du DJ. Hassaouna.

Limite Orientale

La limite orientale du CI est la seule du modèle qui ne soit pas une limite naturelle. En réalité, les formations aquifères du Crétacé inférieur se poursuivent bien à l'Est du graben mais présentent de faibles transmissivités et une forte salinité. Il n'existe donc pas de limite hydraulique précise à cet endroit. Le modèle est limité par une condition de potentiels imposés à travers une résistance. Cette formule autorise l'estimation des échanges du CI avec son prolongement oriental saumâtre : ces échanges calculés restent dérisoires mais indiquent malgré tout une tendance à l'activation des apports en eau salée sous l'effet de fortes sollicitations. On ne peut donc manquer de recommander de pousser un peu plus les investigations dans ce secteur pour mieux reconnaître la distribution des hauteurs piezométriques, des transmissivités et des salinités.

Golfe de Syrte

Si pour le scénario de résorption des déficits en Libye, [simulations CI7 & CT3] le Continental Intercalaire continue de bénéficier en 2050 d'une charge respectable sur le littoral, il n'en est pas de même pour le Complexe Terminal, dont la situation serait gravement préjudiciable avec un niveau piézométrique à -70 m sur le littoral ! Un tel scénario catastrophe justifie amplement que des investigations approfondies soient consenties pour une connaissance plus précise de l'hydrogéologie de la zone littorale précisément ainsi qu'un monitoring serré dans le secteur.

Les Foggaras

Les Foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt constituent le principal exutoire naturel de la nappe du Continental Intercalaire. Leur recensement précis représente un enjeu à double titre :

- ces émergences vont de plus en plus difficilement supporter la compétition avec les forages et seront appelées à disparaître à plus ou moins long terme. La connaissance précise de leur régime actuel permettra de mieux appréhender une telle évolution, en autorisant la mise au point d'outils fiables capables d'anticiper en connaissance de cause les mutations à venir ;
- Les Foggaras constituent l'une des plus importantes « sorties », la seule « sortie visible » et donc « mesurable » du Modèle du Continental Intercalaire en Algérie.

Le calage du Modèle dans la région et sa représentativité, dépend d'une bonne connaissance de la localisation et du débit actuel des foggaras et de la qualité de l'observation de son évolution passée. Or, à l'échelle de l'étude du SASS et du maillage adopté pour le modèle de 12,5x12,5 km, il n'était pas possible de s'attacher à une hydrogéologie fine des foggaras, laquelle reste à faire. La représentation actuelle des foggaras sur le modèle, sous forme de drains de 156 km², est certes loin d'être satisfaisante même si globalement le modèle arrive à restituer correctement les débits des émergences sommés par grande région. Mais à la décharge du modèle, on doit préciser que les

estimations historiques du débit des foggaras (inventaires de 1960 et de 1998) ne fournissent que des évolutions globales : il n'existe pas d'historique individuel par foggaras, ni même par groupe de foggaras ou par palmeraie, ce qui est préjudiciable à une modélisation fine du système. Par ailleurs, les centaines de foggaras actives ne sont pas rattachées à des coordonnées précises. Il est vrai que le point d'émergence ne constitue que la partie visible d'un système de drainage souterrain très complexe et très étendu (parfois plusieurs km) et que ce point d'émergence peut se déplacer après des travaux de réfection. L'Hydrogéologie fine des foggaras comporte une composante topographique, cartographique et piézométrique très importante.

Les Chotts

Une modélisation précise des liens entre la nappe du CT et les chotts nécessite une analyse fine et une prise en compte des mécanismes régissant les échanges entre ces deux entités. En réalité, on ne possède pas encore d'observations scientifiques validées permettant de décrire avec précision les relations et les écoulements entre les Chotts et la nappe du CT. Dans le modèle, la liaison s'effectue à travers une simple perméabilité verticale, et les transferts de matière seraient instantanés s'ils arrivaient à être activés. En pratique, la version finale du Modèle SASS a abandonné toute liaison directe entre CT et Chott en cas de dénoyage de celui-ci. En effet, les quelques historiques de salinités disponibles dans la Base de Données SASS et la disposition des forages correspondants autour des Chotts ne permettent pas de conclure clairement que les augmentations constatées soient imputables à une arrivée de sel en provenance du Chott. Ceci résume quelques unes des interrogations que l'on peut formuler sur la connaissance actuelle du phénomène. Cela justifie l'ampleur des recherches à entreprendre dans un avenir immédiat pour que l'on ne soit pas amené encore, dans dix ou vingt ans, à enregistrer le même constat d'ignorance. Ces questions justifient en outre l'urgence de la mise en place effective d'un système de monitoring des salinités dans la région : L'absence d'historiques significatifs d'évolution des salinités du CT autour des chotts serait catastrophique si elle devait se prolonger encore.

Recharge des aquifères

L'un des points faibles de tous les modèles réalisés dans le Sahara a été de passer outre la question de la Recharge des nappes. Il est à présent possible de comparer les débits d'alimentation calculés par le modèle, avec les estimations des débits d'alimentation aux mêmes endroits estimés en faisant la somme des infiltrations directes des précipitations aux affleurements et des infiltrations des crues d'oueds. A l'examen des résultats obtenus, on peut y noter que :

- l'estimation de la recharge hydrologique de la nappe du Continental Intercalaire correspond à peu de chose près à celle calculée par le modèle numérique,
- pour le Complexe Terminal, les choses sont plus compliquées : d'abord le débit total d'alimentation ne représente que 75% de la valeur calculée par le Modèle ; ensuite, la répartition régionale est très déséquilibrée par les Aurès par exemple, les Oueds « apportent » 3.m3/s à la nappe alors que le Modèle n'en calcule que 300 L/s. Sur les autres limites, le Modèle surestime, parfois d'une manière drastique, les apports : c'est notamment le cas dans le Tademait (2500 vs 350 L/s), Sud Libye (1000 vs 30), le Mzab (3400 vs 1700), le Dahar-Nefussa (6600 vs 1400), et ce sont les surfaces infiltrantes du MioPliocène (5000 L/s d'apport) qui permettent de se rapprocher du bilan calculé par le modèle. En conclusion, la représentativité du modèle aura beaucoup à gagner d'une connaissance approfondie des mécanismes de recharge des aquifères du CI et du CT.

Réserves du Bassin Occidental

Les scénarios prévisionnels ont laissé entrevoir de sérieuses possibilités d'exploitation des réserves du Bassin Occidental , gisement privilégié des secteurs à surface libre de la nappe du Continental Intercalaire. Etant donné le poids spécifique des débits additionnels du bassin occidental dans les simulations finales [90 % des prélèvements de l'Algérie et 84% du SASS au CI] , l'importance des quantités mises en jeu [3.5 Milliards m³] et la participation exclusive des réserves du CI à la production de ces quantités, il était important de savoir estimer quels en seraient les impacts sur le très long terme, dans le bassin lui-même et sur les autres régions, voire les autres pays sachant que Tunisie et Libye se trouvent à un millier de km.

Le Bilan et les rabattements calculés à l'horizon 2200 indiquent que :

- les Foggaras sont complètement tarées,
- les influences en rabattement sont nettement marquées à l'extérieur de la région : 25m à Ouargla et près de 10 m en Tunisie.

Avant de penser à mettre en œuvre les prélèvements simulés et étant donné les fortes incertitudes du modèle dans la région du grand erg occidental [méconnaissance quasi totale des transmissivités de terrain et des niveaux piezométriques, cf. calage du modèle en régime permanent], il paraît nécessaire d'engager d'importantes investigations dans ces régions, pour mieux reconnaître la structure des aquifères, la répartition des niveaux piezométriques, des Transmissivités et des coefficients d'emmagasinement en nappe libre.

Evaporation profonde

La nappe du CI peut être soumise à de fortes pertes par évaporation dans les zones d'affleurements où elle est libre et proche de la surface du sol. Dans le Gourara-Touat-Tidikelt, le flux d'évaporation calculé par des formules empiriques indiquerait un débit continu de l'ordre de 10 m³/s, ce qui paraît considérable. En effet, pour évacuer un tel débit, il faudrait doubler les apports à la nappe du CI en infiltrant dans l'Erg Occidental et sur le plateau du Tademait. Les implications d'une telle hypothèse sont lourdes de conséquences pour la modélisation du système mais demeurent sans contradiction vis à vis des aires de recharge potentielles identifiées. L'approfondissement de cette question nécessite un surcroît d'investigation et une modélisation fine du bassin occidental du CI. Quant à la nappe du CT, elle n'est pas exempte d'évaporation profonde, principalement dans le secteur de l'Oued Mya, objet précisément d'un scénario fort d'exploitation et qui nécessiterait d'importantes reconnaissances.

ANNEXES

ANNEXE 1
Piézométrie de référence du continental intercalaire

N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
1	37H12	950995	361044	268		UNESCO (1972)	69	22-O6	421103	-385923	269	1960	UNESCO (1972)
2	EG1	1031790	284903	242	1962	UNESCO (1972)	70	TK105	240131	-386765	266	1970	UNESCO (1972)
3	5717	1140583	290513	310	1951	UNESCO (1972)	71	In Salah 1	481802	-375970	281	1956	UNESCO (1972)
4	DKA1	1102985	239218	301	1969	UNESCO (1972)	72	4N7	501089	-294859	346	1964	UNESCO (1972)
5	SP4-N	1159478	227457	307		UNESCO (1972)	73	A2	207672	-294619	265		UNESCO (1972)
6	5654	1190363	203664	312		UNESCO (1972)	74	Hassi Meraguene	203146	-277118	259	1969	UNESCO (1972)
7	2J14	1101379	178886	303	1966	UNESCO (1972)	75	Hassi en Nouss	203046	-221129	257		UNESCO (1972)
8	BZA1	1132894	179974	307	1966	UNESCO (1972)	76	OF101	241314	-235649	279	1970	UNESCO (1972)
9	6368	1210800	189529	306		UNESCO (1972)	77	TH5B	268092	-205743	300	1970	UNESCO (1972)
10	Mr a	1214838	177332	315	1961	UNESCO (1972)	78	Hassi Rhaba	256737	-178518	295	1969	UNESCO (1972)
11	6511	1224327	157716	317	1955	UNESCO (1972)	79	3N7	484109	-195838	358	1965	UNESCO (1972)
12	Sna	1168262	166169	315	1957	UNESCO (1972)	80	Me1	565105	-147602	367		UNESCO (1972)
13	EBA4	1121343	146090	318	1964	UNESCO (1972)	81	Oum Chen	489490	-149922	373		UNESCO (1972)
14	EBA7	1124451	120410	319	1968	UNESCO (1972)	82	Gouret Louazouaza	509429	-65770	388	1969	UNESCO (1972)
15	ZTA1	1139921	104990	316	1969	UNESCO (1972)	83	OS1	524659	-113537	381	1964	UNESCO (1972)
16	EZA1	1143531	94448	317	1970	UNESCO (1972)	84	Hassi Inkhal	457121	-96243	385		UNESCO (1972)
17	ECHA1	1145997	71251	342	1969	UNESCO (1972)	85	PN°8	426210	-88728	377		UNESCO (1972)
18	SBa	1167641	113925	312	1961	UNESCO (1972)	86	4M6	387470	-100183	364	1970	UNESCO (1972)
19	7000	1210657	77379	322		UNESCO (1972)	87	PN°4	364084	-132084	343		UNESCO (1972)
20	1K12	903063	81356	333	1969	UNESCO (1972)	88	PN°2	321604	-140198	327		UNESCO (1972)
21	Hassi Messaoud	819538	116525	375		UNESCO (1972)	89	T6	252469	-150896	280	1970	UNESCO (1972)

N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
23	447J10	743948	148424	405		UNESCO (1972)	91	El Golea	508892	3033	401	1970	GEOMATH (1994)
24	480J10	753543	145583	403		UNESCO (1972)	92	C1-19	1208624	-246707	408	1970	GEOMATH (1994)
25	228I11	811534	277669	362		UNESCO (1972)	93	Ghadames	1151858	-44465	349	1970	GEOMATH (1994)
26	436I11	824763	288187	362	1959	UNESCO (1972)	94	T/96/76	1236279	-29915	331	1970	GEOMATH (1994)
27	437I11	823785	305674	357	1962	UNESCO (1972)	95	WG-9	1287223	9369	323	1970	GEOMATH (1994)
28	408H11	799982	315485	362	1956	UNESCO (1972)	96	WG-13	1252290	66113	319	1970	GEOMATH (1994)
29	42H10	768734	319822	362	1956	UNESCO (1972)	97	WG-16	1229001	80663	321	1970	GEOMATH (1994)
30	7I9	685741	291263	425	1954	UNESCO (1972)	98	T/41/81	1278489	166506	313	1970	GEOMATH (1994)
31	Guerrara	667395	245714	426		UNESCO (1972)	99	T/22/76	1252290	173781	312	1970	GEOMATH (1994)
32	Zelfana	647817	198074	426		UNESCO (1972)	100	W-23	1317789	118492	314	1970	GEOMATH (1994)
33	4K9	689117	86344	425	1960	UNESCO (1972)	101	C70-5	1346899	89392	304	1970	GEOMATH (1994)
34	16K8	561142	12444	407	1957	UNESCO (1972)	102	C70-8	1358543	76298	308	1970	GEOMATH (1994)
35	15K8	565770	56219	414	1958	UNESCO (1972)	103	T/11/81	1320700	-9546	315	1970	GEOMATH (1994)
36	1J8	592363	110996	422	1970	UNESCO (1972)	104	10/81	1457519	-3726	282	1970	GEOMATH (1994)
37	20J8	597050	147689	432	1956	UNESCO (1972)	105	158/70	1514285	22463	253	1970	GEOMATH (1994)
38	67J8	568205	163292	441	1958	UNESCO (1972)	106	213/76	1536118	64658	249	1970	GEOMATH (1994)
39	71J8	544403	171870	441	1958	UNESCO (1972)	107	29/83	1492452	128677	254	1970	GEOMATH (1994)
40	Metili	592202	180143	443		UNESCO (1972)	108	22/87	1552129	128677	208	1970	GEOMATH (1994)
41	Ghardaia	592395	206804	445		UNESCO (1972)	109	B2	1566684	182511	177	1970	GEOMATH (1994)
42	20I7	534630	197187	460	1957	UNESCO (1972)	110	131/77	1412398	71933	291	1970	GEOMATH (1994)
43	Berriane	594191	240975	445		UNESCO (1972)	111	130/77	1400754	92302	297	1970	GEOMATH (1994)
44	124I8	550396	252712	449	1958	UNESCO (1972)	112	46/77	1426953	181056	320	1970	GEOMATH (1994)

N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
45	8-9I7	495523	245617	481	1955	UNESCO (1972)	113	K12	1597250	154866	175	1970	GEOMATH (1994)
46	19I7	496560	221048	477	1957	UNESCO (1972)	114	5-82	1632183	96667	190	1970	GEOMATH (1994)
47	31K8	487035	66015	435	1961	UNESCO (1972)	115	208/76	1629272	-3726	279	1970	GEOMATH (1994)
N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
49	5K4	215146	82629	495	1955	UNESCO (1972)	117	P21	1623450	240710	65.5	1973	GEFLI (1978)
50	1L14	1136168	-25121	335	1959	UNESCO (1972)	118	K6	1643827	197061	87.8	1973	GEFLI (1978)
51	2M14	1153310	-84554	345	1959	UNESCO (1972)	119	K10	1616172	191241	127.6	1973	GEFLI (1978)
52	5M14	1145284	-170011	353	1959	UNESCO (1972)	120	B3	1579784	188331	174.5	1973	GEFLI (1978)
53	3N14	1151601	-228695	383	1957	UNESCO (1972)	121	SOF5	1597250	160686	142	1973	GEFLI (1978)
54	1N15	1174543	-235180	410	1956	UNESCO (1972)	122	K5	1661293	160686	102	1973	GEFLI (1978)
55	2N13	1037731	-247500	378	1959	UNESCO (1972)	123	ZZ2	1686037	154866	91.7	1973	GEFLI (1978)
56	1N13	1060201	-197337	354	1957	UNESCO (1972)	124	WH1	1719515	154866	89	1973	GEFLI (1978)
57	2M13	1032425	-110495	353	1958	UNESCO (1972)	125	ZZ1	1680215	134497	128.9	1973	GEFLI (1978)
58	1N12	928801	-210031	374	1958	UNESCO (1972)	126	WS2	1626361	103942	168	1973	GEFLI (1978)
59	1M12	983556	-188774	358	1958	UNESCO (1972)	127	K7	1702048	102487	137.6	1973	GEFLI (1978)
60	21N11	896736	-257353	369	1958	UNESCO (1972)	128	K8	1687493	76298	161.5	1973	GEFLI (1978)
61	20N11	885496	-207037	342	1958	UNESCO (1972)	129	SR1	1610350	639	270	1973	GEFLI (1978)
62	6M11	885587	-118311	340	1963	UNESCO (1972)	130	FL60	1603072	-11001	281	1973	GEFLI (1978)
63	3M11	856608	-136450	329	1959	UNESCO (1972)	131	WS4	1544851	32648	259	1973	GEFLI (1978)
64	11L11	862618	-8937	350	1969	UNESCO (1972)	132	K9	1710781	-13911	318	1973	GEFLI (1978)

N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
65	6N9	711829	-241306	378	1969	UNESCO (1972)	133	CF2	1135263	386872	171.7	1956	UNESCO (1972)
66	R5	244791	-421446	255	1971	UNESCO (1972)	134	109G9	711875	424396	381	1956	UNESCO (1972)
67	11P5	342578	-404795	266	1961	UNESCO (1972)	135	111I8	551578	287760	459	1958	UNESCO (1972)
68	13P6	383800	-408497	277	1959	UNESCO (1972)	136	Hazoua 1	956450	355817	300	reconstitué	BD du SASS

ANNEXE : 2
Transmissivités du Continental Intercalaire
[cf.SASS/OSS : Vol.2 ;Hydrogéologie]

N°	P	Numéro	Nom	$T_x 10^{-3}$ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	$T_x 10^{-3}$ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	$T_x 10^{-3}$ m ² /s	Origine
1	A	P00500011	Aoulef 2	5.8	ERESS	47	T	5664005	Ch Fedjej 1	27.7	MAMOU, 1990	93	L	K-9		17.0	GEFLI
2	A	P00600013	Tit 3	8.0	ERESS	48	T	5950005	Ch Fedjej 2	83.0	MAMOU, 1990	94	L	K4		1.3	GEFLI
3	A	L00700003	Hadj Halima	35.0	ERESS	49	T	8429005	Ch Fedjej 3	88.5	MAMOU, 1990	95	L	K-11		0.7	GEFLI
4	A	L00700041	Hassi El Gara	14.1	ERESS	50	T	ZTA 1	Zemlet Taiara	6.0	ERESS	96	L	WH-1		2.6	GEFLI
5	A	K00700030	Foucault	17.0	ERESS	51	T	19394005	Limagues (Cl 8)	56.6	MAMOU, 1990	97	L	WS-6		12.0	GEOMATH
6	A	L00700056	Taghit nouveau	9.5	ERESS	52	T	19190005	CF 1 bis	25.4	MAMOU, 1990	98	L	SH-1		1.5	GEFLI
7	A	K00700021	Bel Bechir	10.0	ERESS	53	T	18700005	CF F10	323.0	MAMOU, 1990	99	L	T11-81		25.5	BRL 1997
8	A	M00400284	Timimoun	36.0	ERESS	54	T	19175005	CF 3bis	23.4	MAMOU, 1990	100	L	T96-76		18.0	BRL 1997
9	A	N00400302	Igostene	22.6	ERESS	55	T	18697005	CF F3	88.5	MAMOU, 1990	101	L	T159-89		74.0	BRL 1997
10	A	J00800001	Hassi Fahl	0.5	ERESS	56	T	18698005	CF F8	6.3	MAMOU, 1990	102	L	WG9		17.0	BRL 1997
11	A	J00800020	Hassi Touil	3.5	ERESS	57	T	18699005	CF 9	100.0	MAMOU, 1990	103	L	WG 16		1.7	BRL 1997
12	A	L00700066	Hassi Maroket	0.5	ERESS	58	T	19452005	Steffimi (Cl 7)	3.4	MAMOU	104	L	T203-80		75.0	BRL 1997
13	A	K00800016	Dayet Ghanem	5.0	ERESS	59	T	19484005	Behaier (Cl 9)	87.0	MAMOU	105	L	T276-77		85.0	BRL 1997
14	A	K00800015	Gouiret Moussa	1.5	ERESS	60	T	19230005	Degache Cl2	1.1	MAMOU, 1990	106	L	T277-77		60.0	BRL 1997
15	A	K01200001	Rhourd El Baguel	0.6	ERESS	61	T	19084005	Nefta Cl	0.8	MAMOU, 1990	107	L	WG 22		8.3	BRL 1997
16	A	J01100094	Hassi Mesaoud	2.0	ERESS	62	T	BZA 1		2.0	Geomath	108	L	T5-78		2.7	BRL 1997
17	A	L01100011	Gassi Touil	2.0	ERESS	63	T	ZTA 1		6.0	Geomath	109	L	T35-75		7.9	BRL 1997
18	A	In Salah 18	In Salah 18	16.0	ERESS	64	T	ZN A1	Zemlet En Nous	10.0	ERESS	110	L	T110-76		2.7	BRL 1997
19	A	In Salah 19	In Salah 19	16.0	ERESS	65	T	5654005	Bordj Bourguiba	30.0	ERESS	111	L	T125-81		9.2	BRL 1997
20	A	In Salah 20	In Salah 20	27.0	ERESS	66	T	X00700223	El Borma A1	0.4	MAMOU, 1990	112	L	T126-81		28.0	BRL 1997
21	A	In Salah 21	In Salah 21	3.6	ERESS	67	T	X00700217	El Borma A6	43.0	MAMOU, 1990	113	L	T39-78		7.9	BRL 1997
22	A	J01000447	Ouargla 1	3.2	ERESS	68	T	16726005	El-Borma 202(*)	3.1	MAMOU, 1990	114	L	T175-78		11.0	BRL 1997

N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine
23	A	J01000480	Ouargla 2	5.1	ERESS	69	T	18684005	El-Borma 203(*)	2.5	MAMOU, 1990	115	L	P20		15.0	GEFLI
24	A	J01000511	Ouargla 3	5.1	ERESS	70	T	18643005	El-Borma 207(*)	1.5	MAMOU, 1990	116	L	P21		0.1	GEFLI
25	A	G00900109	Sidi Khaled	2.3	ERESS	71	T	18644005	El-Borma 208(*)	11.0	MAMOU, 1990	117	L	T-2A		10.0	GEFLI
26	A	H01000042	M'rara	6.0	ERESS	72	T	5717005	Ksar Rhilane	6.0	ERESS	118	L	T313-76		1.6	BRL 1997
27	A	H01100408	Tamerna	6.0	ERESS	73	T	19009005	Ksar Ghilane 3 bis	12.7	MAMOU	119	L	131/77		13.0	BRL 1997
28	A	I01100436	Sidi Mahdi	7.0	ERESS	74	T	19157005	Bou Abdallah (Cl 1)	4.5	MAMOU, 1990	120	L	WS 14		6.0	GEOMATH

N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine	N°	P	Numéro	Nom	Tx 10 ⁻³ m ² /s	Origine
29	A	I01100437	Sidi Slimane	5.0	ERESS	75	T	19199005	Taourgha (CI 2)	55.1	MAMOU, 1990	121	L	T64-78		24.0	BRL 1997
30	A	X00700035	Guettara	12.0	ERESS	76	T	19140005	Mansoura (CI 3)	2.7	MAMOU, 1990	122	L	T158-89		19.0	BRL 1997
31	A	L00600019	Hassi Inkhal	17.0	ERESS	77	T	19348005	Zaoueiet Anes (CI 5)	13.8	MAMOU, 1990	123	L	Wg-13		4.5	BRL 1997
32	A	M00700020	Oumchen	15.0	ERESS	78	T	19412005	Menchia CI 6	39.7	MAMOU, 1990	124	L	K 12		15.0	Geomath
33	A	6 M 11		0.4	GEOMATH	79	T	19400005	Kébili (CI 10)	9.4	MAMOU, 1990	125	L	B 2		15.0	Geomath
34	A	M01100006	Rhourd Nouss	0.4	ERESS	80	T	19468005	Jemna (CI 11)	3.1	MAMOU	126	L	K5		100.0	GEFLI
35	A	M01200001	Tamendjelt	0.3	ERESS	81	T	20051005	Kébili (CI 16)	2.0	MAMOU	127	L	K6		3.5	GEFLI
36	A	SP 2	SP 2	2.0	ERESS	82	T	19304005	Zaoueiet Chorfa (CI 4)	69.0	MAMOU	128	L	K-10		2.4	GEFLI
37	A	N01100021	Fort Flatters	3.7	ERESS	83	T	20663005	Zouaia CI 22	41.2	MAMOU	129	L	SOF5		1.0	GEFLI
38	A	N01100020	O. Ameskiki	2.2	ERESS	84	T	19916005	DEBEBCHA CI 14	9.9	MAMOU	130	L	NOR1		15.0	GEFLI
39	A	N00700003	Tineldjane	0.8	ERESS	85	T	20109005	S.Lahad (CI 17)	23.0	MAMOU	131	L	J-18		100.0	GEFLI
40	A	N00700004	El Hassene	0.6	ERESS	86	T	20662005	Bou Abdallah CI 21	3.8	MAMOU	132	L	WS-2		8.6	GEOMATH
41	A	O00700055	Fog. Ez Zoug	7.0	ERESS	87	T	20018005	Douz (CI 18)	45.2	MAMOU	133	L	ZZ 1		10.0	GEOMATH
42	A	J00800070	Metlili 5	15.0	ERESS	88	T	19450005	Douz (CI 12)	13.7	MAMOU	134	L	ZZ 2		9.0	GEOMATH
43	A	J00900011	Zelfana 2	23.8	ERESS	89	L	K-1		14.0	GEFLI	135	L	ZZ 3		20.0	GEOMATH
44	A	J00900011	ZELFANA N°3	13.6	ERESS	90	L	K-2		3.5	GEFLI	136	L	ZZ 4		21.0	GEOMATH
45	A	I00800112	Melika 3	12.2	ERESS	91	L	K-7		2.7	GEFLI	137	L	ZZ 5		14.0	GEOMATH
46	A	I00900050	Guerrara 3	10.0	ERESS	92	L	K-8		2.0	GEFLI	138	L	ZZ 6		12.0	GEOMATH
	A	XXXX	MGHAIER AGID	14.	N-Castoro		A	YYYY	JEMAA AGID	9.	N-Castoro	139	L	K3		39.0	GEFLI

ANNEXE 3
Piézometrie de Référence – Nappe du CT

N°	Identification_Référence	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification_Référence	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
1	67G11	809997	461774	60	1950	UNESCO (1972)	60	3J14	1058293	184289	104	1966	UNESCO (1972)
2	El Feidh 36	847206	441238	60	1956	UNESCO (1972)	61	1J14	1093492	186509	138	1968	UNESCO (1972)
3	El Hamraia 30	820495	400623	40	1955	UNESCO (1972)	62	6J14	1098209	162948	121	1963	UNESCO (1972)
4	Ourir 29	796811	396272	32.4	1950-70	UNESCO (1972)	63	11J13	993994	145633	111	1970	UNESCO (1972)
5	Oum El Thiour 31	781372	401150	36	1942-70	UNESCO (1972)	64	EAT101	966290	135715	120	1970	UNESCO (1972)
6	Sif El Menadi 28	833531	384480	44	1953	UNESCO (1972)	65	4K13	984480	123899	131.5	1967	UNESCO (1972)
7	Sidi Khelil 26	796187	371274	32	1952	UNESCO (1972)	66	6J12	908591	119417	127	1961	UNESCO (1972)
8	Gouifla 34	1007687	410005	56	1953	UNESCO (1972)	67	Rhourd El Baguel 2	901945	102554	127	1966	UNESCO (1972)
9	Oued Chakmou 33	1009837	401691	54.5	1952	UNESCO (1972)	68	11K11	886803	97262	126	1966	UNESCO (1972)
10	Zaouiel El Arab 31	1012788	397132	49	1932	UNESCO (1972)	69	Fld 1	851271	96333	135	1966	UNESCO (1972)
11	El Louah 25	986212	390258	54	1954	UNESCO (1972)	70	4K11	837419	91374	133.5	1958	UNESCO (1972)
12	El Arfiane 24	800116	349227	42	1948-52	UNESCO (1972)	71	10K12	885027	77529	138	1964	UNESCO (1972)
13	Mazer 22	800606	340483	46.2	1949	UNESCO (1972)	72	3K12	905949	84000	128	1964	UNESCO (1972)
14	41H10	770825	318589	72	1958	UNESCO (1972)	73	Zar1	1023836	131324	127	1964	UNESCO (1972)
15	465HM	870117	338945	70	1962	UNESCO (1972)	74	3K13	1053299	123800	132	1970	UNESCO (1972)
16	413H11	873928	331061	72.4	1957	UNESCO (1972)	75	El Borma 4	1108085	140722	156	1968	UNESCO (1972)
17	35H12	891710	344530	70	1961	UNESCO (1972)	76	RE1	1054192	93745	130		UNESCO (1972)
18	15H12	944863	358276	65.6	1954	UNESCO (1972)	77	Arb1	932013	60770	136	1963	UNESCO (1972)
19	Nefta 20	974273	374752	55.5	1965	UNESCO (1972)	78	6K11	850100	42340	148	1959	UNESCO (1972)
20	Zaafrana 21	985900	377759	63.6	1950	UNESCO (1972)	79	13K11	835247	41252	146.5	1968	UNESCO (1972)
21	Ain Tawergha 22	1054610	372466	37.2	1955	UNESCO (1972)	80	12K11	818770	41121	142	1968	UNESCO (1972)
22	Negga 15	1065065	366300	55.3	1950	UNESCO (1972)	81	El Gassi A2701	768476	28113	155	1960	UNESCO (1972)
23	El Golea 16	1072570	364692	47.5	1950	UNESCO (1972)	82	H111	733124	5204	161	1960	UNESCO (1972)
24	Bechelli 9	1070968	357182	68	1935	UNESCO (1972)	83	7K11	855728	25898	146.5	1960	UNESCO (1972)
25	16H12	891947	316206	84	1956	UNESCO (1972)	84	5L11	858154	5876	154.5	1959	UNESCO (1972)
26	23H12	887453	306173	82.6	1961	UNESCO (1972)	85	Bir Atch	1098356	66619	150	1963	UNESCO (1972)
27	Moggar 18	812529	308086	60	1954	UNESCO (1972)	86	BRD1	909496	9517	154.5	1963	UNESCO (1972)
28	El Harihira 17	814679	299771	67.9	1953	UNESCO (1972)	87	GTM1	865694	-7318	157.5	1969	UNESCO (1972)
29	8110	756602	277655	103	1959	UNESCO (1972)	88	Aa N601	824941	-41261	168	1962	UNESCO (1972)

N°	Identification_ Référence	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification_ Référence	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
31	Methouria 11	1078961	346831	70	1955	UNESCO (1972)	90	Tao601	918749	-15624	152	1966	UNESCO (1972)
32	Rhelissia 5	1080310	334761	73.5	1952	UNESCO (1972)	91	MF101	873505	-53481	165	1963	UNESCO (1972)
33	El Faouar 2	1053734	327888	69	1949	UNESCO (1972)	92	3L11	860185	-44536	163	1958	UNESCO (1972)
34	6070B	1107376	332890	75	1953	UNESCO (1972)	93	4L11	841174	-50829	167	1961	UNESCO (1972)
35	Chott Tibni 1	1057604	312922	75	1970	UNESCO (1972)	94	Puits non identifié (P-1)	1665491	260140	12.5	1973	GEFLI (1978)
36	9I12	951787	276686	100	1961	UNESCO (1972)	95	P22	1666872	231182	13.7	1973	GEFLI (1978)
37	Hnb A226H2	890388	253710	113	1960	UNESCO (1972)	96	P18	1676543	231182	13.8	1973	GEFLI (1978)
38	439I11	864494	264765	105	1959	UNESCO (1972)	97	P21	1619901	235319	13.9	1973	GEFLI (1978)
39	16J9	669306	182811	151	1957	UNESCO (1972)	98	Puits non identifié (P-2)	1593653	228424	30.3	1973	GEFLI (1978)
40	17J9	683492	186479	145	1966	UNESCO (1972)	99	Puits non identifié (P-3)	1595034	218771	38.4	1973	GEFLI (1978)
41	7I10	789240	213828	112	1957	UNESCO (1972)	100	K10	1612994	192571	26	1973	GEFLI (1978)
42	15J9	699148	168502	145	1958	UNESCO (1972)	101	Puits non identifié (P-4)	1632335	181540	18.5	1973	GEFLI (1978)
43	469J10	807521	191022	112	1961	UNESCO (1972)	102	WS9	1601942	163614	28	1973	GEFLI (1978)
44	2I13	1003542	241716	101	1956-1971	UNESCO (1972)	103	MG1	1637861	151203	26.8	1973	GEFLI (1978)
45	Ouargla 6	742842	159152	130.7	1959	UNESCO (1972)	104	ZZ2	1688976	156719	33.3	1973	GEFLI (1978)
46	475J10	780999	155253	125.3	1969	UNESCO (1972)	105	Puits non identifié (P-5)	1654439	204982	14.9	1973	GEFLI (1978)
47	Bir El Hadjar	690907	109927	151	1957	UNESCO (1972)	106	C 66-47	1547715	-69642	490	1970	GEOMATH (1994)
48	465J10	795942	145351	125	1961	UNESCO (1972)	107	C 30-5	1589319	83185	165	1970	GEOMATH (1994)
49	56J11	847617	149325	127	1959	UNESCO (1972)	108	C 40-3	1684170	-29482	280	1970	GEOMATH (1994)
50	19J11	869874	152081	121	1960	UNESCO (1972)	109	C 40-4	1711938	-23924	290	1970	GEOMATH (1994)
51	HB1	932641	180703	109	1970	UNESCO (1972)	110	C 60-14	1518654	58415	222	1970	GEOMATH (1994)
52	EHT101	984893	191463	105	1969	UNESCO (1972)	111	PZ3	1757301	-95809	329	1970	GEOMATH (1994)
53	8K9	717836	96241	150	1960	UNESCO (1972)	112	J3	1761184	-104547	325	1970	GEOMATH (1994)
54	SG1	793680	106219	140	1968	UNESCO (1972)	113	C 1-40	1206517	-23933	315	1970	GEOMATH (1994)
55	BSE101	852334	124141	137	1970	UNESCO (1972)	114	WG 12	1232808	-47171	369	1970	GEOMATH (1994)
56	REL101	938784	140992	115	1962	UNESCO (1972)	115	F 1-90	1237400	19774	305	1970	GEOMATH (1994)
57	3J12	964729	168352	116	1961	UNESCO (1972)	116	WG 19	1237188	114701	341	1970	GEOMATH (1994)
58	9J13	1002263	161539	105	1960	UNESCO (1972)	117	WG 20	1279251	154064	407	1970	GEOMATH (1994)
59	3J13	1020363	160713	109	1967	UNESCO (1972)	118	1788/3/4	1393700	171414	501	1970	GEOMATH (1994)

ANNEXE 4 **Piézometrie de la Nappe du Turonien**

N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence	N°	Identification	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Cote piézométrique (m)	Année de mesure	Référence
1	K2	1724895	75119	142.1	1973	GEFLI (1978)	13	K5	1661346	160856	64.6	1973	GEFLI (1978)
2	P21	1618520	251866	14.5	1973	GEFLI (1978)	14	S1	1723514	138793	67.9	1973	GEFLI (1978)
3	P15	1647531	249108	14.4	1973	GEFLI (1978)	15	K7	1697265	102940	144.9	1973	GEFLI (1978)
4	T2A	1648913	253245	15.3	1973	GEFLI (1978)	16	K8	1683450	76740	136.7	1973	GEFLI (1978)
5	P22	1668254	229803	14.2	1973	GEFLI (1978)	17	K1	1763577	76700	139.6	1973	GEFLI (1978)
6	MG3	1690358	233940	16.8	1973	GEFLI (1978)	18	déduit de carte piézo (P-6)	1342337	156286	500		PALLAS (1980)
7	P9	1596416	209119	19.7	1973	GEFLI (1978)	19	déduit de carte piézo(P-7)	1392129	168084	500		PALLAS (1980)
8	K10	1612994	195329	19.2	1973	GEFLI (1978)	20	déduit de carte piézo(P-8)	1450061	144235	400		PALLAS (1980)
9	K6	1646150	203603	15.6	1973	GEFLI (1978)	21	déduit de carte piézo(P-9)	1300546	126062	400		PALLAS (1980)
10	WS9	1604705	164992	21	1973	GEFLI (1978)	22	déduite de carte piézo(P-10)	1488979	123020	300		PALLAS (1980)
11	MG2	1571549	142929	30	1973	GEFLI (1978)	23	Hassi Messaoud	819479	123606	187	corr.densité	FRANLAB (1978)
12	MG1	1637861	155203	57.5	1973	GEFLI (1978)							

ANNEXE 5 **Transmissivités du Complexe Terminal**

N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine	N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine
1	A	I01300002	T 01 De La Société Esso	6.00	ERESS	152	T	19113005	Chakmou 4	35.00	SASS
2	A	K01100009	Fes 1-H1	3.00	ERESS	153	T	19121005	El Faouz	24.00	SASS
3	A	K01200002	Loudje 1 Cpa Ld1	15.00	ERESS	154	T	19137005	Ouled Ghriissi	27.00	SASS
4	A	K01200004	Arb 1- El Arbi Du Cp	15.00	ERESS	155	T	19166005	Hazoua 4	20.00	SASS
5	A	K01200006	Rhourde Baguel Rb 10	1.00	ERESS	156	T	19176005	Hazoua BM 2	20.00	SASS
6	A	F01100576	Ain Cheikh D 41 F 69	15.00	ERESS	157	T	19203005	Hazoua BM 1	16.00	SASS
7	A	FR 1	Melah Ben Taieb	10.00	ERESS	158	T	19250005	Neflalet 3 bis	6.70	SASS
8	A	I01000007	Square Bresson 2	7.00	ERESS	159	T	19269005	Segdoud Ct1	9.10	SASS
9	A	I01100025	Baba Youcef D1 F111	15.00	ERESS	160	T	19284005	Nefta 5 bis	13.00	SASS
10	A	I01100447	Gueddich Gd1 Pts Eau	5.00	ERESS	161	T	19324005	Mides	0.36	SASS
11	A	J01000469	Carrière P80	20.00	ERESS	162	T	19329005	Manachi 2 bis	24.00	SASS
12	A	J01000475	Ol1	25.00	ERESS	163	T	19335005	Nefta 6 bis	29.00	SASS
13	A	J01000518	F Soviet Bouroubia	6.00	ERESS	164	T	19342005	Oued El Kebir 1 bis	13.00	SASS
14	A	J01000519	F Soviet A.Louise D4	4.00	ERESS	165	T	19357005	Dgoumes 2 bis	5.40	SASS
15	A	J01000522	Bamendil li Cofor	12.00	ERESS	166	T	19358005	Hamma 8 bis	8.00	SASS
16	A	J01000533	Garet Chemia D1 F113	4.00	ERESS	167	T	19359005	Hamma 9 bis	22.00	SASS
17	A	J01000625	Ain El Bour Di F 118	9.00	ERESS	168	T	19419005	PK 14 bis	15.00	SASS
18	A	J01000631	Sodexur Bahmid I D1	10.00	ERESS	169	T	19420005	PK 13 bis	30.00	SASS
19	A	J01000792	Outaja D1f116	10.00	ERESS	170	T	19447005	Nefta 8	30.00	SASS
20	A	K01000012	Slassel Yaich Sly1	30.00	ERESS	171	T	19448005	Nefta 9	2.00	SASS
21	A	D11F11	F.Périn. Bendabane Allia D11f11	25.00	ERESS	172	T	19477005	Helba 4bis	21.00	SASS
22	A	G01100036	Ain Naga	0.50	ERESS	173	T	19493005	Helba 1 bis	23.00	SASS
23	A	G01100043	P. Berland Ghegga	3.00	ERESS	174	T	19496005	Kriz 3 ter	9.40	SASS
24	A	G01100067	Ain Naga 4	0.20	ERESS	175	T	19502005	Gardgaya 4 bis	38.00	SASS
25	A	H01000030		20.00	ERESS	176	T	19503005	El Hamma 4 bis	85.50	SASS
26	A	H01000043	Duquenoy N°5 A M'ra	20.00	ERESS	177	T	19525005	Chemsa 1 bis	40.00	SASS
27	A	H01000044	Chaab El Meguedem Sp	1.50	ERESS	178	T	19549005	Cedada 6 bis	4.00	SASS
28	A	H01000047	Hassi Gouira	15.00	ERESS	179	T	19550005	IBN Chabbat 11 bis	30.00	SASS
29	A	H01000077	Ain Draa El Bar F 9	25.00	ERESS	180	T	19575005	Mrah lahouar 1 bis	13.00	SASS
30	A	H01100027	Tarfait Salah Meghai	24.00	ERESS	181	T	19598005	Boulifa 1 (Tozeur 11)	15.00	SASS
31	A	H01100104	Sif El Menadi	4.80	ERESS	182	T	19761005	Oued Nagueess	8.50	SASS
32	A	H01100249	Ain Bertin	5.00	ERESS	183	T	19778005	Nefta 11	5.00	SASS
33	A	H01100373	Sebela Metay 1	2.00	ERESS	184	T	19784005	Dghoumes 3 bis	10.00	SASS
34	A	H01100411	Bouhour	1.90	ERESS	185	T	19881005	El Hamma 16	10.00	SASS
35	A	H01100472	Ain Sousou	3.90	ERESS	186	T	19882005	Tozeur 7 ter	22.00	SASS
36	A	X03000007	Tolga N°Demrh 162	1.50	SCET, 1972	187	T	19883005	Tozeur 12	7.00	SASS
37	A	X03000008	Tolga N°Demrh 283	2.00	SCET, 1972	188	T	20026005	Ain Torba 3 ter	25.00	SASS
38	A	X03000009	Tolga N°Demrh 295	5.60	SCET, 1972	189	T	20040005	El Moncef 4 bis	13.00	SASS
39	A	X03000010	Tolga N°Demrh 334	7.40	SCET, 1972	190	T	20073005	Zaouit El Arab 1 ter	27.00	SASS
40	A	X03000011	Tolga N°Demrh 339	4.80	SCET, 1972	191	T	20281005	Nefta 7 bis	14.00	SASS
41	A	X03000012	Tolga N°Demrh 341	4.00	SCET, 1972	192	T	20282005	Nefta 3Ter	12.00	SASS
42	A	X03000013	Tolga N°Demrh 342	4.30	SCET, 1972	193	T	20290005	Sif Lakhder 1 bis	32.00	SASS
43	A	X03000014	Tolga N°Demrh 344	1.70	SCET, 1972	194	T	20371005	Tozeur Sonede 3	35.00	SASS
44	A	H01100178	Jardin Cmmunal	1.20	ERESS	195	T	20373005	IBN Chabbat 3 ter	10.90	SASS
45	A	H01100340	Ain Debdaba	10.00	ERESS	196	T	20377005	Sedada 3 ter	3.60	SASS
46	A	H01100413	Guemar 1	1.30	ERESS	197	T	20446005	Horchani 2 bis	1.80	SASS
47	A	H01100502	Ain Zaoualia	130.00	ERESS	198	T	20448005	Hamma 17	12.00	SASS
48	A	H01100575	Ain El Khadra D 41 F 68	5.00	ERESS	199	T	20482005	Hezoua 4 bis	20.00	SASS
49	A	H01200015	El Khobna	1.10	ERESS	200	T	20487005	Mrah Lahouar 2 bis	23.00	SASS
50	A	H01200021	Debila N1	1.40	ERESS	201	T	20488005	Tozeur Ras El Ain	19.00	SASS
51	A	H01200023	Amiche Robah 1	2.00	ERESS	202	T	20489005	Serra Hotel	1.50	SASS

N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine	N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine
53	A	H01200035	Magrane Souf	10.00	ERESS	204	T	20515005	IBN Chabbat 13 bis	6.50	SASS
54	A	H01200038	Sahane Berry N 1	25.00	ERESS	205	T	20972005	Manachi CRFA	15.00	SASS
55	A	I01100011	Puits Rannou D36f61	40.00	ERESS	206	T	5941005	BAZMA 3	10.00	ERESS
56	A	I01100012	Zaouia Si Labed	7.00	ERESS	207	T	6481005	GUELIADA 1	5.00	ERESS
57	A	I01100014	A.Lamari A Toug D36f	10.00	ERESS	208	T	6690005	Nouaiel 1	20.00	ERESS
58	A	I01100021	Ain Naeglen	17.00	ERESS	209	T	6756005	Ras El Ain 1	46.00	ERESS
59	A	I01100080	Ain Chotte Touggourt	7.00	ERESS	210	T	9654005	RABTA 2	14.00	ERESS
60	A	I01100206	Puits Devicq 2 D24f2	1.60	ERESS	211	T	5484005	El Faouar 2	5.00	ERESS
61	A	I01100207	Ain Guemmou D33f77	6.00	ERESS	212	T	5571005	El Faouar 1	4.00	ERESS
62	A	I01100223	Gonord Touggourt D36	7.30	ERESS	213	T	11334005	EL FAOUAR 3	4.00	ERESS
63	A	I01100225	Ain Aouf Temacine D3	10.00	ERESS	214	T	6689005	Guidma 1	7.00	ERESS
64	A	I01100226	Ain Midouna D28f10	10.00	ERESS	215	T	5840005	EL HSAY 1	20.00	ERESS
65	A	I01100227	Ain Chaouche 2 D32f1	8.00	ERESS	216	T	6522005	Tarfaïet El Kroub	9.00	ERESS
66	A	I01100448	Taïbet	4.50	ERESS	217	T	30025	Douz 2 bis	30.00	ERESS
67	A	X00101188	Ain Madjoudja Ahmed D33 F94	4.00	ERESS	218	T	6906005	Zarcine 2	12.00	ERESS
68	A	D39 F44	Ain Ourirh D39 F44	15.00	ERESS	219	T	5754005	Grad 1	120.00	ERESS
69	A	FR 5	Daoula	3.40	ERESS	220	T	6470005	EL METOURIA 1	8.00	ERESS
70	A	D34 F117	A.Trabelssi El Arbi D34 F117	10.00	ERESS	221	T	12320005	Chott Salhia 1	10.00	ERESS
71	A	D33 F93	Ain Chaouche El Meki D33 F93	7.00	ERESS	222	T	73025	Guettaya 2	6.00	ERESS
72	A	D33 F92	Ain Benhmida Ali D33 F92	7.00	ERESS	223	T	5570005	Negga 3	4.00	ERESS
73	A	D33 F94	Ain Madjoudja Ahmed D33 F94	6.00	ERESS	224	T	16703005	Negga 5	10.00	ERESS
74	A	D33 90	Ain Bourass D33 90	15.00	ERESS	225	T	46035	Toumbar	26.00	ERESS
75	A	D32 F140	Ain Hadri Sayah D32 F140	7.00	ERESS	226	T	5585005	Telmine 2	10.00	ERESS
76	A	H01100484	Tamerna Guedima A. Chemorah	1.30	ERESS	227	T	19246005	MANSOURA 2bis	15.00	ERESS
77	A	H01100166	Reguiba	15.00	ERESS	228	T	5956005	MESSAID 2	8.00	ERESS
78	A	H01100465	Ghamra	10.00	ERESS	229	T	5692005	RAHMAT 2	20.00	ERESS
79	T	6090005	Hezoua 1	6.00	ERESS	230	T	10226005	Rahmat 3	6.00	ERESS
80	T	6922005	El Hamma 4	10.00	ERESS	231	T	5755005	Ksar Tabeul	15.00	ERESS
81	T	8262025	Nefta 2	34.00	ERESS	232	T	2051035	Taourgha 3	8.00	ERESS
82	T	8262035	Nefta 3	10.00	ERESS	233	T	9347005	Om Somâa 1	15.00	ERESS
83	T	8564005	El Hamma 6	50.00	ERESS	234	T	9632005	BOU ABDALLAH 1	20.00	ERESS
84	T	8838005	El Hamma 8	30.00	ERESS	235	T	9653005	Bou Abdallah 2	30.00	ERESS
85	T	12668005	Jhim 1	4.00	ERESS	236	T	16702005	Bazma 5	9.30	MAMOU, 1990
86	T	13351005	Hezoua 2	8.00	ERESS	237	T	17611005	PZ.CHOTT Nefzaoua	2.20	MAMOU, 1990
87	T	13443005	Nefta 4	40.00	ERESS	238	T	18681005	Bechni	59.80	MAMOU, 1990
88	T	5660005	Ghardgaya2	1.00	ERESS	239	T	18746005	Blidette 3	12.90	MAMOU, 1990
89	T	80025	CASTILIA 2	8.00	ERESS	240	T	18755005	Dergine El Ameur	8.50	MAMOU, 1990
90	T	78005	Ouled Majed	6.00	ERESS	241	T	19003005	Ras El Ain 4	7.10	MAMOU, 1990
91	T	76005	EL HAMMA 2	10.00	ERESS	242	T	19106005	Rabta 2 bis	10.40	MAMOU, 1990
92	T	9455035	ZAOUIT LARAB 3	15.00	ERESS	243	T	19141005	Klebia 2	57.00	MAMOU, 1990
93	T	9456005	Sebaa Biar 1	4.00	ERESS	244	T	19209005	Nefzaoua MILITAIRE	112.00	MAMOU, 1990
94	T	9341005	Kriz 1	50.00	ERESS	245	T	19278005	Zarcine 4	5.40	MAMOU, 1990
95	T	6103005	OUED Shili 1	5.00	ERESS	246	T	19316005	El Golâa 2	47.60	MAMOU, 1990
96	T	800005	Kastilia 2	8.00	SASS	247	T	19317005	Kelwamen	5.50	MAMOU, 1990
97	T	5262005	Helba 2	10.00	SASS	248	T	19340005	Rahmat 5	31.90	MAMOU, 1990
98	T	5436005	Neflayett 1	1.40	SASS	249	T	19345005	Nefzaoua VILLAGE	19.02	MAMOU, 1990
99	T	5487005	Ghardgaya 1	2.10	SASS	250	T	18826005	GUETTAYA 4 bis	6.90	MAMOU, 1990
100	T	5776005	Chakmou	7.00	SASS	251	T	19375005	NEGGA SONEDE 2	3.70	MAMOU, 1990
101	T	5893005	Cedada 1	2.00	SASS	252	T	19375005	NEGGA SONEDE 2	26.10	MAMOU, 1990
102	T	6267005	Chemsâ 1	15.00	SASS	253	T	18851005	Guettaya 7 bis	26.10	MAMOU, 1990
103	T	8262005	Nefta	6.00	SASS	254	T	18747005	Guettaya 8	30.30	MAMOU, 1990
104	T	8405005	Tozeur Gare 2	15.00	SASS	255	T	16733005	Guettaya 6	45.80	MAMOU, 1990

N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine	N°	Pays	NCLAS	Nom	TxE ³ m ² /s	Origine
106	T	8982005	El Manachi 2	8.00	SASS	257	T	19408005	NOUIEL 2	23.50	MAMOU, 1990
107	T	9340005	Kriz 1	50.00	SASS	258	T	19102005	Chott yane	6.40	MAMOU, 1990
108	T	9495035	Zaouiet El Arab		SASS	259	T	19104005	Brika Jemna	6.40	MAMOU, 1990
109	T	9627005	Kriz 2	5.00	SASS	260	T	19103005	Aïn Salah 1	15.40	MAMOU, 1990
110	T	9959005	Zaafraana	10.00	SASS	261	T	19343005	El Faouar 4	71.00	MAMOU, 1990
111	T	10192005	Sedada 3	8.00	SASS	262	T	19351005	Sabria 3	13.70	MAMOU, 1990
112	T	10193005	El Hamma 9	23.00	SASS	263	T	19376005	JEMNA SONEDE	2.60	MAMOU, 1990
113	T	10452005	Kriz 3	20.00	SASS	264	T	18774005	Negga 6	2.10	MAMOU, 1990
114	T	10453005	Degache Nord 1	6.00	SASS	265	T	17608005	Sidi Hamed	186.00	MAMOU, 1990
115	T	10453025	Degache Nord 2	12.00	SASS	266	T	19149005	RAHMAT SONEDE	62.70	MAMOU, 1990
116	T	12330005	El Hamma 10	30.00	SASS	267	T	16735005	El Ghoulia	11.20	MAMOU, 1990
117	T	13119005	Nefta 5	3.20	SASS	268	T	18790005	DOUZ 6	15.20	MAMOU, 1990
118	T	13346005	herdgaya 4	9.00	SASS	269	T	19092005	Smida	331.00	MAMOU, 1990
119	T	13991005	Oued Dghoumes 2	7.35	SASS	270	L	K1	Nalut	1.00	GEFLI 1978
120	T	13992005	Neflaïet 2	3.00	SASS	271	L	K2	Nalut	2.00	GEFLI 1978
121	T	14000005	Degache Sonede	0.90	SASS	272	L	J18	Mizdah-Tigrinna	40.00	GEFLI 1978
122	T	14001005	Tozeur Sonede	4.00	SASS	273	L	Wg-6		1.76	Srivastava, 1981
123	T	14621005	Oued Kebir	2.80	SASS	274	L	Wg-8		0.19	Srivastava, 1981
124	T	14628005	Sif El Akhdar	3.00	SASS	275	L	Wg-12		1.97	Srivastava, 1981
125	T	14630005	Aïn Djedida	1.50	SASS	276	L	Wg-1		0.26	Srivastava, 1981
126	T	16558005	Ben Chaouch	3.00	SASS	277	L	Wg-5		0.00	Srivastava, 1981
127	T	16639005	Nefta 6	28.00	SASS	278	L	Wg-7		0.03	Srivastava, 1981
128	T	16695005	Chouchet Zerga	2.70	SASS	279	L	Wg-11		0.02	Srivastava, 1981
129	T	16732005	El Mekmen	8.00	SASS	280	L	MG1	Nalut	2.00	GEFLI 1978
130	T	16749005	Hamma12	1.40	SASS	281	L	K5	Nalut	50.00	GEFLI 1978
131	T	17656005	Essouni	22.00	SASS	282	L	K7	Nalut	0.60	GEFLI 1978
132	T	17679005	Oued Tozeur 8	31.00	SASS	283	L	K9	Mizdah-Tigrinna	0.05	GEFLI 1978
133	T	18650005	Oued Tozeur 5	18.00	SASS	284	L	K3	Mizdah-Tigrinna	0.10	GEFLI 1978
134	T	18651005	Hazoua 1bis	40.00	SASS	285	L	K4	Mizdah-Tigrinna	0.05	GEFLI 1978
135	T	18660005	Oued Shili 2	8.00	SASS	286	L	ZZ1	Mizdah-Tigrinna	0.10	GEFLI 1978
136	T	18728005	Nefta 1bis	0.36	SASS	287	L	Wg-14		0.02	Srivastava, 1981
137	T	18758005	Errached 1	9.00	SASS	288	L	Wg-15		0.10	Srivastava, 1981
138	T	18765005	Nefta 7	10.00	SASS	289	L	WG 17		0.01	Srivastava, 1981
139	T	18766005	Nefta 2bis	9.00	SASS	290	L	WG 19		0.02	Srivastava, 1981
140	T	18791005	Oued Touzeur 4	2.10	SASS	291	L	MG3	Nalut	40.00	GEFLI 1978
141	T	18800005	Hamma 11 bis	7.00	SASS	292	L	P22	Mizdah-Tigrinna	10.00	GEFLI 1978
142	T	18801005	Drâa Nord 2	5.20	SASS	293	L	P22	Mizdah-Tigrinna-Miocène	100.00	GEFLI 1978
143	T	18802005	El Melah	5.00	SASS	294	L	P18	Mizdah-Tigrinna	50.00	GEFLI 1978
144	T	18844005	Aïn Torba 3	9.00	SASS	295	L	MG2	Nalut	0.20	GEFLI 1978
145	T	18852005	Oued Kebir 2	18.00	SASS	296	L	K6	Nalut	5.00	GEFLI 1978
146	T	18927005	Nefta 3 bis	1.43	SASS	297	L	K10	Nalut	1.00	GEFLI 1978
147	T	18928005	Kriz 3 bis	2.00	SASS	298	L	K12	Nalut	10.00	GEFLI 1978
148	T	18996005	Zaouiet Larab 1 bis	8.00	SASS	299	L	SOF2	Nalut	3.00	GEFLI 1978
149	T	18999005	Tozeur Gare 2 bis	15.00	SASS	300	L	SOF5	Nalut		GEFLI 1978
150	T	19029005	IBN Chabbat 13	7.00	SASS	301	L	P9	Nalut	25.00	GEFLI 1978
151	T	19031005	IBN Chabbat 10	5.00	SASS	302	L	P21	Nalut	6.00	GEFLI 1978
						303	L	WS9	Nalut	3.00	GEFLI 1978

ANNEXE 6								
Points dont l'identificateur PM5 est différent de la BD								
ID Base SASS	ID PM5	Couche	ID Base SASS	ID PM5	Couche	ID Base SASS	ID PM5	Couche
Oued Chakmou	33	1	El Feidh 36	36	1	Rhelissia 5	5	1
Moggar 18	18	1	67G11	38	1	Rhourd El Bag	2	1
Bechelli 9	9	1	El Louah 25	25	1	Valeur d, duit	Pal 10	2
El Golea 16	16	1	Puits non ide	PP14	1	Valeur d, duit	Pal 4	2
Ain Tawergha	22	1	Zaafrana 21	21	1	Valeur d, duit	Pal 12	2
Nefta 20	20	1	Puits non ide	PP17	1	Valeur d, duit	Pal 5	2
Mazer 22	22	1	Methouria 11	11	1	Hassi Messaou	Hassi Me	2
El Arfiane 24	24	1	Puits non ide	PP8	1	Valeur d, duit	Pal 18	2
El Harihira 1	17	1	Puits non ide	PP7	1	Hassi Messaou	Hi Messa	4
Zaouiel El Ar	31	1	Puits non ide	PP15	1	22/87	22-/87	4
Negga 15	15	1	El Gassi A270	1	1	29/83	29-/83	4
Gouifla 34	34	1	El Borma 4	4	1	10/81	10-/81	4
Sidi Khelil 2	26	1	Bir El Hadjar	Bie El H	1	Hassi Inkhal	Hinkhal	4
Sif El Menadi	28	1	Ouargla 6	6	1	Gouret Louazo	Gouret L	4
Oum El Thiour	31	1	Hnb A226H2	HNBH2	1	Hassi Rhaba	Rhaba	4
Ounir 29	29	1	Chott Tibni 1	1	1	Hassi en Nous	Hi Nouss	4
El Hamraia 30	30	1	El Faouar 2	69	1	Hassi Merague	Hi Merag	4
						In Salah 1	In Salah	4

ANNEXE 7

Calage en Régime Permanent

Tableau 1 : Nappe du Complexe Terminal									
	Name	Obs.head	Calc.head	Deviation		Name	Obs.head	Calc.head	Deviation
1	38	60	98.2	38.2	60	3J14	104	115.8	11.8
2	36	60	60.2	0.2	61	1J14	138	127.1	-10.9
3	30	40	37.4	-2.6	62	6J14	121	129.1	8.1
4	29	32.4	27.4	-5	63	11J13	111	113.1	2.1
5	31	36	41.9	5.9	64	EAT101	120	113.8	-6.2
6	28	44	42.5	-1.5	65	4K13	131	116.9	-14.1
7	26	32	31.5	-0.5	66	6J12	127	118.1	-8.9
8	34	56	48.3	-7.7	67	2	127	122.3	-4.7
9	33	54.5	46.6	-7.9	68	11K11	126	124.7	-1.3
10	31	49	45.5	-3.5	69	FL11	135	129.4	-5.6
11	25	54	49	-5	70	4K11	133	132.8	-0.2
12	24	42	49.5	7.5	71	10K12	138	128.8	-9.2
13	22	46.2	54	7.8	72	3K12	128	125.6	-2.4
14	41H10	72	81.9	9.9	73	ZAr1	127	117.9	-9.1
15	40H11	70	72.4	2.4	74	3K13	132	120.2	-11.8
16	413H11	72.4	75.6	3.2	75	4	156	127.2	-28.8
17	35H12	70	73.7	3.7	76	RE1	130	122.5	-7.5
18	15B12	65.6	68.5	2.9	77	Arb1	136	130.2	-5.8
19	20	55.5	55	-0.5	78	16K11	148	143.9	-4.1
20	21	63.6	49.9	-13.7	79	13K11	146	146.1	0.1
21	22	37.2	53.9	16.7	80	12K11	142	149.1	7.1
22	15	55.3	56.1	0.8	81	1	155	163	8
23	16	47.5	57.4	9.9	82	HLL1	161	174.8	13.8
24	9	68	58.3	-9.7	83	7K11	146	148.9	2.9
25	16H12	84	83.2	-0.8	84	5L11	154	155.4	1.4
26	23H12	82.6	86.8	4.2	85	Bir Atch	150	132.9	-17.1
27	18	60	68.6	8.6	86	BRD1	154	151.4	-2.6
28	17	67.9	72	4.1	87	GTM1	157	158.7	1.7
29	8I10	103	101.1	-1.9	88	Aa N601	168	168.8	0.8
30	P3	63	60.5	-2.5	89	Tou1	162	156.8	-5.2
31	11	70	62.3	-7.7	90	TaO601	152	158.7	6.7
32	5	73.5	65.4	-8.1	91	MF101	165	168.5	3.5
33	2	69	63.6	-5.4	92	3L11	163	167.1	4.1
34	6070B	75	72.9	-2.1	93	4L11	167	169.2	2.2
35	1	75	70.3	-4.7	94	PP15	12.5	32.3	19.8
36	9I12	100	91.3	-8.7	95	P22	13.7	36.5	22.8
37	HNBH2	113	97.1	-15.9	96	P18	13.8	28.6	14.8
38	439I11	105	95.3	-9.7	97	PP5	13.9	36	22.1
39	16J9	151	176.9	25.9	98	PP7	30.3	43	12.7
40	17J9	145	165.9	20.9	99	PP8	38.4	45.8	7.4
41	7I10	112	104.6	-7.4	100	K10	26	42.9	16.9
42	15J9	145	157.9	12.9	101	PP14	18.5	43.6	25.1
43	469J10	112	105.7	-6.3	102	WS9	28	49.1	21.1
44	2I13	101	100.1	-0.9	103	MG1	26.8	54.2	27.4
45	6	130.7	132.6	1.9	104	ZZ2	33.3	57	23.7
46	475J10	125.3	124.7	-0.6	105	PP17	14.9	42.2	27.3
47	Bir El H	151	174.6	23.6	106	C 66-17	506	525.9	19.9
48	465J10	125	127.4	2.4	107	C 30-5	165	145.7	-19.3
49	56J11	127	116.1	-10.9	108	C 40-3	280	258.8	-21.2
50	19J11	121	112.7	-8.3	109	C 40-4	290	252.1	-37.9
51	HB1	109	105.1	-3.9	110	C 60-14	222	221.6	-0.4

	Name	Obs.head	Calc.head	Deviation		Name	Obs.head	Calc.head	Deviation
53	8K9	150	163.7	13.7	112	J3	325	253.3	-71.7
54	SG1	140	139.2	-0.8	113	C 1-40	315	337.5	22.5
55	BSE101	137	123	-14	114	WG 12	369	373.1	4.1
56	REL101	115	112.4	-2.6	115	F 1-90	305	350.9	45.9
57	3J12	116	107.4	-8.6	116	WG 19	341	337.9	-3.1
58	9J13	105	110.9	5.9	117	WG 20	407	390	-17
59	3J13	109	112.8	3.8	118	1788/3/4	501	496	-5

Tableau 2 : Nappe du Continental Intercalaire									
	Name	Obs.head	Calc.head	Deviation		Name	Obs.head	Calc.head	Deviation
1	111I8	459	516.9	57.9	69	SBa	312	317	5
2	109G9	381	429	48	70	TH5B	300	304.7	4.7
3	42H10	362	406.7	44.7	71	66L7	390	394.7	4.7
4	124I8	449	492.4	43.4	72	13P6	277	281.1	4.1
5	T6	280	321.5	41.5	73	6511	317	320.9	3.9
6	WH1	89	120.9	31.9	74	20I7	460	463.5	3.5
7	ZZ2	91.7	121.7	30	75	C1-19	408	410.9	2.9
8	Berriane	445	473.5	28.5	76	Hi Merag	259	261.7	2.7
9	K8	161.5	189.8	28.3	77	CF2	171.7	174.1	2.4
10	228I1	362	390	28	78	4M6	364	366.3	2.3
11	K7	137.6	165.5	27.9	79	MRa	315	317.1	2.1
12	22-juin	269	294.3	25.3	80	1N13	354	355.5	1.5
13	Guerrara	426	450.9	24.9	81	2M14	345	346	1
14	T/41/81	313	337.3	24.3	82	16K8	407	407.8	0.8
15	719	425	449.2	24.2	83	19I7	477	477.7	0.7
16	408H11	362	385.6	23.6	84	EZA1	317	317.6	0.6
17	Zelfana	426	447.3	21.3	85	ZTA1	316	315.8	-0.2
18	K5	102	122.9	20.9	86	5M14	353	352.5	-0.5
19	3M11	329	348.6	19.6	87	M1-Me1	367	365.6	-1.4
20	Hi Messa	375	393.8	18.8	88	PN°8	377	375.1	-1.9
21	511J10	399	417.7	18.7	89	5654	312	309.4	-2.6
22	EG1	242	260.3	18.3	90	1M12	358	355.2	-2.8
23	8-9I7	481	499.3	18.3	91	2M13	353	349.9	-3.1
24	437I11	357	374.9	17.9	92	Gouret L	388	384.9	-3.1
25	10-/81	282	299.9	17.9	93	K10	127.6	124.1	-3.5
26	/11/81	315	332.4	17.4	94	2J14	303	299.3	-3.7
27	1K12	333	350.3	17.3	95	mai-82	190	186.3	-3.7
28	37H12	268	285.2	17.2	96	SP4-1	307	303.2	-3.8
29	In Salah	281	297.9	16.9	97	4K9	425	420	-5
30	158/70	253	269.9	16.9	98	BZA1	307	301.4	-5.6
31	C70-5	304	320.7	16.7	99	21N11	369	363.3	-5.7
32	447J10	405	421.6	16.6	100	Adrar	265	259.3	-5.7
33	SOF5	142	158.3	16.3	101	WS4	259	253.3	-5.7
34	Ghardaia	445	461.2	16.2	102	31K8	435	429	-6
35	-23	314	329.8	15.8	103	Ghadames	349	342.8	-6.2
36	480J10	403	418.7	15.7	104	22/87	208	201.6	-6.4
37	436I11	362	377.5	15.5	105	SNa	315	308.4	-6.6
38	Hi Nouss	257	272.3	15.3	106	EBA7	319	312.2	-6.8
39	20N11	342	356.5	14.5	107	213/76	249	241.2	-7.8
40	T/22/76	312	326.5	14.5	108	OS1	381	372.2	-8.8
41	Rhaba	295	308.9	13.9	109	29/83	254	244.7	-9.3

	Name	Obs.head	Calc.head	Deviation		Name	Obs.head	Calc.head	Deviation
43	WG-13	319	331.8	12.8	111	B2	177	167.2	-9.8
44	WS2	168	180.7	12.7	112	1N5	410	399.3	-10.7
45	1J8	422	434	12	113	Hinkhal	385	374.3	-10.7
46	WG-9	323	334.9	11.9	114	EBA4	318	306.8	-11.2
47	20J8	432	443.4	11.4	115	11L11	350	337.4	-12.6
48	ZZ1	128.9	140	11.1	116	Oum Chei	373	360.3	-12.7
49	T/96/76	331	341.1	10.1	117	SR1	270	257.2	-12.8
50	P21	65.5	75.6	10.1	118	2N13	378	365	-13
51	C70-8	308	317.8	9.8	119	K12	175	161.8	-13.2
52	Metlili	443	452.7	9.7	120	OKA1	301	287.2	-13.8
53	6368	306	315.3	9.3	121	4N7	346	330.2	-15.8
54	131/77	291	300.3	9.3	122	FL60	281	264.9	-16.1
55	67J8	441	450.1	9.1	123	1N12	374	357.7	-16.3
56	OF101	279	288	9	124	Hazoua 1	300	282.3	-17.7
57	3N14	383	391.7	8.7	125	5717	310	292.2	-17.8
58	PN°2	327	335.4	8.4	126	WS6	281	262.3	-18.7
59	WG-16	321	329.3	8.3	127	46/77	320	300	-20
60	K6	87.8	95.4	7.6	128	208/76	279	258.5	-20.5
61	130/77	297	304.2	7.2	129	K9	318	297.2	-20.8
62	1I14	335	341.6	6.6	130	6N9	378	356.9	-21.1
63	PN°4	343	349.6	6.6	131	ECHA1	342	320.7	-21.3
64	15K8	414	420.5	6.5	132	B3	174.5	153.1	-21.4
65	6M11	340	346.3	6.3	133	R5	255	232.9	-22.1
66	El Golea	401	406.9	5.9	134	TK105	266	243.2	-22.8
67	7000	322	327.8	5.8	135	SK4	495	458.5	-36.5
68	11P5	266	271.6	5.6	136	17J6	490	450	-40

Tableau 3 : Nappe du Turonien							
Name	Obs.head	Calc.head	Deviation	Name	Obs.head	Calc.head	Deviation
MG2	30	74.4	44.4	S1	67.9	77.4	9.5
WS9	21	65	44	MG1	57.5	64.6	7.1
K10	19.2	56.2	37	Hassi Me	187	189.8	2.8
P9	19.7	54.5	34.8	K8	136.7	136.9	0.2
K6	15.6	49.4	33.8	Pal18	300	299.5	-0.5
K1	139.6	162.4	22.8	K5	64.6	61.1	-3.5
P15	14.4	36.6	22.2	Pal12	400	395.8	-4.2
P22	14.2	35.6	21.4	Pal5	500	490.8	-9.2
P21	14.5	35.7	21.2	K7	144.9	114.2	-30.7
MG3	16.8	33.1	16.3	Pal4	500	463	-37
T2AV	17.9	33.8	15.9	Pal10	400	356.3	-43.7
K2	142.1	156.3	14.2				

ANNEXE 8																												
Calage en Régime Transitoire																												
CT-Libye														CI-Libye														
Grès Supérieurs																												
													</															

	CI - Algérie																CI - Tunisie																	
	NOCLAS																	NOCLAS																
	nom	BOU AROUA BAR 1	GT 101 GASSI TOUIL	HASSI MESSAoud	KEF N 27	NEZLA F16	OUED MEHAIGUENE	Oued Namous	OULED DJELLAL	SIDI KHALED	SIDI SLIMANE	SINCLAIR MPC RB2	TAMERNA	AOULEF 17	TIMIMOUN 2	nom	CF 1 bis	CF F2	CF F3	CF1	CF2	KSAR GHILANE 1	Ksar Ghilane 3 bis	MAHBES 1	Behaier (CI 9)	El Borma A4	El BORMA 6	El Faouiar (CI 19)	Kébili (CI 10)	Menchia CI 6	Mansoura (CI 13)			
																Altitude	33.55	30	27	33.55	30.95	220	199.6	236.2	53.31	257.3	242	58	55.57	40	37			
1956		267.9		375.0			481.0	495.0		381.0			348.8			1956				157.4	171.8	317.8												
1957																1957																		
1958																1958																		
1959																1959																		
1960																1960	154.8			154.8	163.1													
1961																1961																		
1962			350.0		403.3						394.1					1962																		
1963																1963																		
1964																1964											318.2							
1965																1965					161.1													
1966																1966																		
1967																1967																		
1968																1968																		
1969			349.0					487.4				333.0				1969																		
1970		267.9		357.0						351.0	339.7		333.3		279.5	1970	146.6			146.6		309.1												
1971																1971											324.2							
1972																1972																		
1973																1973																		
1974									353.0							1974																		
1975											333.6					1975																		
1976																1976																		
1977																1977																		
1978																1978																		
1979																1979																		
1980																1980																		
1981													293.6			1981																		
1982									360.0	335.0	251.2		233.6			1982						270.4												
1983									330.0							1983	133.7					267.6												
1984																1984	126.4	134.9	117.8	128.0		267.5												
1985																1985						266.1	293.7											
1986																1986				125.4			293.7	190.6						231.6				
1987																1987	119.2						291.2	190.3	289.2					223.1	242			
1988						342.0										1988									190.3					222.6	250			
1989						341.2										1989	112.4							292.4										
1990							477.7					263.0		250	277	1990						266.8	293.2						222.6	235				
1991																1991						265.1	293.2											
1992																1992	105.9							291.2							235	234.3		
1993																1993	104.9	113.5	100.7									269.7				234.3		
1994																1994	98.9		99.6									269.7						
1995																1995																		
1996														247	277	1996														220.6				
1997						336.2										1997													250					
1998		247.8			394.1	336.2					259.5	312.6	256.6			1998												269.7						
1999																1999								284.2	158.3				238				212	
2000																2000							260.9	287.2	158.3	272.8	249							

CT - TUNISIE 1

GRUPE	Rejim Maatoug			RejimMatoug_Synthese	Tozeur			Tozeur _ Synthèse	Metlaoui 2	Metlaoui _ Synthèse	El Faouar Sabria			FaouarSabria_Synthese	Douz El Hsay				Douz El Hsay _ Synthèse	NOUIL			NOUIL _ Synthèse	Douz Tarfaïet			Douz Tarfaïet _ Synth	Kebili Sud			Kebili Sud _ Synthèse
NOM	REJIM MAATOU	REJIM MAATOU	ENNASAR C3 N		DJEDIDA	Nerlayett 1	Menachi 3				EL FAOUAR 3	EL FAOUAR 3	SABRIA		EL HSAY 1	EL HSAY 2	EL HSAY 3	SMIDA		NOUIL	GHIDMA	DARJINE EL AN		TARFAIET ELK	DOUZ 2	BECHNI		GUELIADA 2	RAHMAT 2	RAHMAT 4	
NOCLAS	18678005	18745005	19877005		12667005	05436005	14388005		19053005		11334005	17675005	17609005		06840005	06800005	06801005	19092005		06690005	06689005	18755005		06522005	05263005	18681005		13531005	05692005	16700005	
Altitu	42.5	42.5	47.2		27.2		50		31.4		48.6	46.2	50.3		62.9	63.8	63.3	38.8		43.4	42.1	28.5		55	68.1	36.7		29	46.7	36.9	
1950						51.9		51.9																	80.6						
1951								51.8																					62.4		62.3
1952								51.8							73.2				73.2												62.3
1953								51.7											73.1												62.2
1954								51.7											73												62.2
1955								51.7											72.9					76.8		76.8					62.1
1956								51.6											72.8					76.5		76.5					62
1957								51.6											72.6	72.6	70.7		72.6	76.2		76.2					62
1958								51.6											72.5				72	75.9		75.9					61.9
1959								51.5											72.4				71.4	75.7		75.7					61.8
1960								51.5											72.3				70.8	75.4		75.4					61.8
1961								51.4											72.2				70.7	75.1		75.1					61.7
1962								51.4											72.1				70.7	74.8		74.8					61.6
1963								51.4											72				70.7	74.5		74.5					61.6
1964								51.3											71.9				70.7	74.2		74.2					61.5
1965						51.3		51.3											71.8				70.7	74		74					61.4
1966																			71.6				70.7	73.7		73.7					61.4
1967																			71.5				70.7	73.4		73.4					61.3
1968																			71.4				70.5	73.1		73.1					61.2
1969											70.5		70.5						71.3				70.2	72.8		72.8					61.2
1970					46.2			46.2								71.1	71.2		71.1		70		70.2	72.5		72.5		61.1			61.1
1971					45.4			45.4						69.5									69.6	72.3		72.3		65.4			60.2
1972								44.5						69.6					71.2				69.2	72		72					59.3
1973								43.7						69.6					70.7				68.9	71.7		71.7					58.4
1974					42.8		44.6	44.6						69.7					70.3				68.5	75.5		71.5	60.3	57.5			57.5
1975							44.1	44.1						69.7		69.1	69.4		69.1	62.1	68.1			74.2		70.1	59.1	57.2	53.8		57.2
1976							43.5	43.5					69.8	69.8		69.6	68.4		68.4	67.3	68.8		68.8	69.8		69.8	59.4	56.2	52.1		56.2
1977	80	80		80	44		42.1	42.1				71.1	68.8	69.8		68.8			68.3		67.6		67.6	69.9		69.9	58.6	54.7	53.2		54.7
1978	79.7	79.7		79.7	40.3		41.1	41.1				69.7	68.7	69.7		69.2			68.1	67.3	65.2	68.5	65.2	68.3	70.6	69.7	68.3	58.7	53.2	51.4	53.2
1979	79.4	79.4		79.4			41.5	41.5				69	68	69		68.6	68		68	66.6	65.6	68.7	65.6	67.2	70.7	67.4	67.2	59	52.5	51.4	51.4
1980		79		79	39.8		41.1	41.1				69.2	67.8	69.2		68.1	67.1		67.1	66.6	64.4	67.7	64.4	67.7	69.3	66.7	67.7	56.8		48.6	51.4

CT - TUNISIE 2																															
ANNEE	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	
1981	78.62	78.6		78.62	41.1		40.6	40.6			67.7		67.7		67.9	67.6		67.6		65.2	66.9	65.2	67.8	69.3	66.7	67.8	54.8		48.5	48.6	
1982		78.5		79.52			40.7	40.7	58.1	66.07	67.73		67.43		66.43	64.98		64.98		66.31	64.38	66		65.98	67				46.23	48.5	
1983		77.49		78.02					57.1	63.77	66.13		66.43		66.37	63.98	62.88	63.98		63.38	63.91	63.38	63.5		63.98	66	55.6		44.23	46.23	
1984		77.39		77.7			39.2	39.2	55.25	64.57	66.13	64.46	66.43				62.38	63.38		63.28	63.51	63.28	63.9		63.18	62.65	53.8		43.93	44.23	
1985		76.39		77.42					53.4	63.68	65.03		65.23		63.55	62.4	61.68	62.4		63.78	63.71		63		63.28	63	51.7			43.93	
1986		75.19		75.52						62.57	65.23		65.23		63.17	62.13	61.63	62.13		63.08	61.71		62.45		63.38	62.45					
1987		75.14		76.17					53.9		63.43		64.5				59.88	59.88		60.58	61.01	60.58	61.5		61.18	61.5	52.7		42.93	42.93	
1988							34.5	34.5	52.1	62.07	62.73		63.43				60.48	59.48		60.58	61.01		59		61.18	59	51				
1989							34	34	51.4	62.07	62.53		62.93				58.28	57.98		60.08	60.51	60.08			59.98		50.05				
1990							33.4	33.4	42.9		52.87	60.23		60.73			56.18	55.48		57.58	58.91	57.58			58.18	58.18					
1991											60.33		60.33				55.28	55.28		57.48	60.01	57.48		57.69	57.98	57.98					
1992							30	30			59.33		59.33				50.78	51.28		54.48	56.71	54.48		56.09	56.18	56.18	43.5	33.65		36.09	
1993			70.72	70.72			29.6	29.6	40.4		58.73		58.73				50.78	50.78		52.98	53.51	52.98		54.71	52.68	52.68	41.5			33.65	
1994			68.52	68.52					39.8		57.28		57.28				50.28	49.58		52.98	53.81	52.98			53.18	52.18	40.9	32.05		33.65	
1995				69.42									56.43				49.28	48.18		53.08	55.91	51.98			54.68	51.78		33.8		33.8	
1996			74.22	67.92			27	27					55.13				50.18	46.98		51.48	52.81	50.48			52.98	54.88	36.5				
1997			67.92	67.92			27	27	39.4		53.53		55.13					46.98		50.28		50.48			50.18	52.26	38.7	31.35		31.35	
1998							27	27																				37.8	31.85		31.85
1999							25	25																					26.9		26.9
2000			64.42																	48.51					48.68			32.5	25.33		

CT - ALGERIE

GROUPE		MGHAIE		Hassi Khalifa		EL OUED		Djamaa Nord		Toggourt		OUARGLA		Ouargla Est		Gassi Touil	
NOCL	10"	4010001	4010002	4010003	4010004	4010005	4010006	4010007	4010008	4010009	4010010	4010011	4010012	4010013	4010014	4010015	4010016
1950				69.32					65.63								
1951																	
1952			31.94														
1953	40.03								53.63								
1954									65.63								
1955											70.7						
1956																	
1957					72.38									124.9	133		
1958																	
1959																	
1960																	
1961				68.32						53.4							167.6
1962	28.79																
1963									45.2							148	
1964																	
1965																	
1966												129.3	130				
1967																	
1968																	
1969																	
1970		19.14	67.3	66.75	68.02		60.03							124.5	132.5		
1971		15.74										128.3	129				
1972																	
1973																	
1974																	
1975																	
1976																	
1977				61.7	63												
1978					59.3												
1979																	
1980																	
1981							69.8										
1982					59.3						64.67						
1983																	
1984																	
1985																	
1986																	
1987																	
1988																	
1989																	
1990																147	166.6
1991	22.84				56			44.83	35.56	44.9							
1992																	
1993																	
1994																	
1995		-0.2				51.95											
1996																	
1997										50.13	56.2	123.4	121.2		128.7		
1998	-11	-8	41.12	33.43		49.55	30.9										
1999																	

ANNEXE 9 : Piézomètres de Référence pour le calage transitoire

Tableau 1 : Nappe du CT

N° PM5	Identification_PM5	Nom_BD_SASS	NOCLAS_BD_SASS	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Référence
1	M'Ghaier	AIN DEGUEL (D1 F7) OUM THIOUR	H01000051	811215	382101	
		EL HAMRIA	H01100104	789533	397578	BD_SASS
		SIF EL MENADI	H01100104	822964	394204	BD_SASS
		RECON S.E.S FR 13	H01100522	838915	378110	BD_SASS
		SIDI AHMED TIDJANI	H01100356	813937	363489	BD_SASS
2	H.Khlifa			802598	367503	BD_SASS
				902472	335485	
3	Djamaa-N	MAGRANE SOUF	H01200035	891925	338537	BD_SASS
		SAHANE BERRY N 1	H01200038	905412	336288	BD_SASS
4	Toggourt			807227	331301	
		AIN TOUMI TIGGEDDINE	H01100363	807271	332030	BD_SASS
		AIN DJENANE	H01100364	806156	331378	BD_SASS
		AIN CHERAGA	H01100479	805827	336082	BD_SASS
5	Ouargla-	TAKHFOUNT MABROUKA	H01100482	807535	329388	BD_SASS
				809595	279299	
		MERDJAJA D36F64	I01100432	813645	278314	BD_SASS
		BERRAHMOUNE NEZLA	I01100512	815430	281668	BD_SASS
		DAIRA DE TOUGGOURT F	I01100549	813537	280867	BD_SASS
6	Ouargl-E	AIN NAGA	I01100540	805131	263501	BD_SASS
				748455	150789	
		GARET CHEMIA D1 F113	J01000533	744457	151697	BD_SASS
		F SOVIET BOUROUBIA	J01000518	749287	156007	BD_SASS
		BANOUNOU D2 F54	J01000521	748714	156855	BD_SASS
7	G. Touil	A CHERIF D4 F80	J01000536	752147	143788	BD_SASS
		AIN BEN SACI D4F86	J01000761	750643	153300	BD_SASS
				799971	147875	
		DAIA RHEMTA	J00900015	797501	160702	BD_SASS
		HASSI RHENANI N°2	J01000465	801703	141788	BD_SASS
8	Regim M.	A.EL CADI DJEDIDA D4	J01000526	762467	154192	BD_SASS
		NOUVELLE WILAYA D1 F	J01000531	780561	154413	BD_SASS
				838262	4982	
		FORT LALLEMAND	K01100004	846285	62808	BD_SASS
		HASSI LAROQUE P-C	K01100006	860488	36799	BD_SASS
9	Tozeurct	ERG EL AGREB AR 101	L01100006	824777	-1115	BD_SASS
		AZEL NORD ALN 1	L01100008	850083	-55654	BD_SASS
		EL HASSANI HSN 101	L01100019	825785	-39660	BD_SASS
				1006562	315216	
		REJIM MAATOUG 1	18678005	995295	314515	BD_SASS
10	Metlaoui	REJIM MAATOUG 2	18745005	995378	314519	BD_SASS
		Rejim Maatoug 7	19777005	993109	314604	BD_SASS
		ENNASAR C3 N1	19877005	989762	314434	BD_SASS
		GUETIRA 1	19383005	980317	315461	BD_SASS
				1002954	384057	
11	ElFaouar	DJEDIDA	12667005	1077850	364063	BD_SASS
		HELBA 3	05262025	1003599	383538	BD_SASS
		Neflayett 1	05436005	1000262	387811	BD_SASS
		Ouled Majed	14387005	1011705	390910	BD_SASS
		Menachi 3	14388005	1008600	387748	BD_SASS
12	Douz -	Metlaoui 2	19053005	1051353	430050	BD_SASS
				1059773	323934	
		EL FAOUAR 3	11334005	1054677	323825	BD_SASS
		EL FAOUAR 4	19343005	1054706	323327	BD_SASS
		EL FAOUAR OUEST	17675005	1052656	316614	BD_SASS
13	Nouil -	DRAA SAKKOUM	16730005	1085372	319733	BD_SASS
		SABRIA	17609005	1062716	322589	BD_SASS
				1088629	328143	
		EL HSAY 1	05840005	1086194	329728	BD_SASS
		EL HSAY 2	06800005	1086193	329748	BD_SASS
14	Douz-Nor	EL HSAY 3	06801005	1086151	329746	BD_SASS
		EL HSAY 4	06815005	1086361	329738	BD_SASS
		EL HSAY 5	06821005	1086360	329758	BD_SASS
		DOUZE SONEDE	06999005	1088239	335400	BD_SASS
		SMIDA	19092005	1082316	337041	BD_SASS
15	Kebili-S			1076003	340167	
		ZAAFRANE 2	10199005	1078396	333958	BD_SASS
		ZAAFRANE 3	13996005	1077933	333840	BD_SASS
		ZARCINE 3	13999005	1067810	343426	BD_SASS
		ZARCINE 4	19278005	1069479	343075	BD_SASS
16	Nclis a changé	NOUIL	06690005	1077272	338739	BD_SASS
		GHIDMA	06689005	1068949	332149	BD_SASS
		DARJINE EL AMEUR	18755005	1051443	336433	BD_SASS
		BLIDETTE 3	18746005	1071250	337182	BD_SASS
17	Kebili-S			1085322	348885	
		TARFAIET ELKROUB S	13551005	1082955	334091	BD_SASS
		TARFAIET ELKROUB1	06522005	1080942	334810	BD_SASS
		DOUZ 2	05263005	1088362	334058	BD_SASS
		DOUZ OUEST	17615005	1085908	335559	BD_SASS
18	Nclis a changé	BOUHAMZA	14622005	1086605	332622	BD_SASS
		EL GHOULA	16735005	1082369	340343	BD_SASS
		GRAAD	05754005	1084657	341281	BD_SASS
		BECHNI	18681005	1065617	337551	BD_SASS
				1083719	358504	
19	Kebili-S	BAZMA 3	05941005	1085112	357553	BD_SASS
		BAZMA 4	13446005	1085660	357886	BD_SASS
		BCHELLI 2	13994005	1076273	351574	BD_SASS
		BOURZINE 1	14623005	1083398	348003	BD_SASS
		BEN ZITOUN 2	18641005	1072360	348143	BD_SASS
20	Kebili-S	EL METOURIA 2	16701005	1086102	346467	BD_SASS
		GUELIADA 2	13531005	1072756	347816	BD_SASS
		JEMNA 2	14022005	1085647	348438	BD_SASS
		RAHMAT 2	05692005	1083276	355842	BD_SASS
		RAHMAT 4	16700005	1082909	356370	BD_SASS
21	Kebili-S	SCAST 4	05713005	1085680	352039	BD_SASS
		SCAST 6	14380005	1086335	352279	BD_SASS
		SIDI HAMED	17608005	1081919	347813	BD_SASS
		MESSAID 2	05956005	1080996	352736	BD_SASS

NAPPE DU CT

N° PM5	Identification_PM5	Nom_BD_SASS	NOCLAS_BD_SASS	Longitude Lambert (m)	Latitude Lambert (m)	Référence
16	PZ 4		PZ4	1769336	-85687	BD_SASS
18	PZ 5		PZ5	1766166	-90688	BD_SASS
20	P5 2135	2135 (P5)		1657215	251114	
21	P6 2128	2128 (P6)		1652276	258344	
22	Pz 1287		MW-1287	1248277	72296	BD_SASS
23	El Oued			884138	316956	
		DEBILA N1	H01200021	882726	326488	BD_SASS
		GUEMAR 1	H01100411	879418	327837	BD_SASS
		KOUININE	H01100531	882127	322674	BD_SASS
		KHOBNA	H01200011	894168	308084	BD_SASS
		EL OUED	H01200011	886195	313311	BD_SASS
63	Hun J 3		J3	1766790	-100251	BD_SASS
64	Hun Pz 3		PZ3	1763135	-96385	BD_SASS

Tableau 2 : NAPPE DU CI

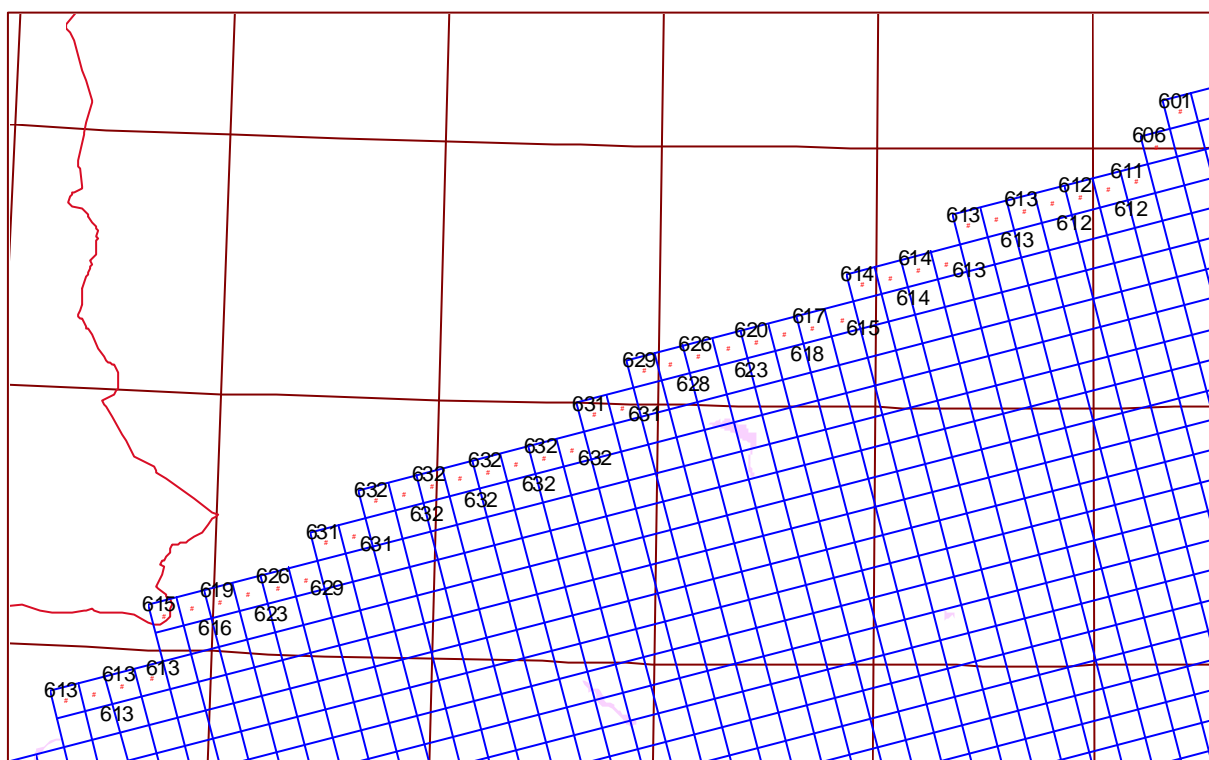
N° PM5	Identification_PM5	Nom_BD_SASS	NOCLAS_BD_SASS	Longitude Lambert	Latitude Lambert (m)	Référence
17	Zemz ZZ2	Fawar el	ZZ 2	1692306	157823	BD_SASS
19	Mardum 1		Mar 01	1595444	197632	BD_SASS
24	Kef N 27	KEF N 27	L00700061	517598	-134	BD_SASS
25	Sinclair	SINCLAIR MPC RB2	K01200001	906281	93747	BD_SASS
26	HMGToui			864400	-8633	
		GT 101 GASSI TOUL	L01100011	864400	-8634	BD_SASS
		NEZLA F16	K01100024	858863	40563	BD_SASS
27	Tamerna-	TAMERNA	H01100401	804195	318190	BD_SASS
28	S.Khaled			681062	423518	BD_SASS
		OULED DJELLAL	G01000463	716090	427818	BD_SASS
		SIDI KHALED	G00900109	715192	424396	BD_SASS
29	Bar 1 -	BOU AROUA BAR 1	H01200037	941498	360063	BD_SASS
30	O.Nam-OM			500135	250202	
		Oued MEHAIGUENE	I00700008	500135	250203	BD_SASS
		Oued Namous	K00400005	292671	78671	BD_SASS
31	Aoulef22		O00500063	357078	-396608	BD_SASS
32	Taw 3.83		3.83	1632487	183978	BD_SASS
33	WG 16		MW-1219	1241116	-22521	BD_SASS
34	WG(1219)			1310762	6807	
35	Bay BAK4		BAK-4	1739393		BD_SASS
36	K.Rhilan			1148527	288002	
		KSAR GHILANE 1	05717005	1148527	288002	BD_SASS
		Ksar Ghilane 3	19009005	1148489	287949	BD_SASS
39	CF 1 bis	CF 1 bis	19190005	1143060	388790	BD_SASS
45	Kebili10	Kebili (CI 10)	19400005	1082481	362092	BD_SASS
46	Wash WH1		WH 1	1722771	154851	BD_SASS
47	Mahbes 1	MAHBES 1	19432005	1148898	269778	BD_SASS
48	Boun B-5		B-5(1/81)	1570887	187271	BD_SASS
50	Bahaier9	Behaier (CI 9)	19484005	1107030	373053	BD_SASS
51	Mansoura	Mansoura (CI	19893005	1055721	363964	BD_SASS
54	Faouar 9	El Faouar (CI 19)	20019005	1053892	322881	BD_SASS
55	Menchia6	Menchia CI 6	19412005	1070449	370571	BD_SASS
56	Borma205			1118796	135850.6	M. CHAIEB (ENIT,1986)
58	Borma A4			1125071	128977	BD_SASS
		El Borma A4	X00700216	1125071	128977	BD_SASS
		El BORMA 6	X00700217	1125072	128977	BD_SASS
59	Saf S1Q1		SIQ1	1595763	159054	BD_SASS
60	Borma204			1118745	136647	M. CHAIEB (ENIT,1986)
61	Nina N2		T/2D/005/0/83	1707690	-32299	BD_SASS
62	CF-Synth			1142625	388790	BD_SASS
		CF 1 bis	19190005	1143060	388790	BD_SASS
		CF F2	18696005	1140968	390151	BD_SASS
		CF F3	18697005	1140652	387380	BD_SASS
		CF1	05664005	1142625	389061	BD_SASS
		CF2	05950005	1135264	386873	BD_SASS

Tableau 3 : NAPPE Des GRES SUPERIEURS

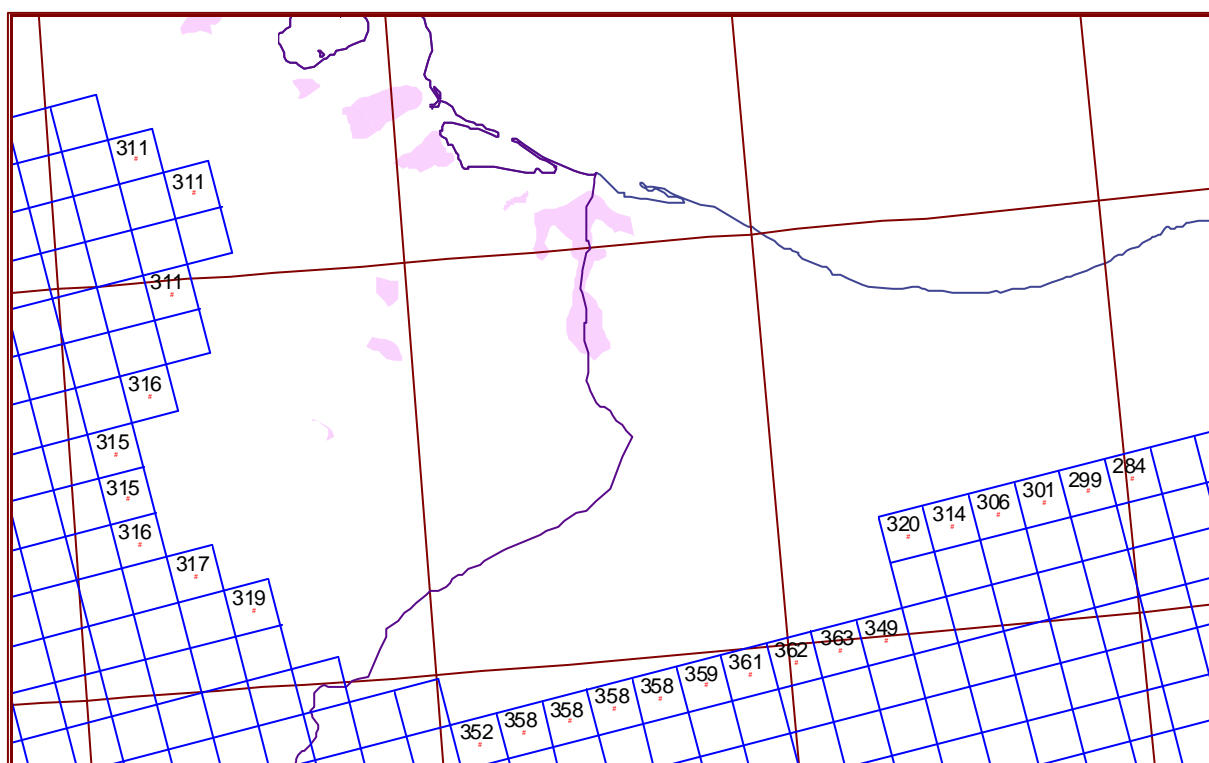
N° PM5	Identification_PM5	Nom_BD_SASS	NOCLAS_BD_SASS	Longitude Lambert	Latitude Lambert (m)	Référence
37	NeftaCI1	Nefta CI	19084005	978561	377016	BD_SASS
38	Tozeur 1	Tozeur CI 1	19162005	1000832	382294	BD_SASS
40	Tozeur 2	Tozeur CI 2	19224005	999183	381160	BD_SASS
41	NeftaCI2	NEFTA CI2	19227005	978689	376972	BD_SASS
42	Degache3	DEGACHE CI 3	19231005	1012962	393876	BD_SASS
43	HammaCI2	EL HAMMA CI 2	19233005	1006262	389923	BD_SASS
44	HammaC1b	EL HAMMA C.I.1bis	19260005	1006283	389854	BD_SASS

ANNEXE 10

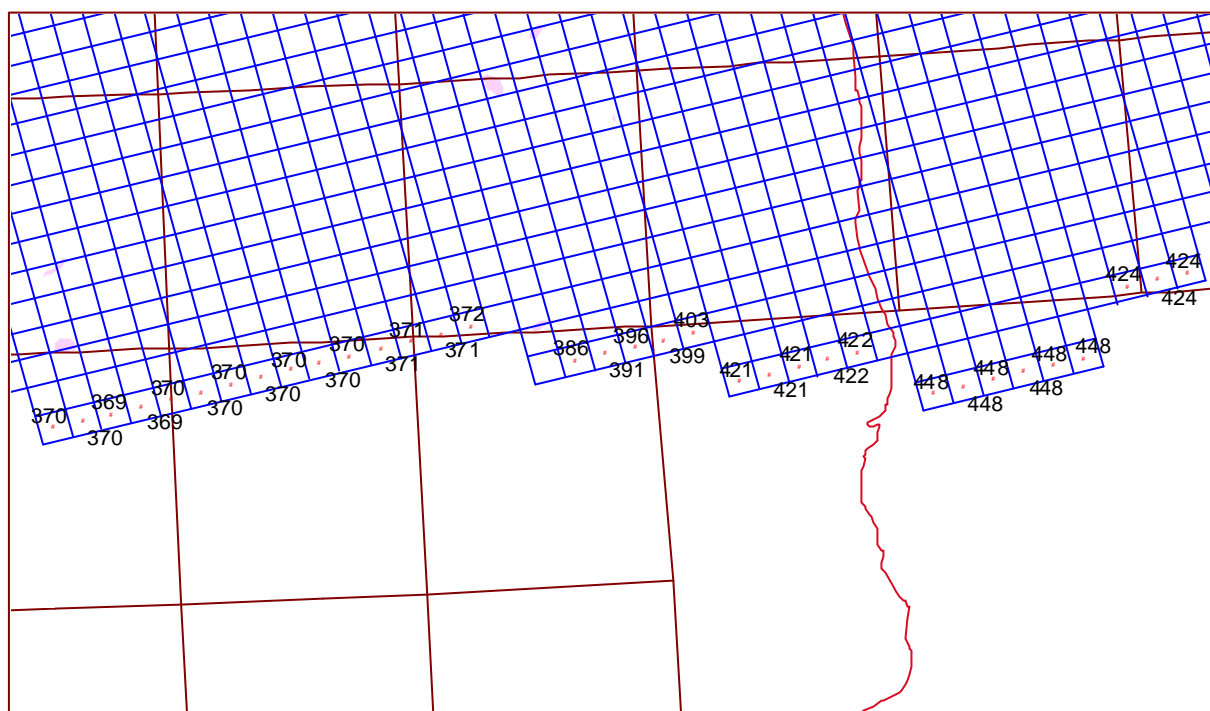
Annexe 10.1 : CI : Potentiels Imposés sur la Limite Nord Ouest : Atlas Saharien



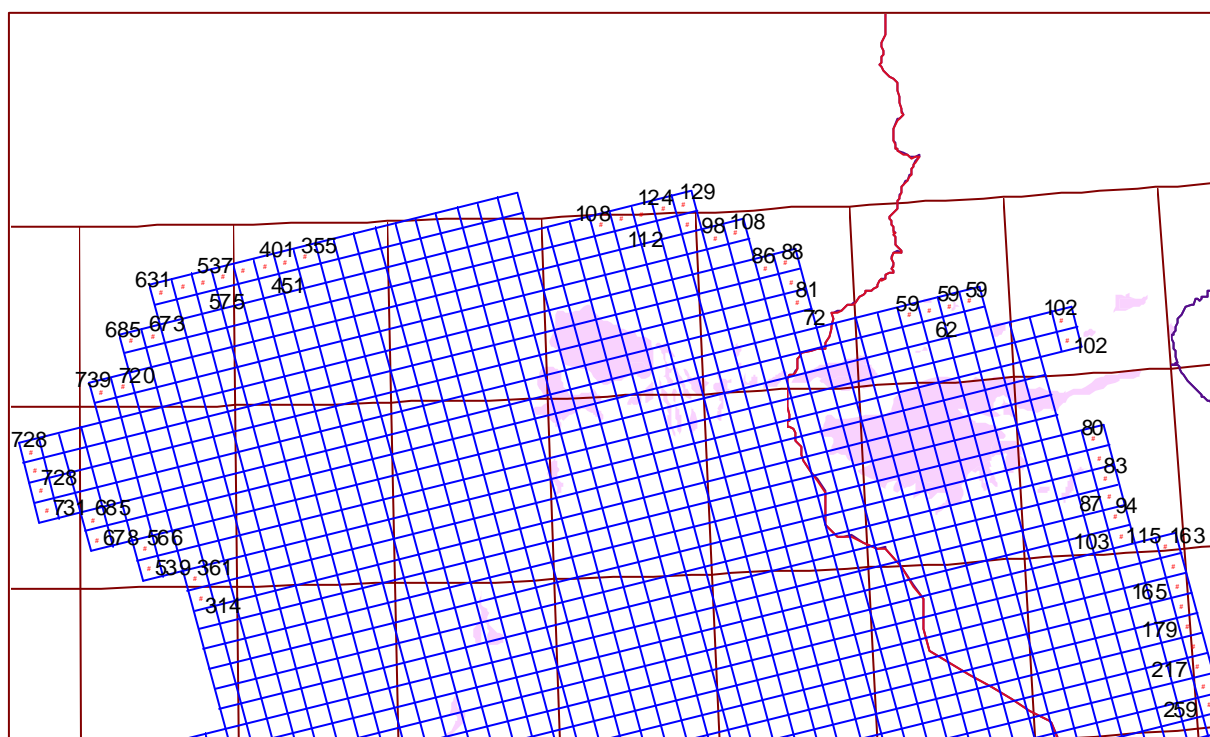
Annexe 10.2 : CI : Potentiels Imposés sur la Limite Dahar – Dj. Nefusa



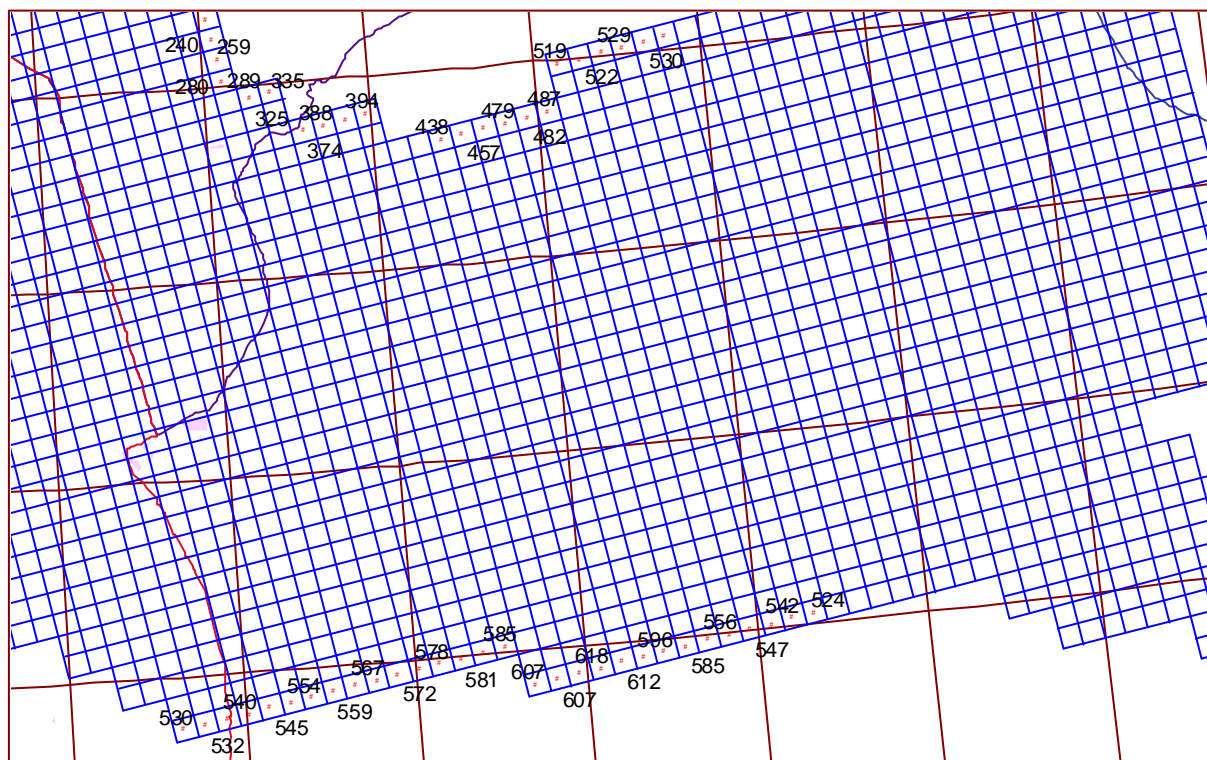
**Annexe 10.3 : CI : Potentiels Imposés sur la Limite Sud Algérie-Libye :
Plateau du Tihert**



**Annexe 10.4 : CT : Potentiels Imposés sur les limites Nord du Modèle,
Dahar et Atlas Saharien**



Annexe 10.5 : CT : Potentiels Imposés sur les limites Sud-Libye et Dj. Nefousa



Annexe 10.6 : CT : Potentiels Imposés sur les limites Sud-Ouest Algérie

