

SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL

Gestion commune d'un bassin transfrontière

1^{ere} édition

RAPPORT DE SYNTHÈSE
- JANVIER 2003 -

OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL

© 2003/Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)

ISBN : 9973-856-03-1

Observatoire du Sahara et du Sahel
Boulevard de l'Environnement – BP 31 Tunis Cedex
Tel. + 216 71 806 522 – Fax. + 216 71 807 310
E-mail : boc@oss.org.tn - URL : www.unesco.org/oss

PREFACE

Occupant une superficie de plus d'un million de km², le Système Aquifère du Sahara Septentrional, partagé par l'Algérie, la Tunisie et la Libye, est formé de dépôts continentaux renfermant deux grandes nappes souterraines : le Continental Intercalaire [CI] et le Complexe Terminal [CT]. La configuration structurale et le climat de la région font que les réserves de ces deux nappes se renouvellent très peu : ce sont des réserves géologiques dont les exutoires naturels (sources et foggaras) ont permis le développement d'oasis où les modes de vie séculaires sont restés longtemps en parfaite symbiose avec l'écosystème saharien.

Depuis plus d'un siècle, et plus particulièrement au cours des trente dernières années, l'exploitation par forages a sévèrement entamé cette réserve d'eau souterraine. De 1970 à 2000, les prélèvements, utilisés autant pour des fins agricoles (irrigation) que pour l'alimentation en eau potable et pour l'industrie, sont passés de 0,6 à 2,5 milliards de m³/an à travers des points d'eau dont le nombre atteint aujourd'hui plus de 8800 points où les sources, qui tarissent, sont remplacées par des forages de plus en plus profonds.

Cette intensification de l'exploitation engendre un certain nombre de problèmes dont principalement la baisse régulière du niveau d'eau, l'augmentation du coût du pompage, l'affaiblissement de l'artésianisme, le tarissement des exutoires naturels et un risque de plus en plus grand de détérioration de la qualité des eaux par salinisation...

Les trois pays concernés ont très tôt pris conscience de la problématique de l'utilisation de ces ressources aquifères dans une optique de durabilité et ont œuvré pour améliorer l'état des connaissances et la gestion de ces ressources. Ainsi et dès 1970, un important programme algéro-tunisien, l'ERESS, mis en œuvre par l'Unesco, a permis d'établir, sur la base d'une première modélisation, limitée aux frontières des deux pays, une évaluation des ressources exploitables de ce système aquifère et des prévisions de l'évolution de leur utilisation. Ce programme a été poursuivi dans le cadre du PNUD en 1984.

Une vingtaine d'années plus tard, en 1992, l'Observatoire du Sahara et du Sahel organisait, au Caire, le premier atelier sur les aquifères des grands bassins marquant ainsi le lancement de son programme « Aquifères des Grands Bassins » qui conduira à la naissance du « projet SASS », en septembre 1997, après une série de séminaires et d'ateliers régionaux. Ce projet SASS est le premier à prendre en considération le bassin dans son intégralité, jusqu'à ses limites naturelles.

A la demande des trois pays, l'OSS a obtenu l'appui financier de la Coopération suisse, du FIDA et de la FAO pour une première phase de trois ans lancée officiellement en Mai 1999 à Rome avec pour principal objectif l'actualisation de l'évaluation des ressources exploitables et la mise en place d'un mécanisme de concertation entre les trois pays.

Par rapport à son prédécesseur, ERESS, le projet SASS va bénéficier d'un atout de taille : l'intégration de la Libye et l'exploitation des données accumulées durant les trente dernières années. Ces données vont permettre :

- la mise en place d'une base de données commune aux trois pays destinée à valoriser l'information et à servir d'outil d'échange,
- la réalisation d'un modèle simulant le comportement hydrodynamique du système aquifère et permettant de prévoir l'impact du développement de l'exploitation.

Ces deux activités ont été réalisées en associant, en permanence, les compétences nationales des trois pays. Les résultats ont été présentés aux trois pays et ont permis d'éclairer les décideurs sur les perspectives de développement et les risques qui leurs sont associés. Ils ont aussi permis de mettre en évidence l'intérêt des trois pays à asseoir la durabilité des programmes d'actualisation, de suivi et d'échange d'informations et à concrétiser la « conscience de bassin » qui s'est progressivement développée.

Comment se présente l'avenir du SASS, au terme de cette première phase d'investigation ?

Autant en Algérie qu'en Tunisie et en Libye, le Complexe Terminal aujourd'hui, le Continental Intercalaire demain, se trouvent dans un état d'exploitation tel qu'il faudra que les trois pays, ensemble, contrôlent les prélèvements dans une volonté mutuelle de garantir l'avenir de la région à travers notamment une politique concertée de préservation des ressources en eau.

La pratique d'un tel partenariat, au cours du projet SASS, a permis de forger, progressivement, la confiance mutuelle entre les équipes techniques, la conscience que les problèmes rencontrés par les uns dépendent en partie des actions menées par les autres et la conviction que l'échange d'informations, qui fonde toute solidarité, est une activité non seulement possible mais nécessaire.

Constatant la nécessité d'une concertation soutenue et de l'institutionnalisation de la coopération initiée dans le cadre de ce projet, les trois pays du SASS ont exprimé leur accord pour la création d'un mécanisme tripartite permanent de concertation pour la gestion commune du SASS. La nécessité d'un mécanisme institutionnel élaboré et durable étant acquise, sa mise en œuvre a été conçue dans une démarche progressive ; au départ, ses attributions seront principalement axées sur le développement de bases de données et de modèles, la promotion d'études, de recherches et de formations, la production d'indicateurs de suivi et sur la réflexion vers l'évolution future du mécanisme. L'OSS accueille l'Unité de Coordination, en charge de ce mécanisme, conformément à la volonté des trois pays.

Par ses activités et ses résultats aux plans scientifique et technique, le projet SASS constitue une approche exemplaire d'étude et de gestion de ressources en eau non renouvelables dans un objectif de durabilité. A travers l'échange d'informations et la volonté de concertation, il peut servir de modèle pour la coopération régionale. Ce projet constitue un exemple réussi de coopération Sud-Sud et Nord-Sud qui cadre parfaitement avec les objectifs et la mission de l'OSS.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation et à la réussite de cette première phase. En premier lieu, mes remerciements s'adressent aux Ministres en charge des ressources en eau et aux administrations nationales : l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) en Algérie, la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) en Tunisie et la General Water Authority (GWA) en Libye, dont les dispositions à échanger l'information, participer aux activités scientifiques et prendre les décisions adéquates dans le cadre du Comité du pilotage ne se sont jamais démenties et ont été le garant de l'atteinte des objectifs du projet. Je remercie également les partenaires de coopération de l'OSS qui ont apporté, outre leur appui financier à ce projet, une attention toute particulière à sa réalisation et leurs avis éclairés lors des différentes réunions du Comité de pilotage. Enfin, je ne saurais omettre de citer l'équipe du projet au sein du Secrétariat exécutif de l'OSS : équipe permanente, consultants et équipes nationales, ainsi que les éminents spécialistes qui nous ont aidé à valider les résultats scientifiques du projet.

Chedli FEZZANI

Secrétaire exécutif

REMERCIEMENTS

Juillet 1999 – Octobre 2002 : la réalisation de l'étude du Système Aquifère du Sahara Septentrional a représenté quarante mois d'efforts, une coopération de tous les instants, parfois délicate mais incontournable, et un exercice de solidarité exemplaire.

Autour de l'équipe permanente du SASS, se sont ralliés un certain nombre de personnalités que nous remercions vivement pour leur contribution à la réussite de cette entreprise collective. Il est de notre devoir de citer tout particulièrement :

Les Directeurs Généraux des ressources en eau :

- EI BATTI Djemili pour la DGRE
- SALEM Mhamed Omar pour la GWA
- TAIBI Rachid pour l'ANRH

Les principaux partenaires financiers :

- DDC-Suisse
- FAO
- FIDA

Les coordinateurs nationaux du projet :

- AYAD Abedelmalek pour l'Algérie
- EI MEDJEBRI Mehdi pour la Libye
- KHANFIR Rachid pour la Tunisie

Autres partenaires

- Allemagne et France pour leur contribution partielle

L'équipe de l'ANRH (Algérie) :

- BIOUT Fatima
- KHADHRAOUI Abderrazak
- LARBES Ali

L'équipe de la GWA (Libye) :

- ABU BOUFILA Tahar
- AYOUBI Assem
- DOUMA Ali
- MADHI Lotfi

L'équipe de la DGRE (Tunisie) :

- ABIDI Brahim
- BEN BACCAR Brahim
- BEN SALAH Yosra
- EI-MOUMNI Lahmadi
- HORRICHE Faten

Le comité d'évaluation scientifique :

- DE MARSILY Ghislain
- KINZELBACH Wolfgang
- MARGAT Jean
- PALLAS Philippe
- PIZZI Giuseppe
- BURCHI Stefano, pour le Mécanisme de concertation

Les consultants du projet :

- ADOUM Akli
- BACHTA Med Salah
- BOUCHIBI Khier
- DERWICH Mohammed
- GHADI Mohamed
- GHAYED Karima
- MEKRAZI Aoun Ferjani
- SALEM Abderrahmane
- SIEGFRIED Tobias
- ZAMMOURI Mounira
- SOUISSI Jamel
- NANNI Marciella

Institutions nationales et régionales de Cartographie

- INCT, Algérie
- OTC, Tunisie
- SDL, Libye
- OACT
- CRTEAN

L'équipe du projet

- LATRECH Djamel, coordinateur régional
- MAMOUCHE Ahmed, conseiller scientifique
- KADRI Sadek, conseiller pour le Mécanisme de Concertation
- BESBES Mustapha, consultant principal pour le Modèle
- ABDOUS Belcacem, consultant principal pour la Base de Données
- BABASY Mohamadou Lamine, thésard
- JOUINI Wafa, assistante
- OTHMAN Olfa, documentaliste

SOMMAIRE

PREFACE	3
RESUME	12
INTRODUCTION	17
PREMIERE PARTIE : CONNAISSANCE DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL	20
I- DEFINITION DU SYSTEME AQUIFERE du SAHARA SEPTENTRIONAL	21
I. 1- Faciès géologiques du Sahara Septentrional	21
I. 2- Corrélations lithostratigraphiques	26
I. 3 – Le Schéma du multicouche saharien	28
II- CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU SAHARA SEPTENTRIONAL	30
II. 1- Les Précipitations sur le Domaine du SASS	30
II. 2- Ruissellement sur les Bassins Versants du SASS	30
II. 3- Aires de Recharge et Alimentation des Nappes	31
III- BASE DE DONNEES ET SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES	34
IV- CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SASS	39
IV. 1- Tracé de la Carte Piézométrique du CI	39
IV. 2- Carte Piézométrique du CT	39
IV. 3- Répartition spatiale des Transmissivités	41
IV. 4- Les Coefficients d'Emmagasinement	41
V- EVOLUTION DES PRELEVEMENTS et des NIVEAUX du SASS	42
V. 1- Historiques des prélèvements	42
V. 2- Historiques des Niveaux	43
VI- CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUES DU SASS	46
VI. 1- Qualité chimique des eaux	46
VI. 2-Intégration des données isotopiques dans le schéma hydrodynamique	48

DEUXIEME PARTIE :

ELABORATION ET EXPLOITATION DU MODELE MATHEMATIQUE	50
I- CONSTRUCTION DU MODELE DU SASS	51
I. 1- Cadre historique de la construction du modèle SASS	51
I. 2- Structure générale du modèle	52
I. 3- Extension et délimitation des couches	53
I. 4- Discrétisation de l'espace et modèle mathématique	55
I. 5- Le logiciel de simulation	56
I. 6- Les conditions aux limites du modèle	56
I. 7- Les paramètres hydrauliques initiaux	59
II- LE CALAGE DU MODELE DU SASS	60
II. 1- Les principales étapes du calage	60
II. 2- Calage du modèle en régime permanent	62
II. 3- Calage du modèle en régime transitoire	64
III- REALISATION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES	69
III. 1- définition des simulations exploratoires	69
III. 2- Résultats des simulations exploratoires	71
III. 3- Analyse des Résultats des Simulations	74
IV- LE MICRO-MODELE DU SASS	78
IV. 1- Pourquoi un modèle miniature ?	78
IV. 2- Fonctions d'influence et coefficients d'influence	79
IV. 3- Matrice des coefficients d'influence	80
IV. 4- Objectifs et contraintes de l'exploitation du SASS	82
V- REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES	85
V. 1- Définition des scénarios d'exploitation du SASS	85
V. 2- Résultats des simulations prévisionnelles	85
V. 3- Conclusion sur les simulations prévisionnelles	94

TROISIEME PARTIE :

MAITRISE DES RISQUES ET GESTION COMMUNE DU SASS	96
I- ENJEUX ET RISQUES LIES A L'EXPLOITATION DU SASS	97
I.1- Les Chotts	98
I.2- Autres sources de contamination par le sel	100
II- CONNAISSANCE DU SYSTEME ET REPRESENTATIVITE DU MODELE	101
II.1- Connaissance des paramètres structuraux du système aquifère	101
II. 2- Connaissance des paramètres de la demande en eau	105
III- Le CHAMP DES INTERFERENCES, ESPACE DE CONCERTATION	107
IV- PRODUCTION D'INDICATEURS POUR LE SUIVI ET L'EVALUATION	109
IV- 1. Le Réseau qualité du SASS	109
IV- 2. Le réseau piézométrique du SASS	110
V- UN MECANISME DE CONCERTATION PERMANENT	117
V. 1- Les contours possibles d'une concertation	117
V. 2- De l'étude du SASS au projet de Mécanisme	118
V. 3- Ateliers Nationaux et Atelier Régional	119
V. 4- Caractéristiques du Mécanisme de concertation	120
CONCLUSIONS	122
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	126

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre de la figure	Pages
Fig. 1-1	extension des formations du SASS	12
Fig. 1-2	carte du Sahara Septentrional	19
Fig. 1-3	carte géologique du Sahara Septentrional	21
Fig. 1-4. a	Coupe W-E à travers le SASS, du Bassin Occidental au Graben de HUN	27
Fig. 1-4. b	Corrélation ouest- Est du Bassin Occidental à Tawargha	27
Fig. 1-5. a	Schéma du Multicouche Saharien	29
Fig. 1-5. b	Schéma simplifié du Multicouche Saharien	29
Fig. 1-6	Carte de isohyètes du SASS en mm/an	30
Fig. 1-7	Bassins-versants sud de l'Atlas Saharien	31
Fig. 1-8a	Affleurements perméables utiles du CI	33
Fig. 1-8b	Affleurements perméables utiles du CT	33
Fig. 1-9	les composants du S.I.	35
Fig. 1-10	structure de la Base de Données	36
Fig. 1-11	les éléments de « sagesse »	37
Fig. 1-12 a	carte piézométrique de référence du CI	40
Fig. 1-12 b	carte piézométrique de référence du CT	40
Fig. 1-13	Extension de la zone à surface libre du Complexe Terminal et Continental Intercalaire	41
Fig. 1-14	Evolution des Prélèvements sur forages, par aquifère et pays	43
Fig. 1-15	exemples d'évolution générale, de 1950 à 2000, des niveaux piézométriques au CI [Algérie, Libye] et au CT [Tunisie]	44
Fig. 1-16	Carte des salinités en mg/l, respectivement du CI et du CT	47
Fig. 1-17	évolution de la salinité au forage Chott-fejej (CI), en mg/l	48
Fig. 1-18	Age (en années) des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14	48
Fig. 2-1	Schéma structural du Modèle du SASS	53
Fig. 2-2	Limites respectives du CI et des Grès Supérieurs	55
Fig. 2-3	Conditions aux limites du Modèle adoptées en Régime Permanent	58
Fig. 2-4. a	CI – Régime Permanent – Courbes piézométriques calculées (en mauve) et courbes de référence tracées (en bleu)	62
Fig. 2-4. b	CT – Régime Permanent – Courbes piézométriques calculées (en mauve) et courbes de référence tracées (en bleu)	63
Fig. 2-5	Rabattements observés et calculés aux puits-témoins	65
Fig. 2-6	Position des Séries retenues pour le calage du CI, des «Grès sup» et du CT	66
Fig. 2-7. a et b	Carte des Rabattements 1950-2000 restitués par le modèle	68
Fig. 2-8. a	Simulation Zéro ; Rabattements 2000-2050 au CI	71
Fig. 2-8. b	Simulation Zéro ; Rabattements 2000-2050 au CT	71

Fig. 2-9. a	Hypothèse forte au CI ; Rabattements nets et Niveaux piézométriques 2050	72
Fig. 2-9. b	Hypothèse forte au CI ; Rabattements nets et Niveaux piézométriques 2050	72
Fig. 2-10	Ghadamès Field; Rabattements nets 2050 au CI	73
Fig. 2-11	Dj. Hassaouna ; Rabattements nets 2050 au CI	73
Fig. 2-12	Simulation Zéro ; Niveaux piézométriques calculés en 2050 dans la zone de Khoms-Zliten	75
Fig. 2-13. a	Sites de Pompages potentiels au CI	81
Fig. 2-13. b	Sites de Pompages potentiels au CT	82
Fig. 2-14	exemple de convertisseur « Débits-Rabattements »	83
Fig. 2-15	Simulation CI-1 ; Rabattements nets en 2050	86
Fig. 2-16	Simulation CI-2 ; Rabattements nets en 2050	87
Fig. 2-17	Simulation CI-3 ; Rabattements nets en 2050	87
Fig. 2-18	Simulation CI6 ; Rabattements nets en 2050	89
Fig. 2-19	Simulation CI-8 ; Rabattements nets en 2050	90
Fig. 2-20	Simulation CT-3 ; Niveaux piézométriques 2050 sur le golfe de Syrte	91
Fig. 2-21	Simulation CT-5 ; Niveaux piézométriques par rapport aux chotts en 2050	92
Fig. 2-22	Simulation CT-5 ; Rabattements nets en 2050	93
Fig. 3-1	Distribution des salinités, en g/L, des eaux pompées dans le CT et le CI	98
Fig. 3-2	Evolution du niveau piézométrique du CT par rapport aux chotts	99
Fig. 3-3	Extensions des zones à eaux salées du Turonien (salinités en g/l)	100
Fig. 3-4	Charge hydraulique du CT le long du littoral libyen en 2050 ; Simulations CT3 et CT5	102
Fig. 3-5	Exploitation du Bassin Occidental ; Rabattements nets calculés en 2050 et en 2200	104
Fig. 3-6	Coupe N-S dans l'Oued Rhir, ERESS, (1972) ; Structure d'ensemble du CT et Domaine [en bleu] représenté sur le Modèle SASS	105
Fig. 3-7	Répartition des prélèvements 2000 dans le SASS	107
Fig. 3-8	le Bassin des Chotts	108
Fig. 3-9	Bassin d'Artésianisme et de l'Exutoire Tunisien, et Bassin de Ghadamès	108
Fig. 3-10	Evolution des salinités dans des puits de la Nefzaoua	109
Fig.3-11	Groupes de points d'eau et séries historiques de référence	112
Fig. 3-12	Polygones d'influence du réseau piézométrique du CI	113
Fig. 3-13	La Carte des Risques du SASS et le Réseau Piézométrique de Référence	115
Fig. 3-14	Schéma du Mécanisme de concertation dans sa première phase	120

LISTE DES TABLEAUX

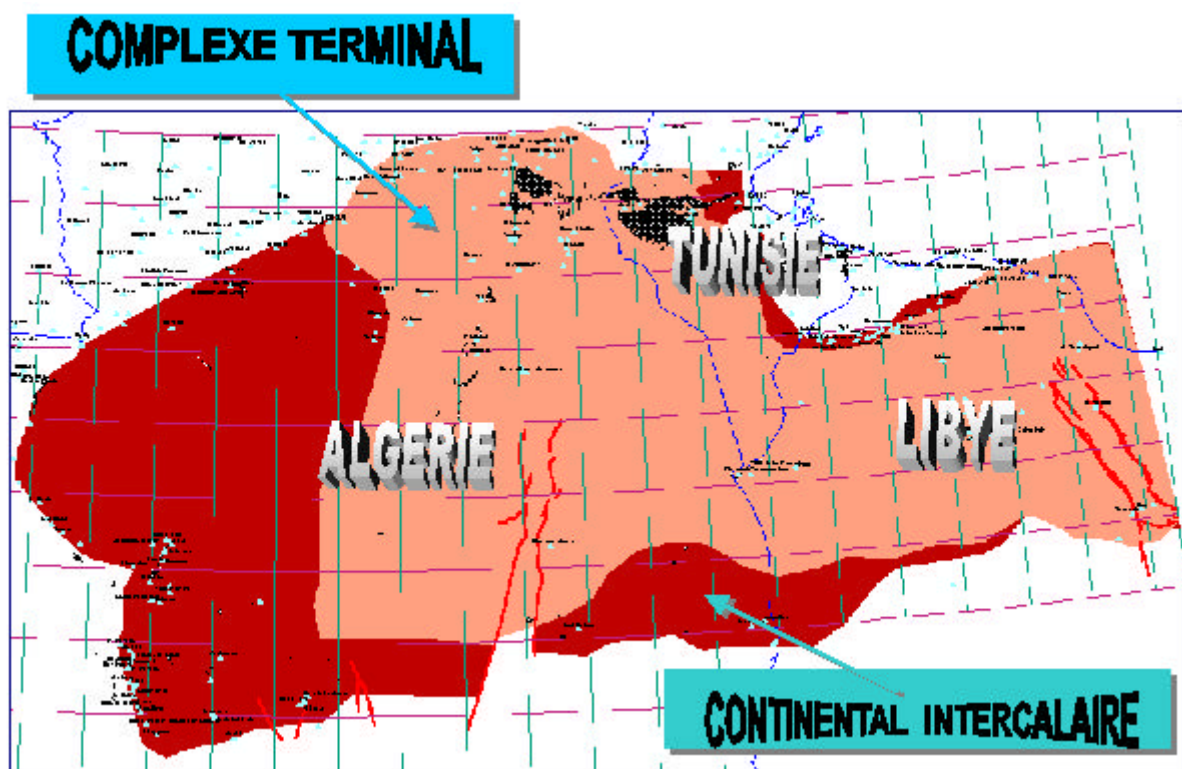
N° du tableau	Titre du Tableau	Page
Tableau 2-1 :	Bilan du SASS calculé en 1950 (m ³ /s)	63
Tableau 2-2 :	Débit des Sources Observé sur la période 1950-2000 (l/s)	64
Tableau 2-3 :	Bilans 1950 et 2000 du SASS	67
Tableau 2-4 :	Hypothèses faible et forte en Algérie	69
Tableau 2-5 :	Récapitulatif des Simulations Exploratoires	70
Tableau 2-6 :	Bilans 2050 du CI	74
Tableau 2-7 :	Simulations prévisionnelles ; Débits imposés	85
Tableau 2-8 :	Prélèvements et Résultats des principales Simulations Prévisionnelles du SASS	93

RESUME

Le Système Aquifère Saharien désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : a) la formation du Continental Intercalaire, CI, la plus profonde, b) celle du Complexe Terminal, CT, notamment très sollicitée dans l'Oued Rhir, le Souf, le Djérid, la Nefzaoua et le golfe de Syrte. Ce Système recouvre une étendue de plus de un Million de km² dont 700.000km² se trouvent en Algérie, 80.000 en Tunisie, et 250.000 en Libye.

Etant données les conditions du climat saharien, ces formations sont faiblement alimentées : environ 1 Milliard 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. Comment alors exploiter les nappes sahariennes, au delà de leur taux de réalimentation, par puisage dans les réserves accumulées, dans l'optique d'un développement durable ? Comment assurer un maximum de prélèvements d'eau pour le meilleur développement de la région sans risquer pour autant de dégrader irrémédiablement l'état de la ressource ? C'est en ces termes que se pose aujourd'hui la définition des ressources exploitables du Système Aquifère du Sahara Septentrional [SASS].

Fig. 1-1 : extension des formations du SASS



- **Problématique du SASS**

Le Système Aquifère Saharien est reconnu et exploité par près de 8800 points d'eau, forages et sources : 3500 au Continental Intercalaire et 5300 au Complexe Terminal. Par pays, ces points se répartissent ainsi : 6500 en Algérie, 1200 en Tunisie et 1100 en Libye. L'évolution du nombre de forages et de leur régime d'exploitation indique des croissances vertigineuses au cours des vingt dernières années : cette exploitation atteint aujourd'hui 2,2 milliards m³/an [soit 1.33 Milliard en Algérie, 0.55 en Tunisie et 0.33 en Libye]. Si cette évolution, partagée par 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 détérioration de l'état de la ressource en eau.

L'intense évolution de l'exploitation des aquifères du SASS a profondément modifié la vision que l'on peut désormais se faire de cette exploitation, laquelle se trouve confrontée à un certain nombre de risques majeurs du simple fait de son développement : fortes interférences entre pays, salinisation des eaux, disparition de l'artésianisme, tarissement des exutoires, hauteurs de pompage excessives ... Les trois pays concernés par le devenir du système sont donc condamnés, à court terme, à rechercher ensemble une certaine forme de gestion concertée du Bassin Saharien.

- **Des Ressources Partagées et Vulnérables**

Les simulations réalisées sur le Modèle du SASS, ont mis en évidence trois zones où les ressources partagées paraissent les plus vulnérables. Dénommées « Périmètres Prioritaires d'Observation », ces zones sont :

- a) le Bassin de Ghadamès dans le CI ;
- b) le Bassin Artésien et de l'Exutoire Tunisien dans le CI ;
- c) le Bassin des Chotts pour le CT.

Au CI, le bassin de Ghadamès présente des risques de rabattements excessifs, mais ce risque se joue sur le moyen terme, et le contrôle en est techniquement facile : champs de pompages exclusivement publics et concentrés dans l'espace.

Sur le second bassin : le Bassin Artésien et de l'Exutoire Tunisien, le risque se joue certes sur le court terme mais le contrôle y est également facile : les forages, tous très profonds, ne sont pas très nombreux. L'accès à l'information y est donc techniquement aisé.

Le secteur le plus exposé est celui des chotts algéro-tunisiens au CT. C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte. Les calculs effectués sur le Modèle ont clairement montré que la simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres sur chacune des deux nappes, et ce sur l'ensemble des quatre secteurs solidaires que sont l'Oued Rhir, le Souf, le Djérid et la Nefzaoua.

Une telle situation serait inacceptable pour le Complexe Terminal : le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. La simple poursuite de l'existant, du moins dans le CT, serait donc tout à fait inacceptable pour la région des Chotts. Là, il faudra sérieusement envisager la réduction des prélèvements comme un scénario plausible, et s'y préparer d'ores et déjà.

- **Exploitation du modèle du SASS : résultats des simulations**

Les simulations exploratoires effectuées sur le modèle SASS ont mis en exergue un certain nombre de nuisances et de « risques » auxquels est exposée la ressource en eau du simple fait de son développement. Vouloir continuer à exploiter encore plus les nappes du CI et du CT nécessitera désormais de savoir, en connaissance de cause, minimiser et gérer ces risques, parmi lesquels on peut notamment citer :

- a) la disparition de l'artésianisme ;
- b) des hauteurs de pompages excessives ;
- c) le tarissement de l'Exutoire Tunisien ;
- d) le tarissement des Foggaras ;

- e) d'importantes interférences de rabattements entre pays ;
- f) la réalimentation potentielle par les Chotts.

Les résultats de ces premières simulations 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 graves 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 identifiés, 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 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 est précisément investi d'une telle fonction.

- **Exploration du Bassin Occidental**

L'un des résultats des investigations effectuées sur ce modèle a permis de vérifier qu'il existe une possibilité de porter l'exploitation par forages du SASS, estimée à 2.2 Milliards de m³ en 2000, jusqu'à un niveau de 7.8 Milliards de m³/an à l'horizon 2050, et ce en respectant dans une certaine mesure les contraintes relatives aux risques de dégradation de la ressource. L'atteinte d'un tel niveau de développement de la ressource ne peut se faire qu'au prix d'une rupture totale avec les régions traditionnelles d'exploitation intensive. En effet, 80 % des prélèvements additionnels devront se faire dans des régions «nouvelles» et éloignées : 3,5 Milliards dans le Bassin Occidental du CI, 0,6 Milliard aux confins sud du CT... 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. Une telle éventualité 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 un important puisage sur les réserves du système. On doit toutefois souligner la nécessité qu'il y a de confirmer certains des résultats obtenus : malgré les progrès réalisés par le projet SASS, des incertitudes subsistent dans la connaissance du système, qui nécessiteront d'entreprendre de nouvelles investigations.

- **Maîtrise des Risques et Indicateurs de suivi de la ressource**

L'exploitation du SASS présente trois principaux types de risques :

- (i) la salinisation des nappes par inversion des écoulements ;
- (ii) la chute du niveau dans les forages ;

(iii) le tarissement d'exutoires naturels.

Ces risques ne sont évidemment pas de la même gravité, le premier étant le risque majeur. Un décideur peut accepter des augmentations de coûts de pompage, mais doit refuser tout risque de salinisation, en raison de son caractère irréversible. Comment exploiter les nappes sahariennes dans l'optique d'un développement durable ? Les trois pays concernés par le devenir du système sont condamnés à rechercher ensemble une forme de gestion commune pour minimiser les risques liés à l'exploitation du bassin. Il est primordial qu'un Réseau de Référence permanent soit mis en place pour assurer la production et la diffusion d'Indicateurs fiables et permettre le suivi permanent et l'évaluation de la ressource : niveaux de prélèvements, réseau piézométrique, réseau qualité, réseau hydro-pluviométrique...

Un autre facteur de risque concerne l'ignorance des effets et les dangers qui résultent d'une mauvaise connaissance de la nappe. La levée des incertitudes sur les caractéristiques physiques du SASS contribuera à améliorer davantage la représentativité du modèle et augmenter encore la fiabilité des résultats des simulations effectuées. Il en va de même pour la prise en compte des paramètres socio-économiques dans le but d'une évaluation plus précise de la structure de la demande et de son évolution à venir.

- **Etude en Partenariat et gestion commune du SASS**

Entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, le Complexe Terminal aujourd'hui, le Continental Intercalaire demain, se trouvent dans un état d'exploitation tel qu'il faut déjà penser à y contrôler ensemble, sinon à y réduire, les pompages. Parmi les raisons objectives qui poussent à la concertation, la gestion des risques mis en évidence par l'étude du SASS constitue une raison majeure.

Les problèmes techniques rencontrés par les différents pays du SASS les conduisent naturellement à s'organiser ensemble : la pratique du partenariat au cours du projet SASS a progressivement forgé la confiance mutuelle entre équipes techniques, la conscience que les problèmes rencontrés ou pressentis par les uns dépendent en partie des actions menées par d'autres, et la conviction que l'action commune augmente l'efficacité des solutions. Les trois pays du SASS sont favorables à la création d'un mécanisme tripartite permanent de concertation pour la gestion commune du SASS.

Le point de départ est la nécessité de maintenir et de développer la base de données commune et le modèle. L'échange de données doit par la suite servir de base à la formulation de politiques et de stratégies de l'eau. C'est ainsi que la mise en place d'un mécanisme institutionnel élaboré et durable s'avère nécessaire, sa mise en œuvre devant se faire d'une manière progressive.

- **Un Mécanisme de Concertation Permanent**

La mise en place du Mécanisme de concertation a suscité un large débat, organisé en trois ateliers nationaux. Les points de convergence et de consensus issus de ces journées ont été validés par un atelier régional de synthèse. Ces points concernent notamment :

- la nécessité d'assurer la continuité des travaux portant sur l'amélioration de la connaissance du système et de son exploitation (évaluation des risques, gestion de la Base de Données commune, actualisation du Modèle, mise en place d'un réseau commun, formation, développement de la recherche) ;
- nécessité de la mise en place d'un mécanisme de concertation et de son ancrage institutionnel dans une première phase au sein d'un organisme international, l'OSS ;

- nécessité d'une mise en place progressive, partant d'une structure efficace et légère, vers un mécanisme autonome plus élaboré et doté d'attributions plus importantes à terme.

Les principales caractéristiques, convenues lors de l'Atelier Régional, confèrent au mécanisme l'objectif de coordonner, promouvoir et favoriser la gestion rationnelle et concertée du SASS.

Sa structure comporte, dans la phase de démarrage :

- a) un Comité de Pilotage composé des structures nationales chargées des ressources en eau agissant en tant que points focaux nationaux ;
- b) une Unité de Coordination gérée et abritée par l'OSS ;
- c) un Comité scientifique ad-hoc.

Ses attributions sont multiples et centrées autour de la production d'indicateurs de suivi, du développement des bases de données et des modèles, de la promotion d'études, de recherches et de formations, de la réflexion sur l'évolution future du mécanisme.

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 près de 9000 et les prélèvements par forages de 600 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 précèdent, et qui avait trouvé sa justification dans la profusion des reconnaissances ayant accompagné la découverte du pétrole saharien. 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, devaient se situer à la mesure de ce défi.

Deux principaux sous-systèmes composent le Système Aquifère du Sahara Septentrional : la nappe du Continental Intercalaire (CI) et la nappe du Complexe Terminal (CT). 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 a 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, on peut concevoir le Modèle comme un puissant outil éducatif et un instrument de dialogue et de médiation objectif, autour duquel peut s'organiser la concertation.

Le présent rapport rend compte de l'ensemble des travaux réalisés, de Juillet 1999 à Décembre 2002, pour la mise en oeuvre des différentes composantes du projet SASS :

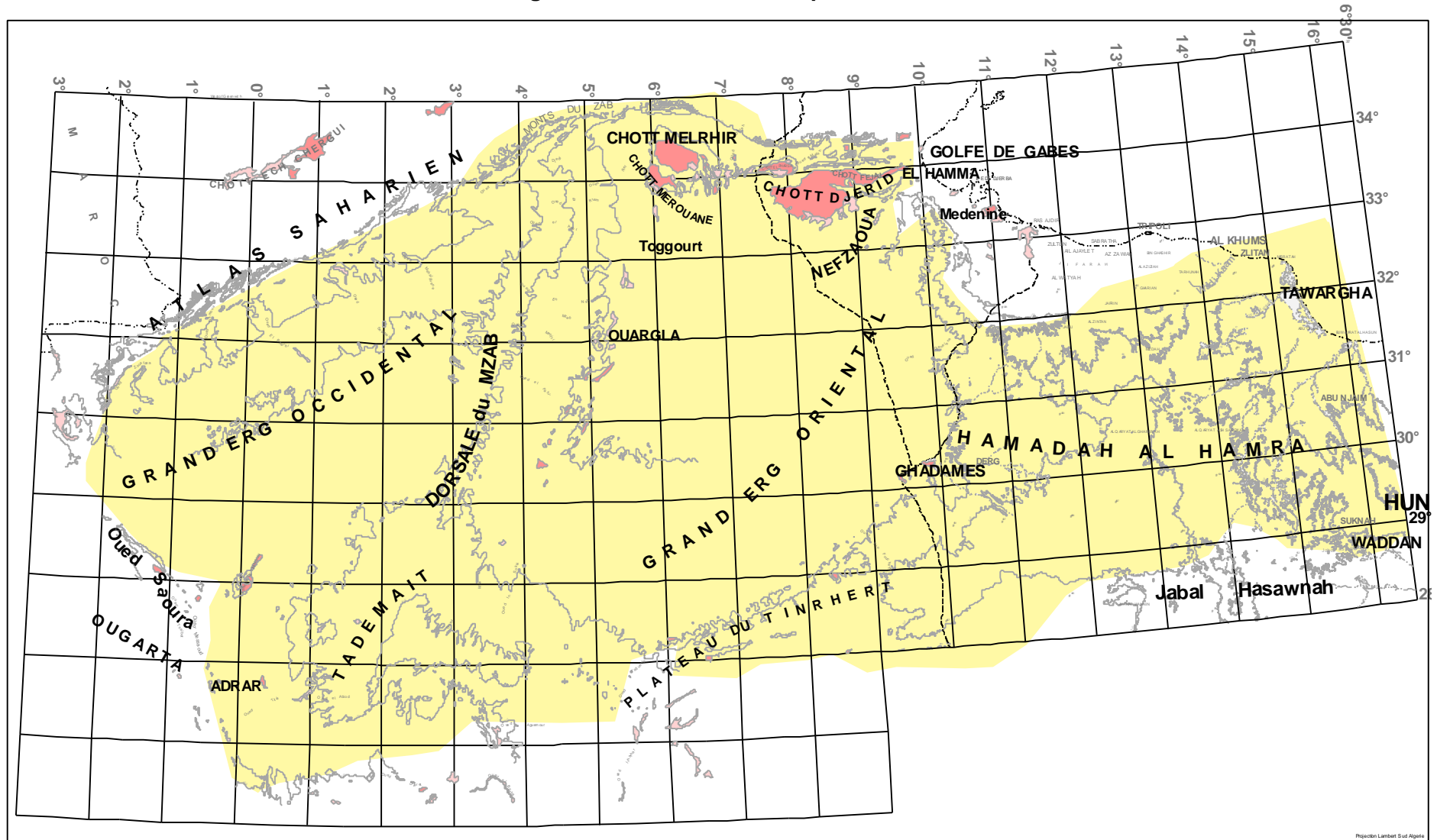
- Acquisition, Analyse et Synthèse des données hydrogéologiques ;
- Elaboration de la Base de Données commune et du Système d'Informations ;
- Développement et Exploitation du Modèle Mathématique du SASS ;
- Mise en Place d'un Mécanisme de Concertation pour la gestion commune du bassin.

Le présent document est organisé en trois parties :

- **Une première partie** intitulée : **Connaissance du Système Aquifère du Sahara Septentrional**, qui fait la synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques, et présente la Base de Données et le Système d'Informations ;
- **Une deuxième partie** intitulée : **Elaboration du Modèle Mathématique**, qui décrit les étapes de la construction et du calage du modèle, puis la conception et les résultats des simulations réalisées ;

- **Une troisième partie** intitulée : **Maîtrise des Risques et Gestion Commune du Système Aquifère**, qui traite des risques et des incertitudes, de la mise en place d'une démarche d'observation permanente, et du Mécanisme de Concertation.

Fig. 1-2 : carte du Sahara Septentrional



PREMIERE PARTIE :

**CONNAISSANCE DU SYSTEME
AQUIFERE DU SAHARA
SEPTENTRIONAL**

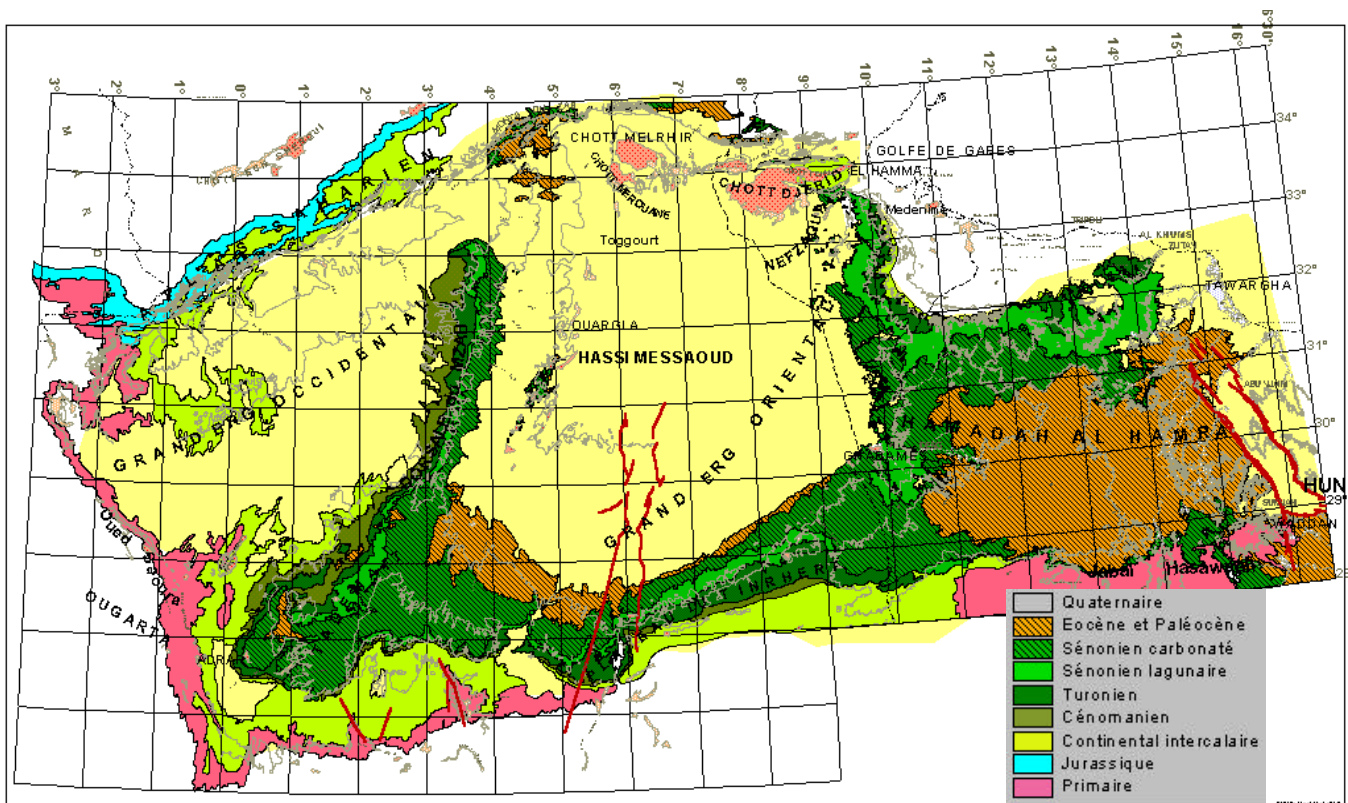
I- DEFINITION DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes: la formation du Continental Intercalaire, CI, et celle du Complexe Terminal, CT. Ce Système recouvre une étendue de plus de un Million de km².

I. 1- Faciès géologiques du Sahara Septentrional

Le terme Continental intercalaire désigne l'épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins : à la base, le cycle Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne, au sommet, le cycle du Crétacé supérieur. Le Complexe Terminal est un ensemble peu homogène comprenant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, notamment du Miocène. La carte géologique de la plate-forme nord saharienne (**fig.1-3**) indique d'importants affleurements du Crétacé supérieur, qui débute avec la transgression cénomaniennne.

Fig. 1-3 : carte géologique du Sahara Septentrional



I. 1. 1- Les faciès du Continental Intercalaire

Directement surmontées par les argiles du Cénomaniennne, 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 Paléozoïque, 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-cénomaniens 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-Cénomarien.
- **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 et 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, des 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 Cénomaniens** : argiles, marnes et argiles gypseuses. [ep.# 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 inférieur** :
Bathonien et 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 Cénomaniens** : 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. Hassaouana, 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** : Nèocomien, 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 Cénomaniens** : retour de la sédimentation marine ; argiles, gypse, calcaires, dolomies, marnes, sel ; (formations Ain Tobi et Yefren) ; constitue le toit du CI.

I. 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 (1972) que l'on verra apparaître la notion de « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par Bel et Cuhe (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 MioPliocène : 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 et le bassin occidental. C'est le principal niveau aquifère du Mio-Pliocène.
 - **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.

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 l'extrême sud.
- **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** : c'est l'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 Cénomaniens inférieur (formation Ain Tobi)** : calcaires dolomitiques au Nord, faciès détritiques assimilés à Kiklah au Sud.
- **Le Cénomaniens 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 [& Cénomaniens sup] (formation Nalut)** : calcaires dolomitiques, bon aquifère sur la moitié Nord du Bassin, plus marneux au Sud.
- **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'Aquitaniens aquifère ;
 - les marnes du Miocène moyen ;
 - les calcaires, marnes et gypse du Miocène supérieur et du Plio-Quaternaire.

I. 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. Ces corrélations sont alimentées par une base de données géologiques forte de 175 forages pétroliers et forages d'eau profonds.

Le Modèle Conceptuel du SASS 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 la coupe géologique fig.1-4.a. Sur cette coupe, W-E à travers l'ensemble du Sahara Septentrional, on décèle clairement la structure générale du SASS en trois bassins :

- **le bassin occidental**, comprenant le secteur des foggaras au Sud, le Grand Erg Occidental et l'Atlas Saharien au Nord,
- **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, sa morphologie est dominée par le Grand Erg Oriental et par les Chotts.
- **le bassin oriental** caractérisé par l'effondrement du graben de Hun et l'accumulation des sédimentations tertiaires.

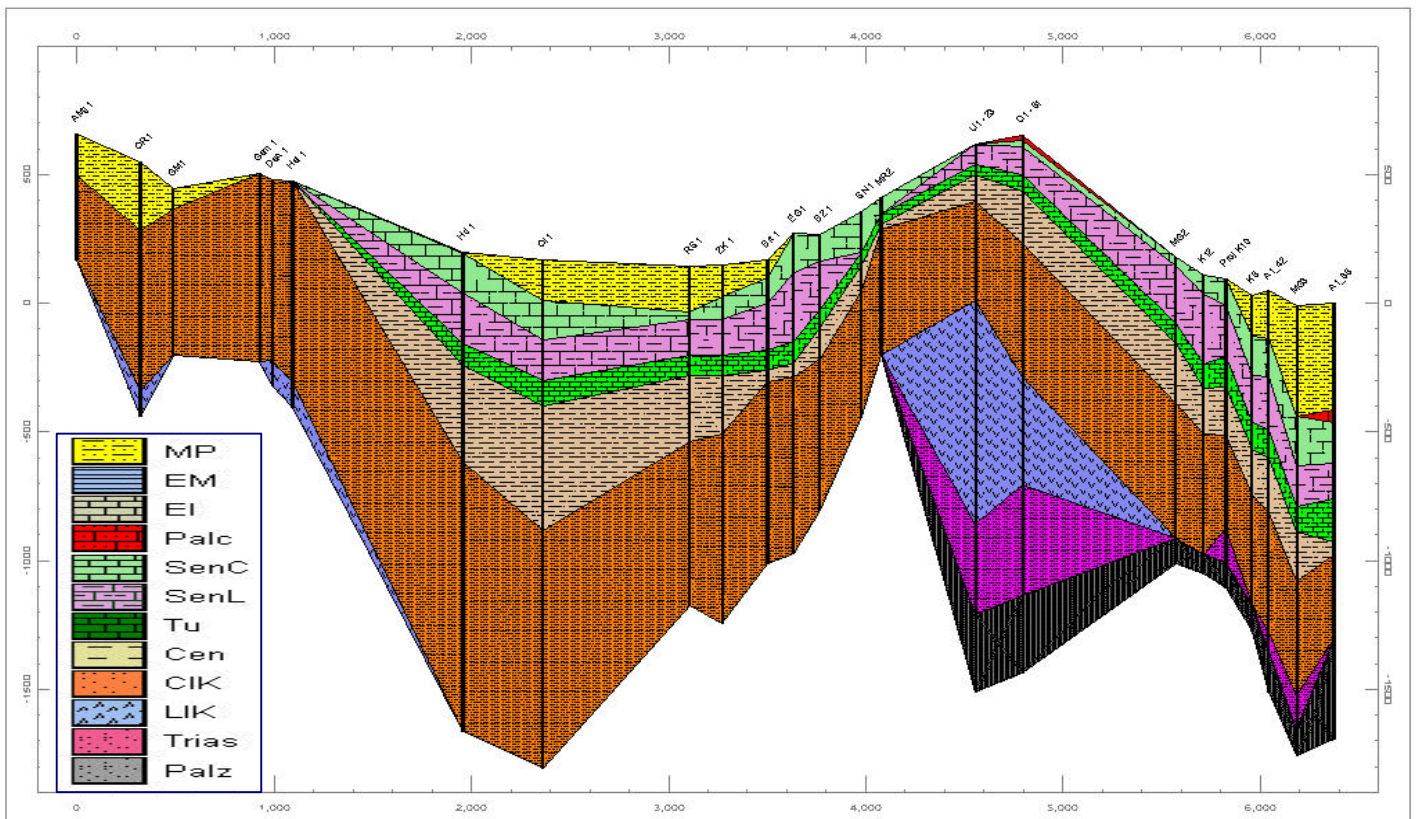
Cette coupe rend par ailleurs compte d'une continuité exceptionnelle au sein des séries sédimentaires de la plate-forme saharienne, et indique clairement la continuité et l'homogénéité des grandes formations aquifères ainsi que des séries semi-perméables.

Grâce à l'échelle stratigraphique, qui assure la concordance des temps et les correspondances dans l'espace et grâce à l'ensemble des coupes lithostratigraphiques effectuées, il est à présent possible de conjuguer ensemble Algérie, Tunisie et Libye.

L'objectif étant d'aboutir à la construction d'un ensemble cohérent au plan hydrogéologique, il était nécessaire au préalable, de :

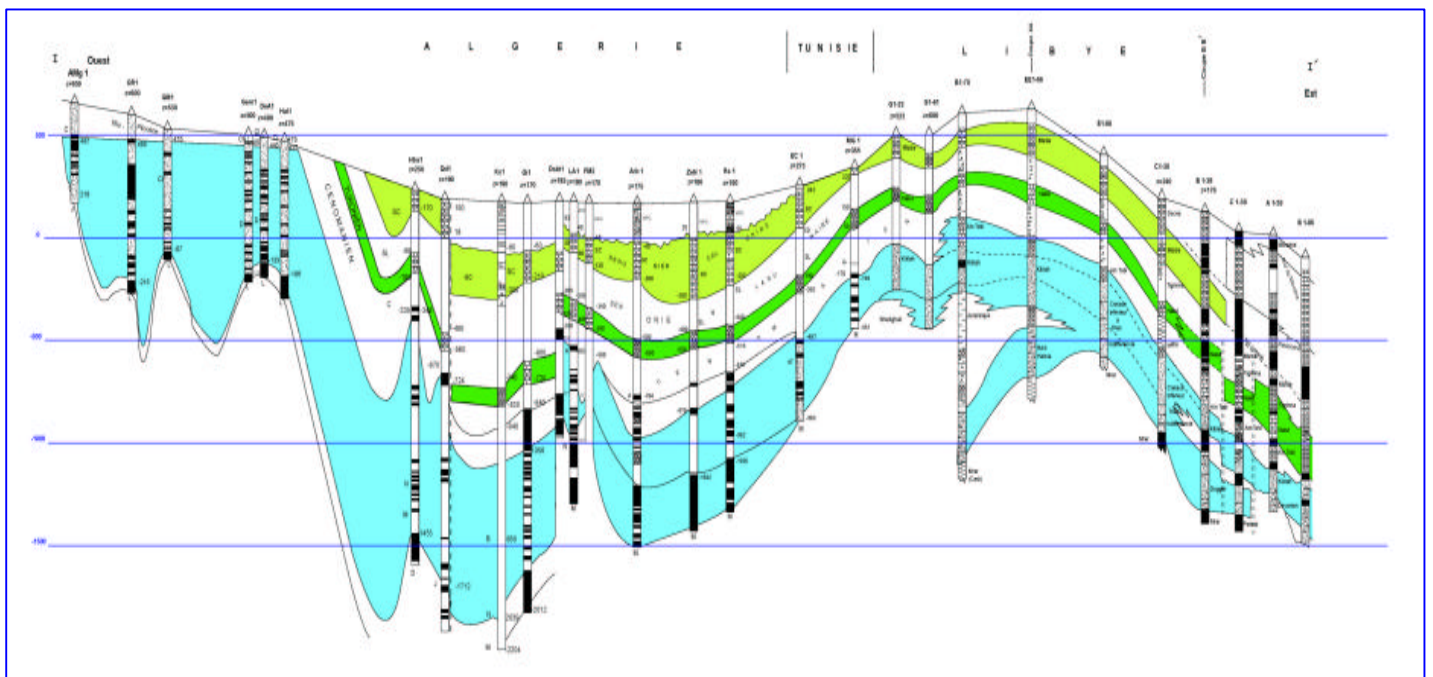
- pouvoir, d'abord dans la terminologie adoptée dans chacun des pays, rattacher les formations lithostratigraphiques reconnues à l'échelle stratigraphique universelle,
- traduire ces formations en termes purement lithologiques pour apprécier leurs degrés de perméabilité,
- traduire enfin les formations lithologiques obtenues en termes de formations aquifères ou d'aquifères et aquicludes.

Fig. 1-4. a : Coupe W-E à travers le SASS, du Bassin Occidental au Graben de Hun



La base de données géologiques développée permet le dessin automatique et instantané des corrélations lithostratigraphiques, utilisant pour ce faire le code « Rockworks ». Un dessin semi automatique, utilisant les mêmes données, autorise toutefois une restitution plus fidèle, notamment des structures faillées comme le montre la **fig.1-4.b**.

Fig. 1-4. b : Corrélation ouest- EST du Bassin Occidental à Tawargha
[sources : UNESCO 1972, et Base de Données SASS]



I. 3- Le Schéma du multicouche saharien

Le stade ultime de la 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 schéma **fig. 1-5**.

Précisément, la dernière étape de lecture des coupes-types par pays a consisté à traduire la succession des équivalents lithostratigraphiques en termes d'« aquifères » et d'«**aquitards**». Mis en vis à vis et rattachés à l'échelle stratigraphique, ces séries fournissent le schéma de la **fig. 1-5a**, 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.

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 niveaux 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 équivalent¹ en Libye les deux nappes respectivement de l'Aquitaniens et du Plio-Quaternaire.

Un degré de simplification supplémentaire permet de parvenir à l'élaboration du schéma de la **fig.1-5b**, où les **aquifères sont figurés en turquoise et les couches semi perméables en brun**.

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 Mio-Pliocène (resp. Mizdah et Plio-Quaternaire), **le multicouche du SASS** va se présenter sous la forme de trois niveaux 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.

¹ 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.

Fig. 1-5. a : Schéma du Multicouche Saharien

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	
Senonien Sup	Maestrichtien		Nappe des Calcaires Sup de Nefzaoua	Upper Cretaceous- Paleocene : MIZDA Aquifer
	Campanien			Semi perméable
	Santonien	Nappe Calcaires Inf/Nefzaoua		semiperméable
Senonien Inférieur		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 - Low er 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				
Muschelkalk				
Bundstandstein		Nappe salée du Trias	Nappe du TRIAS	Trias : AZIZIA Aquifer

Fig. 1-5. b : Schéma simplifié du Multicouche Saharien

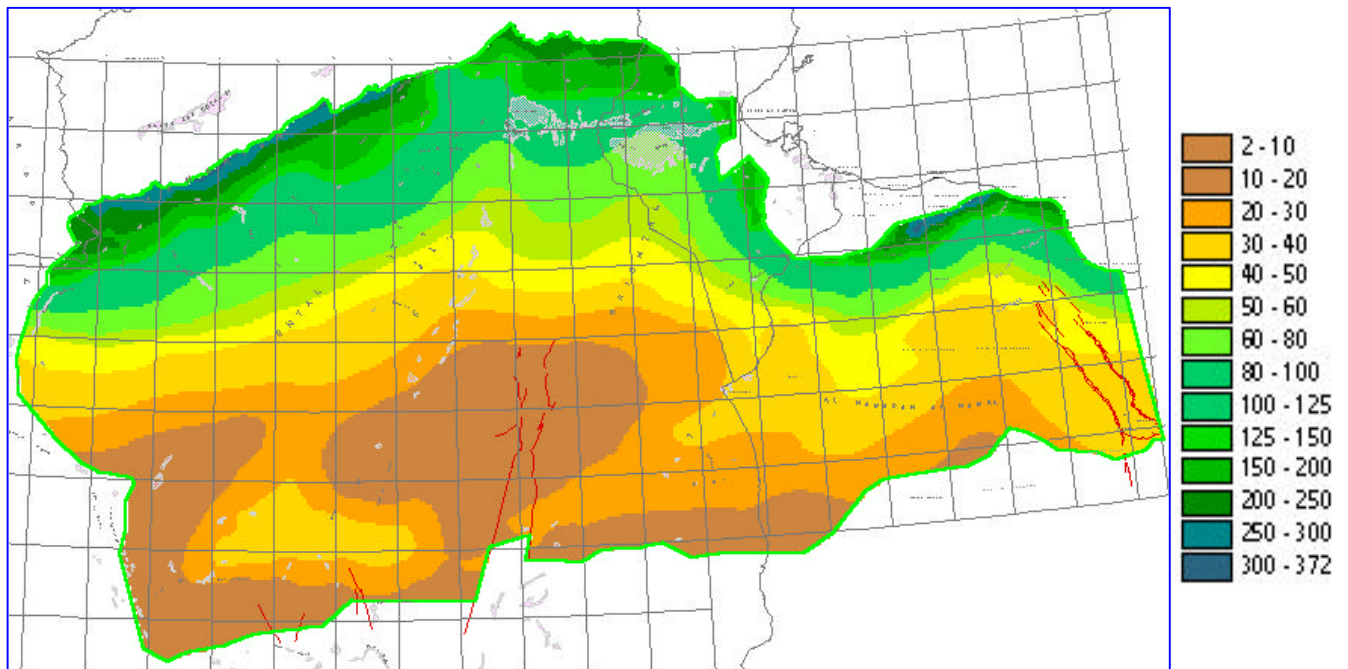
SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE DU SAHARA SEPTENTRIONAL		
ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Toit Imperméable		
Nappe des Sables	Nappe des Sables du Djerid	Sables et Calcaires Miocène Inf.
NAPPE du COMPLEXE TERMINAL - Upper Cretaceous		
Nappe des Calcaires	Nappe des Calcaires Nefzaoua	Upper Cretaceous Mizdah
Semi perméable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

II- CARACTERISATIQUES HYDROLOGIQUES du SAHARA SEPTENTRIONAL

II. 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 représentant la lame d'eau moyenne (moyenne des 25 années 1926-1950) en tout point du domaine du SASS² (fig.1-6).

Fig. 1-6 : Carte de isohyètes du SASS en mm/an



Cette carte permet d'estimer la lame d'eau moyenne pondérée sur l'ensemble du bassin du SASS, laquelle s'établit à $P = 57$ mm / an. Pour une surface totale de 1.095.000 Km², le volume des Ressources Pluviales « moyennes » du SASS s'établit à **62 Milliards de m³/an.**

II. 2- Ruissellement sur les Bassins Versants du 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 suscité bien peu d'intérêt. La contribution de M. FERSI (1979)³ est à cet égard précieuse. Mettant à profit l'observation du ruissellement sur plusieurs bassins de Tunisie centrale et méridionale, Fersi a établi une formule empirique valable en climat aride, qui relie la lame ruisselée à la pluviométrie (moyenne annuelle) et aux caractéristiques physiographiques résumées par la pente moyenne. Ajustée sur les points expérimentaux, l'équation de Fersi s'écrit :

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

où \overline{Lr} : lame ruisselée moyenne en mm / an ;

\overline{P} : pluie moyenne en mm / an ;

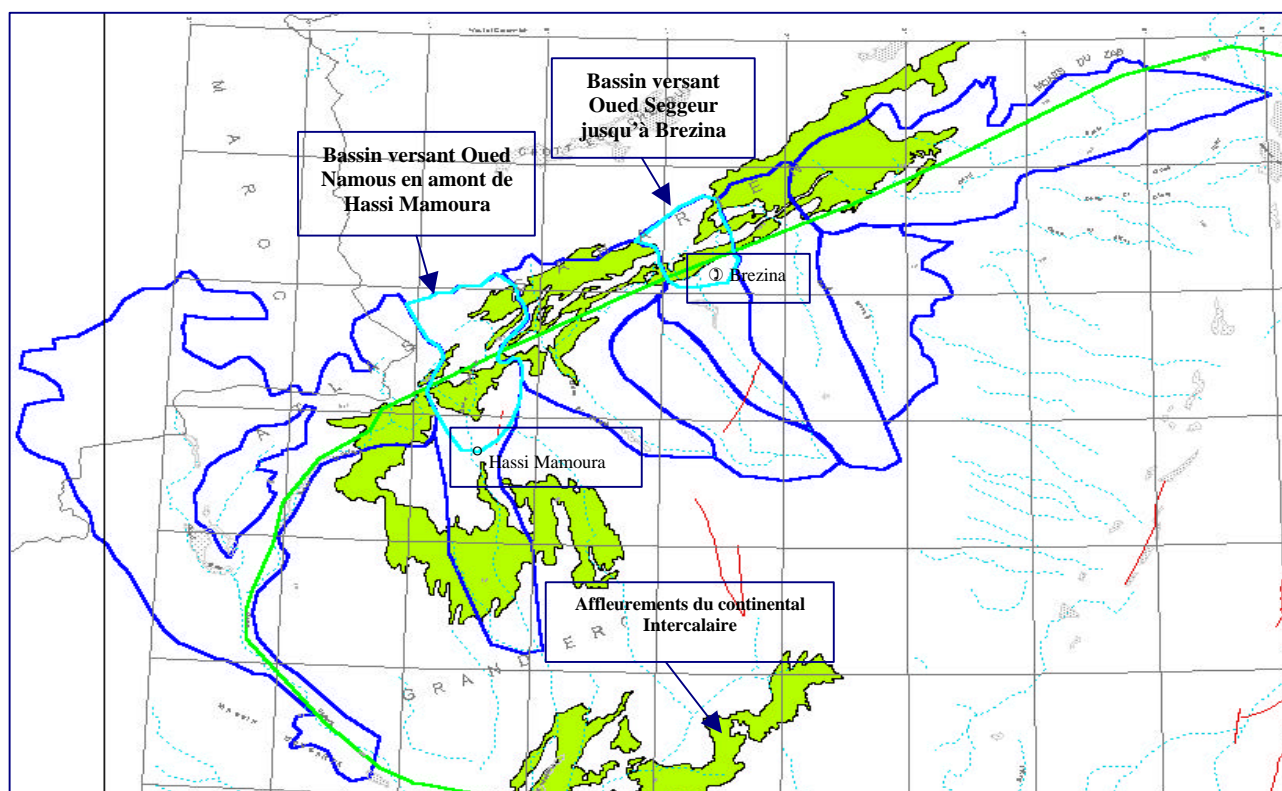
IG : pente moyenne du bassin en m/Km

² Le domaine de la fig 1-6 représente l'union des extensions du Continental Intercalaire, du Complexe Terminal (extension marine exclue) et des Bassins-Versants drainant l'Atlas Saharien vers le Sud.

³ FERSI. M ; 1979: Estimation du ruissellement moyen annuel sur les BV du SE, du SW et Sahel sud ; DGRE

Cette formule a permis à Fersi (1979) de proposer des estimations du ruissellement moyen sur l'ensemble des bassins-versants du Sud Tunisien. Nous l'avons utilisée pour tenter d'évaluer le ruissellement sur l'ensemble des Bassins-Versants drainés par le SASS. Parmi ces bassins, les plus actifs sont sans conteste ceux de l'Atlas Saharien, dont on dénombre huit principaux. Parmi ces derniers, deux sont contrôlés par l'ANRH (**fig.1-7**) : les Oueds Namous et Seggeur. Les mesures effectuées ont permis de vérifier la validité de la formule de Fersi dans les conditions de l'Atlas saharien.

Fig. 1-7 : Bassins-versants sud de l'Atlas Saharien



Valable pour deux grands oueds de l'Atlas saharien, la formule de FERSI peut donc être appliquée aux autres bassins versants du Système Aquifère du Sahara Septentrional. En première analyse, on peut en dénombrer une trentaine, à partir desquels on peut estimer que l'ensemble du ruissellement interannuel moyen sur le SASS serait de l'ordre de **1 Milliard m³/an**, dont la moitié provient des bassins de l'Atlas Saharien⁴.

II. 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 accredité 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.

⁴ Oued Saoura et affluents non compris

Les commentaires du projet ERESS sur cette question sont édifiants : « *La recharge de la nappe du CI s'effectue par infiltration :*

a) des ruissellements à la périphérie du domaine ...notamment l'Atlas Saharien, le Dahar ...le Tademaït, le Tinhert ;

b) 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 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 ... »⁵

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 est 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 critiquer les résultats obtenus. Pour ce faire, les trois éléments suivants sont disponibles :

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

Ces éléments ont permis une première estimation de l'alimentation avec ses deux volets :

II. 3. 1- L'infiltration directe aux affleurements :

Les cartes **fig.1-8.a** et **1-8.b** 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 ces cartes avec celle des précipitations moyennes fournit les résultats suivants :

- les affleurements perméables utiles⁶ 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.
- Lorsque l'on fait varier entre **1% et 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 jour⁷ 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 **2%** si l'on tient compte des apports par infiltration des crues d'oueds.

⁵ UNESCO, 1972

⁶ situés dans les secteurs à nappe libre

⁷ DDC-Burgeap (1963), Geopetrole (1964), Unesco(1972), Srivastava (1983), Zammouri (1990), Geomath (1994)

II. 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.

En s'inspirant de travaux sur l'infiltration des crues des Oueds Zeroud et Merguellil⁸ et par analogie, l'ensemble des **infiltrations de crues** sur le domaine du SASS pourrait se situer autour de **300 Millions de m³/an**. Il serait fort imprudent de vouloir aller au delà de la recherche de tels ordres de grandeur en l'état actuel des connaissances.

Fig. 1-8. a : Affleurements perméables utiles du CI

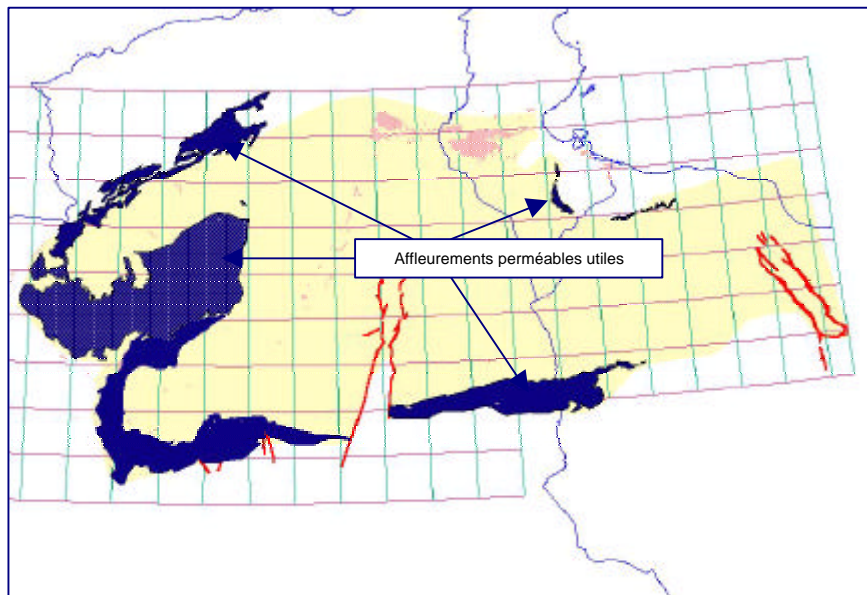
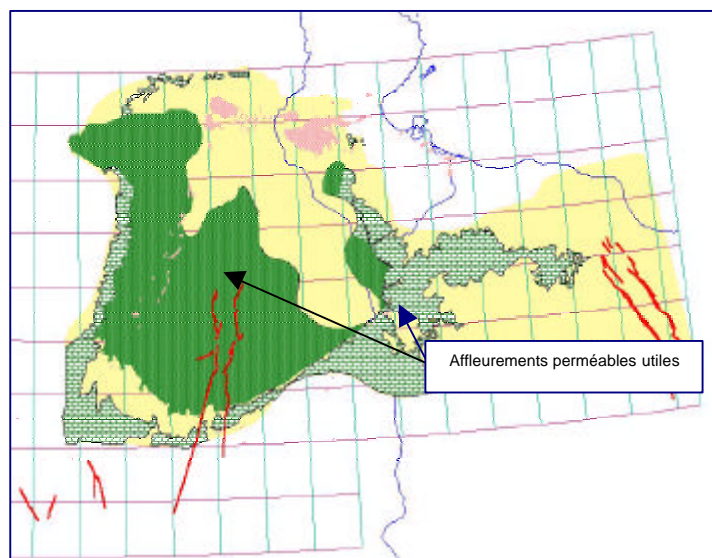


Fig. 1-8. b : Affleurements perméables utiles du CT



⁸ Y.Nazoumou (2002)

III- BASE DE DONNEES ET SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

Le projet SASS s'est fixé comme objectif d'élaborer une base de données commune qui permette l'intégration et la mise en cohérence de toutes les informations recensées, mais également le recueil, l'intégration et la mise à jour de données nouvelles. Ceci nécessitait que les bases de données nationales soient adaptées et homogénéisées, ce qui impliquait :

- a) des structures de données et une codification homogènes ;
- b) l'Interfaçage avec un système d'information géographique ;
- c) l'Elaboration d'un module de liaison avec le modèle numérique.

La base de données rassemble toutes les informations existant sur la zone du SASS dans une structure relationnelle facile d'accès et autorisant les traitements envisagés par l'étude. Un premier diagnostic a permis de constater que les pays avaient lancé chacun pour sa part des chantiers d'amélioration ou de refonte de leur système d'information pour regrouper les données disparates et mettre en place des outils de traitement automatique des données. Il y avait donc bien un besoin de structuration des données dont le projet SASS devait tenir compte. Il fallait, à partir de l'existant, confectionner une architecture qui couvre les besoins du SASS et qui soit en conformité avec les objectifs de chacun des trois pays dans ce domaine. La structure de la base envisagée pour le SASS va représenter un noyau commun issu des trois BD.

Sur le plan des contenus, la situation était plus complexe : les fichiers inventoriés présentaient de nombreuses hétérogénéités du fait de la diversité des outils et des procédures de collecte. La raison principale est que les données recueillies pour les traitements de modélisation étaient généralement considérées comme dissociées de la base de données : les études de modélisation ne puisaient pas l'information dans des structures relationnelles. En ce sens, on peut considérer que le SASS a été un projet innovant.

Sur le plan organisationnel, un mécanisme de mise à jour des données aux différents échelons d'intervention (services régionaux, sièges des administrations, bureau du SASS) était à mettre en place. Ce dispositif, basé sur des procédures formalisées et une répartition des tâches entre l'équipe du SASS et celles des pays, constituait une étape importante pour la mise en œuvre future d'une cellule de gestion concertée à l'échelle du bassin.

Trois niveaux de traitement ont été définis :

- a) **les services décentralisés**, chargés de contrôler les données existantes, de procéder à la collecte de données complémentaires, de recueillir et saisir des informations nouvelles ;
- b) **Les services nationaux** : qui administrent la base de données de la zone du SASS et veillent à la cohérence d'ensemble des informations ;
- c) **L'équipe du SASS** : qui assure la mise en cohésion des données issues des trois pays et les traitements sur l'ensemble du bassin, et garantit in fine la mise en place d'une base de données commune au niveau du SASS (qui pourra devenir la future BD de la structure de gestion concertée),

Sur le plan technique, les outils hardware et software ont été définis en fonction de plusieurs critères :

- a) objectifs et exigences du projet SASS,
- b) tendances technologiques du moment,
- c) maîtrise des experts nationaux,
- d) compatibilité avec les équipements et logiciels existants au sein des pays. Une solution simple a été adoptée pour permettre une maîtrise parfaite de la part des experts

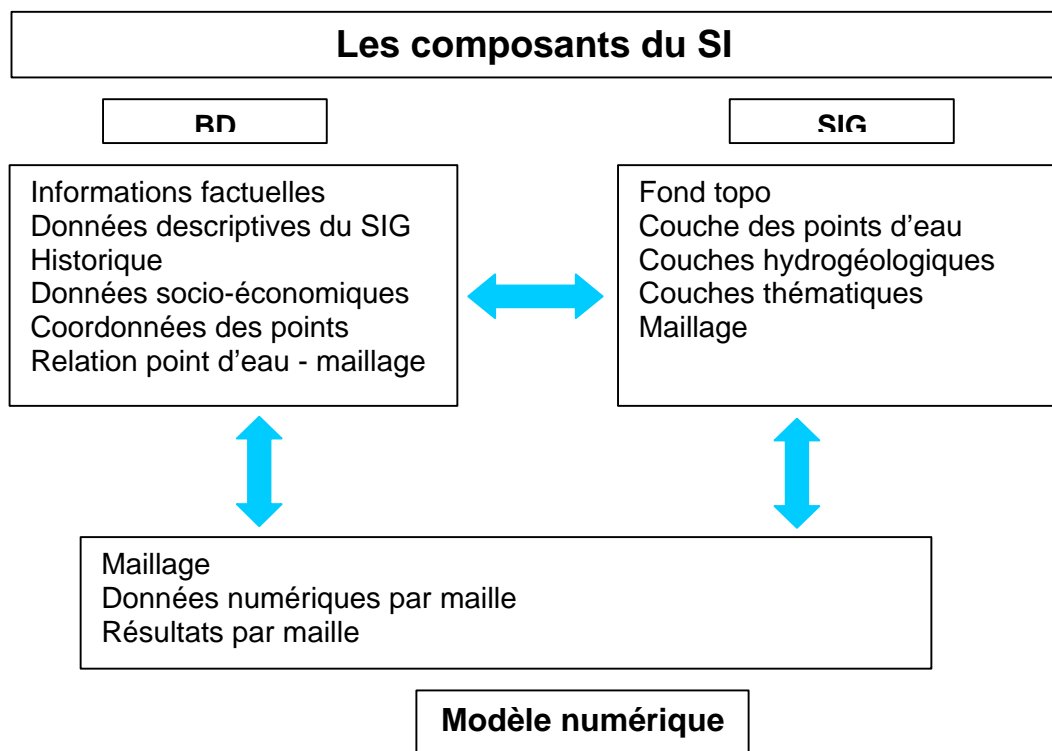
nationaux et par l'équipe permanente du SASS. La seule exigence était que cette solution fût apte à prendre en charge les besoins du projet et évoluer en cas de nécessité. Cette solution comporte :

- le SGBD « ACCESS » déjà largement répandu au sein des trois administrations,
- le SIG « ARCVIEW » également très utilisé dans le domaine des ressources naturelles et bien interfacé avec ACCESS.

Conception et mise en œuvre du Système d'Information

Le Système d'Information comporte ainsi trois éléments principaux qui sont : la BD, le SIG et le modèle numérique. Le maillage du modèle, qui est en même temps une table de la BD et une couche du SIG, permet d'assurer ces liens, comme l'illustre le schéma **fig 1-9**.

Fig. 1-9 : les composants du SI



Les liens BD – SIG se traduisent par :

- l'intégration des données descriptives des couches géographiques dans la BD afin de pouvoir les utiliser dans les requêtes même en dehors du SIG. Les redondances sont évitées, l'information n'étant stockée qu'à un seul endroit. ;
- la création de couches SIG pour l'ensemble des données susceptibles d'être cartographiées ou de faire l'objet de requêtes spatiales : au moment de la conception de la BD, un inventaire de ces entités a été dressé (zone de prélèvement, aquifère, unités administratives, ...)

De ce fait, toute requête réalisée sur la BD peut, sans difficulté, faire l'objet d'une cartographie thématique.

La réalisation du système comporte donc les trois volets qui sont :

- une base de données commune intégrant également les données descriptives des entités spatiales ;

b) un SIG constitué de toutes les couches cartographiques nécessaires au projet dans un même système de projection ;

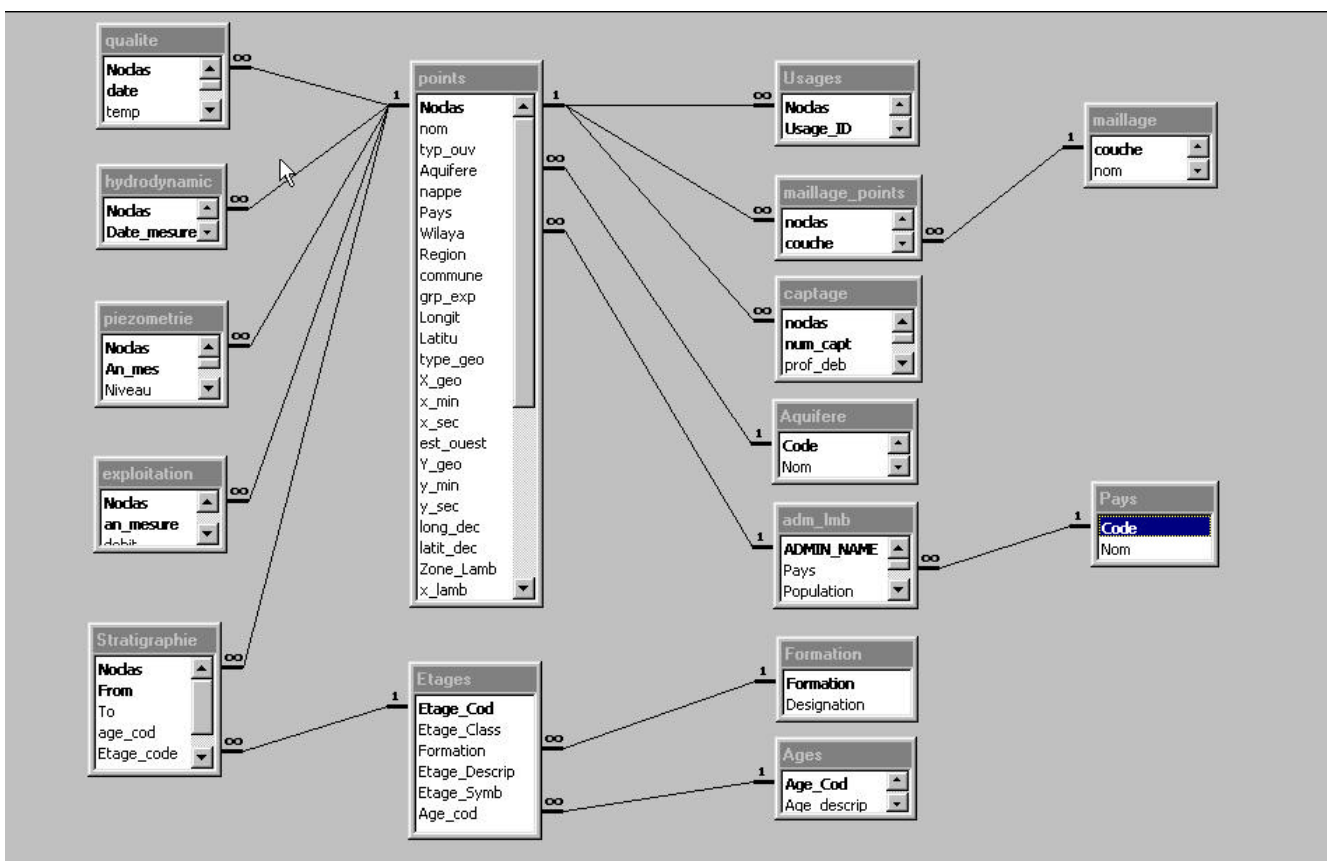
c) un ensemble de modules spécifiques permettant de réaliser les traitements prévus par le projet (préparation des données pour le modèle numérique, outils de visualisation et d'analyse de données, dispositifs de saisie et de contrôle).

L'unité de base étant le point d'eau, les informations gérées par la BD se regroupent en cinq catégories :

- Identification – localisation des points d'eau
- Unités spatiales (administratives et physiques)
- Historiques (exploitation, piézométrie, qualité), paramètres hydrauliques.
- Données géologiques et lithologiques
- Liaison avec le modèle numérique.

Il est possible d'incorporer d'autres informations. Il suffit pour cela de respecter les règles élémentaires des bases relationnelles et d'être familiarisé avec ACCESS 2000 pour réaliser les extensions nécessaires.

Fig. 1-10 : structure de la Base de Données



Quant aux couches du SIG élaboré dans le cadre du projet, elles sont dans le système de projection Lambert Sud aux caractéristiques suivantes :

- Ellipsoïde : Clarke 1880
- méridien central. : 2.7
- parallèle de réf. : 33.3

- latitude sud : 31.733928
- Latitude Nord : 36.866072
- False easting : 500135
- False northing : 300090

Il s'agit des principales couches suivantes :

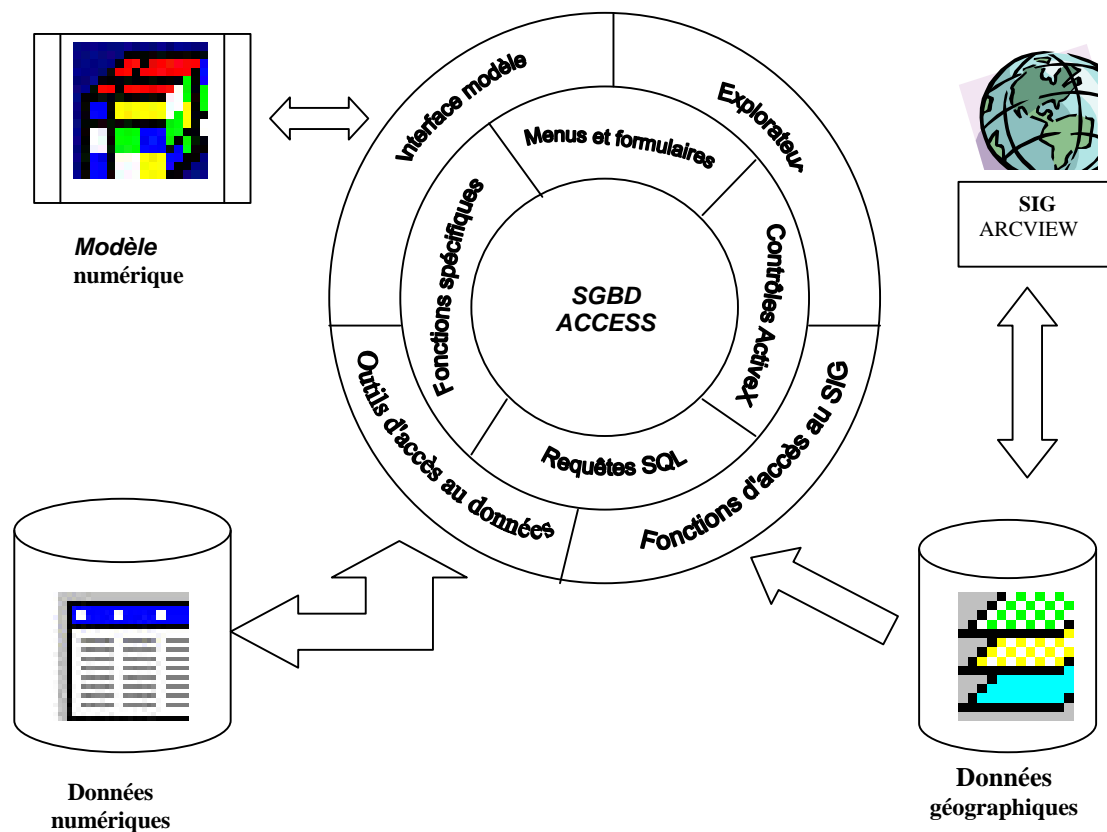
a) **Le fond topographique** [courbes de niveau équidistance 100 mètres, réseau hydrographique principal, agglomérations et localités importantes, voies de communication, limites administratives, limites de la zone d'étude et extension des aquifères] ;

b) **Les couches thématiques** [couvertures géologiques : affleurements des principales formations, failles, coupes litho-stratigraphiques ; paramètres hydrauliques : transmissivités, coefficients d'emmagasinement ; maillages du modèle].

Les points d'eau constituent une couche dynamique qui provient directement de la base de données. Cette organisation de l'information géographique combinée aux modules de traitements spatiaux permet de multiplier les possibilités de production de cartes thématiques : requêtes au sein de la base de données ou valeurs calculées par le modèle numérique (prélèvements par entité spatiale, piézométrie, rabattements, qualité de l'eau...)

Les outils développés dans l'environnement ACCESS ont été regroupés au sein d'un package unique baptisé « **SAGESSE** » (Système d'Aide à la Gestion des Eaux du Sahara Septentrional).

Fig. 1-11 : les éléments de « sagesse »



L'idée d'élaborer un tel package répond au souhait de mettre en place un dispositif permanent de recueil et de gestion des informations relatives au bassin du SASS : **SAGESSE** comporte tous les éléments de base pour constituer un véritable tableau de bord pour le suivi de l'exploitation des eaux du bassin. SAGESSE est conçu comme un explorateur qui affiche les informations recueillies durant le projet sous forme tabulaire ou géographique. Le basculement entre ces deux modes ainsi que le contrôle des couches SIG se fait sur simple click, sans quitter l'environnement ACCESS.

Autour des noyaux constitués par le SGBD, un certain nombre de développements ont été réalisés qui permettent : d'accéder aux fonctionnalités du SIG pour effectuer la plupart des opérations de visualisation cartographiques, D'explorer le contenu de la BD avec des clés d'entrée diverses (par aquifère, entité administrative, ...), de préparer les données nécessaires au modèle PM5, de réaliser les contrôles sur les données introduites et d'aider à leur analyse par le biais de requêtes statistiques et de synthèse.

Le projet SASS a réuni une masse considérable d'informations issues de diverses sources. Mais la diversité de ces sources entraîne fatalement des risques d'anomalies qu'il a fallu repérer. Une bonne partie des données et plus particulièrement les historiques de prélèvement et de piézométrie ont fait l'objet d'une analyse et d'un contrôle de validité.

Les Traitements préliminaires sur les données brutes ont notamment porté sur :

- a) le traitement des coordonnées ;
- b) l'identification unique des points d'eau ;
- c) les procédures d'analyse statistique....

A l'avenir, il y a lieu de consolider les acquis du projet et la dynamique qu'il a engendrée par les actions suivantes :

- a) poursuivre les adaptations entamées sur les BD nationales et développer les outils de gestion au niveau local ;
- b) mettre en place un dispositif de transmission des données pour réaliser les actualisations et la mise à jour de la base de données commune ;
- c) constituer une cellule de gestion et d'administration de la base de données et du SIG ;
- d) mettre au point des procédures et des guides standardisés pour la collecte, le contrôle et la validation des données.

IV- CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SASS

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 SASS⁹. 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 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'évaporeraient, 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 qui fera de l'«**Exutoire Tunisien**» l'unique sortie de la nappe dans le bassin central du SASS.

Les écoulements de la formation Kiklah vers le golfe de Syrte ont été décrits par GEFLI (1978)¹⁰, puis par P. PALLAS (1978)¹¹ 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)¹² 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. Enfin vers le Nord les écoulements du Trias l'emportent sur le Kiklah, lequel ne reçoit pas d'apport du Djebel Nefussa, et l'exutoire principal est attribué à la nappe de la Djefara, aussi bien en Libye qu'en Tunisie.

Dans le cadre du projet SASS, il a été nécessaire de construire une carte piézométrique d'ensemble, qui présente un schéma d'écoulements cohérent sur l'ensemble du bassin. Le résultat, **fig.1-12**, est une synthèse de toutes les précédentes 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.

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

⁹ 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.

¹⁰ GEFLI ; 1978 : Survey for the development of the Central Wadi Zone & Golf of Sirte ; Groundwater resources ; Final synthesis report ; Text & App 2&3- water analyses, hydrogeol cross sections, maps.- ref : AL-WR-205.

¹¹ P. PALLAS ;1980 :Water resource socialist people's arab libyan republic. In Salem & Busrewille : the geology of Libya ; Ac. Press ; vol II

¹² GEOMATH ; 1994 : Western Jamahirya System; Hydrogeological Modelling of aquifers & well fields; Final Report ; Text & pl. ref : AW-MI-579.

peut citer notamment Bel et Cuche (1969)¹³, le Projet ERESS (1972), A. Levassor (1975), A. Mamou (1976 et 1990), 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 (fig.1-12. b), qui pourra servir de référence pour décrire le système en régime permanent.

Fig. 1-12. a : carte piézométrique de référence du CI

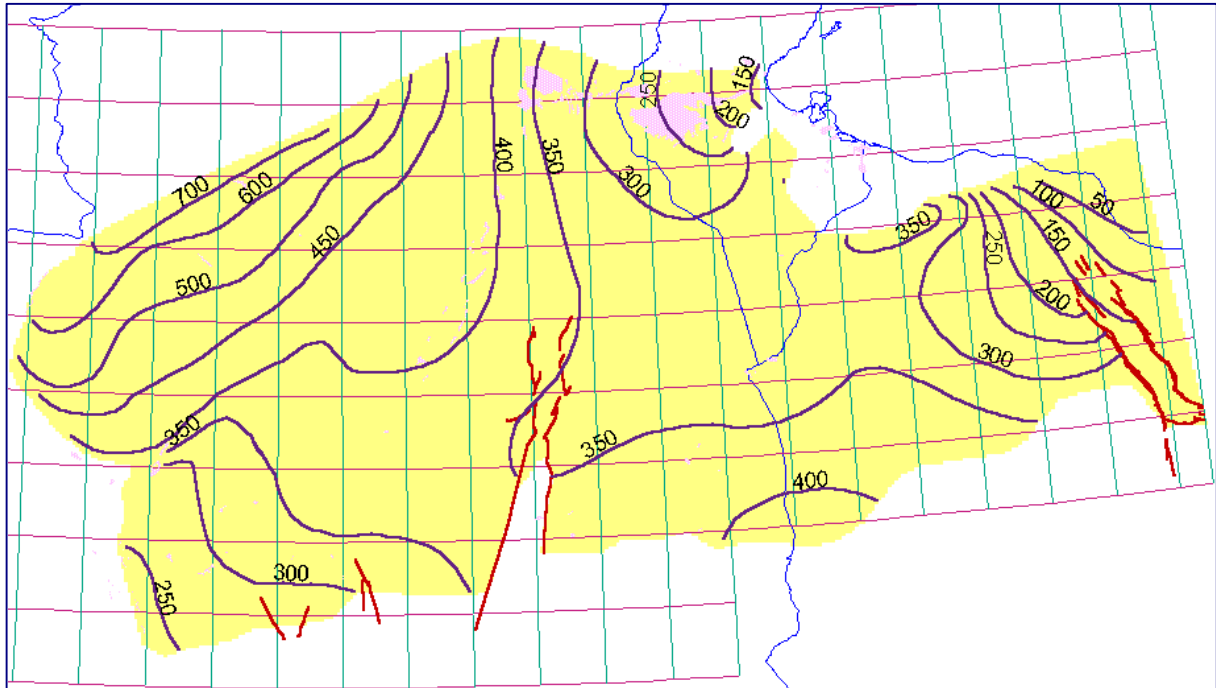
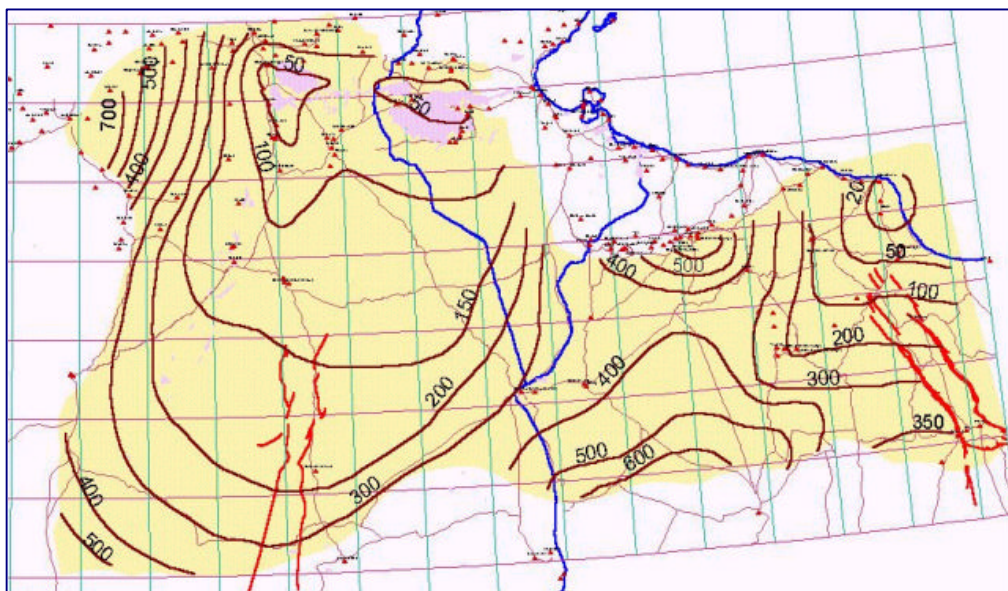


Fig. 1-12.b : carte piézométrique de référence du CT



¹³ Bel et Cuche ; 1969 : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal ; ERESS ; Ouargla.

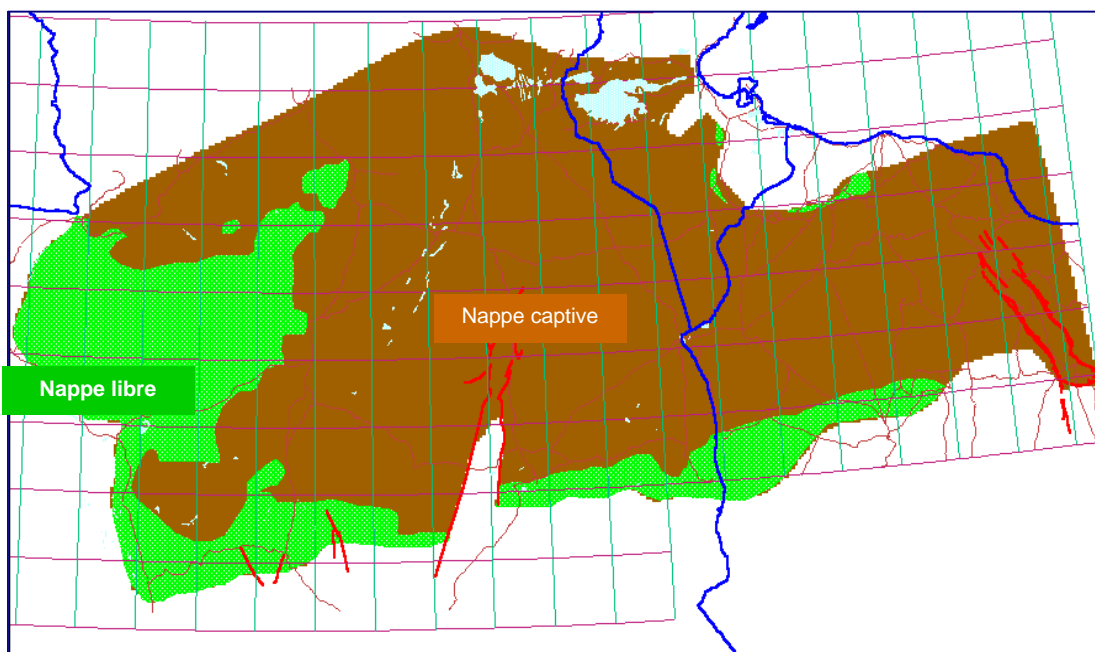
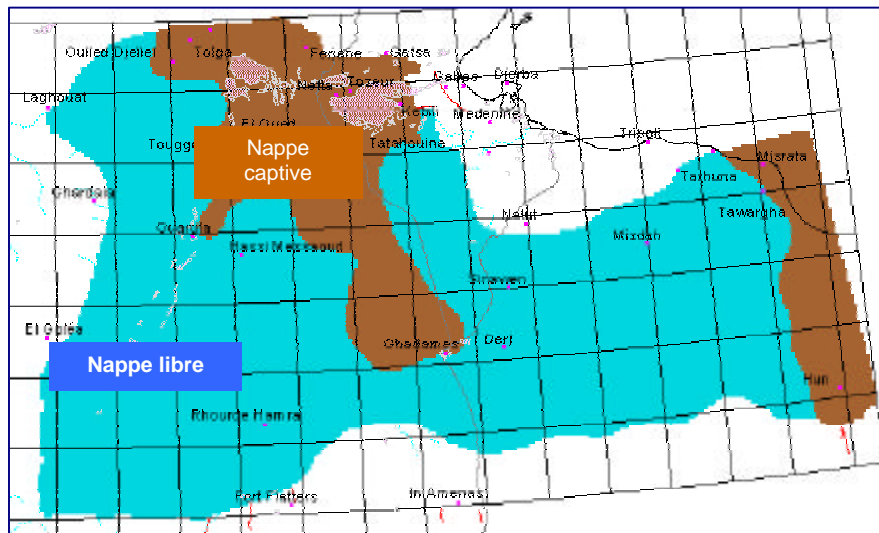
IV. 3- Répartition spatiale des Transmissivités

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. Ces informations se présentaient sur divers supports : Bases de Données nationales, archives, Rapports publiés et inédits. La série des Transmissivités du CI admet pour Moyenne la valeur $20.E-03 \text{ m}^2/\text{s}$ et pour Médiane $10.E-3 \text{ m}^2/\text{s}$. Quant à la série du CT, elle a une moyenne de $16.E-03 \text{ m}^2/\text{s}$ et une Médiane de $9.E-03 \text{ m}^2/\text{s}$. La répartition spatiale des Transmissivités respectivement dans le CI et le CT peut servir de repère pour le calage du Modèle en régime permanent.

IV. 4- Les Coefficients d'Emmagasinement

L'ensemble des informations disponibles sur les coefficients d'emmagasinement du CI et du CT figure dans le volume « Hydrogéologie » du rapport final du projet. 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 Piezométrique de référence (carte piezométrique « 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. 1-13 :
Extension de
la Zone à
surface libre
du Complexe
Terminal et
Continental
Intercalaire



V- EVOLUTION des PRELEVEMENTS et des NIVEAUX du SASS

V. 1- Historiques des prélèvements:

V. 1. 1. Diversité des Méthodologies et des Sources d'information

Dans la reconstitution de l'historique des prélèvements 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 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 :

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

Lorsqu'on connaît la grande difficulté qu'il y a à évaluer avec précision les débits de prélèvements sur une nappe comportant plusieurs milliers de puits, et la démultiplication de ces difficultés lorsqu'il s'agit de **reconstituer l'évolution** de ces débits au cours du temps, on doit s'attendre à rencontrer un certain nombre de difficultés 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. 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 pompages

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.

Par ailleurs, 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 disposons alors d'une estimation instantanée¹⁴ du débit d'exploitation. La difficulté consiste à reconstituer son évolution au cours du temps, que ce soit en rétrospective ou en prospective.

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 « sondes 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.

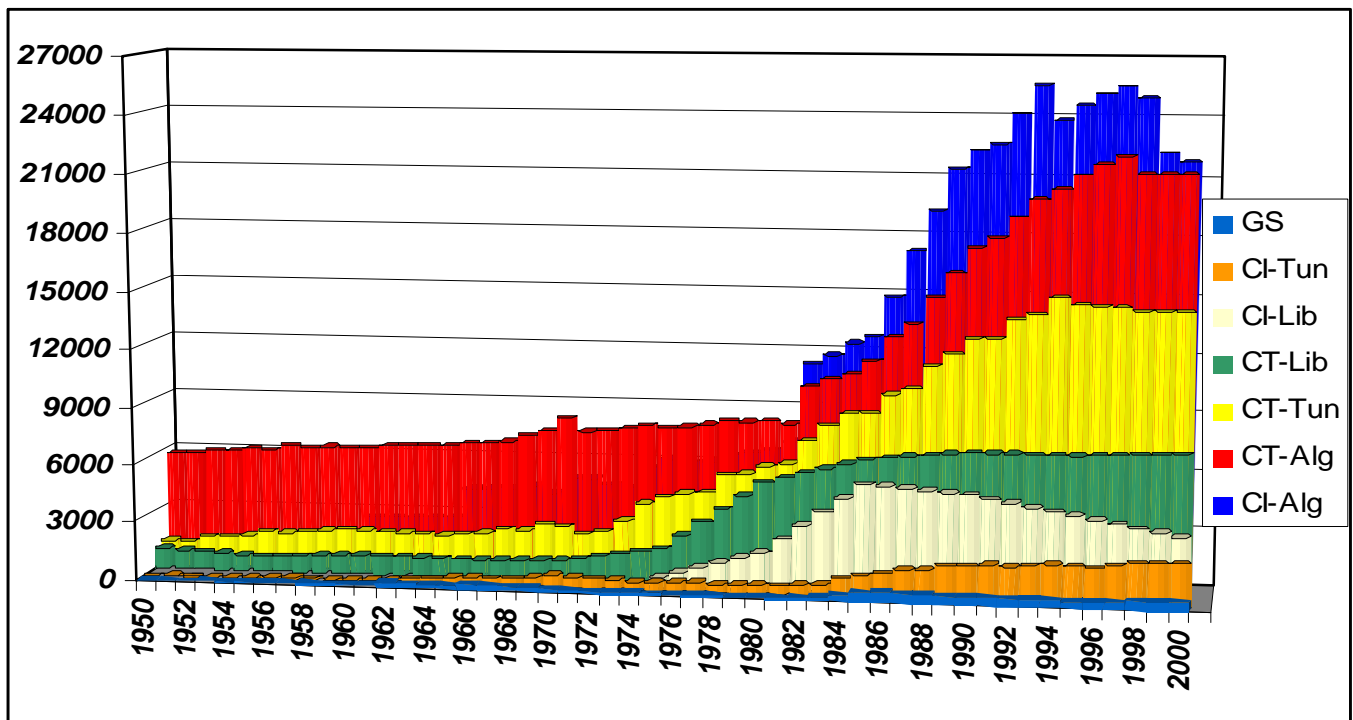
¹⁴ En terme de valeur annuelle

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 a priori insuffisant et induit une concentration artificielle des pompages, certainement préjudiciable à la représentativité des modèles à construire.

V. 1. 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 Données du SASS. L'évolution des prélèvements par forages, consignée par Aquifère et par pays sur la **fig. 1-14**, indique un peu partout des tendances de stabilisation au cours des années 50 à 70, puis une 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 GMRP¹⁵.

Fig. 1-14 : Evolution des Prélèvements sur forages, par aquifère¹⁶ et pays



V. 2- Historiques des Niveaux :

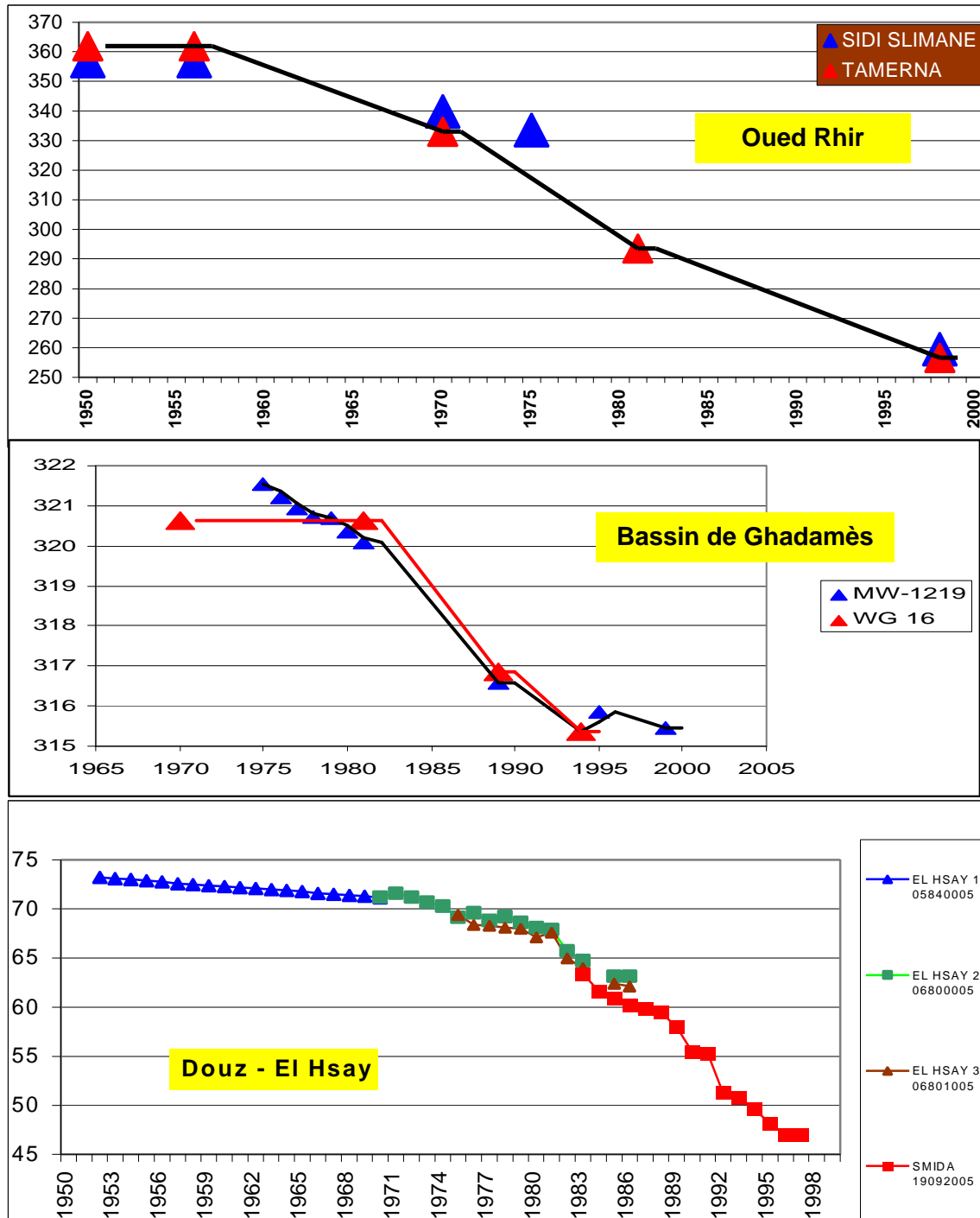
Les évolutions Piézométriques les plus significatives du CI sont regroupées par secteur géographique homogène et représentatif (**fig.1-15**) : Tamerna pour le bassin artésien à fortes pressions au sol, Kef N°27 pour les zones proches de la surface libre, Chott Fedjej pour la proximité de l'Exutoire Tunisien, le Djerid pour de très forts rabattements, le bassin de Ghadamès et le graben de Hun enfin.

¹⁵ Great Man Made River Project

¹⁶ l'aquifère des Grès Supérieurs [GS] sera introduit plus loin, dans la partie « calage du modèle ».

Au CT, la présentation des courbes d'évolution piézométriques se fait également par regroupements géographiques homogènes. Au CT Tunisie, on est confronté à une situation peu commune : une multitude de forages observés, un très grand nombre de mesures, mais peu de séries suffisamment longues pour autoriser une interprétation en connaissance de cause de l'évolution du système aquifère sur une période aussi longue, 50 ans, que celle qu'il serait légitime d'investiguer. Etant donnée la profusion des informations disponibles, il a été tenté, pour faciliter le calage transitoire des modèles, d'établir, pour chaque groupe géographique, une série-type, ou « courbe de synthèse », par agrégation des mesures disponibles sur l'ensemble du groupe (fig.1-15).

Fig. 1-15 : exemples d'évolution générale, de 1950 à 2000, des niveaux piézométriques au CI [Algérie, Libye] et au CT [Tunisie]



- **Problèmes liés aux mesures de niveau et de pression**

Les mesures de niveau piézométrique dans les forages sahariens se heurtent à de nombreuses difficultés : la première tient à **l'absence** de piézomètres spécifiquement voués aux mesures en raison de profondeurs importantes notamment pour le cas du Continental Intercalaire. Les mesures sont donc effectuées sur des forages en exploitation ce qui nécessite l'arrêt du pompage pendant de longues heures. Cette opération rencontre une grande réticence de la part des usagers. La seconde est liée aux **forages jaillissants** dont la fermeture n'est pas toujours possible, et qui ne sont souvent pas équipés de prise manométrique dédiée à la mesure. On doit également signaler la difficulté liée à la forte **température** des forages profonds qui nécessite des corrections pas toujours aisées sur le terrain.

- **Résultats en termes de Rabattements au Complexe Terminal**

En Algérie

Dans l'Oued Rhir nord, secteurs de Mghaier et Djemaa, on peut noter entre 1950 et 2000 un rabattement de l'ordre de 32m à Sidi Ahmed Tidjani, et 26m à Chemora. Ce rabattement se réduit au niveau de Ouargla – Hassi Messaoud [4 à 9m] et notamment à Gassi Touil [0.5m].

En Tunisie

La piézométrie du CT accuse une baisse continue, notamment dans la presqu'île de Kebili [23m] et le secteur de Douz [28m]. Dans le reste de la Nefzaoua, les rabattements sont plus faibles : 10-15m à Redjem Maatoug, 5-10m à Nouil-Zarcine. Dans le Djérid, les baisses sont de 14m à Castilia et Sebaa Biar, et 2 à 4m à Ghardaïa et Nefta.

En Libye

Les forages disposant de plusieurs mesures de niveau sont concentrés dans deux zones : la zone d'Al Jufrah où les projets agricoles de Ferjan et Hammam ont provoqué un rabattement de 35 à 40 m ; la zone côtière, entre Zliten et Tawurgha où plusieurs projets agricoles ont exploité les nappes du Crétacé supérieur depuis la fin des années 30. Au cours des années 70, de nouveaux forages ont été réalisés puis abandonnés par suite de l'augmentation de la salinité de l'eau. Les rabattements observés sont de l'ordre de 6m.

- **Rabattements au Continental intercalaire**

En Algérie

Dans la région de l'Oued Rhir, on a pu enregistrer d'importants rabattements notamment à Tamerna [100m]. A Ouargla, la baisse est de 66m. Elle est de 46m à Hassi Messaoud, 15m à Gassi Touil, 15m à Ghardaïa, 10m à El Golea.

En Tunisie

Dans le secteur de Chott Fedjej, proche de l'exutoire tunisien du CI, on a pu observer des rabattements totaux de l'ordre de 75m aux forages CF1, et de 50m à El Bhaier. Dans la Nefzaoua, le rabattement est de 19m à Kebili, et 32m à Faouar. Dans le Djerid, les rabattements ont été brusques et anormalement élevés, de l'ordre de 100m et plus à Tozeur, Nefta, plus atténués à El Hamma. ces derniers forages captent en réalité une formation aquifère particulière qui n'est pas en continuité avec le CI : la formation des Grès supérieurs dont l'extension est limitée.

En Libye

Dans le bassin du Wadi Sufajjin, les rabattements sont de 30 à 45m, avec un point singulier à 60m. Dans le Wadi Zamzam, les baisses enregistrées varient de 20 à 40m. Celles-ci sont de 46m à Bay el Kabir, et de 24m dans le secteur de Tawurgha. Dans le bassin de Ghadamès, les rabattements sont de l'ordre de 7 à 10m.

VI- CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUES du SASS

VI. 1- Qualité chimique des eaux

Les données sur les salinités et la composition chimique de l'eau sont inégalement réparties : dans le temps, entre aquifères, entre pays. Celles relatives à la salinité sont de loin plus nombreuses. Elles résultent d'opérations d'échantillonnage effectuées à la création de l'ouvrage ou à l'occasion d'inventaires ou de mesures périodiques. Celles relatives à la composition chimique sont bien moins nombreuses.

VI. 1. 1- Evolution des salinités du CT

Une certaine différenciation dans l'évolution de la minéralisation totale des eaux est possible entre la nappe des sables mio-pliocènes et celle des calcaires sénoniens.

Nappes des sables mio-pliocènes

Les points de mesures se cantonnent souvent dans les zones d'exploitation. Des phénomènes particuliers, comme l'effet de l'exploitation intensive concentrée et le retour des eaux d'irrigation, peuvent être à l'origine d'anomalies localisées. Entre Ouargla et l'Oued Rhir, on peut observer :

- a) une zone à moins de 2 g/l sur la moitié sud du Grand Erg oriental, correspondant probablement à l'aire d'alimentation actuelle à partir des eaux de pluie exceptionnelles s'infiltrant sur l'Erg,
- b) une autre zone à moins de 2 g/l sur les pentes du Mzab et la limite ouest de la nappe, au Nord de Ouargla,
- c) une zone à moins de 2.5 g/l sur le Draa Djérid correspondant à l'affleurement des sables aquifères. En dehors de ces zones, la minéralisation est généralement forte.

C'est particulièrement le cas à :

- a) dans la cuvette de Ouargla,
- b) Le long d'un axe Hassi Messaoud - Nord du Chott Melrhir. Cette dernière anomalie semble traduire l'effet d'une forte exploitation et d'un retour des eaux d'irrigation.

Nappe des calcaires

En Algérie, la nappe des calcaires sénoniens et éocènes est exploitée dans une zone qui s'étend de Biskra au Nord à Ouargla au Sud. En Tunisie, elle se cantonne à la Nefzaoua. En Libye, elle est présente dans la majeure partie d'El Hamada El Hamra, le long de Jabal Nafusa et dans la zone côtière. Bien que les données sur la minéralisation de cette nappe soient plus fragmentaires, on peut observer :

- a) une zone faiblement minéralisée sur toute la bordure ouest algérienne du bassin, correspondant aux zones d'alimentation de la dorsale du Mzab,
- b) une zone à eau douce, sur le flanc occidental du Dahar,
- c) une zone assez douce sur le flanc sud du Jabal Nafusah correspondant à une zone de recharge de la nappe,
- d) une zone à forte minéralisation sur la partie nord de Oued Rhir (Meghair-Djamaa),
- e) une zone à eau salée entre Ouargla et Touggourt, secteur d' El Hadjira.

L'eau du Complexe Terminal accuse, en Tunisie, dans la zone située à proximité des chotts, une légère augmentation de sa minéralisation, notamment dans les deux régions d'El Ouediane (Djérid) et de la Presqu'île de Kébili. Ceci peut résulter du fait que l'épaisseur du toit de la nappe sous le chott est ici réduite, réduisant par là même son étanchéité.

La salinité de l'eau du Complexe Terminal est largement influencée par les relations entre cette nappe et ses épontes. Avec l'accroissement de l'exploitation, cette salinité a évolué. Les deux principales sources potentielles d'augmentation sont les eaux des chotts et le retour à la nappe des eaux de drainage dans les zones où le toit est peu épais. L'éventuelle contamination à partir des eaux du Turonien plus salées, doit également être envisagée.

VI. 1. 2- Salinité des Eaux du Continental intercalaire

En Algérie

80% des points d'eau ont une salinité inférieure à 2 g/l ; et 92% une salinité inférieure à 3 g/l. Les eaux du bassin du Grand Erg Occidental ont des salinités inférieures à 1 g/l. Ceci n'est pas le cas dans le bassin du Grand Erg Oriental où les salinités oscillent entre 2 et 4 g/l. Les plus fortes valeurs sont observées dans la région d'El Borma.

En Tunisie

Les salinités du CI sont généralement plus élevées. Elles varient de 1,5 à 4 g/l, ce qui limite leur usage pour l'eau potable. Cette salinité s'explique par le fait que ces eaux sont situées dans la partie confinée de la nappe, en contact avec des formations encaissantes comprenant des éléments argileux et gypseux

En Libye

Les eaux de la formation Kiklah présentent des résidus secs inférieurs à 2. g/l, dûs au fait que la formation aquifère est propre, comprenant peu d'éléments argileux.

Fig. 1-16 : Carte des salinités en mg/l, respectivement du CI et du CT.

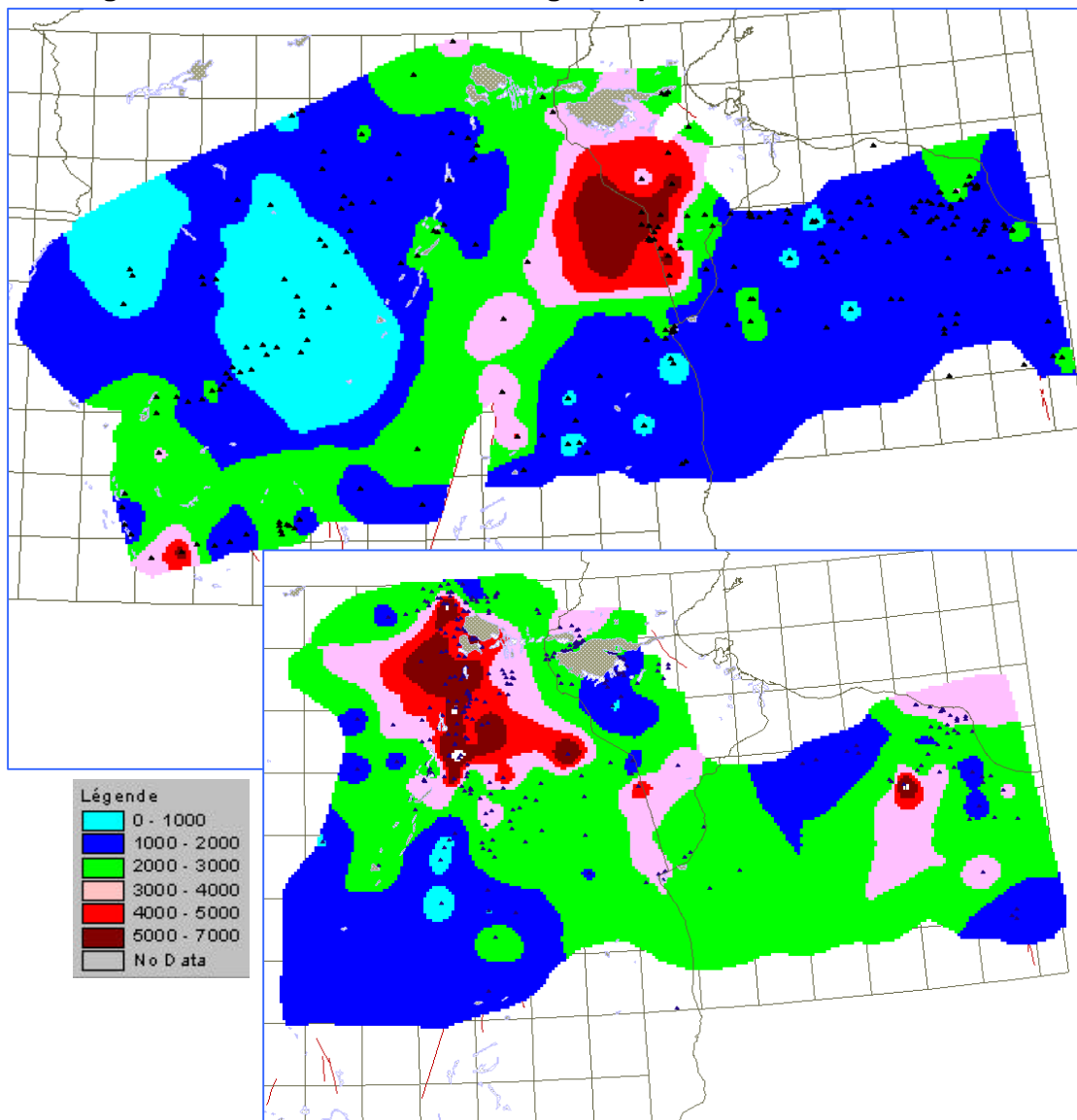


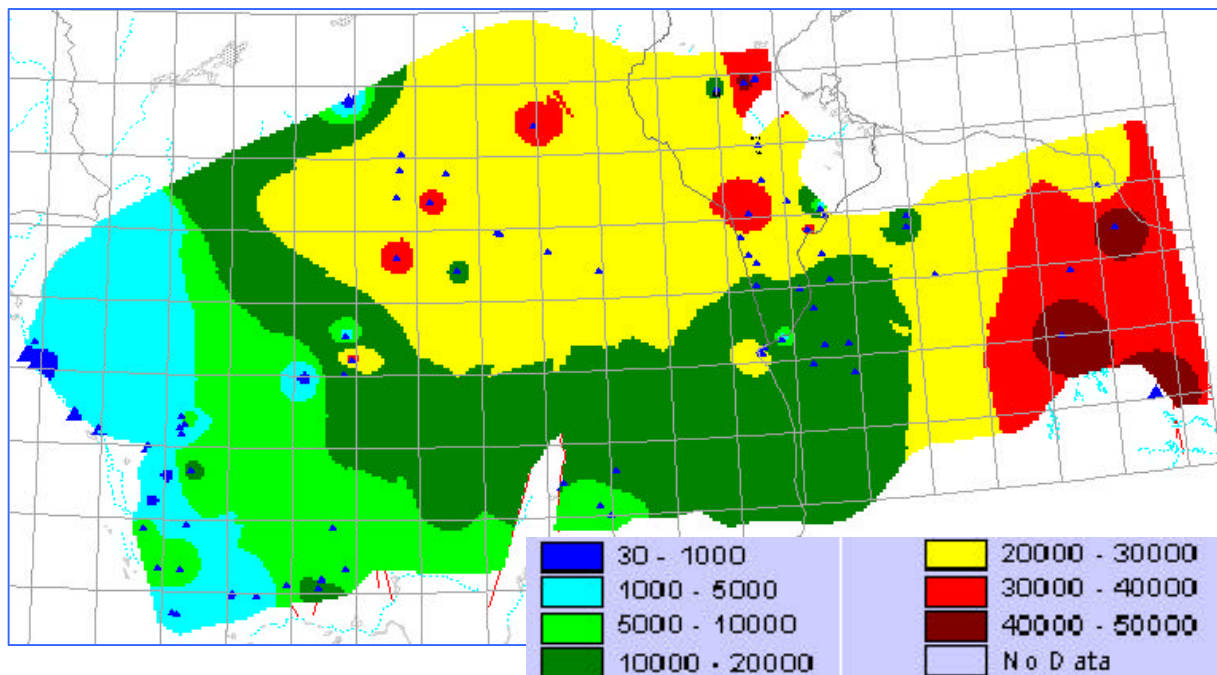
Fig. 1-17 : évolution de la salinité au forage Chott-fejej (CI), en mg/l



VI. 2- Intégration des données isotopiques dans le schéma hydrodynamique

Les données isotopiques concernant l'activité en carbone 14 ont été rassemblées, ainsi que les âges correspondants (Conrad et Fontes, 1972 ; Gonfiantini & al, 1976 ; BRLi,1997) . A partir des quelques 72 points d'eau du CI possédant des valeurs d'activité en C14, nous avons pu déterminer les âges radiométriques correspondants. Les âges 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.

Fig. 1-18 : Age (en années) des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14



Il a donc été possible de collecter une série de données bien réparties dans le domaine du SASS. Par interpolation sur un support cartographique, la **fig.1-18** représente la répartition des activités en C14 mesurées aux forages, traduite en ages-équivalents des eaux de la nappe du continental intercalaire.

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, en provenance de l'Atlas Saharien, du plateau du Tinrhert, et du Dahar.

Dans le Bassin Occidental, les eaux sont toutes jeunes (inf. à 10.000 ans). Tout au long de leur parcours, 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 au cours de leur cheminement. Cette observation est en parfaite 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. Mais 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, c'est tout à fait l'inverse que l'on observe 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 âges s'explique parfaitement : le CI est ici « rechargé », « renouvelé », non pas par des eaux actuelles mais par les eaux anciennes du Cambro-Ordovicien.

L'âge 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 âges très différents correspondant à divers spectres de transit. Il faut donc bien se garder de vouloir à tout prix faire correspondre l'âge radiométrique d'un échantillon (composé d'un mélange de particules fluides d'âges variés) avec l'âge 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, et par là, sur les perméabilités puis les transmissivités si l'on a pu avoir une bonne connaissance des gradients hydrauliques et des épaisseurs de l'aquifère.

DEUXIEME PARTIE :

**ELABORATION ET
EXPLOITATION DU MODELE
MATHEMATIQUE**

I- CONSTRUCTION DU MODELE DU SASS

I. 1- Cadre historique de la construction du modèle SASS

Dans le Sahara Algéro-Tunisien, les connaissances hydrogéologiques 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** ».
- L'«**Etude du Continental Intercalaire Saharien**»³, qui a notamment permis :
 - a) de proposer des cartes structurales des formations du CI toujours valables grâce à l'analyse de l'ensemble des forages pétroliers ;
 - b) 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 ;
 - c) de proposer un bilan plausible du CI, avec la construction, par Géopétrole⁴, du premier Modèle 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 en vigueur. 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 de l'ensemble des formations aquifères du SASS.
- La construction, par **IDROTECNECO**, du premier modèle régional⁶ représentant l'ensemble des couches aquifères qui nous intéressent : Kiklah, Upper Cretaceous, Cambro Ordovicien.
- L'étude **GEFLI**⁷ 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 drainage en mer dans le système, ensemble que l'on peut désigner par « **l'Exutoire Libyen de la nappe du Continental Intercalaire** ».

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, réalisé pour l'org. de mise en valeur sous-sol saharien.

⁵ In « The Geology of Libya ; Ac. Press ; vol. II ; Salem & Busrewille(ed)»,1980.

⁶ « Hydrogeological 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 & Golf of Sirte ; Groundwater resources, 1978.

Ces six contributions fondamentales ont par la suite été enrichies et complétées par d'importantes études et notamment les modèles de simulation construits au cours de ces trente dernières années. Parmi ces contributions, celle du **Projet ERESS**⁸ (1972) demeure incontestablement parmi les plus essentielles 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, de A.MAMOU¹² pour la revue critique et l'actualisation des données tunisiennes et de Bri-Ecole des Mines¹³. Pour ce qui est de la partie libyenne du réservoir, on peut considérer que les points de vue actualisés doivent être recherchés respectivement dans GEFLI (1978) pour la partie orientale et dans GEOMATH¹⁴ et BRL¹⁵ pour la partie centrale et la Hamada El Hamra proprement dite, ainsi que dans l'article de Pizzi et Sartori¹⁶.

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 ZAMMOURI¹⁷ (1988) et ZAMMOURI (1990)¹⁸.

I. 2- Structure générale du modèle

La structure adoptée au terme de l'élaboration du Modèle Conceptuel comprend quatre couches aquifères : Complexe Terminal, Turonien, Continental Intercalaire, et Cambro-Ordovicien (COD) ; séparées par trois aquitards [Sénonien lagunaire, Cénomaniens, Carbonifère]. Ce premier schéma, qui simplifie d'une manière parfois excessive certaines configurations géologiques limitrophes, comme la région Nord des Chotts ou le graben de Hun, a pu être sensiblement amélioré au cours du projet lors d'investigations particulières, notamment pour ce qui concerne le CI en Tunisie.

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 CI dans le Sud tunisien. Il a donc été décidé de reprendre l'ensemble des coupes de forages existantes et de procéder à une analyse^{19,20,21} actualisée des données hydrogéologiques de manière à pouvoir élaborer une nouvelle vision structurale des formations du CI.

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, répartis sur les diverses provinces géologiques classiquement identifiées dans la région. Les corrélations interprovinces établies au terme de l'étude comparative des faciès résultent en une échelle « Hydro-Stratigraphique » comportant, du haut vers le bas, six entités aquifères (**fig. 2-1**) séparées par des couches semi-perméables. Aux fins de

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 A.Mamou : caractéristiques, évaluation et gestion des ressources en eau du sud tunisien, th. Doct. Paris Sud, 1990

¹³ Modèles du CT et du CI, CDARS, 1998.

¹⁴ Western Jamahirya system hydrogeological modelling of aquifers and well fields; final report.

¹⁵ Ghadames Project water resources ; Mathematical Model, 1997.

¹⁶ Journal of Hydrology, 75 ; 1984.

¹⁷ M. Besbes, M. Zammouri; 1988 : Extension en Libye du modèle du CI algéro-tunisien ; int. Conf. Comput. methods and water resources, Rabat

¹⁸ M.Zammouri : Thèse de Doctorat, Fac.Sc.Tunis,1990.

¹⁹ B. Abidi : La nappe du Continental Intercalaire du Sud-Est tunisien ; Rapp.int. DGRE/OSS ; Déc. 2001

²⁰ 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

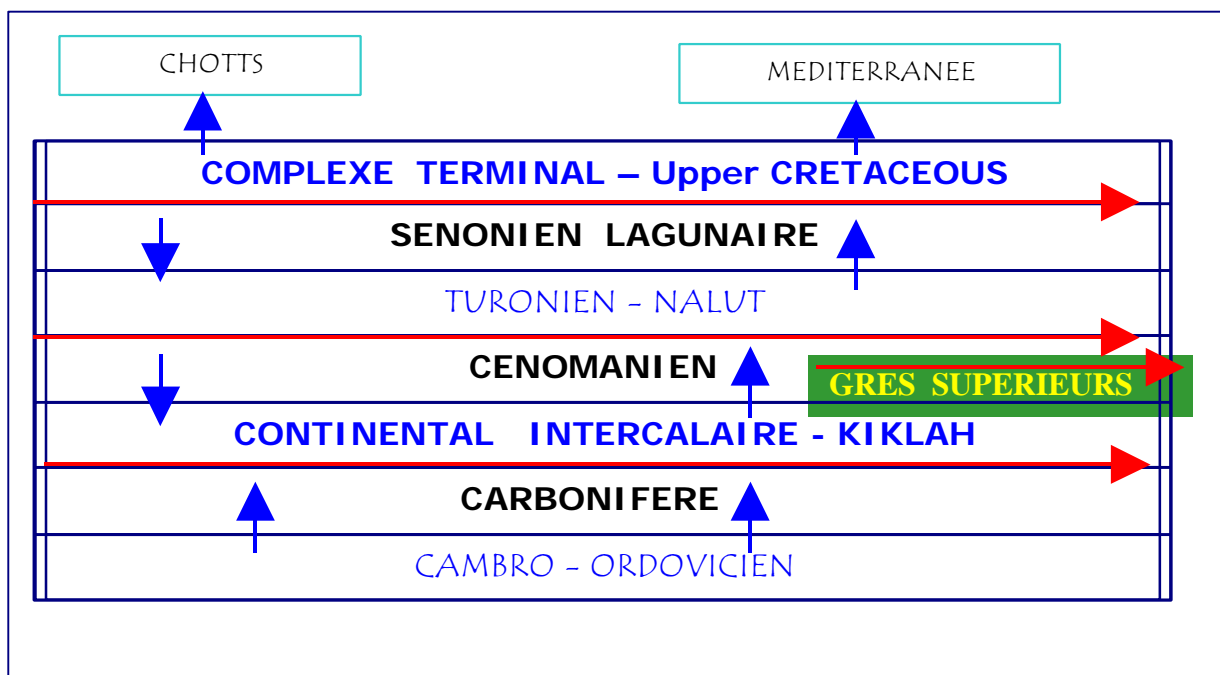
²¹ L. Moumni: La nappe des grès de Sidi Aich ou Continental Intercalaire du Djerid;Rapp.int.DGRE/OSS;Nov.2001

Modélisation, Il a été décidé de limiter la représentation du CI en Tunisie à une structure Bicouche comprenant :

- a) le Continental Intercalaire sensu-stricto, constitué au sud par le Wealdien et l'Albien, et au Nord par le regroupement de la formation Kbar el Haj avec les Grès du Chott et les Grès à Bois ;
- b) les Grès Supérieurs dont la singularité se justifie par un comportement piézométrique atypique sans relation avec le Continental Intercalaire.

Le nouveau schéma structural du Modèle du SASS (fig. 2-1) va donc comprendre une couche aquifère supplémentaire : l'aquifère des « Grès Supérieurs ». 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 considéré²² absent.

Fig. 2-1 : Schéma structural du Modèle du SASS



I. 3- Extension et délimitation des couches

L'extension des deux principales couches du modèle est présentée fig. 2.3

- **Pour ce qui concerne le Continental Intercalaire**

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

- a) du CI de l'ERESS ;
- b) du TRJLC (Trias-Jurassic-Lower Cretaceous) de GEOMATH ;
- c) 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. Par ailleurs, du fait de la concentration des zones à surface libre dans la région de l'Erg, cette dernière constitue le véritable

²² 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 (Franlab, 1972) 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, schéma auquel il a été renoncé au terme de l'analyse structurale fine du CI élaborée dans le sud tunisien.

« château d'eau du Continental Intercalaire ». Une telle extension doit permettre de simuler sur le modèle l'exploitation de ces réserves, même si, en raison des difficultés d'accès, ces régions sont encore peu reconnues.

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

- a) La limite Sud-Est est une limite naturelle d'extension des formations du Crétacé inférieur, qui sont ici en continuité avec l'aquifère cambro-ordovicien ;
- b) 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 ;
- c) 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.

- **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 CT 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.

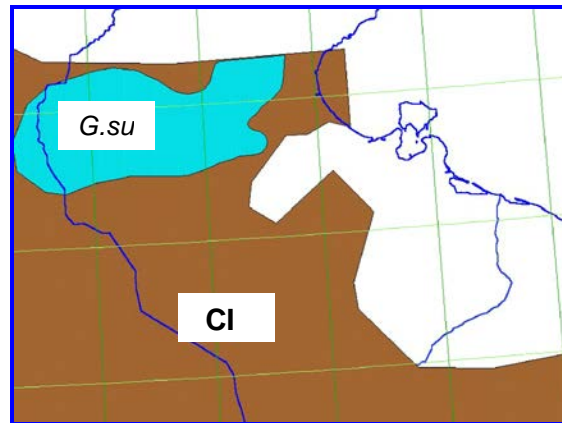
- **Pour ce qui concerne le Turonien**

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

- **Pour ce qui concerne les Grès Supérieurs**

Les limites du modèle sont conformes aux limites géologiques de la couche (**fig. 2-2**).

Fig. 2-2 : Limites respectives du CI et des Grès Supérieurs



- **Pour ce qui concerne le Cambro Ordovicien :**

La limite de cette couche 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.

I. 4- Discrétisation de l'espace et modèle mathématique

La grille du Modèle décrit un maillage carré de **12,5x12,5 Km**, représentant pour le Complexe Terminal 4295 mailles, pour le Turonien 4295 mailles, pour les Grès Supérieurs 109 mailles, pour le Continental Intercalaire 6639 mailles, pour le Cambro-Ordovicien 1185 mailles ; Soit un total de **16523 Mailles** représentant une superficie développée de près de 2580000 Km².

Quant aux couches semi perméables, elles sont représentées par les flux de drainance qui les traversent sous l'effet des différences de charges entre couches aquifères. Ceci correspond à une Modélisation quasi-tridimensionnelle fondée sur l'hypothèse du Multicouche : écoulements horizontaux dans les aquifères principaux, et verticaux dans les couches semi-perméables (aquitards). On démontre que cette hypothèse se trouve amplement vérifiée lorsque le contraste des perméabilités entre formations adjacentes (aquifère/aquitard) est important : un rapport de 10⁴ 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 Cénomaniens 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 :

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

$$q_H = K_v \frac{H_H - H_C}{e_H} \quad ; \quad q_B = K_v \frac{H_B - H_C}{e_B}$$

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

I. 5- Le logiciel de simulation

L'outil de simulation devait garantir que le modèle du SASS pût être facilement transportable entre les trois pays, ce qui impliquait une implantation sur PC et un système d'exploitation accessible. Le meilleur outil aujourd'hui disponible et remplissant ces conditions est le logiciel Processing Modflow, PMWIN, élaboré par W. H. Chiang et W. Kinzelbach²³. 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. 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 présente certains inconvénients à la saisie des historiques de prélèvements lorsque, précisément comme c'est le cas du SASS, ces historiques sont très longs et affectés non à des mailles mais à des milliers de forages. L'équipe du projet a dû développer un programme d'interfaçage entre la base de données du SASS et PMWIN pour automatiser l'introduction des historiques de débits. Quant à la présentation graphique des résultats, elle peut être enregistrée sous format DXF, HPGL ou BMP. Toutefois, il était préférable que les cartes de valeurs (piézométrie, rabattements, paramètres hydrauliques,...) puissent être enregistrées sous forme de fichiers ASCII ou de fichiers directement accessibles sous SURFER ou ARCVIEW pour une présentation personnalisée des résultats. Une telle option a également été introduite pour la présentation des séries chronologiques.

I. 6- Les conditions aux limites du modèle

Les 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 piézométriques 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 satisfaisante. 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 piézométrique de référence²⁴.

- **Limite Ouest**

Elle correspond à la vallée de la Saoura, représentée par des drains sur le Modèle.

²³ Wen Hsing CHIANG & Wolfgang KINZELBACH : 3-D Groundwater Modeling with PMWIN, Springer-Verlag, 2001

²⁴ Il est vrai que la connaissance des niveaux piézométriques 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 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 calage du modèle. 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 Tinrhert, les apports par les affleurements de l'Adrar Ben Drich, sur une longueur d'environ 400 km à cheval sur la frontière, sont déduits de conditions de potentiels dont les valeurs sont tirées de la carte piézométrique. Plus à l'Est et jusqu'au graben de Hun, le CI se termine par une limite imperméable, sachant que sur une grande partie de cette région, le contact avec le Cambro-Ordovicien va déterminer d'importants échanges verticaux.

- **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.

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. La région est marquée par l'occurrence d'importants ruissellements des Aurès et du bassin de Gafsa, mais la contribution 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 : Atlas Saharien**

Elle correspond à l'extension des formations Mio-Pliocènes du Bassin Central, qui surmontent l'Eocène moyen imperméable. Cette limite est représentée par des potentiels imposés.

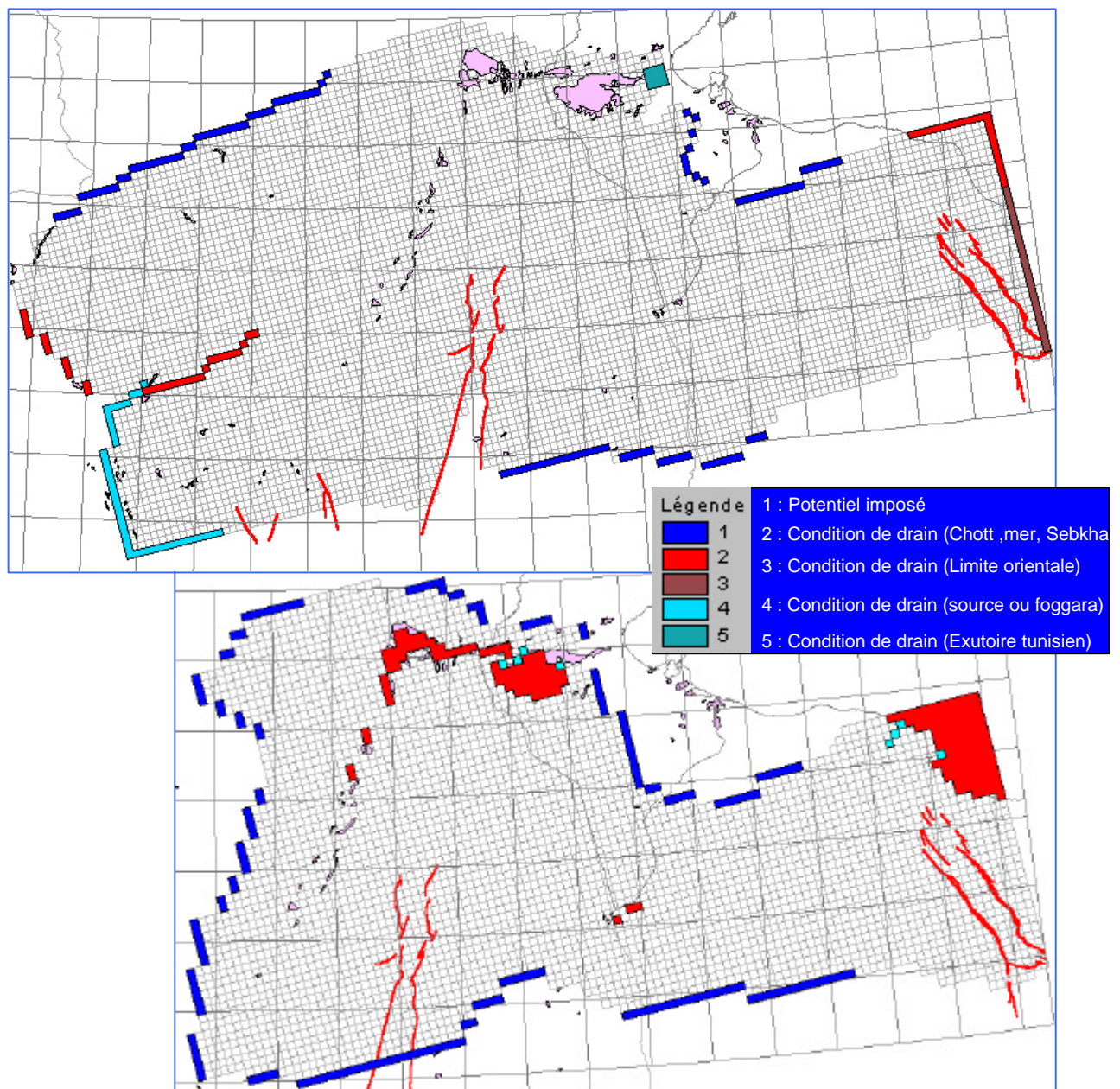
- **Limite Ouest et Sud-Ouest**

Elle correspond au tracé de la dorsale du Mزاب, 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 Moi-Pliocène. Elle est représentée par des conditions de potentiel imposé.

- **Limite Sud-Algérie**

Entre les parallèles 29° et 28°, et de la dorsale du Mزاب à la frontière Libyenne, elle correspond à la limite d'extension sud du Sénonien carbonaté. Ces formations s'étendent sur les plateaux du Tademait et du Tinrhert, 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.

Fig. 2-3 : Conditions aux limites du Modèle adoptées en Régime Permanent



- **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 : Elle est représentée par une condition de flux nul.
- Limites Est Tunisie et Nord Libye ; Dahar et Dj. Nefussa

Faute de 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

I. 7- Les paramètres hydrauliques initiaux

Les cartes de Transmissivités qui ont servi à démarrer le calage du modèle ont été établies essentiellement à partir des résultats des modélisations antérieures. Il s'agit :

- a) des deux modèles monocouches du CT et du CI (ERESS) ;
- b) du modèle multicouche GEOMATH (1994) ;
- c) du modèle du CI algéro-tunisien (BRL-Ecole des Mines, 1998) ;
- d) des trois modèles monocouches de Mizda, Nalut et Kiklah, réalisés en 1978 par GEFLI.

Cette situation sera enrichie par l'ensemble des valeurs de Transmissivités récoltées dans les trois pays au cours du projet SASS.

Quant aux aquitards considérés, ce sont de haut en bas :

- Le Sénonien lagunaire, qui s'intercale entre les aquifères du CT et du Turonien, et dont l'épaisseur moyenne est de 150m en Algérie-Tunisie et de 30m en Libye
- Le Cénomaniens, 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 se fondant sur les informations acquises par la base de données géologiques du SASS et l'analyse structurale qu'elles permettent désormais de réaliser à peu de frais, il est possible de tracer la carte de l'épaisseur des obstacles qui s'opposent à la circulation de flux entre le CI et le CT. Cette épaisseur cumulée dépasse 1000m dans le fossé du Mya et le sillon des Chotts, et sa valeur moyenne est de l'ordre de 500 m. En vertu des différences de charge entre CI et CT, [en moyenne 200 m, soit un gradient moyen de 0.4], d'un flux de drainance CI→CT de l'ordre de 1 m³/s, d'une surface de drainance potentielle de l'ordre de 500.000 km² la perméabilité verticale équivalente moyenne pourrait être de l'ordre de 5. 10⁻¹² m/s.

II- LE CALAGE DU MODELE DU SASS

II. 1- Les principales étapes du calage

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 variations de niveaux observées. Les paramètres à ajuster au cours de cette deuxième phase sont les coefficients d'emménagement.

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.

En effet, 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 Juin 2001 », trois modifications importantes ont été apportées au modèle.

- **Le modèle de Juin 2001**

Il comprend trois aquifères (CT, Turonien, CI), séparés par deux aquitards (Sénonien lagunaire et Cénomaniens). Le modèle comporte deux couches à potentiel imposé en haut et en bas, représentant respectivement : la région des Chotts Algéro-Tunisiens et le Golfe de Syrte (en haut), et l'aquifère du Cambro-Ordovicien (en bas).

Les paramètres (transmissivité et emménagement) du CT et du CI sont pratiquement les mêmes que ceux utilisés dans les modèles précédents (ERESS, GEOMATH et GEFLI). Les paramètres du Turonien et la conductivité hydraulique des aquitards ont été déterminés par calage du modèle. Le calage en permanent est satisfaisant : charges hydrauliques et bilan calculés sont en 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 (Djerid et Chott Fedjej). La structure du CI dans le Sud Tunisien a dû être entièrement revue.

- **Impact des modifications de débits en Algérie**

Au terme d'une série de vérifications, le total des prélèvements 1998 en Algérie, toutes nappes confondues, a dû être ramené de 52, m³/s à 45.9 m³/s, soit un abattement de 15%.

Sans toucher à la structure ni aux paramètres du modèle, les historiques de débits nouvellement acquis ont été simulés sur le modèle de Juin 2001. Le résultat obtenu, en termes de rabattements, comparés à ceux « de Juin 2001 » et en termes de bilans 2000, a montré l'ampleur des modifications induites par ces changements de pompages, indiquant la nécessité d'une révision du modèle un peu partout en Algérie, révision mise en œuvre avec la nouvelle représentation de l'Exutoire tunisien.

- **Nouvelle configuration structurale du CI en Tunisie**

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 ». Dans la nouvelle configuration, le mole du Melaab a été exclu de l'aquifère. Quelques calculs préliminaires montrent que le débit calculé en régime permanent de l'exutoire Tunisien ne peut dépasser 1,8 m³/s (alors que le débit généralement admis de cet exutoire est de 3,6 m³/s). 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 Juin 2001.

- **Le Modèle du 20 Août 2001**

Pour pouvoir restituer l'augmentation du débit de l'exutoire, il a fallu 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 l'Erg Oriental. L'autre modification notable concerne les coefficients de Drainance : 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.

- **Le Modèle du 10 Septembre 2001**

Cette nouvelle version du modèle se distingue par :

- 1) Une modification des conditions sur les Chotts algéro-tunisiens : d'une couche de mailles à potentiels imposés les Chotts passent à une condition de Drain à débit – limite nul, qui interdit toute réalimentation du CT par les Chotts ;
- 2) Un réajustement du champ des Transmissivités du CI: 20 à 25% plus élevées que celles du 20 Août ;
- 3) Une réévaluation du débit calculé de l'Exutoire Tunisien à 3.3m³/s ;
- 4) Une réduction substantielle, dans le CT, des coefficients d'emmagasinement de surface libre.

- **Modèle du 23 Septembre 2001, Retour sur les Transmissivités**

On remplace les transmissivités du CI du 10 Septembre par celles du Modèle de Juin 2001 : le débit de l'exutoire Tunisien n'est plus que 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 Tunisien, qui a été l'objet de nombreuses estimations mais demeure entaché d'incertitudes.

- **Le Modèle du 30 Septembre 2001**

Il dérive du Modèle du 23 Septembre en doublant les transmissivités du CI dans la région de Biskra, El Oued, Nefzaoua. Les résultats du calage sont d'excellente qualité et le débit permanent de l'exutoire Tunisien est de 3,1 m³/s.

Le Modèle du 30 Septembre constitue une synthèse, un compromis, entre deux options du calage : plausibilité géologique du champ des transmissivités VS débit de l'Exutoire Tunisien. Ce Modèle du 30 Septembre peut être considéré comme un état final acceptable du Modèle SASS. C'est le mieux indiqué pour la réalisation des simulations prévisionnelles de développement du SASS.

- **Reprise du Modèle dans le Bassin Oriental**

La prise en compte de nouvelles données acquises en Libye, au premier semestre 2002, a nécessité une nouvelle actualisation du Modèle. 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.

II. 2- Calage du modèle en régime permanent

- **Définition d'un Etat de Référence**

C'est la période datée 1950, assimilée à un état d'équilibre, 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.1-12.a et 1-12.b).

- **Critères de référence pour le calage en Régime Permanent**

Il s'agit de reconstituer aussi fidèlement que possible :

- les cartes piézométriques d'ensemble construites dans le CI et le CT, pour 1950.
- les valeurs piézométriques ponctuelles observées ou estimées autour de cette date.
- le débit des résurgences naturelles jaugé à cette époque : sources du Djérid et Nefzaoua, Ain Tawergha et Wadi Kaam pour le CT ; foggaras pour le CI.

- **Evaluation du Calage en Régime Permanent**

- **Reconstitution des Cartes Piezometriques du CI et du CT**

La superposition des courbes isopiézométriques calculées et observées permet 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 très grande rigueur, leur forme traduit toute l'expérience et le savoir-faire de l'hydrogéologue qui les a tracées. A ce titre, leur restitution traduit *l'aptitude du modèle à épouser le point de vue de l'hydrogéologue* (cf. fig.2-4.a et 2-4.b)

Fig. 2-4. a : CI – Régime Permanent – Courbes piezometriques calculées (en mauve) et courbes de référence tracées (en bleu)

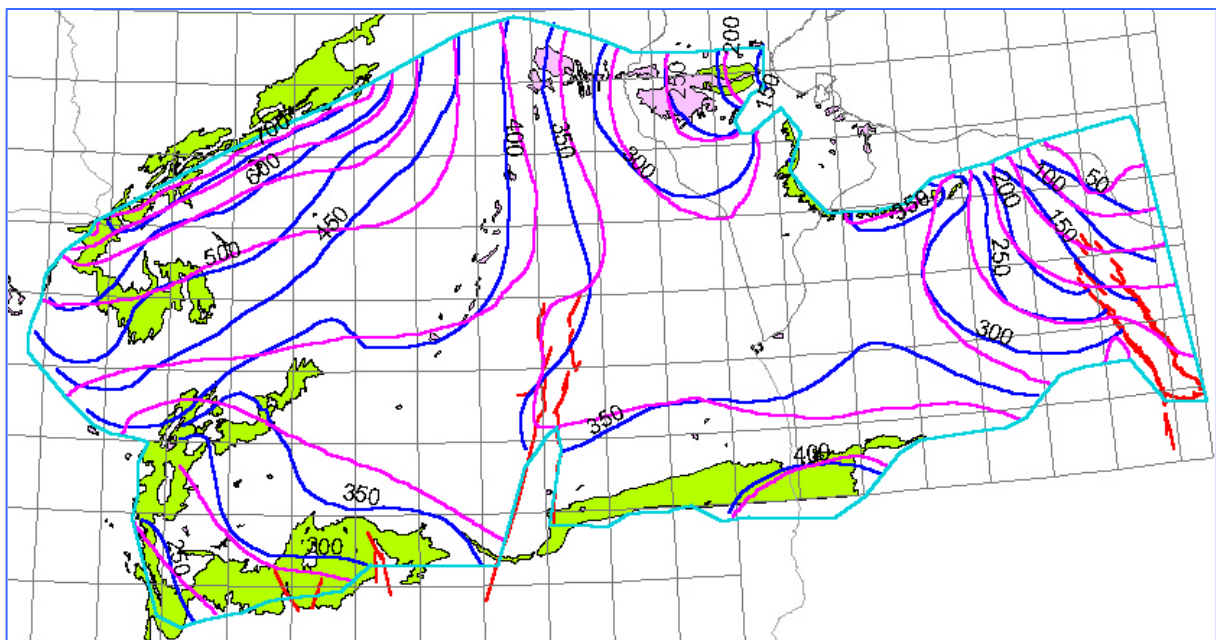
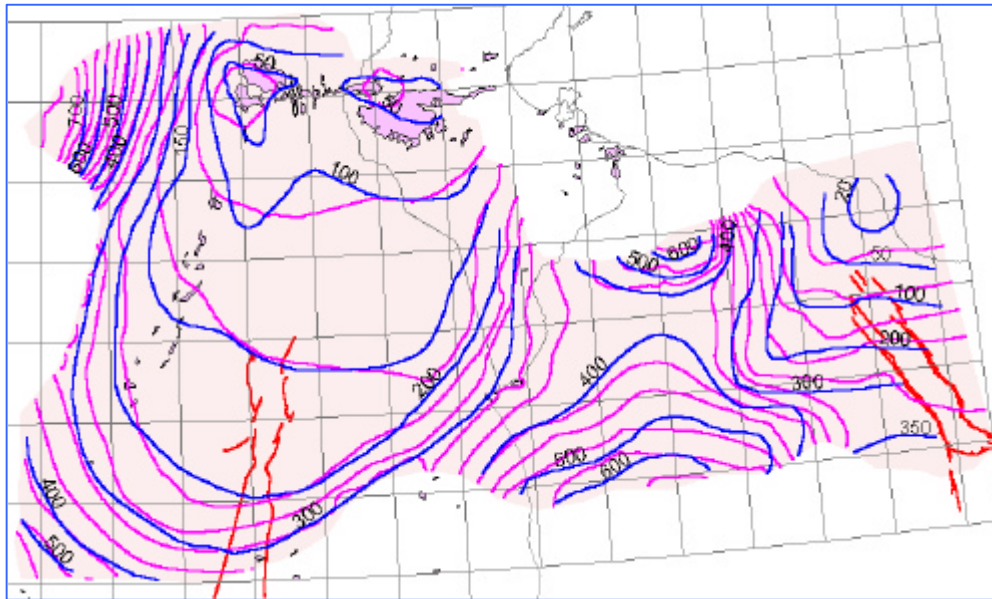


Fig. 2-4. b : CT – Régime Permanent – Courbes piezométriques calculées (en mauve) et courbes de référence tracées (en bleu)



- **Résultats du Calage en Régime Permanent**

- **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 On peut remarquer que la recharge est respectivement de l'ordre de 18m³/s et 10. m³/s pour les nappes du CT et du CI.

Tableau 2-1 – Bilan du SASS calculé en 1950 (m³/s)

	CT	CI	Grès Sup	SASS
Entrées m³/s				
Alimentation totale	18,2	9,4		27,6
Apport Cambro-Ordovicien		2		2
Drainance Haut	-	0,5		[0,5]**
Drainance Bas	5,4	-	0,4	[5,8]**
Total	23,6	11,9	0,41	35,9
Sorties m³/s				
Chotts & Sebhas				
Tunisie	5,95	-	0,26	6,2
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	-		2
Algérie	-	3,6		3,6
Libye	2,3	-		2,3
Pompages	7,5	0,5		8
Drainance Haut	-	3,7	0,15	[3,85]**
Drainance Bas	2,4	0		[2,4]**
Total	23,6	11,9	0,41	35,9

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

II. 3- Calage du modèle en régime transitoire

i. Conditions initiales et aux limites et Historique 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. La période historique 1950-2000 a été adoptée comme période de référence du calage.

ii. Les Paramètres structuraux d'initialisation du calage :

La répartition des valeurs initiales des coefficients d'emmagasinement est déterminée 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 piézométrique. 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** : $S=10^{-3}$ en Libye, et en moyenne à 2×10^{-3} ailleurs ; **Nappe du CI** : entre 4×10^{-4} dans la région Nord des chotts et 10^{-3} dans le secteur méridional, 10^{-4} en Libye sauf dans le secteur de Ghadamès où il prend une valeur de 10^{-3} ; **Turonien** : 1.5×10^{-4} pour l'ensemble du domaine.

iii. Les critères du calage en Transitoire :

C'est d'abord la bonne restitution des séries historiques des rabattements de référence. Il s'agit également de restituer les séries de débits aux exutoires : Sources du Djerid et Nefzaoua, Ain Tawargha et Kaam, débits des foggaras.

• Connaissance des Historiques de Prélèvements

- i. **Exploitation des Forages en Algérie, Tunisie et en Libye** : La base de données du SASS rend compte des historiques individuels par forage. 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 une concentration artificielle des pompages (et des rabattements en conséquence) dans des points singuliers.
- ii. **Débits des Sources et Foggaras** : Le **tableau 2-2** présente l'évolution du débit des sources du Djérid et de Nefzaoua en Tunisie, et celui de Ain Tawargha en Libye. Quant aux évolutions des débits des foggaras, les derniers inventaires réalisés par l'ANRH en 1998 indiquent des diminutions significatives (25%) du débit des foggaras.

Tableau 2-2 – Débit des Sources Observé 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

• Les chroniques de Niveaux Piézoélectriques de référence

La carte de situation des points de contrôle retenus pour l'évaluation du calage est présentée **fig. 2-6**. Sur la **fig. 2-5** sont reportées des courbes de rabattements calculés et observés en un certain nombre de puits-témoins significatifs.

Fig. 2-5 : Rabattements observés et calculés aux puits-témoins

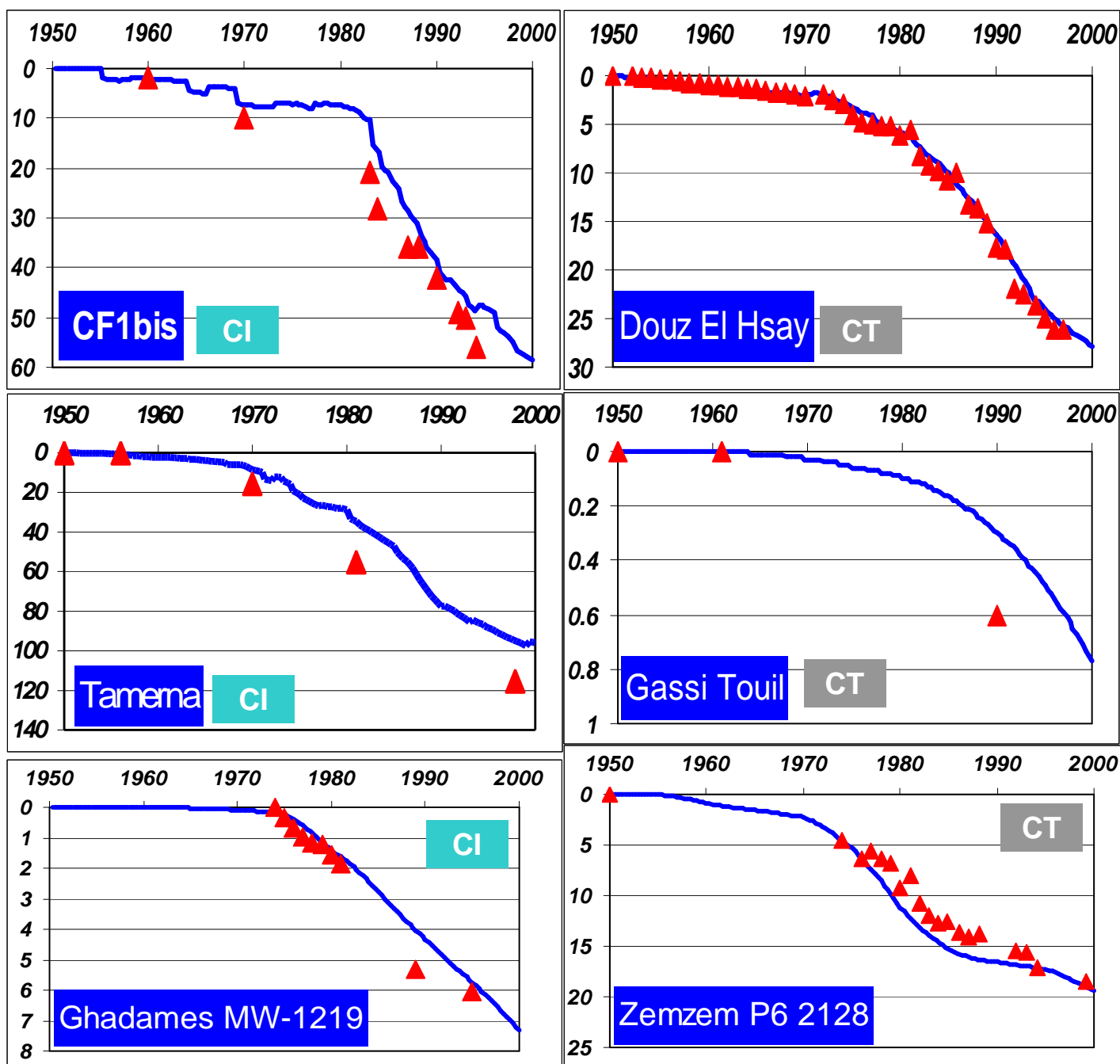
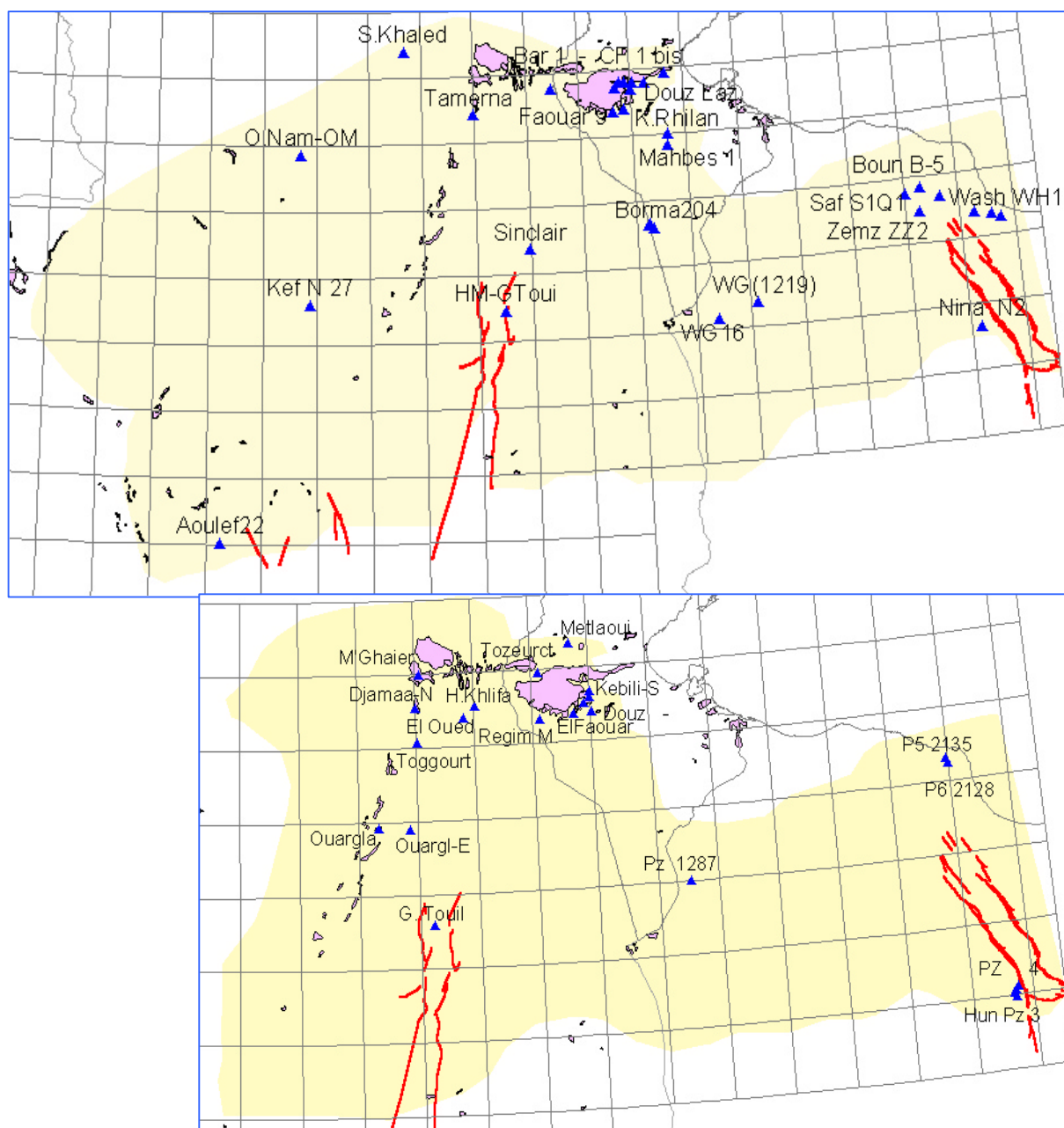


Fig. 2-6 : Position des Séries retenues pour le calage du CI, des « Grés sup » et du CT



- **Carte des Rabattements 1950-2000**

Les cartes des **fig. 2-7.a & 2-7.b** rendent compte de la distribution spatiale des rabattements calculés par le modèle respectivement au CI et au CT.

- **Carte Piézométrique 2000 et Bilan 2000 du SASS**

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

La carte piézométrique 2000 du CT indique que les lignes principales de l'écoulement sont conservées, en direction des chotts algériens et tunisiens et du golfe de Syrte. Néanmoins, l'écoulement est très fortement marqué par les pompages du Djérid, de la Nefzaoua et de la vallée de l'oued Rhir.

Etant donné qu'un rabattement excessif dans ce secteur, peut engendrer une éventuelle inversion des écoulements, on doit comparer la piézométrie calculée en 2000 à la cote des chotts.

On constate une évolution très nette entre 1950 et 2000 : en Tunisie, toute la Nefzaoua et le Djerid, où la nappe était franchement artésienne en 1950, présentent aujourd'hui, sous l'effet de rabattements généralisés de l'ordre de 25 m, des niveaux piézométriques tout juste en équilibre avec le niveau du Chott Djerid (cf. fig.3-2). A l'avenir, cette situation ne peut qu'empirer, sauf à diminuer le rythme des prélèvements. En Algérie, la situation est encore plus préoccupante au Chott Merouane où la piézométrie du CT se trouve d'ores et déjà sous la cote du chott, en situation d' «appel».

Le calcul du Bilan 2000 du SASS permet les observations suivantes :

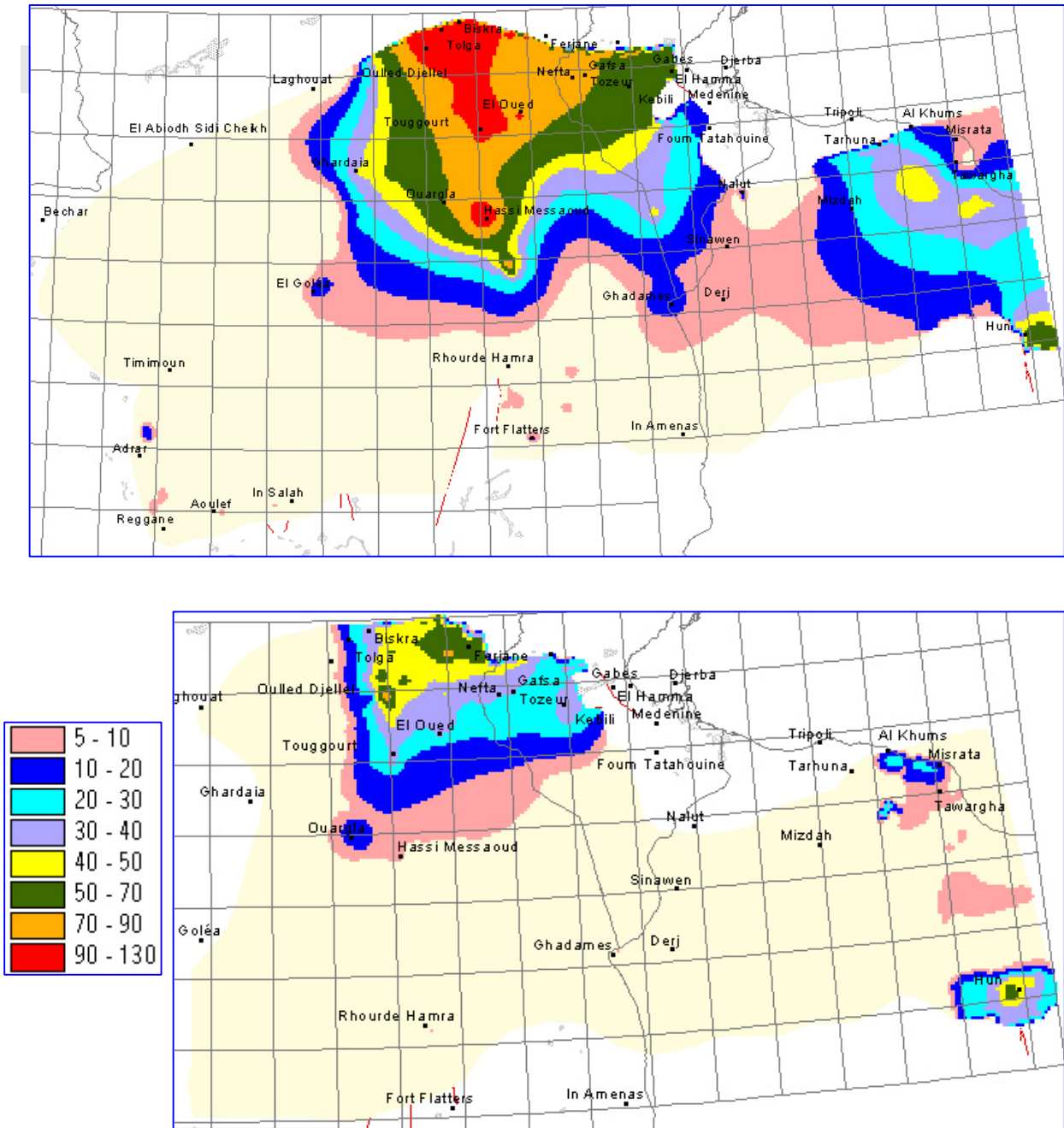
- a) la somme des recharges du système (y compris l'apport du COD) totalise 30. m³/s, ce qui représente 43% de l'ensemble des prélèvements par forages (70. m³/s) ;
- b) La contribution des réserves (« apport par rabattement ») représente 46. m³/s, soit 66% des pompages ;
- c) Le débit de l'Exutoire Tunisien accuse une diminution de près de 55 % ;
- d) On note également la très forte diminution des sorties du CT vers les chotts et les sebkhas : 2. m³/s en 2000 contre 8.6 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.

A la lecture de ce qui précède, et à l'examen de l'évolution des rabattements en fonction du temps, **on peut d'ores et déjà prévoir que les rabattements continueront de progresser, même si l'on décidait de bloquer les pompages à leur niveau actuel.** L'amplitude de cette progression, dans le temps et dans l'espace, reste à préciser : ce calcul constitue l'objet de la Simulation prévisionnelle Zéro, la première à envisager sur le modèle

Tableau 2-3 : Bilans 1950 et 2000 du SASS

BILAN du SASS (CI & CT) en 1950 et 2000 <small>[Grès Sup inclus dans CI]</small>					
CONTINENTAL INTERCALAIRE	1950	2000	COMPLEXE TERMINAL	1950	2000
Entrées (m3/s)			Entrées (m3/s)		
Alimentation	9,4	9,4	Alimentation	18,2	18,2
Drainance Turonien	0,5	0,8	Drainance Turonien	5,4	6,9
Apport Cambro-Ordovicien	2,0	2,7			
Contribution des réserves	0,0	21,5	Contribution réserves	0,0	24,9
Total Entrées	11,9	34,4	Total Entrées	23,6	50,0
Sorties (m3/s)			Sorties (m3/s)		
Pompages	0,5	27,3	Pompages	7,5	42,8
<i>Algérie</i>	0,5	21,3	<i>Algérie</i>	5,9	20,9
<i>Tunisie</i>		2,7	<i>Tunisie</i>	1,2	14,5
<i>Libye</i>		3,3	<i>Libye</i>	0,4	7,4
Drainance Turonien	3,4	1,7	Drainance Turonien	2,4	2,7
Saoura & S.Timimoun	0,2	0,2	Source Ain Tawargha	2,0	1,6
Foggaras	3,6	3,1	Chotts Algérie-Tunisie	8,6	2,0
Exutoire Tunisien <small>[Chott Fejej inclus]</small>	3,4	1,5	Kaam & Syrte	1,1	0,9
Golfe de Syrte	0,8	0,6	Sources Nefzaoua Djérid	2,0	0,0
Total Sorties	11,9	34,4	Total Sorties	23,6	50,0

Fig. 2-7. a et b : Carte des Rabattements 1950-2000 restitués par le modèle



III- REALISATION DES SIMULATIONS EXPLORATOIRES

Les simulations exploratoires doivent permettre d'évaluer la capacité du SASS à réaliser, sur un plan hydraulique, les objectifs définis par les pays. Il s'agit à ce stade de dire jusqu'où on peut aller en termes de développement des ressources en eau, et étant données les incertitudes qui existent aussi bien au niveau des paramètres hydrogéologiques, qu'économiques ou sociaux, et qui pourraient engendrer des précisions illusoires en termes d'hypothèses de travail et de résultats, il a été décidé de mener les calculs sur le long terme

III. 1- définition des simulations exploratoires

Les simulations exploratoires sont conduites sur 50 ans, l'état initial de référence étant l'état 2000 reconstitué par le Modèle. Le débit simulé est constant sur toute la période. A chacun des scénarios sont associés les résultats suivants :

- a) rabattements 2000-2050 ;
- b) profondeurs du Niveau par rapport au sol ;
- c) bilan 2050 et débit calculé aux principaux exutoires ;
- d) impact sur les pays voisins.

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

Il Consiste à maintenir constants les prélèvements 2000 et calculer l'évolution du système au cours des 50 prochaines années.

Ce scénario est 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.

- **Pour l'Algérie**, ont été élaborés deux scénarios de développement des Ressources en Eau, dénommés Hypothèse Forte et Hypothèse Faible, résumées par le tab...

Tableau 2-4 : Hypothèses faible et forte en Algérie

Débits Additionnels - m3/sec			
Région		H_faible	H_FORTE
Gourara-Touat-Tidikelt	CI	16,6	29
BISKRA	CI	1,1	1,4
O.RHIR	CI	6	7
OUARGLA	CI	2	4
SOUF	CI	2,5	3,9
MZAB	CI	8,2	14,3
O.RHIR	CT	3,8	4,3
OUARGLA	CT	17,3	29,5
SOUF	CT	5	8
TOTAL CI		36,4	59,6
TOTAL CT		26,1	41,8
TOTAL Général		62,5	101,4

- **En Tunisie**, les économies réalisées par l'amélioration des efficacités de l'irrigation vont peu à peu estomper la demande additionnelle des nouveaux périmètres irrigués. Au titre des simulations exploratoires, ce scénario est équivalent au « maintien de l'Actuel, ou Simulation Zéro ».

- **En Libye**, on prévoit une demande totale additionnelle égale à 840 Mm³/an en 2030. La contribution du GMRP²⁵ aux besoins du Bassin de Hamada el Hamra est estimée à 300 Mm³/an. Il subsistera donc un déficit de 540 Mm³/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 en 2000. Les conditions de réalisation de ce scénario, dénommé « Scénario de résorption des déficits 2030 », ainsi que les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre intitulé « Réalisation des simulations prévisionnelles ».

Les Simulations exploratoires réalisées par ailleurs en Libye concernent les deux programmes suivants :

Le Champ de Pompage prévu dans la région de Ghadamès-Derj, correspondant à la dernière phase du GMRP, où doit être mis en exploitation un débit additionnel de 90. Mm³/an [BRLi, 1997].

Le Champ captant du Dj. Hassaouna, 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/s, par pompage sur la nappe des grès du Cambro-Ordovicien. Cette nappe n'est pas explicitement représentée dans notre modèle ; elle est figurée par une couche de mailles dont les niveaux sont imposés avec une possibilité de variation dans le temps, qui sera déduite à partir des résultats du modèle Geomath.

En définitive, l'ensemble des Simulations Exploratoires peuvent se résumer ainsi :

Maintien de l'actuel ou « Simulation Zéro »

Algérie : Hypothèse faible

Algérie : Hypothèse forte

Libye : Ghadames field.

Libye : Impact des pompages de Jebel Hassaouna

Tableau 2-5 : Récapitulatif des Simulations Exploratoires

Scenari0 (débits en m ³ /s)	CI	CT	Total SASS
Simulation Zéro			
Algérie [1]	21.2	20.9	42.1
Libye [2]	3.4	7.4	10.8
Tunisie [3] Grès Sup inclus dans CI	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 = [1]+[2]+[3]+[6]	30.2	42.8	72.9

²⁵ Great Man Made River Project.

III. 2- Résultats des simulations exploratoires

III. 2. 1- Poursuite de l'Actuel : le SCENARIO ZERO

Cette simulation constitue la référence incontournable pour pouvoir estimer l'effet de tout prélèvement additionnel envisageable sur le système.

Les Rabattements sont calculés par référence aux Niveaux Piézométriques restitués par le Modèle en 2000. Les figures qui suivent présentent successivement : La carte des rabattements 2050 au CI ; La carte des rabattements 2050 au CT.

Fig. 2-8. a : Simulation Zéro ; Rabattements 2000-2050 au CI (en m)

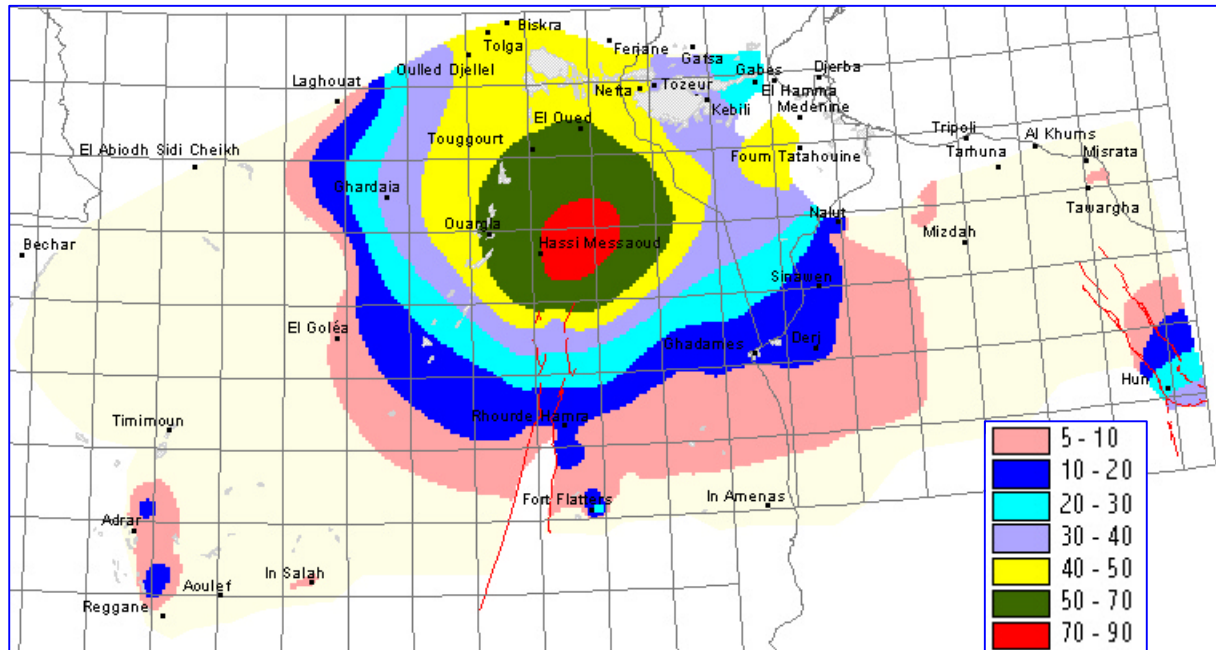
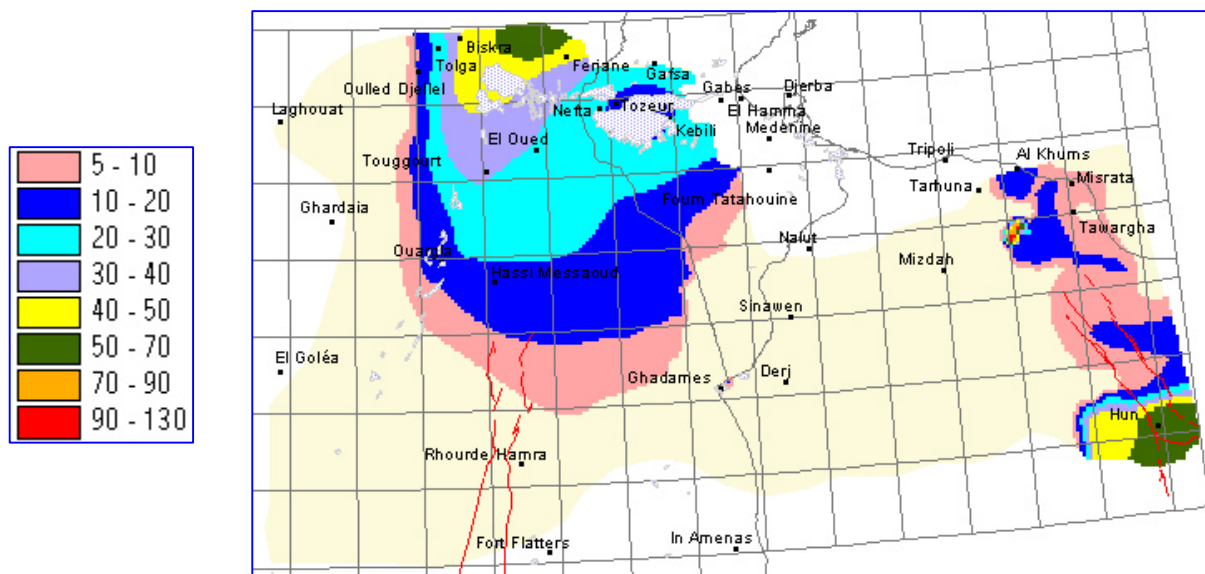


Fig. 2-8. b : Simulation Zéro ; Rabattements 2000-2050 au CT (en m)



III. 2. 2- Algérie : Hypothèse Forte

Résultats en termes de Rabattements et Niveaux

Les figures 2-9.a et b présentent respectivement :- La carte des Rabattements 2050 au CI après déduction des rabattements de la Simulation Zéro et que l'on désigne par « **rabattements nets** » ; - La carte des niveaux piézométriques 2050 du CI correspondant à la même simulation.

Fig. 2-9. a : Hypothèse forte au CI ; Rabattements nets 2050 (en m)

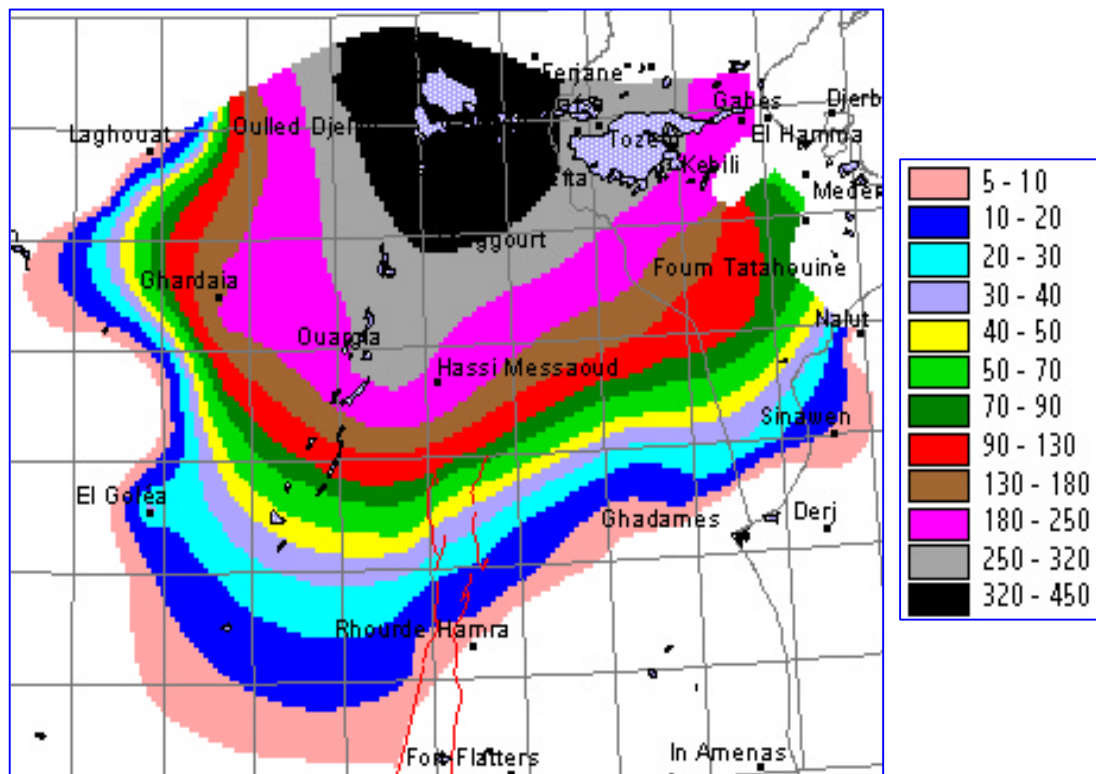
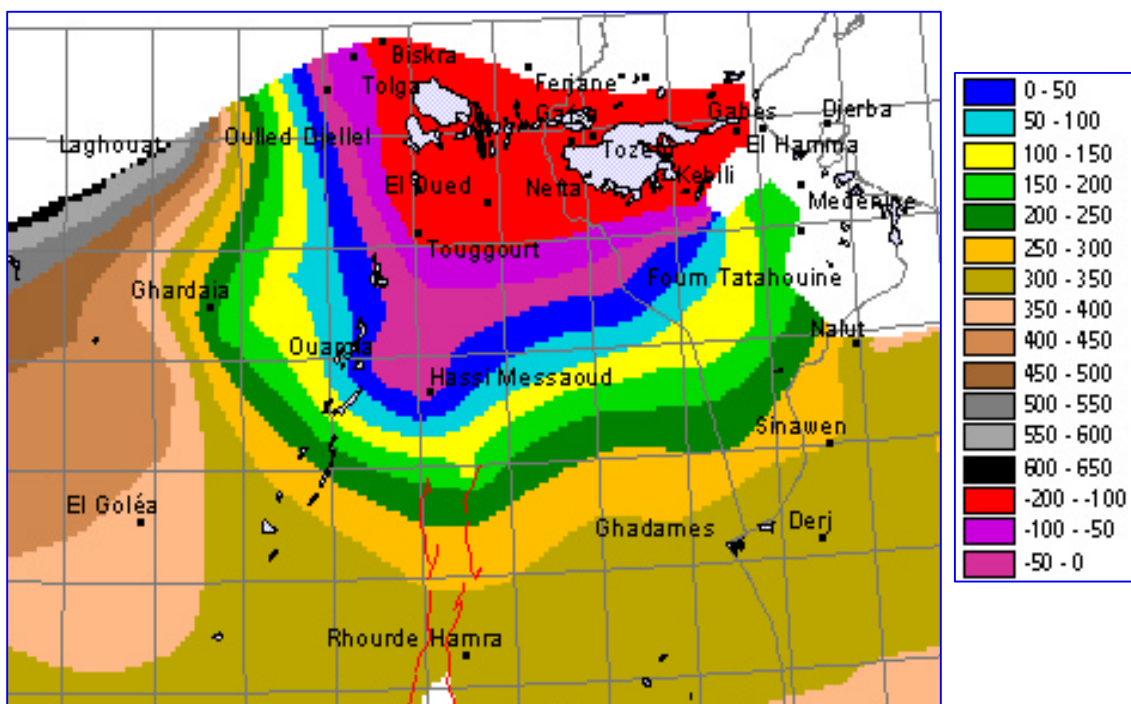


Fig. 2-9. b: Hypothèse forte au CI ; Niveaux piézométriques 2050 (en m)



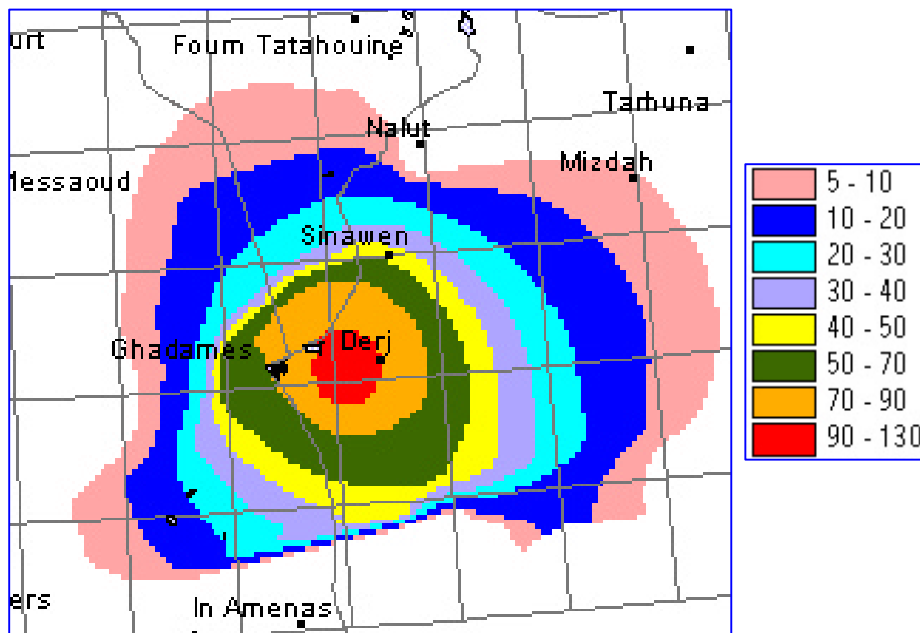
Rabattements Bruts VS Rabattements Nets

si en un point donné et à un instant donné, s_0 désigne le rabattement calculé lors de la simulation zéro, s_b désigne le rabattement brut ou rabattement calculé lors d'une simulation exploratoire quelconque, alors s_n , tel que : $s_n = s_b - s_0$ désignera le rabattement net correspondant à cette simulation exploratoire.

III. 2. 3- Libye : Ghadamès Field

Cette simulation représente le pompage continu d'un débit de $2.85\text{m}^3/\text{s}$ 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.

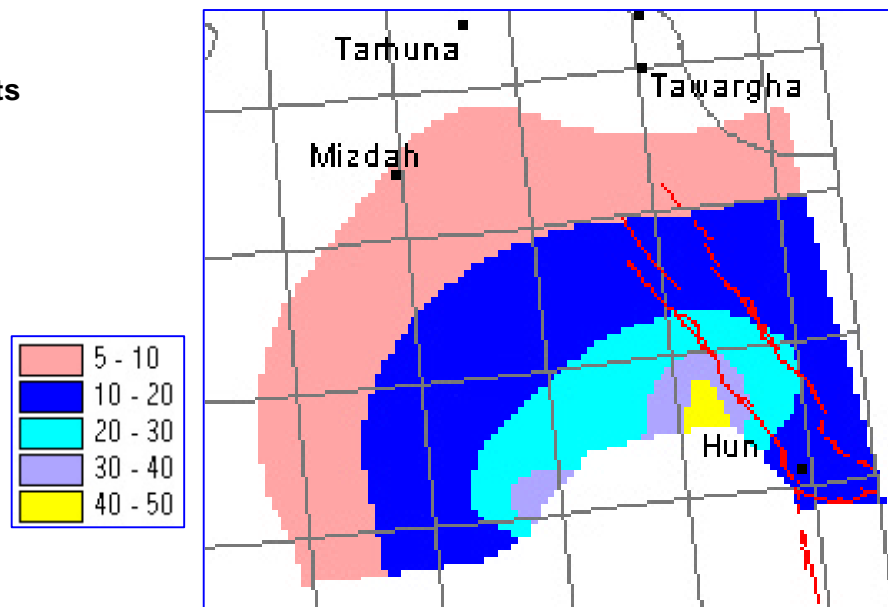
Fig. 2-10 : Ghadamès Field; Rabattements nets 2050 au CI (en m)



III. 2. 4- Libye : DJ. Hassaouna Field

Les rabattements calculés par GEOMATH ont servi à déterminer les potentiels de la nappe du Cambro-Ordovicien, imposés de 2001 à 2050. Les résultats, 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.

Fig. 2-11 :
Dj. Hassaouna ;
Rabattements nets
2050 au CI (en m)



III. 2. 5- Bilans à l'horizon 2050

Les Bilans calculés en 2050 pour chacune des simulations effectuées sont présentés ci-dessous pour chacun des aquifères: CT, CI. Dans un autre tableau, nous présentons l'évolution, pour chacune des simulations et depuis 1950, du débit des trois principaux exutoires naturels du Bassin Saharien : source de Tawargha, Exutoire tunisien, Foggaras.

Tableau 2-6 : Bilans 2050 du CI

CI BILAN 2050 m ³ /s	1950	2000	Sim Zero	Hyp faible	Hyp forte	Dj Hassa	Ghadam es
Entrées (m³/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 (m³/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	34.4	32.9	66.9	89.8	32.5	35.7

Tableau 2-6 : Bilans 2050 du CT

CT BILAN 2050 m ³ /s	1950	2000	Sim Zéro	Hyp faible	Hyp forte	Hassao una	Ghada mès
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 & Sebkhass	13.7	4.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Total Sorties	23.6	50.	47.5	73.7	89.6	47.6	47.6

III. 3- Analyse des Résultats des Simulations

III. 3. 1- Effets de la poursuite de l'actuel 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 Piézométriques 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.

au Complexe Terminal

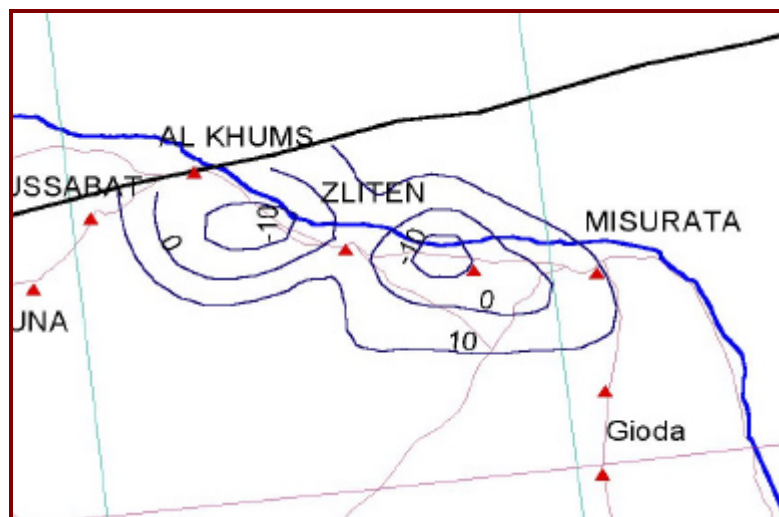
En Algérie, les rabattements 2050 dépassent 30m dans toute la vallée de l'Oued Rhir au Nord de Toggourt ; ils atteignent 60m au nord des chotts.

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 Sud-Est, 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. 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, et dans la zone côtière de Khoms-Zliten on voit apparaître deux plages où le niveau piézométrique est plus bas que le niveau de la mer, ce qui représente un risque inacceptable d'inversion des écoulements.

Fig. 2-12 : Simulation Zéro ; Niveaux piézométriques calculés en 2050 dans la zone de Khoms-Zliten (en m)



III. 3. 2- Effets de l'Hypothèse Forte

au Continental Intercalaire

Si l'on considère les rabattements « nets » 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. Les profondeurs du NP sous le sol indiquent une disparition totale de l'artésianisme de la nappe Albiennaise dans le Bas Sahara algérien : dans toute la vallée de l'Oued Rhir, les profondeurs de pompage se situent entre 100m et 300m.

Si la Libye n'est pratiquement pas touchée par ce scénario, la Tunisie se trouve quant à elle très fortement influencée :

- 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.

sur la nappe des Grès Supérieurs

Les rabattements bruts calculés sont considérables : 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.

au Complexe Terminal

En Algérie même, ce scénario provoque de très importants rabattements, 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.

III. 3. 3- Effets de l'Hypothèse Faible

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.

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.

III. 3. 4- Effets du scénario « Ghadamès Field »

Sur le CT, les rabattements induits 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.

III. 3. 5- Effets du scénario « Dj. Hassaouna »

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.

IV- LE MICRO-MODELE DU SASS : MINIATURISATION DU MODELE POUR L'INVESTIGATION DU RESERVOIR

IV. 1- Pourquoi un modèle 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 ;
- une intrusion saline dans le golfe de Syrte...

Les résultats de l'« Hypothèse Forte » et de l'« Hypothèse faible » ont par ailleurs démontré les limites de l'**approche « simulation pure »** dans la définition d'une stratégie de développement du SASS. Aussi bien l'Hypothèse Forte que l'Hypothèse faible, qui paraissent de prime abord devoir « encadrer » les choix des décideurs et les solutions envisageables, auraient au vu de ces résultats des conséquences dévastatrices sur le devenir du SASS. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de rechercher une autre façon de procéder à la définition 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'emmagasinement 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 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 ; alors la simulation devient fastidieuse et il vaut mieux recourir aux techniques d'**optimisation** (P.Hubert,1984)²⁶.

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

²⁶ P. Hubert : *Eaupuscule*, une introduction à la gestion de l'eau, Ellipses, 1984

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 :

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

Les coefficients **a_{ij}** et **b_i** sont des données alors que les **q_j** sont les variables de décision 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**²⁷ ». 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. Il peuvent être utilisés soit pour formuler des problèmes d'optimisation, soit pour miniaturiser²⁸ un modèle de simulation, soit encore pour réaliser une combinaison de ces deux possibilités. C'est cette dernière approche : **couplage miniaturisation-optimisation**, qui a été privilégiée dans la recherche des solutions envisageables pour la poursuite de l'exploitation du CI et du CT.

IV. 2- Fonctions d'influence et coefficients d'influence

Partant d'un état donné de la nappe [31-12-2000, calculé par le modèle], on applique dans une maille **j** un prélèvement égal à l'**unité** de débit maintenu constant pendant la durée de la simulation [50 ans] et l'on calcule le rabattement dans chacune des mailles du modèle. Ce calcul peut être répété pour toutes les mailles. On aboutit à une matrice d'influence à **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 :

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

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

La définition de chaque fonction **a_{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 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 en observer les 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, dans une simple feuille de tableur sur un écran d'ordinateur.

Les Calculs sont conduits sur 50 ans : 2001-2050. Dans chacune des « **mailles-témoins** » sélectionnées, on calcule une Fonction d'Influence en imposant un débit de pompage

²⁷ A. Levassor : Simulation et Gestion des Systèmes Aquifères, application aux nappes du CT du bas-Sahara algérien, thèse doc. Univ.Paris 6, 1978

²⁸ P. Hubert et J. Leon : Miniaturisation des modèles d'écoulement souterrain; c.r. symp. Coblence; UNESCO-IAH ; vol.2, pp 829-841; 1983

constant, égal au débit nominal, dans respectivement chacune des mailles choisies pour constituer les « **mailles-puits** » du SASS. Le débit nominal de pompage a été fixé à 10 m³/s.

L'équation du multicouche étant linéaire, on est autorisé à utiliser le « **principe de superposition** », qui énonce notamment que : **si à un pompage q correspond un rabattement s, alors, à un pompage lq correspondra un rabattement ls**. Cette propriété est fondamentale pour valider la miniaturisation du Modèle du SASS. Elle a été vérifiée sur le Modèle de simulation.

IV. 3- Matrice des coefficients d'influence

IV. 3. 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 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 :**

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**

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**

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. 3. 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.2-13.a)** et **34 au CT (fig.2-13.b)**. 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, la fonction de rabattement ou fonction d'influence en chacun des puits-témoins.

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

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, 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 **disposer sur le même écran à la fois des données et des résultats du problème**.

Avec un écran ordinaire, le confort de manipulation commence à baisser notablement lorsqu'on atteint des tailles de tableaux dépassant 25 colonnes. C'est pour cette raison que le problème a été décomposé en parties : d'abord un **micro-modèle** par pays et par nappe, incluant des puits-témoins frontaliers pour apprécier les interférences transfrontières, ce qui permet dans une première étape de rechercher un certain nombre de configurations « acceptables », puis dans une seconde étape 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, et d'autre part l'ensemble du bassin des chotts pour ce qui concerne le CT.

Fig. 2-13. a : Sites de Pompages potentiels au CI

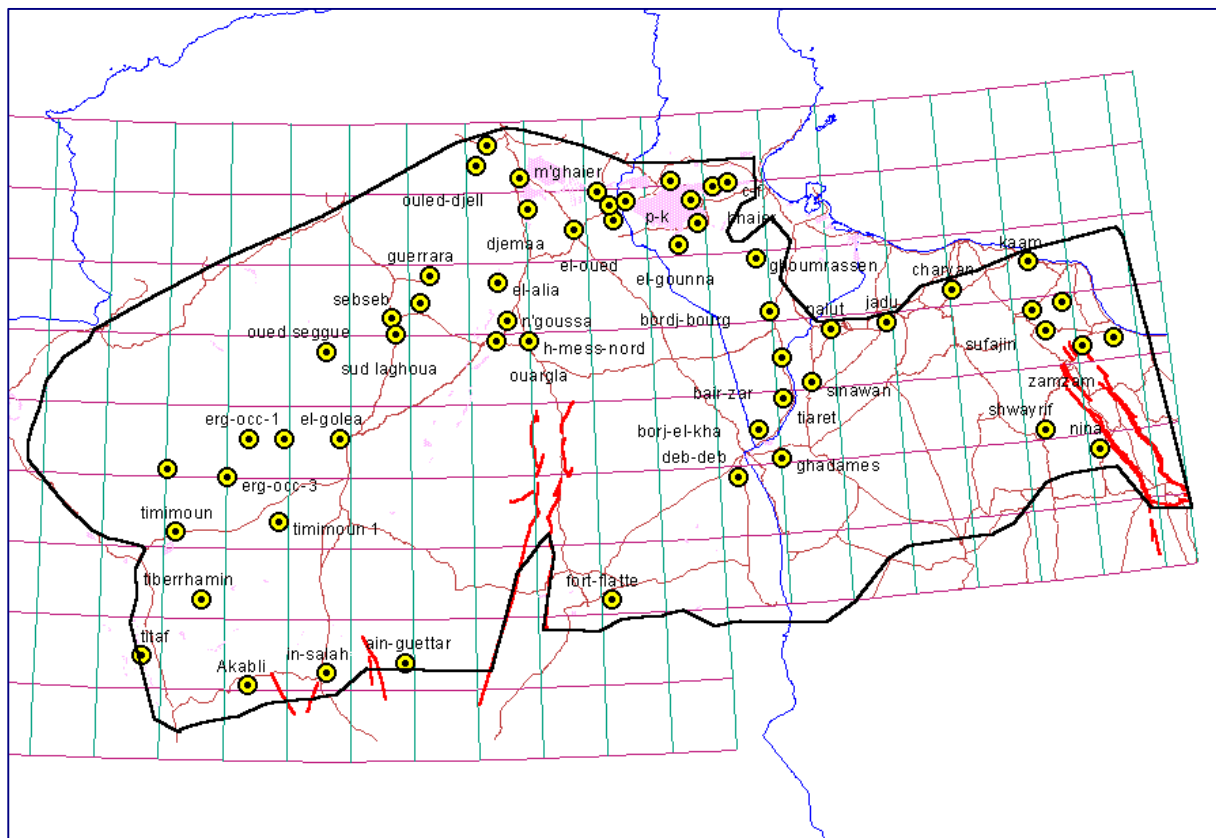
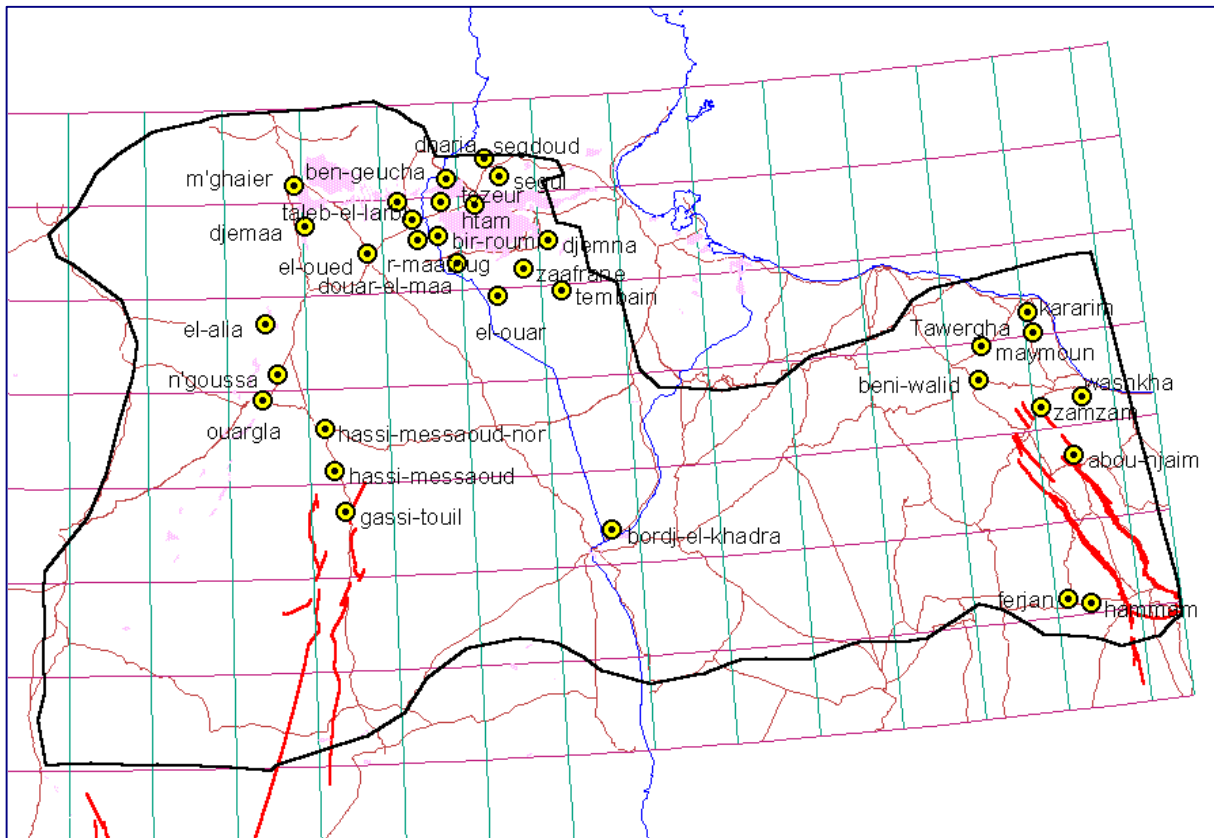


Fig. 2-13. b : Sites de Pompages potentiels au CT



IV. 4- Objectifs et contraintes de l'exploitation du SASS

IV. 4. 1- Objectifs : Maximiser la Production et Préserver la Ressource

Etant données les conditions du climat saharien, les formations du SASS sont faiblement alimentées. Cependant, l'extension du système et l'épaisseur des couches ont favorisé l'accumulation de réserves considérables. 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. 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. 2-14 : exemple de convertisseur « Débits-Rabattelements »

Zone	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Rabattelements
Debits	0	5	0	0	0	3	0	2	0	3	5	0	0	18
A	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
B	0	250	0	0	0	0	0	1	0	2	4	0	0	258
C	0	68	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	72
D	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	9
E	0	8	0	0	0	2	0	9	0	35	79	0	0	134
F	0	1	0	0	0	43	0	4	0	4	5	0	0	57
G	0	5	0	0	0	15	0	16	0	23	30	0	0	90
H	0	2	0	0	0	6	0	54	0	43	42	0	0	147
I	0	1	0	0	0	6	0	41	0	23	23	0	0	95
J	0	4	0	0	0	4	0	29	0	98	125	0	0	259
K	0	4	0	0	0	3	0	17	0	75	118	0	0	216
L	0	2	0	0	0	1	0	7	0	28	75	0	0	113
M	0	1	0	0	0	2	0	14	0	39	74	0	0	130

IV. 4. 2- Les Contraintes et la Gestion des Risques

Rappelons les risques majeurs auxquels la poursuite de l'exploitation du SASS et à fortiori son intensification, est confrontée : disparition de l'artésianisme ; hauteurs de pompages excessives ; tarissement de l'Exutoire Tunisien ; tarissement des Foggaras ; interférences exagérées de rabattements entre pays ; réalimentation éventuelle par les Chotts b. Il s'agit donc dès à présent de quantifier, autant que faire se peut, ces risques afin de pouvoir préciser les contraintes à respecter.

- **La Fonction « Exutoire Tunisien » :** La Fonction « débit-rabattement » de l'exutoire tunisien 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 sur une droite, qui traduit bien le comportement d'un réservoir linéaire dont le débit est proportionnel à la charge. Cette Fonction permettra de prédire²⁹ les situations postérieures à 2000. 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.
- **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.
- **Maintien de l'Artésianisme :** On ne peut envisager de maintenir l'artésianisme partout ; mais il paraît possible de maintenir des pressions au sol de l'ordre de la centaine de

²⁹ prédiction « rapide » au niveau du micro-modèle.

mètres dans toute la vallée de l'Oued Rhir à condition d'y exiger des rabattements 2050 inférieurs à 100 m.

- **Minimiser les Hauteurs de Pompages 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. Il paraît raisonnable de se limiter à des hauteurs de pompages régionalisées (au niveau des mailles du modèle numérique) de l'ordre de la centaine de mètres.
- **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 une dégradation irréversible de la ressource en eau. Le Modèle numérique permet de calculer 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 cote 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.
- **Le Champ des Interférences** : Dans la région des Chotts, les interférences Algérie-Tunisie sont 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, 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.

V- REALISATION DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES

V.1- Définition des scénarios 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 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.

Une fois définis sur le micro modèle, ces scénarios, résumés dans le tableau ci-après, sont simulés sur le modèle numérique qui donne des résultats plus complets et permet plus précisément de mesurer le degré d'atteinte des objectifs et le niveau de respect des contraintes.

Tableau 2-7 : Simulations prévisionnelles ; Débits imposés

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.

Nota : 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**, mais pour la commodité de l'exposé la présentation se fera par aquifère.

V. 2- Résultats des simulations prévisionnelles

V. 2. 1- Au Continental Intercalaire

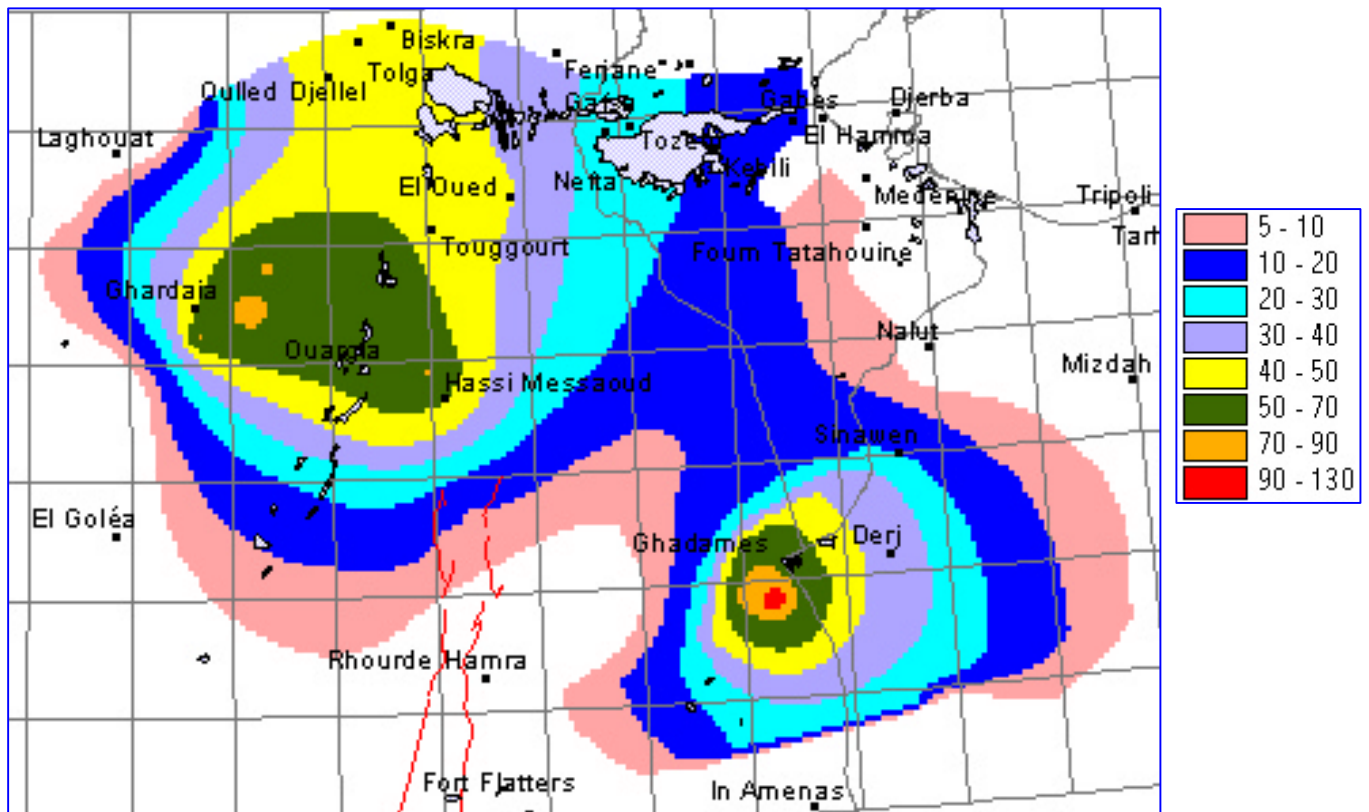
- **Simulation CI-1 ; Le Bas Sahara Algérien : [8.5 m³/s additionnels].**

Les rabattements sont concentrés autour de Zelfana – Ouargla et du champ de Debdeb. En Tunisie, le rabattement induit est de 25 m à Tozeur-Nefta, et de 12 m à Chott Fejej. En Libye, l'influence du pompage à Debdeb se traduit par des rabattements nets de l'ordre de 40 à 50 m au niveau du champ de Ghadames-Derj, ainsi du reste que dans l'extrême sud tunisien : 50 m à Bj el Khadhra et 30 m à Tiaret. Sur les Foggaras, l'impact de cette simulation est strictement nul. Quant à l'Exutoire Tunisien, son débit 2050 est passé à 0.6 m³/s, alors qu'il aurait été de 0.94 m³/s dans le scénario zéro.

En Algérie, il y a disparition de l'artésianisme à Hassi Messaoud ; ailleurs, l'artésianisme demeure actif un peu partout : 80m à Ouargla, 50m à Toggourt et à El Oued, 180 m à Mghaier. En Tunisie, nous avons encore 80 m à Tozeur et Sabria. On peut estimer à la lecture du Bilan que les débits de prélèvements additionnels proviennent à raison de :

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

Fig. 2-15 : Simulation CI-1 ; Rabatements nets en 2050 (en m)

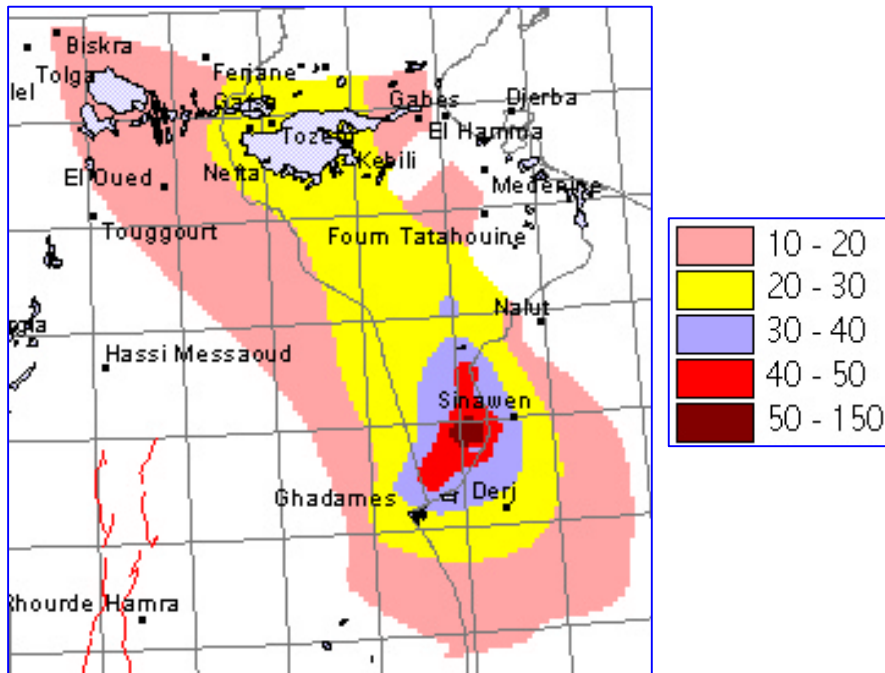


- **Simulation CI-2 ; Le CI en Tunisie : [2.2 m³/s additionnels].**

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

- a) des réserves de la nappe du CI à 73% ,
- b) de l'exutoire tunisien à 20% ,
- c) de la drainance à 5%

Fig. 2-16 : Simulation CI-2 ; Rabatements nets en 2050 (en m)

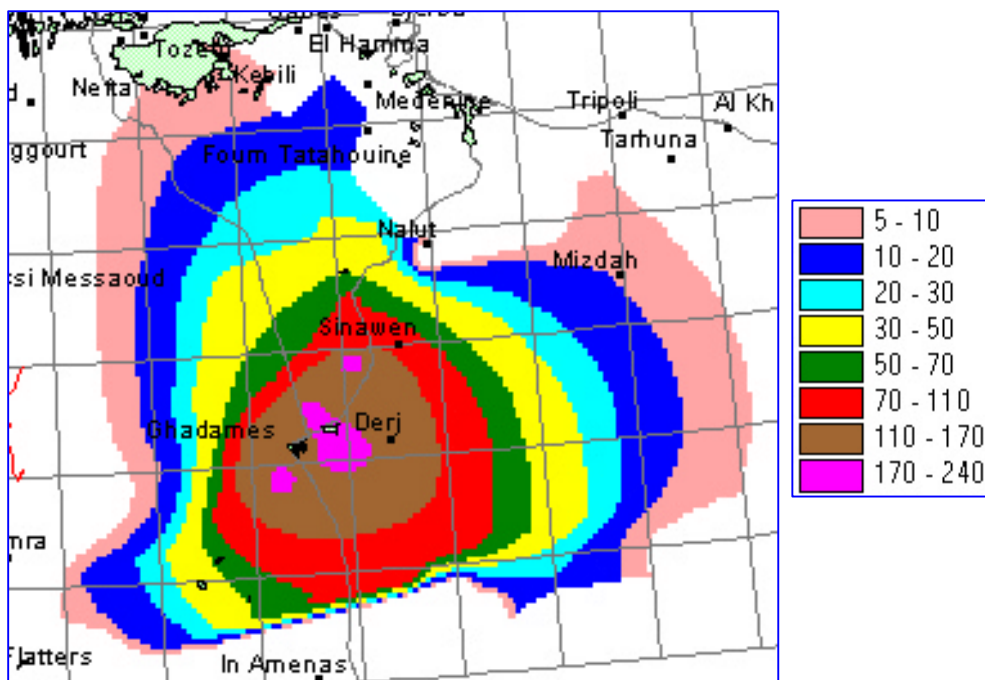


- **Simulation CI-3 ; le Bassin de Ghadamès : [6.3 m³/s additionnels].**

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

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

Fig. 2-17 : Simulation CI-3 ; Rabatements nets en 2050 (en m)



- **Simulation CI-4 ; l'ensemble du Bassin Central : [14.3 m3/s additionnels].**

Cette simulation correspond, à peu de chose près, au cumul des débits affichés dans les trois simulations précédentes ; il est donc naturel, que les rabattements y représentent approximativement la somme des rabattements des simulations 1, 2 et 3. Par ailleurs, les trois pays participant au pompage : il ne peut y avoir d'estimation des effets réciproques.

L'Exutoire Tunisien passe à 0.13 m³/s sous l'effet conjugué des prélèvements tunisiens et algériens . Au niveau de l'artésianisme, Il existe peu de différence avec la simulation CI1.

Le débit total de pompage simulé est fourni par :

- a) les réserves du CI (87%) ;
- b) l'exutoire tunisien 5.5% ;
- c) la drainance du Turonien 4%.

- **Simulation CI-5 ; Le Bas Sahara Algérien et l'Adrar : [38.5 m3/s additionnels].**

C'est la simulation n°1 à laquelle s'ajoute une forte sollicitation du Bassin Occidental notamment dans l'Adrar, In Salah et El Goléa. Tous ces nouveaux prélèvements se situent dans les zones à surface libre de la nappe du CI ; les rabattements résultants se concentrent en des cônes localisés : très profonds en leur centre mais qui se propagent très peu. Les influences sur la Tunisie et la Libye, ainsi que Le débit de l'exutoire tunisien sont les mêmes que lors de la simulation n°1. Le débit des Foggaras passe à 1.32 m³/s , alors qu'il était de 1.95m³/s lors du scénario zéro. Les débits additionnels simulés proviennent de :

- a) la contribution des réserves du CI à 97% ;
- b) des foggaras à 1.5%

- **Simulation CI-6 ; le CI dans l'Erg Occidental : [80. m3/s additionnels].**

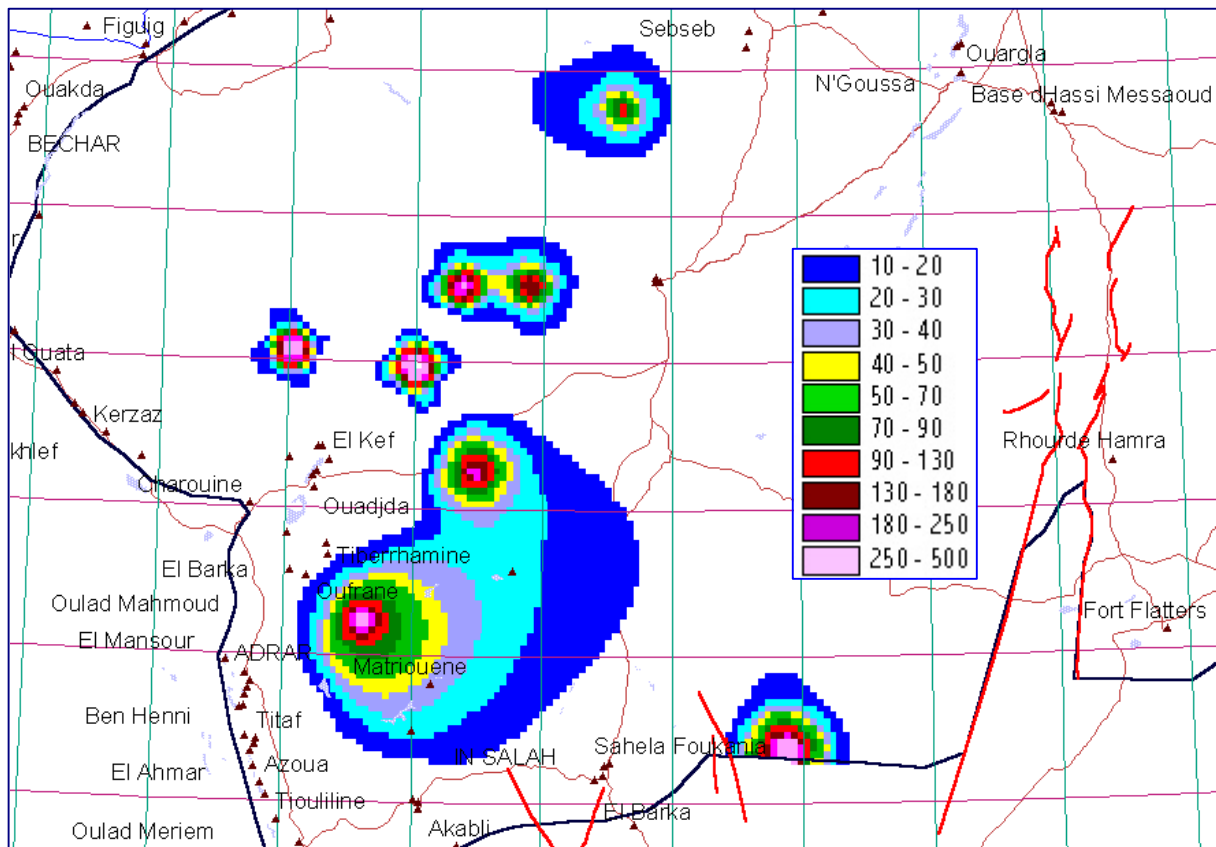
Cette simulation a pour objet d'explorer les propriétés « **capacitives** » du Continental Intercalaire dans sa partie à surface libre, en mettant à profit le phénomène de « non diffusion » des rabattements mis en évidence lors de la simulation CI5. Il s'agit ici d'explorer une région encore assez mal 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 (**2,5 Milliards 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**. Cette simulation confirme et consolide les résultats de la simulation CI5 sur les rabattements du CI dans la zone à surface libre : localement importants **[100 à 180m]** aux centres, mais qui peuvent atteindre des valeurs très fortes : jusqu'à **400 à 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] mais se propageant très peu latéralement : 1m à El Goléa qui se trouve à une centaine de km , et pratiquement rien à Hassi Messaoud et Ouargla après 50 ans de pompages. Les influences sur la Tunisie et la Libye sont rigoureusement nulles à l'horizon 2050. Le débit des Foggaras est passé à 1.78 m³/s , soit une baisse de 0.17 m³/s par référence au scénario zéro. Cette simulation n'a aucune incidence sur l'artésianisme dans l'Oued Rhir.

Les prélèvements additionnels (80m³/s) sont fournis par :

- a) la contribution des réserves à 99.75%,
- b) la diminution du débit des foggaras à 0.22% .

Fig. 2-18 : Simulation CI-6 ; Rabatements nets en 2050 (en m)



- **Simulation CI-7 ; LIBYE : Résorption des Déficits : [5.1m³/s additionnels].**

Deux secteurs s'individualisent nettement :

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

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

Les prélèvements additionnels proviennent de :

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

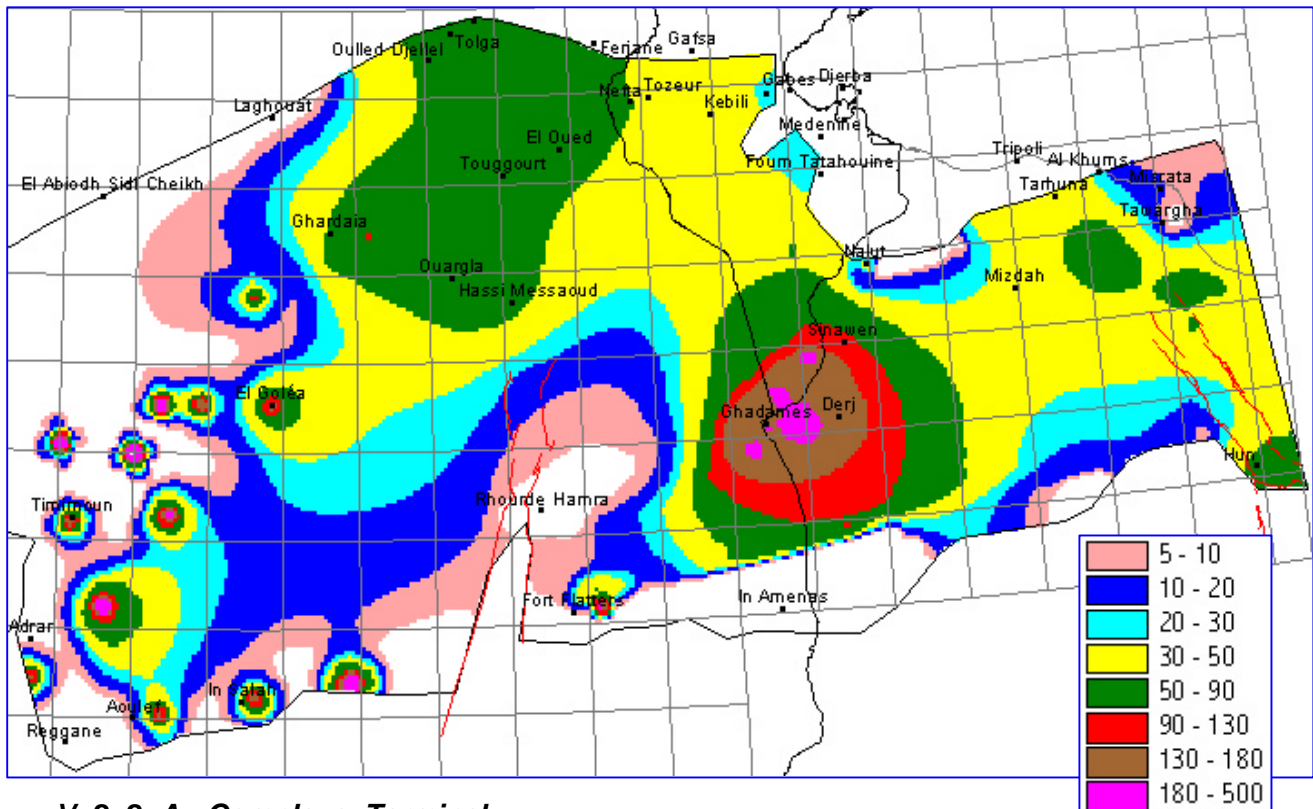
- **Simulation CI-8 ; ENSEMBLE du CI : [129. m³/s additionnels].**

On retrouve bien l'union des rabatements, des débits aux exutoires et de l'artésianisme respectifs correspondant aux simulations composant la CI8, soit les CI2, CI5, CI6 et CI7. Au niveau du bilan en eau 2050 : Les prélèvements additionnels représentent 129 m³/s , dont 118.5 pour l'Algérie.

Ces débits supplémentaires doivent provenir :

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

Fig. 2-19 : Simulation CI-8 ; Rabatements nets en 2050 (en m)



V. 2. 2- Au Complexe Terminal :

- **Simulation CT-1 ; ALGERIE : [14.7 m³/s additionnels].**

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. Les rabatements maxima, de l'ordre de 70 à 100 m, se trouvent dans le champ de Gassi Touil, où sont concentrés les prélèvements. Ailleurs, les rabatements sont assez faibles, notamment 10m au niveau des chotts Merouane et Melhir. En termes d'interférences, la courbe des 5m suit à peu près la frontière tunisienne. Les rabatements induits sont de 7m à Nefta, 5m à Tozeur et de 3m à Kebili. Quant à l'influence de cette simulation sur la Libye, elle est nulle.

Au niveau de la position du NP de la nappe par rapport aux chotts : le niveau piézométrique du CT est globalement 10m plus bas que la simulation zéro au niveau du Melhir et du Merouane, et 5m plus bas au niveau du Djerid ; or le scénario zéro avait lui même été qualifié de critique. Avec cette simulation CT1 nous serions donc, selon le critère des chotts, dans une situation encore plus risquée, et ce bien que 95 % des prélèvements additionnels[14 m³/s sur 14.7] aient été déportés vers le sud-ouest, loin des chotts.

Les débits additionnels proviendraient pour 14.6 m³/s (soit 99.3%) des réserves du CT.

- **Simulation CT-2 ; TUNISIE : [3.3 m³/s additionnels].**

Le même souci, de minimiser les débits additionnels autour des chotts, a permis de reconnaître des régions plus éloignées, telles Tembain ou El Ouar. Les rabattements calculés sont de 25m au Nord du Rharsa, de 10m partout ailleurs sous les chotts tunisiens, et entre 5 et 10m dans toute la Nefzaoua. La frontière algérienne décrit globalement la courbe des rabattements à 10m. L'influence des prélèvements tunisiens est de 3m à El Oued, elle est de 1m à Mghaier. Au niveau de la position du NP de la nappe par rapport aux chotts : elle se trouve 10m plus bas que celle du scénario zéro.

Au niveau du bilan en eau 2050 : Le débit additionnel est fourni par les réserves du CT à plus de 99% .

- **Simulation CT-3 ; LIBYE : Résorption des Déficits [11.6 m³/s additionnels].**

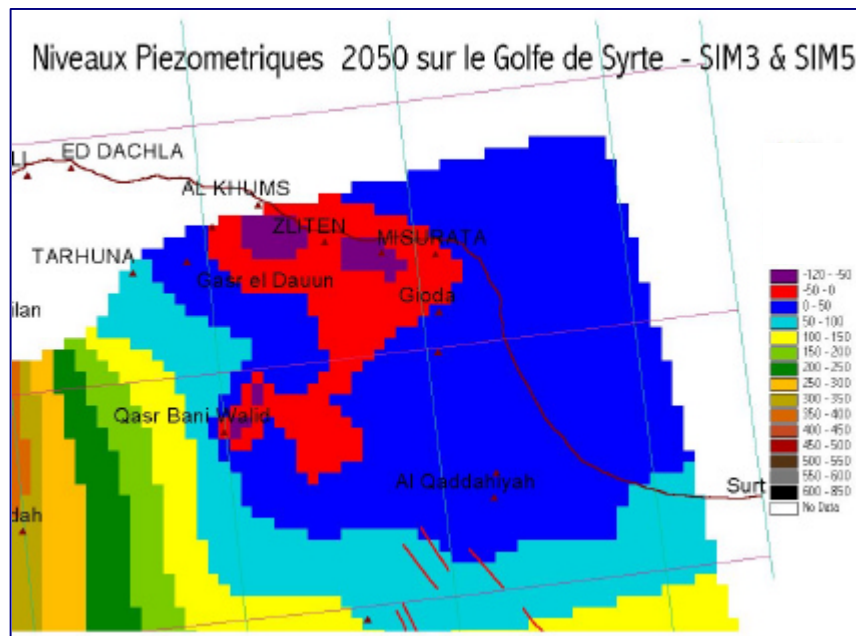
On note des rabattements nets de l'ordre de 100m à Soknah et Waddan, de 10 à 20m tout le long du Graben, et de 50m dans les champs septentrionaux d'Al Khoms - Zliten proches du littoral. Aucune influence en Tunisie et Algérie. Le débit de Ain Tawargha passe de 1.3 (scénario zéro) à 0.4 m³/s ; et la drainance dans le Golfe de Syrte passe de 0.5 à 0.4 m³/s. Les champs captants de la zone côtière [Al Khums, Zliten, Misurata] accusent des niveaux piézométriques particulièrement bas, atteignant des côtes inférieures à -50m sur le littoral.

Le débit additionnel est fourni par :

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

Le reste est récupéré sur le débit des exutoires .

Fig. 2-20 : Simulation CT-3 ; Niveaux piézométriques 2050 sur le golfe de Syrte



- **Simulation CT-4 ; Champ captant de l'Oued MYA : [18. m³/s additionnels].**

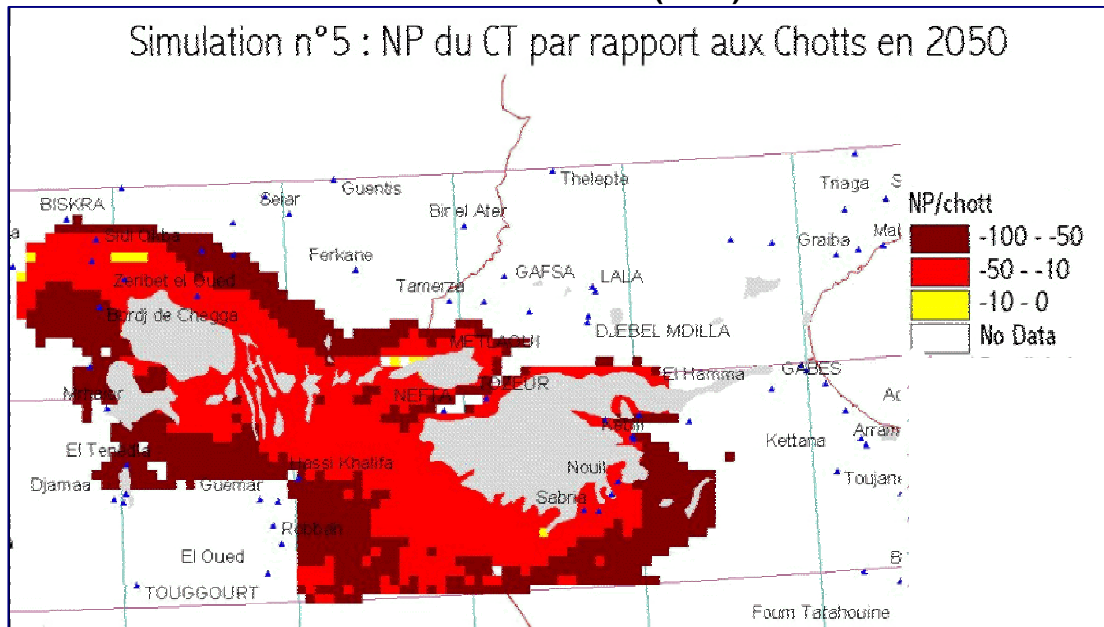
Cette simulation vise à investiguer une région qui n'a jamais été reconnue. Une telle investigation est devenue possible sur le modèle du SASS où le CT a été étendu vers le Sud jusqu'aux limites des affleurements, permettant ainsi de mieux tenir compte d'importantes réserves à surface libre.

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 sur le modèle numérique : NP proche du sol ou artésien, valeurs de T et S élevées.

Les rabattements nets calculés sont circonscrits autour du champ, de l'ordre de 150m au centre. Aucune incidence sur la Tunisie et la Libye. Les rabattements induits 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. Les débits additionnels sont fournis par les réserves du CT à raison de 17.9 m³/s sur 18.

Fig.2-21 : Simulation CT-5 ; Niveaux piézométriques par rapport aux chotts en 2050 (en m)



• **Simulation CT-5 ; Exploitation d'ensemble du CT : [47. m³/s additionnels]**

Cette dernière simulation représente la somme des débits additionnels affichés sur les quatre simulations précédentes. Si l'on y ajoute les prélèvements actuels, cela représente dans le CT un prélèvement total simulé de **90 m³/s [2.8 Milliards de m³/an]**.

Les effets sont équivalents à la somme des effets décrits précédemment ; les plus notables étant :

- a) 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 ;
- b) des niveaux piézométriques à plus de 50m sous le niveau de la mer sur le littoral libyen (cf. fig.2-20) , traduisant une réelle situation de crise ;
- c) enfin au niveau du bilan, l'omnipotence de la contribution des réserves du CT.

Fig. 2-22 : Simulation CT-5 ; Rabattements nets en 2050

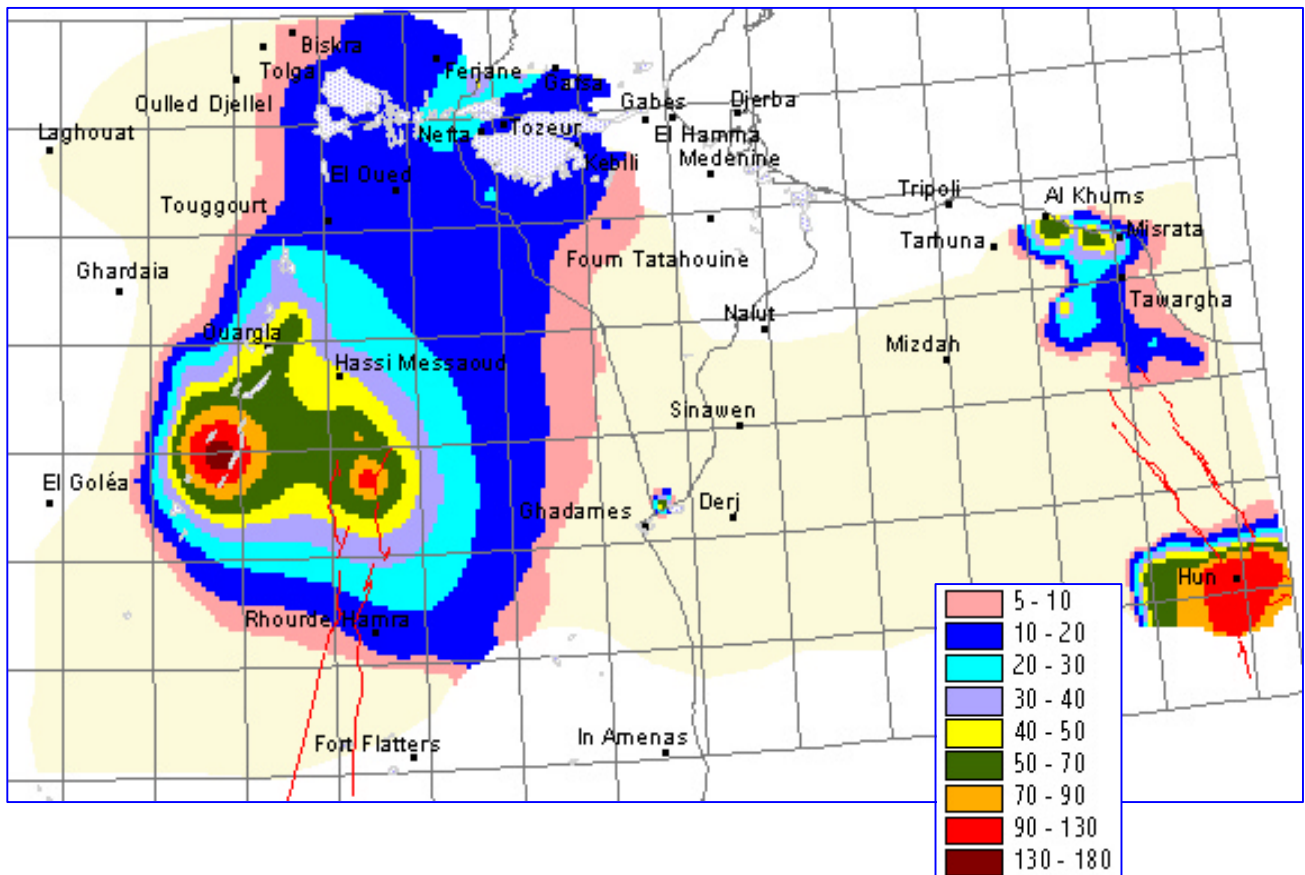


Tableau 2-8 : Prélèvements et Résultats des principales Simulations Prévisionnelles du SASS

	Prélèvements imposés au CI ** [m3/s]							
	2000	CI- 2		CI- 5		CI- 8		
		Q additionnel	Q total	Q additionnel	Q total	Q additionnel	Q total	
Oued Rhir	1,64	0,00	1,64	0,30	1,94	0,30	1,94	
El Oued	0,35	0,00	0,35	0,20	0,55	0,20	0,55	
Biskra	1,50	0,00	1,50	0,20	1,70	0,20	1,70	
Ouargla	1,54	0,00	1,54	0,50	2,04	0,50	2,04	
H-Messaoud	1,22	0,00	1,22	0,30	1,52	0,30	1,52	
Gassi Touil	0,24	0,00	0,24	0,00	0,24	0,00	0,24	
Illizi	1,10	0,00	1,10	4,00	5,10	4,00	5,10	
Ghardaia	4,48	0,00	4,48	5,00	9,48	5,00	9,48	
El Golea	1,88	0,00	1,88	8,00	9,88	38,00	39,88	
Gourara	0,90	0,00	0,90	5,00	5,90	45,00	45,90	
Touat-Tidkelt	5,08	0,00	5,08	10,00	15,08	10,00	15,08	
In Salah	1,39	0,00	1,39	5,00	6,39	15,00	16,39	
Total Algérie	21,3	0,0	21,3	38,5	59,8	118,5	139,8	
Djerid	0,37	0,40	0,77	0,00	0,37	0,40	0,77	
Nefzaoua	1,85	0,40	2,25	0,00	1,85	0,40	2,25	
Ext-Sud	0,49	1,40	1,89	0,00	0,49	1,40	1,89	
Total Tunisie	2,7	2,2	4,9	0,0	2,7	2,2	4,9	
Al Khums	0,19	0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	0,19	
Sufajin	0,82	0,00	0,82	0,00	0,82	2,63	3,45	
Grabén	1,26	0,00	1,26	0,00	1,26	0,84	2,10	
Jufrah	0,44	0,00	0,44	0,00	0,44	0,90	1,34	
Nefusa	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,79	1,29	
Ghadames	0,18	0,00	0,18	0,00	0,18	3,17	3,35	
Total Libye	3,4	0,0	3,4	0,0	3,4	8,3	11,7	
Total Général	27,4	2,2	29,6	38,5	65,9	129,0	156,4	

** Grès Supérieurs inclus

Prélèvements Simulés au CT [m3/s]							
	2000	CT - 1		CT - 2		CT - 5	
		Q addit	Q total	Q addit	Q total	Q addit	Q total
El Oued	10,70	0,70	11,40	0,00	10,70	0,70	11,40
Ouargla	9,35	14,00	23,35	0,00	9,35	32,00	41,35
Biskra-Tebessa	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
Total Algérie	21,0	14,7	35,7	0,0	21,0	32,7	53,7
Djerid	3,83	0,00	3,83	0,50	4,33	0,50	4,33
Nefzaoua	10,56	0,00	10,56	1,60	12,16	1,60	12,16
Ext-Sud	0,05	0,00	0,05	1,20	1,25	1,20	1,25
Total Tunisie	14,4	0,0	14,4	3,3	17,7	3,3	17,7
Al Khums	3,10	0,00	3,10	0,00	3,10	3,40	6,50
Sufajin	0,48	0,00	0,48	0,00	0,48	2,00	2,48
Graben	0,38	0,00	0,38	0,00	0,38	0,00	0,38
Jufrah	3,42	0,00	3,42	0,00	3,42	5,70	9,12
Total Libye	7,4	0,0	7,4	0,0	7,4	11,1	18,5
Total Général	42,8	14,7	57,5	3,3	46,1	47,1	89,9

Résultats des Simulations CI-2 , CI-5 & CI-8						
	2000	SIM Zero	CI - 2	CI - 5	CI - 8	
	NP/sol	Rabat / 2000	Rabat.net / 2000	Rabat.net / 2000	Rabat.net / 2000	NP/sol
Algérie						
Oued Rhir	-150 à -250	45	10	50	60	-150 à 0
Biskra	-150 à -250	45	10	50	60	-100 à -50
Ouargla	-120 à -150	30 à 50	1 à 5	40 à 60	40 à 60	-100 à -20
H-Messaoud	-120 à -150	75	5 à 10	30 à 60	40 à 70	-50 à 20
Illizi	-10 à 40	10	10 à 30	10 à 100	100 à 180	160 à 260
Ghardaia	-20 à 80	20 à 40	0	40 à 80	40 à 80	70 à 120
El Golea	-20 à 80	5 à 10	0	5 à 100	20 à 100	20 à 70
Gourara	-10 à 40	1 à 5	0	0 à 100	20 à 150	0 à 150
In Salah	-30 à 50	1 à 5	0	0 à 100	10 à 150	0 à 150
Tunisie						
Djerid	-150 à -100	40	20 à 25	25	50	-80 à -20
Nefzaoua - CF	-50 à -150	25 à 35	15 à 20	15 à 20	30 à 45	-60 à 0
Ext-Sud	-50 à 50	20 à 40	40 à 100	20 à 45	100 à 180	200 à 250
Libye						
Al Khums	-20 à 50	0	0	0	10 à 40	-10 à 60
Sufajin	-50 à 70	0	0	0	40 à 60	0 à 150
Graben	-30 à 30	0	0	0	40 à 50	30 à 80
Jufrah	80 à 110	30	0	0	50 à 70	160 à 220
Nefusa	150 à 200	10	0	0	20 à 30	160 à 250
Ghadames	-15 à 75	10	30 à 40	30 à 55	150 à 230	200 à 270
Débit des Exutoires	m3/s					
Exutoire Tunisien	1.5	0.94		0,5	0.59	0.13
Foggaras	3.1	1.95		1.95	1.32	1.19

Les profondeurs NP /sol de CI-8 intègrent les rabattements du scénario zéro . Les valeurs négatives de NP/sol correspondent à des niveaux artésiens

Résultats des Simulations CT-1 , CT-2 & CT-5						
	2000	SIM Zero	CT - 1	CT - 2	CT - 5	
	NP/sol	Rabat / 2000	Rabat.net / 2000	Rabat.net / 2000	Rabat.net / 2000	NP/sol
Algérie						
Oued Rhir	20 à 40	30 à 40	5 à 12	0 à 3	5 à 15	60 à 100
El Oued	-10 à 30	25 à 40	9 à 12	4 à 10	15 à 20	40 à 70
Ouargla	40 à 80	10 à 20	15 à 30	0 à 2	30 à 80	100 à 150
H.Messaoud-G.Touil	30 à 70	5 à 20	20 à 80	0 à 2	20 à 80	80 à 120
Tunisie						
Djerid	0 à 50	20	4 à 8	10 à 20	15 à 30	40 à 80
Nefzaoua	-10 à 20	20	4 à 7	8 à 10	12 à 20	25 à 50
Ext-Sud	25 à 60	0 à 20	0 à 7	0 à 7	0 à 14	30 à 80
Libye						
Al Khums	-20 à 60	10 à 15	0	0	10 à 50	-10 à 120
Sufajin	-20 à 60	10 à 30	0	0	10 à 30	0 à 100
Grabén	-40 à 40	10	0	0	0 à 10	-40 à 50
Jufrah	70 à 100	50	0	0	50 à 100	150 à 250
Principaux Exutoires	m3/s					
Ain Tawargha	1,6	1,3	1,3	1,3	1,3	0,4
<small>Les profondeurs NP /sol de CT-5 intègrent les rabattements du scénario zéro. Les valeurs négatives de NP /sol correspondent à des niveaux artésiens</small>						

V. 3- Conclusions sur les simulations prévisionnelles

Les données et résultats des principales simulations prévisionnelles sont présentés, pour chacune des régions hydrauliques du SASS, dans le tableau 2-8. Les résultats y sont présentés sous forme de rabattements et de profondeurs de pompages .

L'un des principaux résultats des investigations effectuées lors des simulations prévisionnelles a permis de vérifier que la possibilité existe de porter l'exploitation par forages du SASS, estimée à 2.2 Milliards de m³ en 2000, jusqu'au niveau de 7.8 Milliards de m³/an, et ce en respectant dans une certaine mesure les contraintes relatives aux risques de dégradation de la ressource. L'atteinte d'un tel niveau de développement de la ressource ne peut se faire qu'au prix d'une rupture totale avec les secteurs traditionnels d'exploitation intensive et un redéploiement vers les secteurs où la nappe est à surface libre.

En effet, 80% des prélèvements additionnels devront se faire dans des régions «nouvelles» et éloignées, donc forcément encore peu reconnues : 3,5 Milliards dans le Bassin Occidental du CI, 0,6 Milliard aux confins sud du CT... 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. Cette éventualité 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 un important puisage sur les réserves du système.

Toutefois, le caractère somme toute optimiste des résultats des simulations prévisionnelles doit être fortement tempéré. Tout d'abord, Il est utile de souligner la nécessité qu'il y a de confirmer certains des résultats obtenus : malgré les progrès réalisés par le projet SASS, des incertitudes subsistent dans la connaissance du système, qui nécessiteront d'entreprendre de nouvelles investigations. Ensuite et pour conclure, il est nécessaire de rappeler la **vulnérabilité** et la fragilité du **Complexe Terminal** du point de vue du risque de contamination par le sel, déjà mises en avant par la simulation Zéro : « la région des Chotts et le Golfe de Syrte sont 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** ».

TROISIEME PARTIE :

**MAITRISE DES RISQUES
ET GESTION COMMUNE DU
SYSTEME AQUIFERE**

I- ENJEUX ET RISQUES LIES A L'EXPLOITATION DU SASS

Comment exploiter les nappes sahariennes, au delà de leur taux de réalimentation, par puisage dans les réserves accumulées, dans l'optique d'un développement durable ?

Comment assurer un maximum de prélèvements d'eau pour le meilleur développement de la région sans risquer pour autant de dégrader irrémédiablement l'état de la ressource ? C'est en ces termes que se pose la définition des ressources exploitables du Système Aquifère du Sahara Septentrional. L'intense évolution de l'exploitation des aquifères du SASS a profondément modifié la vision que l'on peut désormais se faire de cette exploitation, laquelle se trouve confrontée à un certain nombre de risques majeurs du simple fait de son développement.

Les trois pays concernés par le devenir du système sont donc condamnés, à court terme, à rechercher ensemble une forme de gestion commune du Bassin Saharien afin de minimiser les nuisances liées à ces risques. Les simulations effectuées sur le modèle SASS ont mis en exergue tous ces risques et commencé à en quantifier les nuisances. Vouloir continuer à exploiter encore plus les nappes du CI et du CT nécessitera désormais de savoir, en connaissance de cause, maîtriser ces risques.

Dans l'exploitation du SASS, il existe trois types de risques majeurs :

- (i) la salinisation des nappes par inversion des écoulements entre les nappes et les chotts (en Algérie et Tunisie) ou entre les nappes et la mer (en Libye) ;
- (ii) la chute du niveau des nappes dans les forages, entraînant des coûts de pompages excessifs ;
- (iii) le tarissement d'exutoires naturels, comme le débit des foggaras en Algérie, l'artésianisme dans la région des chotts ou le débit de l'exutoire Tunisien, qui alimente des nappes côtières dans la Djefara, ou le débit de Ain Tawergha en Libye.

Ces risques ne sont évidemment pas de la même importance, le premier étant le risque majeur, du fait de ses conséquences sur la dégradation de la qualité des nappes. Un décideur peut accepter des augmentations de coûts de pompage, mais refuser le risque de salinisation, en raison de son caractère irréversible, ou encore le tarissement d'une ressource exploitée, s'il n'existe pas de ressource alternative.

Un grand facteur de risque concerne l'ignorance des effets et les dangers qui pourraient résulter d'une mauvaise connaissance de la nappe : le chapitre suivant sera consacré à l'inventaire des incertitudes qui subsistent sur la connaissance du SASS et aux imperfections du Modèle qui en résultent. Le présent chapitre récapitule les facteurs de nuisances les plus évidents du SASS : le sel avec toutes ses composantes.

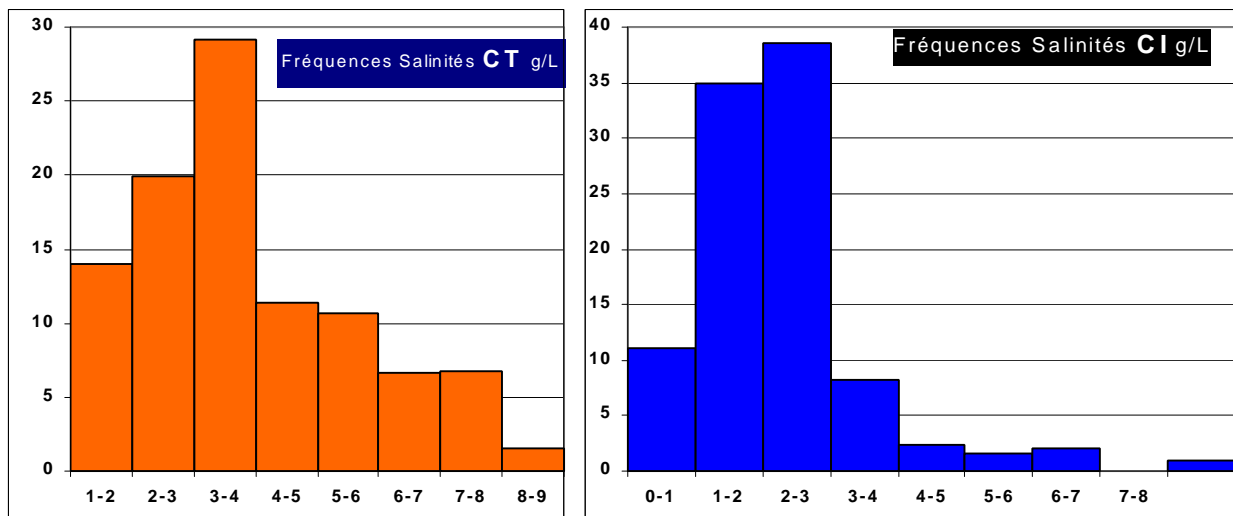
• Rappel sur la salinité des eaux du SASS

Etant données les conditions climatiques et de gisement géologique des formations aquifères, la qualité des eaux du SASS constitue intrinsèquement une source de préoccupation : le sel dans la région constitue un risque majeur qu'il faut gérer en connaissance de cause. Pour fixer les ordres de grandeur, le tableau suivant a été élaboré, qui présente la qualité des eaux prélevées en 2000 par tranche de salinité [salinité moyenne des vingt dernières années]. Malheureusement, il n'existe pas de mesure systématique de salinité sur tous les puits, et l'échantillon considéré ne porte que sur 23% des débits prélevés en 2000, soit 16 m³/s [7,5 m³/s au CI et 8,5 m³/s au CT]. Les graphiques qui suivent illustrent ce tableau.

Salinité des Prélèvements 2000 du SASS **		
Classe de Salinité g/L	Pompages CI %	Pompages CT %
0-1	11	0
1-2	35	14
2-3	39	20
3-4	8	29
4-5	2	11
5-6	2	11
6-7	2	7
7-8	0	7
8-9	1	2

** porte sur 23% des prélèvements 2000

Fig. 3-1 : Distribution des salinités, en g/l, des eaux pompées dans le CT et le CI



• Les Chotts

C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte. Les calculs effectués sur le Modèle ont montré que la simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres sur chacune des deux nappes, et ce sur l'ensemble des quatre secteurs solidaires que sont l'Oued Rhir, le Souf, le Djérid et la Nefzaoua.

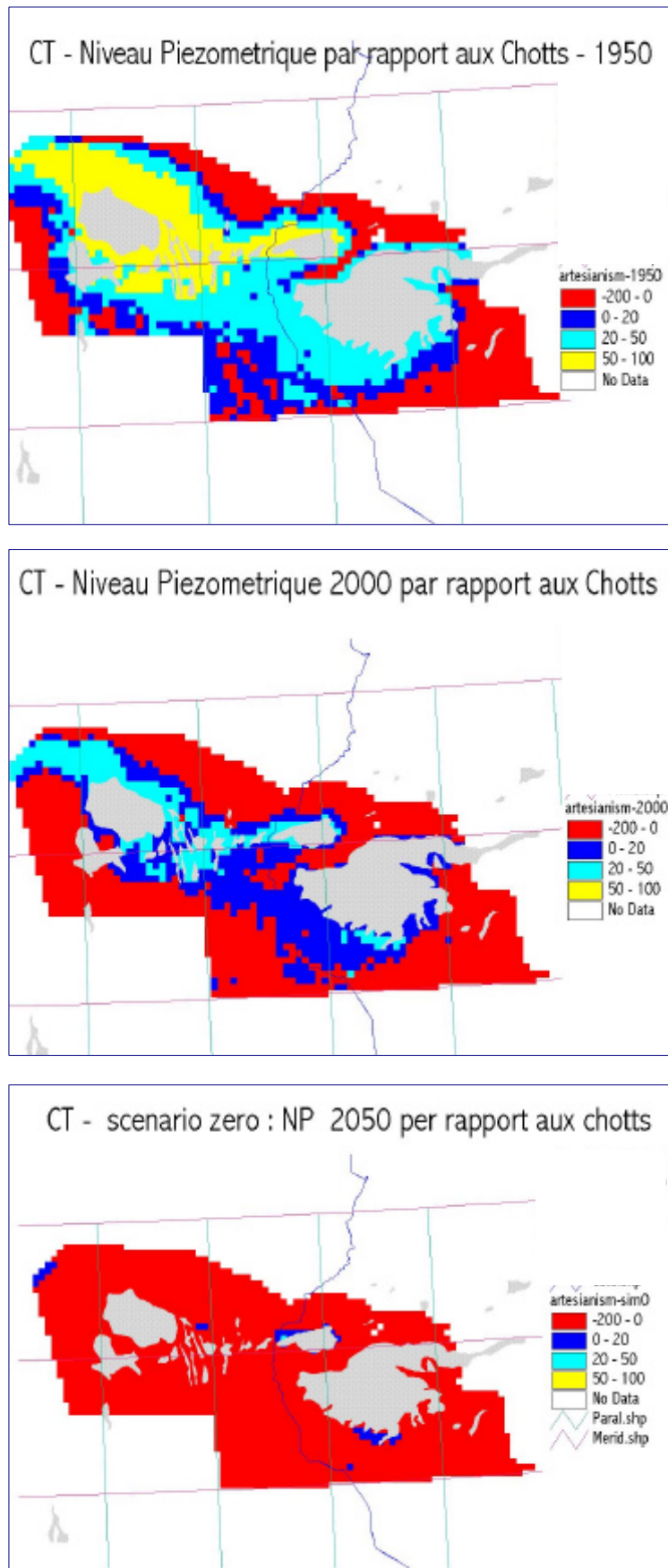
Une telle situation serait inacceptable pour le Complexe Terminal : le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. La simple poursuite de l'existant, du moins dans le CT, serait donc inacceptable pour la région des Chotts.

Un intérêt particulier doit être accordé à l'examen de la carte piézométrique calculée du Complexe Terminal dans le secteur 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 est comparée à la cote des chotts (fig.3-2).

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 (fig3-2), présentent aujourd'hui, sous l'effet de rabattements généralisés de l'ordre de 25 m, des niveaux piézométriques tout juste en équilibre avec le niveau du Chott Djerid. A l'avenir, cette situation ne peut qu'empirer, sauf à diminuer le rythme des prélèvements.

En Algérie, la situation est encore plus préoccupante au Chott Merouane où la piézométrie du CT se trouve d'ores et déjà sous la côte du chott, en situation d'«appel».

Fig. 3-2 : Evolution du niveau piézométrique du CT par rapport aux chotts

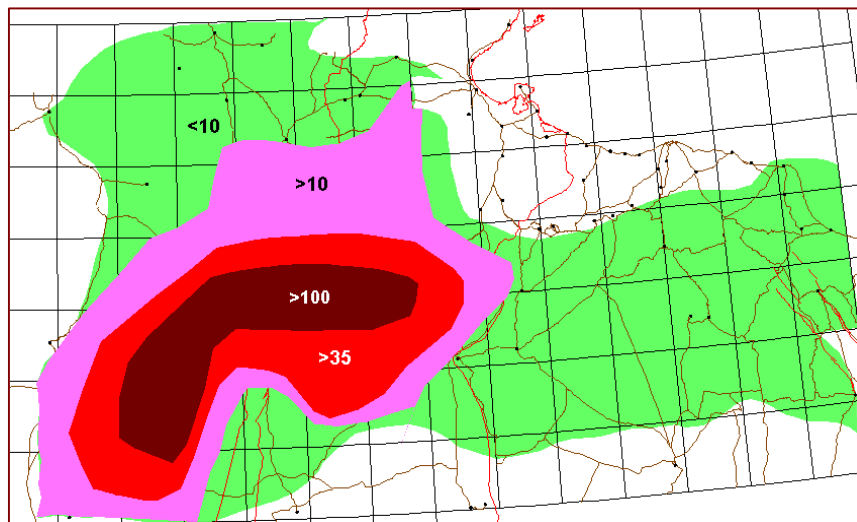


- **Autres sources de contamination par le sel**

L'analyse des quelques historiques de salinité disponibles sembleraient indiquer que les augmentations de salinité observées à ce jour, notamment dans le CT de Nefzaoua, ne proviennent pas du Chott. D'autres sources potentielles de contamination par le sel existent donc, dans la région des Chotts et ailleurs. Parmi ces sources, on peut citer particulièrement : a) Le Turonien de la Presqu'île de Kébili ; b) Le Turonien du Sahara Central ; c) La nappe phréatique salée ; d) Le réseau de drainage des palmeraies ; e) ainsi bien entendu que le risque d'invasion par l'eau de mer dans le Golfe de Syrte.

Concernant le Turonien, la fig.3-3 indique son extension sur le bassin, ainsi que les salinités des eaux de cette formation, aux valeurs extrêmement élevées dans la zone centrale du Sahara algérien. L'extension des secteurs sursalés du Turonien est directement liée à l'existence d'une importante couche de sel reconnue en forage à la base du Sénonien lagunaire, centrée sur la région de Hassi Messaoud (fig.3-3). Des valeurs élevées se retrouvent en Tunisie, dans la Nefzaoua, où il a été déjà établi que le Turonien constituait bien, notamment dans la presqu'île de Kébili, une menace potentielle pour la salinité à venir des eaux du Complexe Terminal. Avec l'accélération des pompages et la croissance des rabattements dans le CT, l'appel d'eaux profondes salées du Turonien paraît inéluctable : certaines augmentations de salinités observées d'ores et déjà peuvent être expliquées de la sorte.

Fig. 3-3 : Extensions des zones à eaux salées du Turonien (salinités en g/l)



Pour ce qui concerne la nappe phréatique : par suite d'importants rabattements, le niveau piézométrique de la nappe du Complexe Terminal va baisser (c'est déjà le cas en plusieurs endroits) au dessous du niveau de la nappe phréatique laquelle est généralement très salée en raison d'une alimentation continue par des eaux d'irrigation elles-mêmes génératrices d'une concentration de sel dans le sol que lessive la nappe phréatique.

Tous les périmètres irrigués sont pourvus de réseaux de drainage destinés à abaisser le niveau de la nappe et à favoriser le drainage des sols.

Ces réseaux de drainage et notamment leurs collecteurs principaux, concentrent les eaux salées, et pour peu que le cône de rabattement d'un forage se trouve à proximité immédiate et en position d'«appel» [niveau piézométrique plus], et que l'épaisseur de la couverture soit réduite, les eaux du drain peuvent en partie contribuer à alimenter les pompages dans le CT.

II- CONNAISSANCE DU SYSTEME ET REPRESENTATIVITE DU MODELE

Malgré l'importance des efforts consentis pour la collecte, la critique et la mise en forme des données nécessaires au modèle et à l'élaboration des simulations, 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, de la nature et des caractéristiques des conditions aux limites adoptées, ou encore de la structure même du modèle, ou enfin au niveau de l'évolution à venir de la demande en eau et du comportement des acteurs socio-économiques.

La levée de ces incertitudes contribuerait sans doute à améliorer davantage la représentativité du modèle et augmenter encore la fiabilité des résultats des simulations effectuées. Les points suivants, rappellent les incertitudes les plus marquantes relevées au cours de l'étude du SASS, et dressent quelques pistes de recherche.

II.1- Connaissance des paramètres structuraux du système aquifère

II. 1. 1- Structure fine du SASS

L'approfondissement réalisé dans le Sud tunisien, qui avait été entrepris pour améliorer le calage des historiques du CI, a démontré le bien fondé de ce genre d'exercice. Ce dernier est toutefois demeuré incomplet dans la mesure où la restructuration du CI se trouve aujourd'hui confinée à l'intérieur des frontières tunisiennes : la même analyse doit se poursuivre en Algérie et en Libye, et être étendue au Complexe Terminal dont la représentation par une couche unique devrait être dépassée.

II. 1. 2- L'exutoire tunisien et le champ des transmissivités connexes :

Si l'on doit juger le modèle du SASS du point de vue des deux contraintes adoptées pour le calage :

- a) légitimité géologique de la structure du champ des transmissivités,
- b) valeur du débit de l'exutoire tunisien du CI, la version adoptée constitue le meilleur des compromis. Il n'en reste pas moins que les Transmissivités du SASS : celles du CI mais également du CT, doivent faire l'objet de nouvelles investigations, notamment sur les immenses étendues vierges que représentent encore les deux Grands Ergs : l'Oriental et l'Occidental.

II. 1. 3- Emmagasinement en nappe libre :

Le modèle du SASS se distingue par une réduction substantielle des coefficients d'emmagasinement dans les zones à surface libre du CT. Cette réduction avait déjà été opérée 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% à 1%. Ceci reste à vérifier par un ensemble d'essais in-situ, étant données les implications d'une telle hypothèse.

II. 1. 4- 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.

II. 1. 5- Limite orientale :

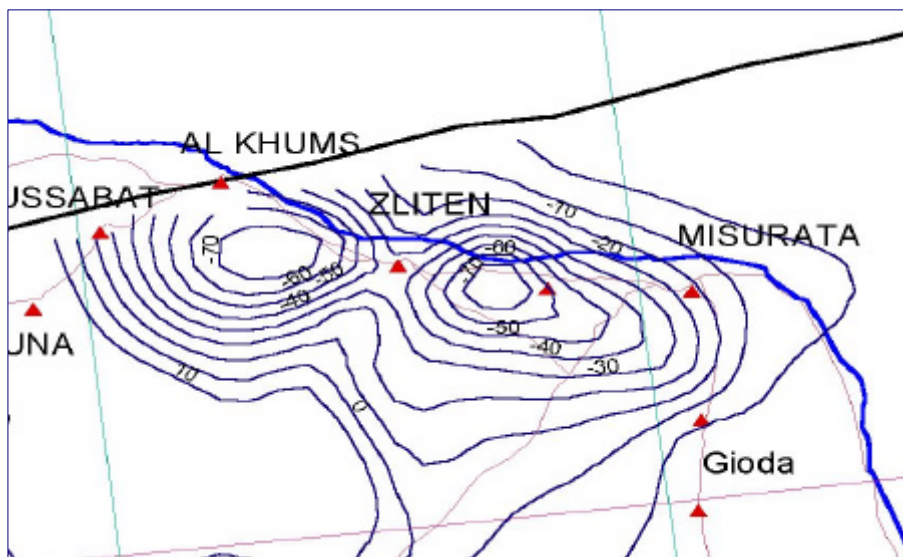
La limite orientale du CI est la seule du modèle qui ne soit pas une limite naturelle. En réalité, les formations aquifères du Crétacé inférieur se poursuivent bien à l'Est du graben mais présentent de faibles transmissivités et une forte salinité. Il n'existe donc pas de limite hydraulique précise à cet endroit. Le modèle est limité par une condition de potentiels imposés à travers une résistance.

Cette formule n'est pas satisfaisante. Il faudra pousser les investigations dans ce secteur pour mieux reconnaître la distribution des hauteurs piézométriques, des transmissivités et des salinités.

II. 1. 6- Golfe de Syrte :

Dans le scénario de résorption des déficits en Libye le Continental Intercalaire continue de bénéficier en 2050 d'une charge suffisante sur le littoral, mais il n'en est pas de même pour le Complexe Terminal, dont la situation serait gravement préjudiciable avec un niveau piézométrique à -70 m à Khoms-Zliten (**fig.3-4**). Des investigations approfondies doivent être consenties pour une connaissance plus précise de la zone littorale.

Fig. 3-4 : Charge hydraulique du CT le long du littoral libyen en 2050 ; Simulations CT3 et CT5 (en m)



II. 1. 7- 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 plusieurs titres : l'hydrogéologie fine des foggaras comporte une composante topographique, cartographique et piézométrique très importante.

II. 1. 8- Les Chotts :

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, et il demeure de nombreuses interrogations que l'on peut formuler sur la connaissance actuelle du phénomène.

Cela justifie l'ampleur des recherches à entreprendre dans un avenir immédiat.

II. 1. 9- Recharge des Aquifères :

L'un des points faibles de tous les modèles réalisés dans le Sahara a été de passer 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 de la première partie, certes encore préliminaires, 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 (coefficient d'infiltration = 2% de la pluie moyenne inter-annuelle), des infiltrations de crues d'oueds (30% du ruissellement moyen).

Les résultats d'un tel calcul montrent qu'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 numérique¹. 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/s. Sur les autres limites, et par rapport au calcul hydrologique, 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 l/s), le Mzab (3400 vs 1700l/s), le Dahar-Nefussa (6600 vs 1400l/s). Et ce sont les surfaces infiltrantes du Moi-Pliocène (5000 l/s d'apport) qui permettront de se rapprocher du bilan calculé par le modèle.

II. 1. 10- Réserves 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 Occidental (G.E.O), 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 été procédé à une simulation particulière 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 [5 m³/s dans chacun des sites d'Akabli, Timimoun, Titaf, In Salah ; et 8 m³/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 :

- a) quelles étaient les influences du Bassin Occidental sur le reste du SASS à l'horizon de prévision 2050 ? ;
- b) 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

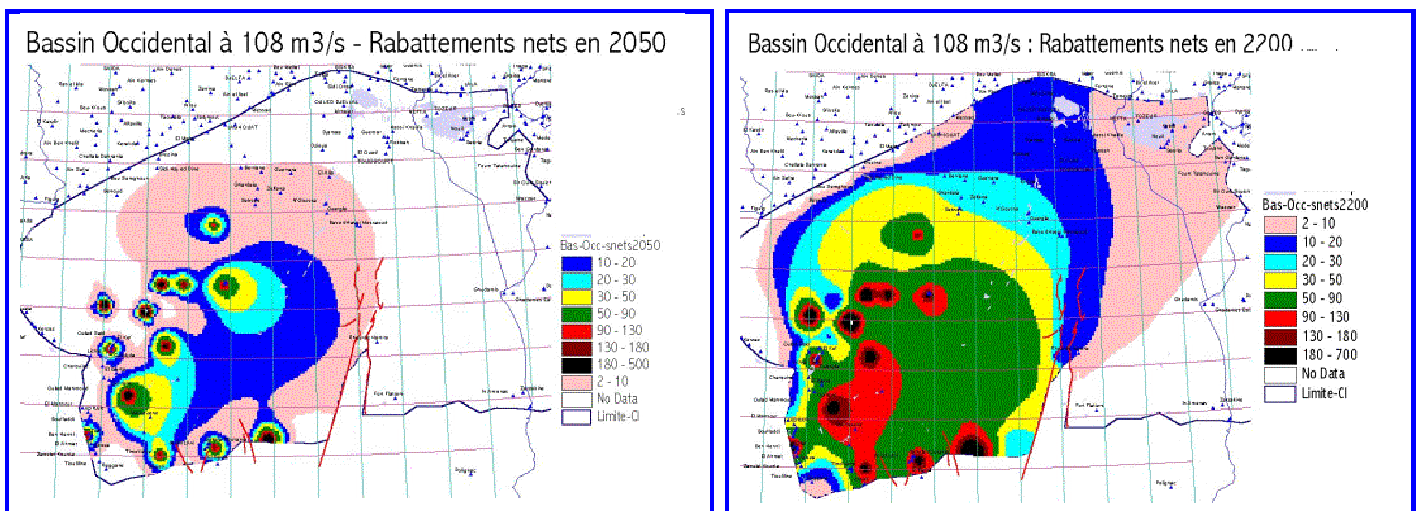
¹ Ce résultat pourrait être considéré comme un artéfact dans la mesure où le coefficient d'infiltration directe retenu (2%) était précisément celui qui devait permettre de retrouver les estimations a priori de la recharge des nappes du CI et du CT. Un tel coefficient n'a toutefois rien d'exagéré et peut être considéré comme raisonnable y compris au Sahara.

régions, voire les autres pays sachant que Tunisie et Libye se trouvent à un millier de km ?

Les bilans calculés et les cartes des rabattements nets aux horizons 2050 et 2200, indiquent que :

- a) les débits pompés sont fournis exclusivement par le déstockage des réserves de la nappe,
- b) les Foggaras qui conservaient un certain débit à l'horizon 2050, sont complètement tariées en 2200,
- c) à l'horizon 2050, les rabattements induits par les prélèvements additionnels (rabattements nets) restent cantonnés dans la région,
- d) en 2200, les influences en rabattement sont nettement marquées à l'extérieur de la région : 25 m à Ouargla, 20 m à Toggourt... et près de 10 m en Tunisie, à près de 1000 km du barycentre des prélèvements.

Fig. 3-5 : Exploitation du Bassin Occidental ; Rabattements nets calculés en 2050 et en 2200



II. 1. 11- 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. 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.

II. 1. 12- Schématisation particulière du CT au Nord des Chotts

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

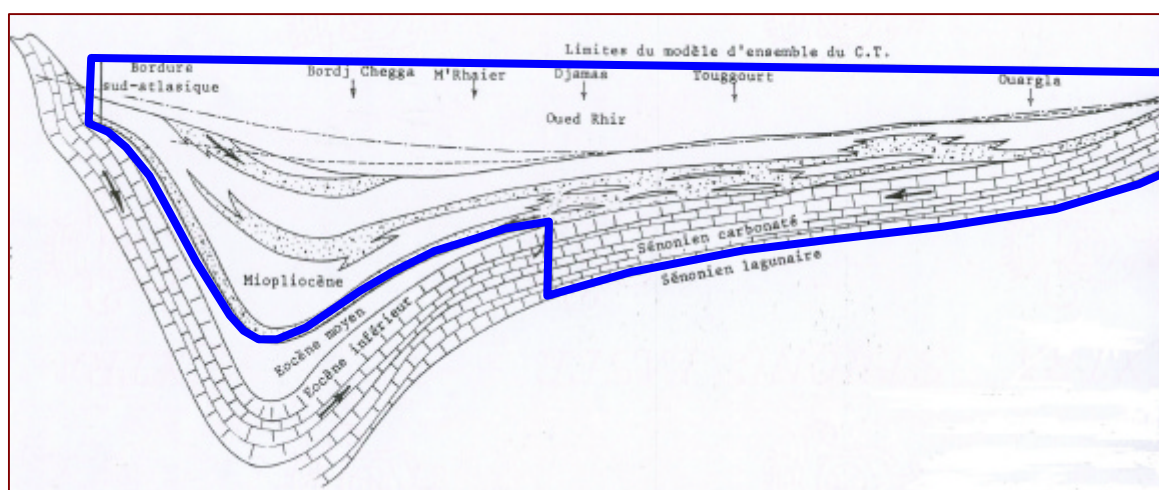
constituer un réservoir homogène ; mais à l'échelle du Sahara, il est raisonnable de schématiser cet ensemble aquifère par un système hydraulique mono-couche même si cette schématisation perd toute réalité à une échelle locale.

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 sables du Miopliocène reposent sur les marnes de l'Eocène moyen et les calcaires de l'Eocène inférieur, très peu transmissifs et trop profonds, ne sont plus exploités : ils plongent rapidement vers le Nord sous le fossé MioPliocène qui marque une zone de subsidence près de l'accident sud-atlasique.

Etant donné le peu d'importance pratique de ces calcaires éocènes, il n'en a été tenu compte que comme une source possible d'apport, sous forme d'un débit d'injection imposé au Nord de Djemaa. Cette représentation, initiée par le modèle ERESS, a été reprise telle que par le modèle SASS.

Au terme de l'analyse des derniers inventaires des puits de la région de Biskra, il semble fort opportun, autant pour l'amélioration de la représentativité générale du modèle SASS que pour une représentation locale plus fidèle de la structure géologique et de l'exploitation réelle, que le versant Nord des Chotts puisse faire l'objet d'une modélisation structuralement plus fine et actualisée aux prélèvements les plus récents.

Fig. 3-6 : Coupe N-S dans l'Oued Rhir, ERESS, (1972) ; Structure d'ensemble du CT et Domaine [en bleu] représenté sur le Modèle SASS



II. 2- Connaissance des paramètres de la demande en eau :

Le principe premier qui doit guider le développement des régions du Sahara Septentrional est de faire perdurer les parties exploitables du SASS le plus longtemps possible, l'amélioration de la productivité de cette ressource devant être le souci permanent des planificateurs. C'est dans le cadre de la gestion d'une « ressource commune » à « responsabilité partagée », satisfaisant la demande de façon juste et rigoureuse, mais sans aucun excès, que l'avenir de l'eau dans la région doit être envisagé.

A cet égard, on peut noter que par rapport au secteur le plus consommateur d'eau, l'irrigation, deux stratégies différentes se sont dégagées dès l'élaboration des premiers scénarios exploratoires préparés par les pays (voir « simulations exploratoires ») :

- a) La première, développée pour l'Algérie et la Libye, opte pour une extension maximale des périmètres irrigués pour répondre à des besoins croissants évidents en produits agricoles et en emplois, mais sans miser clairement sur l'amélioration de la

productivité de l'eau dans ce secteur, ce qui correspond à une stratégie « d'extensification » ;

- b) La seconde, perceptible pour la Tunisie, privilégie la réhabilitation des superficies irriguées actuelles, sans extension significative, avec des objectifs de maîtrise des pertes d'eau et d'augmentation de la rentabilité de la ressource, ce qui correspond à une stratégie de concentration et « d'intensification ».

A l'avenir, il devient évident et urgent de gérer la raréfaction des ressources en eau dans une approche holistique intégrant les dimensions économiques, sociales et environnementales. Dans ce sens, l'élaboration de scénarios de demande devra s'accompagner de l'identification des impacts écologiques et sociaux, en considérant que les ressources humaines forment avec les ressources naturelles une entité complexe comportant de fortes interactions.

Dans cette perspective, plusieurs voies d'investigations peuvent être développées dans un cadre régional pluridisciplinaire :

- a) analyse fine des systèmes de production agricoles des zones concernées afin d'élucider leurs consommations en eau, leurs productions et leurs rentabilités économiques actuelles. Cela permettra d'identifier les filières et les cultures les plus performantes susceptibles d'être reproduites et développées ;
- b) enquête sur la qualité chimique des eaux dans l'ensemble de la région et mise en place d'un système de suivi ;
- c) étude des opportunités techniques, économiques et sociales du transfert de l'eau Nord-Sud et Sud-Nord dans deux scénarios :
 - un scénario « Catastrophe » de pénurie d'eau « stratégique » ;
 - un scénario de redéploiement des cultures irriguées non appropriées aux zones désertiques (céréales par exemple...)

Dans l'immédiat, il s'agit de compléter la base de données et le modèle avec des données d'ordre socio-économique.

En effet, l'étude du SASS a accentué ses efforts d'observation et d'analyse sur le potentiel hydraulique et le modèle mathématique est un modèle essentiellement hydraulique.

Il convient maintenant d'identifier avec beaucoup de précision les agents économiques et leurs logiques, les pratiques locales de distribution de l'eau, les coûts de production, largement liés au coût de l'eau et du pompage, la valorisation actuelle et d'autres valorisations futures de l'eau.

De nouveaux scénarios d'utilisation de l'eau en fonction de ces paramètres socio-économiques viendront ainsi compléter les simulations effectuées en première phase et participer à la définition de plans de gestion durable du SASS.

III- Le CHAMP DES INTERFERENCES, ESPACE DE CONCERTATION

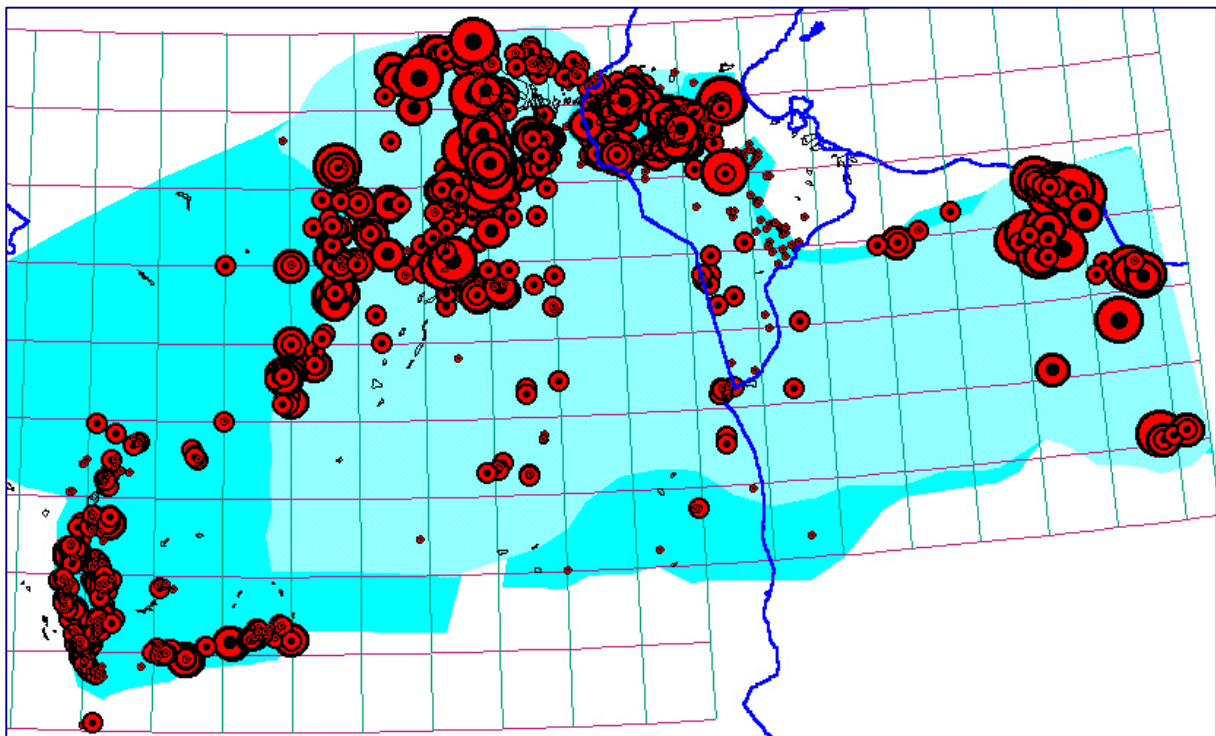
Par la technique des « Rabatements Nets » : rabattements additionnels aux rabattements propres au scénario zéro de maintien de l'actuel, le modèle numérique est en mesure de prédire l'influence d'un pompage dans une région donnée sur toute autre région du domaine, et en particulier de déterminer les influences de tout prélèvement additionnel d'un pays sur ses voisins, ces influences pouvant s'exprimer en termes de rabattements additionnels ou de diminution de débit aux émergences ou aux exutoires. Cette technique a été éprouvée pour la prévision de l'impact international du Champ de Ghadamès, de l'exploitation à long terme des réserves du Grand Erg Occidental, de la mise en œuvre de l'hypothèse forte et de l'hypothèse faible, et de tous les scénarios simulés par le modèle du SASS.

On peut aborder la question de la détermination des zones à sensibilité partagée par les trois pays en se demandant tout d'abord si la concertation est vraiment partout nécessaire ? L'examen de la carte **fig.3-7** montre par exemple que des régions très fortement exploitées, comme Adrar au Sud Ouest algérien ou Syrte au Nord Est en Libye, se trouvent à bien plus de 500 km des frontières communes.

Bien qu'appartenant au même système aquifère, ces deux secteurs sont peu susceptibles d'interférer un jour sur les pays voisins et peuvent être considérés comme des ressources présentant un caractère purement national. On conviendra que la gestion de ce type de ressources, situées à la «périphérie» du système aquifère, puisse ne faire l'objet d'aucune concertation entre les pays.

Toutefois, nous avons montré, sur l'exemple du bassin occidental, qu'une telle présentation du problème n'était valable que sur le court et moyen terme, mais que sur le long terme (à l'échelle du siècle) les impacts de ces régions pouvaient se propager très loin et atteindre ou dépasser les frontières des pays voisins.

Fig. 3-7 : Répartition des prélèvements 2000 dans le SASS



La même carte **fig.3-7** indique par ailleurs, dans la région des chotts algéro-tunisiens, une concentration de forages exceptionnelle, scellant un destin définitivement commun pour les régions de l'Oued Rhir, du Souf, du Djérid et de la Nefzaoua.

Ici, ce qui se passe chez l'un se répercute quasi-immédiatement chez l'autre ; et l'on peut considérer que, dorénavant, tout grand projet de développement hydraulique n'intégrant pas le voisinage est voué à l'échec. Ceci est valable aussi bien pour le CT [Bassin des Chotts] que pour le CI [Bassin d'Artésianisme et de l'Exutoire Tunisien], ce qui permet d'identifier d'ores et déjà deux secteurs d'intérêt commun.

Par ailleurs, les simulations réalisées sur le Modèle ont montré le grand intérêt que les trois pays portent à l'exploitation du CI dans la région de Ghadamès que l'on peut considérer également comme secteur d'observation et de concertation prioritaire.

Fig. 3-8 : le Bassin des Chotts

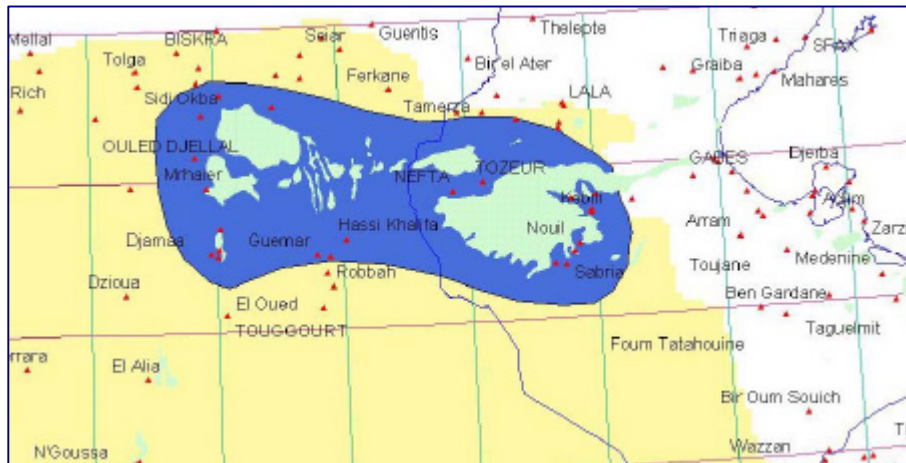
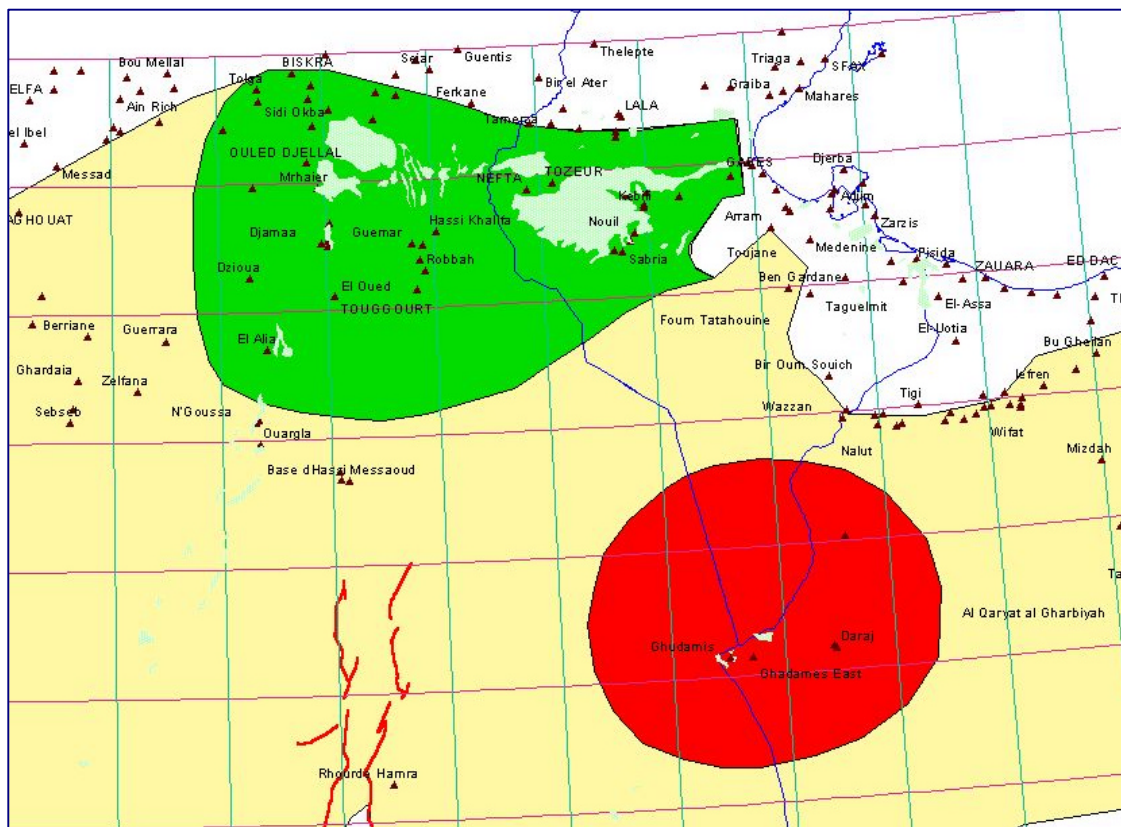


Fig. 3-9 : Bassin d'Artésianisme et de l'Exutoire Tunisien, et Bassin de Ghadamès



IV- PRODUCTION D'INDICATEURS POUR LE SUIVI ET L'ÉVALUATION : LES RESEAUX D'OBSERVATION DU SASS

Les Principaux Indicateurs de suivi et d'évaluation de la ressource en eau sont : les débits des prélèvements, l'évolution des niveaux piézométriques, l'évolution de la qualité des eaux. Pour ce qui concerne les débits de prélèvements, leur suivi passe par le jaugeage de tous les puits exploités ; le réseau comporte plusieurs milliers de forages et il semble difficile de les visiter tous annuellement : une actualisation tous les cinq ans doit être envisagée. Les possibilités de mise en place de Réseaux de suivi de la qualité et de la piézométrie sont étudiées à la lumière de l'analyse des informations contenues dans la Base de Données SASS.

IV- 1. Le Réseau qualité du SASS

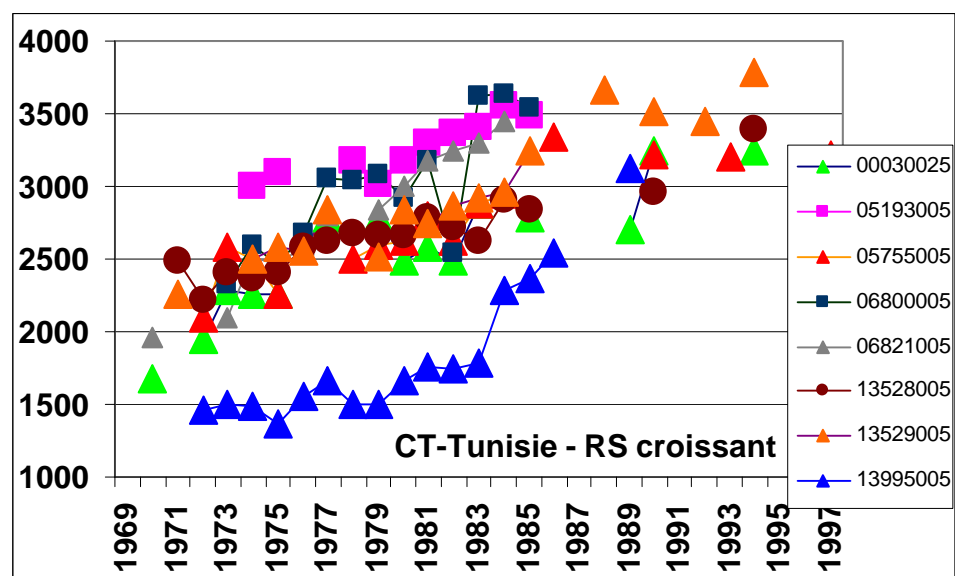
Une première analyse des salinités disponibles dans la base de données SASS autorise les observations suivantes : La table « Qualité » de la BD comporte 4600 enregistrements : 800 au CI et 3800 au CT. Par pays, ces enregistrements se répartissent ainsi : 1600 en Algérie, 200 en Libye, 2800 en Tunisie. Si l'on s'intéresse aux historiques de salinité (Résidu sec), notamment au Complexe Terminal, l'examen de la BD permet d'identifier au total 269 points d'eau présentant au minimum deux valeurs de RS mesurés à des dates différentes : 39 en Algérie, 230 en Tunisie, mais aucun en Libye.

En Algérie, les séries historiques sont peu nombreuses et peu fournies : la fréquence des mesures dans la série est peu élevée. On ne peut réellement parler d'une armature préexistante de réseau qualité, bien que les mesures effectuées convergent vers une tendance générale à l'augmentation des salinités, plus ou moins forte certes. Le réseau qualité reste à concevoir.

En Tunisie, la densité des mesures aussi bien dans le temps que dans l'espace est assez confortable et le réseau de mesure de la qualité peut être considéré comme étant d'ores et déjà installé dans la région des Chotts. Sur les historiques enregistrés, on peut constater que la tendance à l'augmentation des salinités est générale.

Toutefois, un certain nombre de forages, certes minoritaires, dérogent à la règle. Mais le résultat le plus inattendu semble être le fait que les points d'eau dont la salinité est la plus stable se trouvent être ceux qui sont les plus proches du Chott Djérid, ceux précisément qui paraissent être les plus exposés au risque de salinisation. Le diagnostic de la genèse du sel et de l'évolution des salinités dans la nappe du CT reste donc à élucider : la mise en place, la rationalisation et l'exploitation d'un réseau permanent de suivi de la qualité contribuera à améliorer nos connaissances qui sont dans ce domaine encore embryonnaires : c'est bien le moment propice pour investir dans l'acquisition des informations.

Fig. 3-10 :
Evolution des salinités dans des puits de la Nefzaoua (g/l)



En conclusion, si l'on peut considérer que pour le Complexe Terminal en Tunisie, il existe un réseau de surveillance de la qualité assez régulier, et que ce réseau permet d'ores et déjà d'asseoir les bases d'une investigation en profondeur portant sur l'évolution des salinités autour des chotts, il n'en est rien pour l'Algérie et pour la Libye ; de même que pour l'ensemble de la nappe du Continental Intercalaire, il n'existe pas de possibilités installées et régulières de suivi de la qualité. A l'exception du petit noyau qui entoure le Chott Djerid, tout reste donc à faire en vue de concevoir, réaliser et mettre en œuvre le Réseau Qualité du SASS.

IV- 2. Le réseau piézométrique du SASS

IV- 2. 1. Identification du réseau de référence

- **Identification des historiques possibles**

La Source d'informations est la Base de données « Sagesse » ; elle comporte 8800 points d'eau, dont 7500 forages, qui sont les points susceptibles de fournir une indication de niveau piézométrique. Il existe 3001 points (soit 40%) présentant une valeur (au moins) de niveau. Ce nombre passe à 1163 points d'eau lorsqu'on exige au minimum deux mesures de niveau (prises à des dates différentes) : cette population constitue potentiellement un réseau piézométrique sur la période historique de 1950 à 2000 ; elle va être soumise à une série de vérifications et de filtres destinés à éliminer les données aberrantes.

- **Filtrages successifs et Puits destinés à**

Le premier filtre vérifie que deux mesures enregistrées à des dates différentes ne sont pas identiques (au cm près). Ce filtre ramène la population « réseau » potentielle à 758 points d'eau.

Le second filtre s'applique aux points ne présentant que deux mesures avec la condition que dans ce cas il ne peut y avoir de remontée de niveau (qui correspond au non respect d'une convention de signe sur les niveaux artésiens). Ce filtre ramène le « réseau » à 659 points.

Le troisième filtre élimine les points dont l'aquifère est indéterminé, et ceux dont les coordonnées sont inexistantes ou les situent en dehors du domaine du SASS. Ainsi, il ne reste plus que 593 points d'eau. Jusqu'ici, la sélection des points d'eau s'est faite d'une manière automatique, sans intervention d'expert.

Le quatrième filtre va consister à visualiser chacune des séries identifiées précédemment, et à éliminer celles dont l'évolution est jugée inacceptable en première lecture (remontée sur trois mesures, descente anormalement élevée, etc.). Ce quatrième filtre ramène la population retenue à 467 points d'eau.

- **Groupes de points d'eau et Séries historiques de référence**

La plupart des anomalies ont été détectées et éliminées. Il restait à identifier les séries les plus représentatives, et celles susceptibles d'être intégrées dans le réseau de suivi à mettre en place : ces deux critères impliquent que la série considérée soit suffisamment fournie, assez longue, et qu'elle couvre d'une manière ou d'une autre les 20 dernières années au cours desquelles le système a connu les perturbations les plus significatives.

Il fallait pour ce faire procéder à des regroupements de points d'eau pour enrichir [combler et rallonger] les séries piézométriques existantes : pour chacun des aquifères, le regroupement se fait sur la base de la proximité des localisations géographiques et la similitude (parallélisme) des évolutions piézométriques.

Lorsque le regroupement n'est pas possible ou n'est pas souhaitable, on a affaire à des points d'eau isolés. Le résultat forme un réseau de 135 points d'eau ou groupes de points d'eau.

- **Le Réseau Piezométrique de Référence**

Le réseau est ensuite soumis à un niveau de critique supplémentaire :

- a) pour les points isolés, on vérifie que les valeurs piézométriques (niveaux et leur évolution) sont du même ordre de grandeur que celles du secteur considéré (critère de vraisemblance régionale, que ce soit au niveau de la carte piézométrique d'ensemble de la nappe, carte de référence et carte calculée par le modèle, en 1950 ou 2000, ou au niveau de la carte de rabattements calculée par le modèle pour la période correspondante). Des erreurs de localisation peuvent alors être détectées : si elles ne peuvent être facilement corrigées, le point est éliminé.
- b) Pour les groupes, on commence par pressentir un « chef de groupe » ou « tuteur » : point d'eau qui présente la série la plus longue, la plus « actuelle » comportant les mesures les plus récentes, et celle dont l'évolution générale s'éloigne le moins de celle calculée par le modèle du SASS.

Ensuite on commence par éliminer les points d'eau apportant une information strictement redondante et dont les séries paraissent les moins performantes, ainsi que ceux dont l'évolution est par trop éloignée de celle du tuteur sans que l'on sache expliquer cette différence.

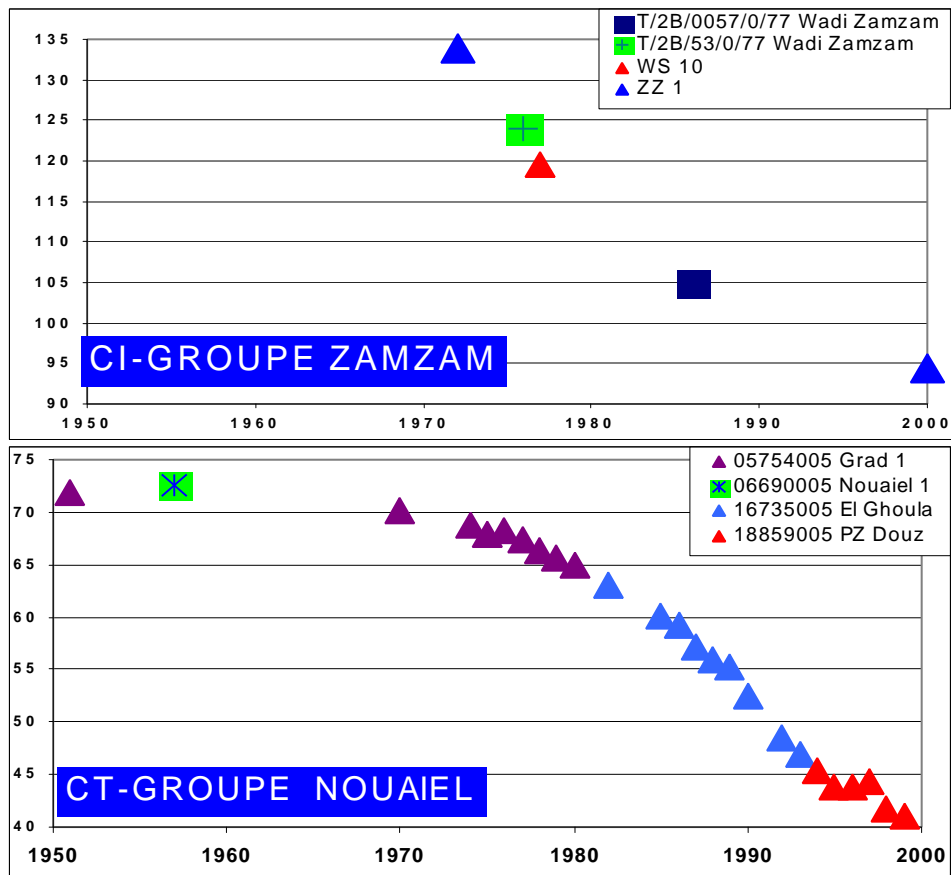
On procède alors à la construction de la série la plus longue et la plus représentative du groupe, sans redondance de l'information ce qui signifie que l'on ne garde qu'une seule valeur de niveau pour une date donnée : on complète la série en empruntant des valeurs aux autres points du groupe, éventuellement en opérant par translation verticale de la courbe « empruntée » tout en respectant la pente générale de l'évolution piézométrique, laquelle doit être impérativement la même ou très proche pour l'ensemble du groupe.

En cas d'hétérogénéité de la variation piézométrique au sein d'un groupe, on peut reconstituer des sous-groupes. Des exemples de regroupements sont présentés **Fig.3-11**.

Le résultat final est un réseau de 73 points d'eau ou groupes de points d'eau [le groupe étant représenté par son tuteur], soit :

- 46 au CI (25 points isolés et 21 groupes) :
 - 12 en Algérie : 6 points isolés et 6 groupes
 - 16 en Tunisie : 9 points isolés et 7 groupes
 - 18 en Libye : 10 points isolés et 8 groupes
- 27 au CT (4 points isolés et 23 groupes) :
 - 8 en Algérie : 8 groupes
 - 15 en Tunisie : 2 point isolé et 13 groupes
 - 4 en Libye : 2 points isolés et 2 groupes

Fig.3-11 : Groupes de points d'eau et séries historiques de référence



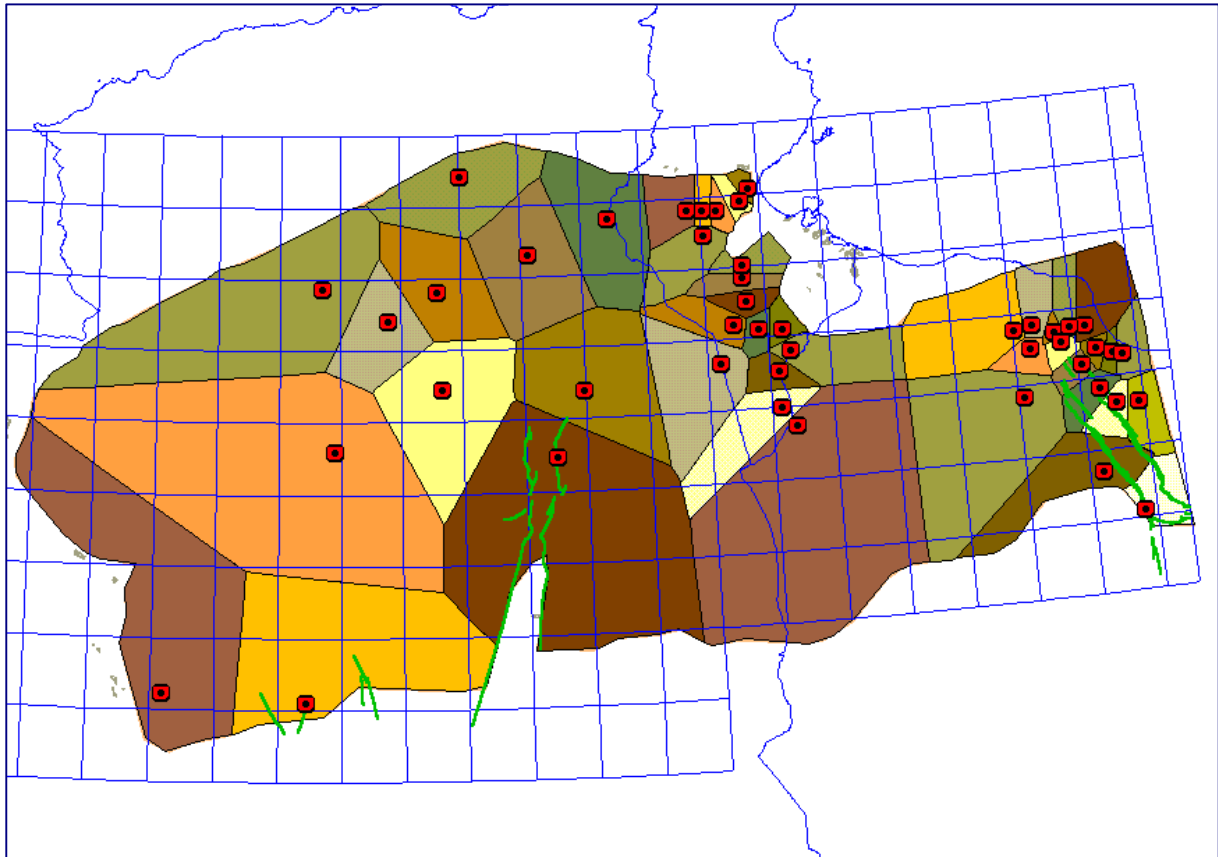
IV- 2. 2. Analyse du réseau de référence

L'analyse du Réseau s'effectue par référence à un certain nombre d'indicateurs par lesquels il est possible d'affecter un niveau de qualité à chacun des points de référence du réseau.

- **Couverture Spatiale : le taux de présence intrinsèque**

Il s'agit de mesurer la densité de la couverture spatiale assurée par la surveillance piézométrique. Pour attribuer à chaque point d'eau le domaine qu'il est censé contrôler, on délimite les polygones d'influence par la méthode des médiatrices. Le résultat pour le CI est présenté Fig. 3-12.

Fig. 3-12: Polygones d'influence du réseau piézométrique du CI



Comment qualifier l'état de la couverture spatiale par les points du réseau actuel ?

On pourrait retenir pour le SASS le critère de un point aux 10.000 Km² comme couverture minimale. 18 points sur 46 ne remplissent pas ce critère au CI, ce qui ne représente que 40%, mais les polygones correspondants représentent 90% en superficie du CI. Pour le CT, ces chiffres sont respectivement de 48% des points, correspondant à 96% de territoire insuffisamment couvert par la surveillance piézométrique.

- **Surveillance de l'Exploitation et Contrôle des Rabattements**

La fonction essentielle du réseau piézométrique est de bien renseigner sur le niveau d'exploitation et de contrôler convenablement l'évolution des rabattements.

On peut mesurer le niveau de surveillance des prélèvements par la densité de débit de chacun des polygones d'influence (Volume annuel prélevé rapporté à la superficie du polygone). En termes dimensionnels, cet indicateur représente une lame d'eau. Rapporté à l'exploitation 2000, il varie de zéro à 18 mm pour le CI. Pour le CT, il atteint 363 mm/an à Ras El Ain.

Cet indicateur renseigne sur l'intensité d'exploitation mais ne permet pas de classer les piézomètres ; un piézomètre est certes « bon » s'il est implanté au cœur d'un champ captant car il fournit les rabattements les plus significatifs ; mais n'en est pas moins bon s'il est loin des captages et fournit un rabattement non influencé.

- **Durabilité des points du réseau**

Il s'agit d'estimer l'aptitude de chacune des séries à se prolonger à l'avenir.

Cet indicateur intègre à la fois : longévité (longueur de la série), régularité (fréquence des mesures), aptitude à la poursuite des mesures (inverse de l'ancienneté).

IV- 2. 3. Consolidation du réseau de référence:

- **Densification spatiale**

La première mesure pour consolider le réseau doit améliorer la couverture spatiale. On peut raisonnablement admettre qu'une couverture minimale de un point pour 10.000 Km² constitue un objectif plausible à court terme, d'autant que les zones les moins bien couvertes sont précisément celles où l'étude du SASS propose d'orienter le plus gros des prélèvements à venir et des investigations à mettre en œuvre.

- **Adéquation au calage du Modèle SASS**

Une densité spatiale plus fournie permettra une meilleure représentativité du modèle et une plus grande fiabilité des résultats en simulations. L'un des résultats de l'étude SASS a été de montrer que l'observation des rabattements dans les zones à surface libre constituait l'une des clés d'une meilleure fiabilité en prévision.

Comment se situent les points du réseau actuel de référence par rapport aux régions à surface libre ? au CI, la grande réserve à surface libre du Continental Intercalaire de l'Erg Occidental n'est contrôlée que par deux puits témoins : Oued Mehégène et Tin BouZid.

Le contrôle de toute cette région du CI est à renforcer considérablement. Concernant la nappe libre du CT, qui représente des étendues importantes, notamment dans le sud tunisien et algérien, elle n'est contrôlée que par deux points d'eau (Gassi Touil et Alenda).

Un autre domaine où la surveillance piézométrique doit apporter une contribution est le suivi de la recharge. Dans le choix des nouveaux puits témoins, l'objectif du suivi de la recharge doit être présent.

- **Couverture des RISQUES**

La **Fig. 3-13**, où les rabattements totaux (somme du scénario zéro et du dernier scénario simulé, respectivement CI8 pour le CI et CT5 pour le CT) sont en bleu (supérieurs à 100m au CI et à 40m au CT) présente la **carte des risques du SASS**, qui comportent notamment :

L'Exutoire Tunisien (CI) : l'Exutoire tunisien se trouve correctement couvert en terme de surveillance piézométrique, par six puits témoins du réseau actuel. Pour accroître l'efficacité du contrôle, il faudrait dédier intégralement l'un des forages du groupe CF à la surveillance en le dotant d'un équipement de mesure permanent.

Le Bassin Artésien (CI) : trois points du réseau permettent de suivre l'artésianisme dans la région de l'Oued Rhir. C'est peu pour un périmètre où les rabattements supplémentaires dépasseront 100m sur plus de 80.000 Km². Un renforcement du réseau s'impose.

Le Bassin de Ghadamès (CI) : Le rabattement prévu dans ce secteur dépasserait 100m sur un domaine de 50.000 km². Là aussi, la surveillance est aujourd'hui dérisoire ; elle n'est assurée que par deux points. Le renforcement du réseau s'impose particulièrement.

Le Bassin Occidental (CI) : Ici, l'acuité du problème se résume en trois chiffres :

-Trois cent mille Km² de superficie de nappe, -Trois milliards de m³/an additionnels simulés sur le Modèle, -Trois puits témoins composent le réseau actuel de surveillance.

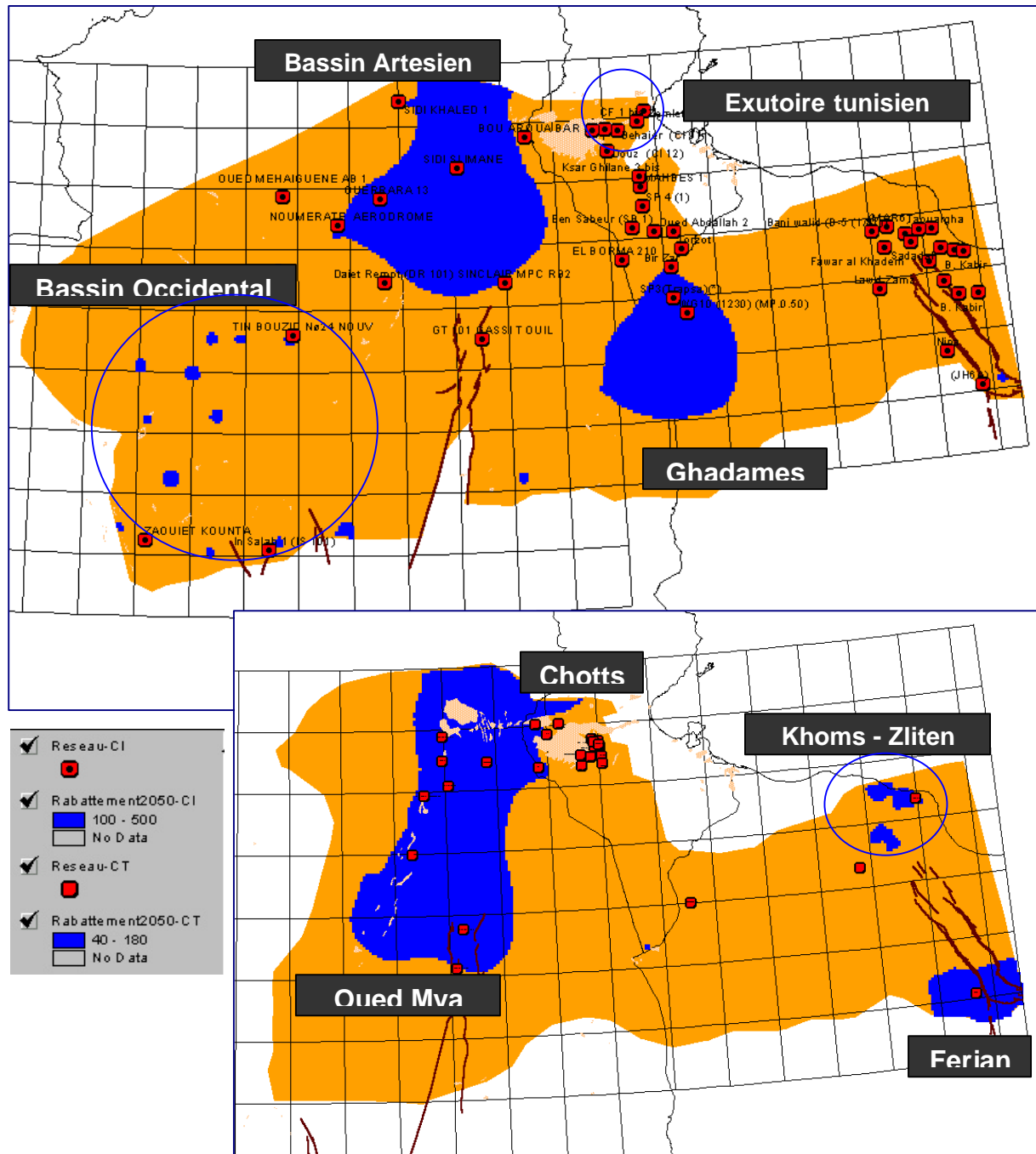
Les Chotts algéro-tunisiens (CT): Par rapport au risque « chotts », la surveillance piézométrique est satisfaisante dans la Nefzaoua avec 11 puits témoins sur moins de 2000 Km², moins fournie dans le Djerid avec 3 puits, encore moins dans Oued Rhir et Souf avec six points pour toute la région.

L'Oued Mya (CT): Ce nouveau champ captant, simulé sur le modèle, ne dispose encore d'aucune surveillance piézométrique : le puits témoin le plus proche se trouve à plus de 100 Km du site.

Ferjan (CT) : Les rabattements supplémentaires attendus dépassent 50m. Il faudra y renforcer la surveillance, actuellement assurée par un seul groupe de puits.

Khoms –Zliten (CT) : dans cette zone côtière, le niveau de la nappe serait à une cote de plus de 50m sous le niveau de la mer en 2050. Un monitoring très sévère doit être mis en place dès aujourd'hui.

Fig. 3-13: La Carte des Risques du SASS et le Réseau Piézométrique de Référence



IV- 2. 4. Devenir du réseau de référence

Comment doit-on procéder pour assurer la poursuite des observations dans les meilleures conditions ? comment doit-on choisir les points d'eau qui vont constituer le réseau de surveillance du SASS ? Quels sont les points du réseau actuel que l'on doit conserver, et

ceux que l'on doit penser à remplacer ? Où doit-on remplacer les forages par des piézomètres pour assurer une plus grande « autonomie » des mesures vis à vis des régimes d'exploitation ? Quels sont les points nouveaux à implanter ?

Au terme de l'analyse qui vient d'être présentée, une réponse adéquate à toutes ces questions nécessite un traitement au cas par cas. On peut toutefois tenter quelques éléments de réponses à l'examen de quelques caractéristiques du réseau.

- **Poursuivre les séries avec les points les plus récents**

La durée de vie des forages étant limitée, il faut choisir les points les plus jeunes du réseau pour assurer la poursuite des séries historiques. Malheureusement, l'examen des dates de création des points du réseau indique des âges généralement élevés aussi bien au CI qu'au CT : près de quatre forages sur cinq ont plus de 20 ans d'âge, et un forage sur trois a plus de quarante ans. Un grand nombre de « tuteurs » devront être remplacés : il faudra s'y préparer et sélectionner les points d'eau auxquels doit être assignée cette fonction.

- **Transformer en Piézomètres les Forages les moins profonds :**

Le remplacement des forages par des piézomètres s'effectue d'autant plus aisément que la profondeur de captage est faible. Au Complexe Terminal, cette opération ne devrait pas rencontrer de difficulté particulière, mais au CI, les captages sont généralement très profonds, excepté dans le Bassin Occidental.

IV- 2. 5. En conclusion

Au terme d'une première analyse des observations piézométriques de la Base de Données du SASS, il a été possible, grâce à des regroupements de forages sur des critères de proximité et de similitude de comportement, d'identifier un Réseau de Référence Historique composé de 73 points d'eau : 46 au CI et 27 au CT.

La répartition par pays, qui n'entre pas dans les critères de sélection, est globalement assez équilibrée : 20 points en Algérie, 22 en Libye, 31 en Tunisie. Par contre, la répartition dans l'espace du SASS est très inégale : elle est en moyenne très faible, de l'ordre de 1 point pour 22.000 Km² ; et plus de 90% du SASS est couvert par moins de 1 point aux 10.000 Km².

Par ailleurs, l'examen des zones à risques a permis d'identifier les secteurs où une densification du réseau paraît nécessaire à court terme. La gestion à venir des points du réseau de référence doit se faire au cas par cas sur le terrain, que ce soit pour l'implantation des points nouveaux dans les secteurs non couverts, ou pour le choix des points d'eau existants qui auront pour fonction d'assurer la poursuite et la pérennisation des séries piézométriques du SASS.

V- Un MECANISME DE CONCERTATION PERMANENT POUR LA GESTION COMMUNE DU SASS

V. 1- Les contours possibles d'une concertation

Les simulations réalisées sur le Modèle ont mis en évidence trois zones où les ressources partagées paraissent les plus vulnérables :

- a) le Bassin de Ghadamès dans le CI ;
- b) le Bassin d'Artésianisme et de l'Exutoire Tunisien dans le CI ;
- c) le Bassin des Chotts pour le CT.

Au CI, le bassin de Ghadamès présente des risques de rabattements excessifs, mais ce risque se joue sur le moyen terme, et le contrôle en est relativement facile : champs de pompages exclusivement publics, concentrés dans l'espace et objets d'une gestion centralisée.

Sur le second bassin : le Bassin d'Artésianisme et de l'Exutoire Tunisien, le risque se joue certes sur le court terme mais le contrôle y est également facile : les forages, tous profonds, ne sont pas très nombreux. L'accès à l'information y est donc techniquement aisé. Le secteur le plus exposé et le plus fragile est celui des chotts algéro-tunisiens au CT.

C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte.

Entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, le Complexe Terminal aujourd'hui, le Continental Intercalaire demain, se trouvent dans un état d'exploitation tel qu'il faudra bien un jour ou l'autre penser à y contrôler ensemble, sinon à y réduire, les débits de pompages. Comment contrôler ces débits dans le cadre d'une volonté des Etats de contribuer mutuellement à garantir l'avenir de la région, notamment par une politique concertée de préservation des ressources en eau ?

Parmi les raisons objectives qui poussent à la concertation, la gestion des crises et notamment le risque de dégradation de la ressource par suite d'une surexploitation constitue une raison majeure. Les problèmes techniques rencontrés par les différents pays du SASS les conduisent naturellement à s'organiser ensemble : la pratique du partenariat au cours du projet SASS a progressivement forgé la confiance mutuelle entre équipes techniques, la conscience que les problèmes rencontrés par certains dépendent en partie des actions menées par d'autres, la conviction que l'action commune augmente l'efficacité des solutions, et la certitude que l'échange d'informations, qui fonde toute solidarité, est devenu avec la fin du projet SASS une activité non seulement possible mais nécessaire.

Le procédé qui garantit le contrôle en présentant le minimum de contraintes, c'est bien l'échange d'informations. A ce titre l'OSS, à travers le projet SASS, a d'ores et déjà permis des avancées qui sont de l'ordre du miracle : la Base de Données élaborée renfermant l'ensemble des informations actuelles et passées sur tous les points d'eau, leurs niveaux, leurs débits, est opérationnelle et accessible aux trois pays. A cet égard, la bonne volonté des trois autorités de l'eau pour la communication des informations a été exemplaire. Par ailleurs, le Modèle du SASS est d'ores et déjà disponible et opérationnel dans chacun des trois pays. Une forme de concertation efficace peut d'abord consister à assurer l'entretien, le développement et l'actualisation permanente de ces deux outils : Base de Données et Modèle de Simulation. Cette mission doit être confiée à un organe permanent présentant les qualités indispensables à la pérennisation de l'opération.

V. 2- De l'étude du SASS au projet de mécanisme

L'importance accordée par l'Algérie, la Libye et la Tunisie à la concertation en matière de ressources en eau partagées a donné lieu à trois mécanismes institutionnels bilatéraux :

- la commission technique mixte algéro-tunisienne de l'hydraulique et de l'environnement, établie au sein d'une 'grande commission', qui traite les questions relatives à l'évaluation des ressources en eau partagées, à la lutte contre la pollution, à l'échange d'informations sur les programmes d'aménagement hydraulique, au suivi des études concernant le SASS, et à la consolidation de la coopération bilatérale en matière de gestion des eaux
- les groupes de travail au sein de la 'grande commission' algéro-libyenne, pour ce qui concerne les eaux partagées par l'Algérie et la Libye; Les deux pays ont décidé de créer un 'comité technique mixte dans le domaine des ressources en eau'.
- la commission sectorielle tuniso-libyenne de l'agriculture, créée dans le cadre de la 'grande commission mixte tuniso-libyenne', vouée à l'échange d'expériences, la protection des nappes, les techniques de CES, l'identification d'études sur les eaux souterraines partagées, le suivi des études du SASS.

Participent aux travaux des commissions et groupes de travail ci-dessus les hauts fonctionnaires des ministères chargés de l'hydraulique. Les décisions sont consignées dans des procès verbaux. Bien que les mécanismes institutionnels mentionnés ci-dessus se soient avérés efficaces, dans la mesure où ils ont favorisé la discussion de thèmes importants dans le domaine de la gestion des eaux partagées, ils sont, et restent, bipartites. De plus, il ne sont pas suffisamment autonomes, dès lors qu'ils s'intègrent dans des mécanismes institutionnels ayant des objectifs plus larges.

La situation actuelle du SASS nécessite une concertation plus étroite entre les trois pays, par le biais d'un mécanisme tripartite permanent chargé uniquement du SASS. A cet effet, un certain nombre de propositions portant mécanisme de concertation s'inspirant des formes institutionnelles existantes, ont été présentées dans le cadre du projet FAO-TCP/RAB/0065, mené en étroite coordination avec l'OSS et les pays concernés.

Parmi les attributions envisageables du mécanisme tripartite, les propositions suivantes ont été formulées :

- 1- recueillir, rassembler et évaluer les données hydrogéologiques relatives au SASS afin d'identifier les problèmes et les solutions en vue d'agir au moment opportun ;
- 2- dresser l'inventaire des prélèvements, et des structures et installations hydrauliques y afférentes ;
- 3- contribuer à définir les objectifs, les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau du SASS ;
- 4- élaborer des programmes communs ou harmonisés de surveillance des ressources en eau et de traitement et d'évaluation des données ;
- 5- servir de cadre pour l'échange d'informations sur les prélèvements et les utilisations de l'eau, et sur les installations connexes existantes et prévues qui risquent d'avoir un impact transfrontières, et, en général, servir de cadre pour l'échange d'informations sur tous les aspects se rapportant aux ressources en eau du SASS ;

- 6- établir des procédures d'alerte et d'alarme ;
- 7- promouvoir la coopération et encourager la coopération dans le cadre de programmes de recherche scientifique ;
- 8- favoriser l'harmonisation des mécanismes institutionnels relatifs aux ressources en eau souterraines des trois pays ;
- 9- promouvoir la réalisation d'études, et y participer ;
- 10- favoriser la coordination des activités des équipes nationales afin de renforcer la prévention, la maîtrise et la réduction de l'impact transfrontière de la gestion des ressources souterraines ;
- 11- organiser des consultations entre les responsables des trois pays ;
- 12- élaborer un rapport annuel sur l'état du SASS.

On peut considérer que les trois pays du SASS sont favorables à la création d'un mécanisme tripartite permanent de concertation au niveau du SASS. Le point de départ est la nécessité de maintenir et de développer la base de données commune du SASS, ainsi que tout autre système pour l'échange régulier des données et des informations. L'échange de données doit par la suite servir de base à la formulation de politiques et de stratégies de l'eau. C'est ainsi que la mise en place d'un mécanisme institutionnel élaboré et durable s'avère nécessaire, sa mise en œuvre devant se faire d'une manière progressive.

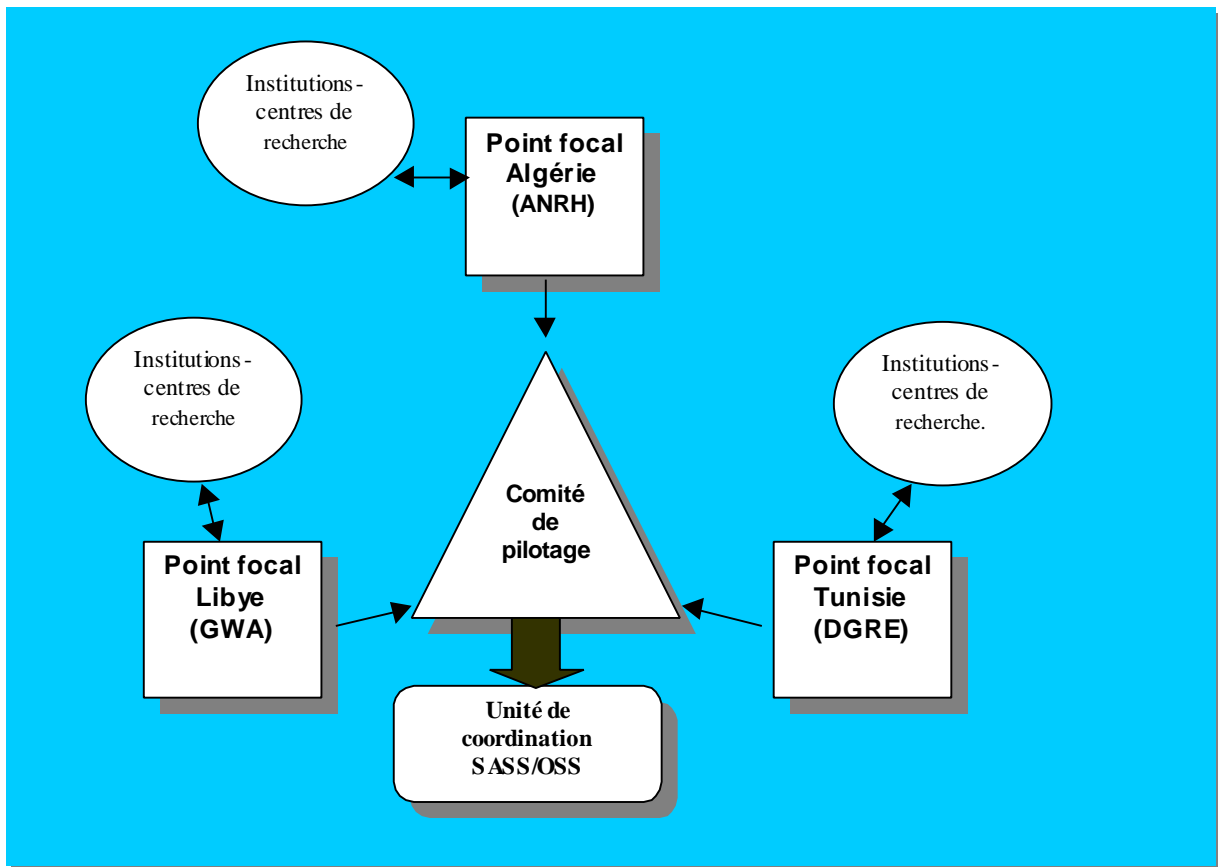
V. 3- Ateliers Nationaux et Atelier Régional

La méthode de travail choisie par le projet RAB-0065 pour la préparation du mécanisme a consisté à élaborer toute la réflexion, les idées et les propositions au terme d'expertises réalisées par des consultants nationaux de chacun des trois pays. Toutes les propositions qui précèdent ont ensuite été discutées au cours des trois ateliers nationaux réalisés respectivement à Tripoli, Tunis et Alger en Novembre 2002. De ces trois ateliers ressortent nettement un certain nombre de points de convergence et de consensus portant sur :

- La nécessité d'assurer une continuité des travaux portant sur l'amélioration de la connaissance du système et de son exploitation (évaluation des risques, gestion de la Base de Données commune, réactualisation du Modèle, mise en place d'un réseau commun d'observation, formation, appréhension des aspects socio économiques, développement de la recherche, etc...)
- La nécessité de la mise en place d'un mécanisme de concertation et de son ancrage institutionnel dans une première phase au sein d'un organisme international : l'OSS
- La nécessité de renforcer les outils techniques, la définition d'un programme de travail, notamment le réseau d'observation commun, et d'un protocole d'échange de l'information
- La mise en place progressive de ce mécanisme, partant d'une structure efficace et légère, vers un mécanisme autonome plus élaboré et doté d'attributions plus importantes à terme.

L'Atelier Régional de synthèse s'est tenu à Rome les 19-20 Décembre 2002. Au terme des discussions et des débats qui se sont déroulés au cours des deux journées, les participants ont approuvé la forme présentée ci-après concernant la mise en place du Mécanisme de Concertation du SASS.

Fig. 3-14 : Schéma du Mécanisme de concertation dans sa première phase



V. 4- Caractéristiques du Mécanisme de concertation

Les principales caractéristiques, convenues lors de l'Atelier de Rome, sont les suivantes :

L'Objectif est de Coordonner, promouvoir et favoriser la gestion rationnelle et concertée des ressources en eau du SASS.

La Structure est composée de :

un comité de pilotage composé par les structures nationales en charge des ressources en eau, agissant en tant que points focaux nationaux. Le comité se réunit en session ordinaire une fois par an, et en session extraordinaire à la demande de l'un des trois pays ; la réunion dudit comité se tient alternativement dans chacun des pays ; la présidence du comité est assurée par le pays hôte

une unité de coordination animée par un coordinateur désigné par l'OSS en concertation avec le comité de pilotage ;

un comité scientifique ad hoc pour l'évaluation et l'orientation scientifique, à mobiliser en tant que de besoin.

Statut juridique :

L'unité de coordination est gérée et abritée par l'OSS.

Attributions :

- gestion des outils développés par le projet 'SASS' (base de données et modèle de gestion) ;
- mise en place et suivi d'un réseau d'observation de référence ;
- traitement, analyse et validation des données sur la connaissance de la ressource ;
- développement de bases de données sur les activités socio-économiques dans la région, en rapport avec les usages de l'eau ;
- production et publication des indicateurs sur la ressource et les usages dans les trois pays ;
- promotion et réalisation d'études et de recherches conduites en partenariat par des compétences des trois pays ;
- élaboration et mise en œuvre de programmes de formation et de perfectionnement ;
- actualisation du modèle du SASS, d'une façon régulière ;
- réflexion et formulation de propositions sur l'évolution et le fonctionnement du mécanisme de concertation, et sur sa mise en œuvre dans la deuxième phase.

Financement :

Chaque pays finance les frais de fonctionnement de son point focal.

Le fonctionnement de l'unité de coordination est assuré par des subventions et des dons octroyés à l'OSS par les pays concernés, les partenaires de coopération, etc.

CONCLUSIONS

L'un des objectifs 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, 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, 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 1963 ont été conçus comme des mono-couches indépendants;

- du côté libyen, les couches de séparation entre formations aquifères sont moins épaisses et depuis le premier modèle régional 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 au profit d'une représentation Multicouche capable de 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.

- **Base de Données et Système d'Informations**

Cette phase du projet a comporté le diagnostic de l'existant, l'élaboration du modèle conceptuel, la réalisation et la mise en œuvre d'une BD commune. L'ampleur de la tâche se mesure à la diversité et à la multiplicité des opérations réalisées sur les 8800 points d'eau inventoriés : collecte, homogénéisation des systèmes de classement et d'identification, critique, détection des données aberrantes, correction, validation,...

Le système d'informations obtenu, dénommé « Sagesse », autorise la mise à jour et l'ajout de nouvelles données, les requêtes statistiques, les graphiques, les connections BD-SIG-Modèle.

- **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 piézométrique 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. Par ailleurs, la reconstitution des historiques de Prélèvements s'est

présentée avec quelque difficulté étant donné le grand nombre des 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.

- **Exploitation des Ressources et Gestion des Risques**

L'approche « minière » de la ressource exploitable des nappes réputées « fossiles », qualifiée uniquement par les rabattements admissibles, 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, dans un ordre de gravité décroissant : la réalimentation potentielle par les Chotts et l'augmentation des salinités, le tarissement des Exutoires, d'importantes interférences entre pays, la disparition de l'artésianisme, des hauteurs de pompages excessives.

- **Scénario de Référence et Simulations Exploratoires**

Les calculs effectués sur le Modèle ont clairement montré que la simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres sur chacune des deux nappes, et ce notamment sur l'ensemble du bassin des chotts. Une telle situation serait inacceptable pour le Complexe Terminal : le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. La simple poursuite de l'existant, du moins dans le CT, serait donc tout à fait inacceptable pour la région des Chotts. Là, il faudra sérieusement envisager la réduction des prélèvements comme un scénario plausible, et s'y préparer d'ores et déjà

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 inacceptables 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 micro-Modèle : une démarche optimisation-simulation**

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.

- **Perspectives nouvelles et Durabilité du système**

L'un des résultats des investigations effectuées sur ce modèle a permis de vérifier qu'il existait une possibilité de porter l'exploitation par forages du SASS, estimée à 2.2 Milliards de m³ en 2000 [1.33 en Algérie, 0.55 en Tunisie, 0.34 en Libye], jusqu'à un niveau de 7.8 Milliards de m³/an à l'horizon 2030, et ce tout en respectant dans une certaine mesure les contraintes relatives aux risques de dégradation de la ressource. L'atteinte d'un tel niveau de développement de la ressource ne peut se faire qu'au prix d'une rupture totale avec les régions traditionnelles d'exploitation intensive.

En effet, 80% des prélèvements additionnels devront se faire dans des régions «nouvelles» et éloignées : 3,5 Milliards dans le Bassin Occidental du CI, 0,6 Milliard aux confins sud du CT... 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.

Une telle éventualité ferait passer l'exploitation du SASS au niveau de huit fois ses ressources renouvelables. Une telle opération n'est évidemment réalisable que par un très important puisage sur les réserves du système, dans les zones à surface libre du bassin occidental, où l'on est assuré d'un minimum de rabattements. On doit toutefois souligner la nécessité qu'il y a de confirmer certains des résultats obtenus : malgré les progrès réalisés par le projet SASS, des incertitudes subsistent dans la connaissance du système, qui nécessiteront d'entreprendre de nouvelles investigations.

- **Maîtrise des Risques et Indicateurs de suivi de la ressource**

Comment exploiter les nappes sahariennes dans l'optique d'un développement durable ? Les trois pays concernés par le devenir du système sont condamnés à rechercher ensemble une forme de gestion commune pour minimiser les risques liés à l'exploitation du bassin. L'un des facteurs de risque concerne l'ignorance des effets et les dangers qui résultent d'une mauvaise connaissance de la nappe. La levée de ces incertitudes contribuera à améliorer davantage la représentativité du modèle et augmenter encore la fiabilité des résultats des simulations effectuées.

Les investigations et les recherches à venir doivent porter sur les questions relatives à :

- l'Exutoire Tunisien et le champ des Transmissivités connexes ;
- l'Emmagasinement en nappe libre ; le poids du Cambro-Ordovicien ;
- la nature de la limite orientale; la représentation du Golfe de Syrte ;
- les Foggaras ;
- les Chotts ;
- la Recharge des Aquifères ;
- l'exploitation des Réserves du Bassin Occidental ;
- la sensibilité du Modèle à ses Paramètres.

Il est par ailleurs primordial qu'un Réseau de Référence permanent soit mis en place pour assurer la production d'Indicateurs fiables et permettre le suivi et l'évaluation de la ressource : niveaux de prélèvements, réseau piézométrique, réseau qualité, réseau hydro-pluviométrique...

- **De l'étude en Partenariat du SASS à la nécessité d'une gestion commune**

Entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, le Complexe Terminal aujourd'hui, le Continental Intercalaire demain, se trouvent dans un état d'exploitation tel qu'il faut déjà penser à y contrôler ensemble, sinon à y réduire, les pompages. Parmi les raisons objectives qui poussent à la concertation, la gestion des risques mis en évidence par l'étude du SASS constitue une raison majeure.

Les problèmes techniques rencontrés par les différents pays du SASS les conduisent naturellement à s'organiser ensemble : la pratique du partenariat au cours du projet SASS a progressivement forgé la confiance mutuelle entre équipes techniques, la conscience que les problèmes rencontrés ou pressentis par les uns dépendent en partie des actions menées par d'autres, et la conviction que l'action commune augmente l'efficacité des solutions.

Les trois pays du SASS sont favorables à la création d'un mécanisme tripartite permanent de concertation pour la gestion commune du SASS. Le point de départ est la nécessité de maintenir et de développer la base de données commune et le modèle. L'échange de données doit par la suite servir de base à la formulation de politiques et de stratégies de l'eau.

C'est ainsi que la mise en place d'un mécanisme institutionnel élaboré et durable s'avère nécessaire, sa mise en œuvre devant se faire d'une manière progressive.

- **Mise en place d'un Mécanisme de Concertation Permanent**

La mise en place du mécanisme de concertation a suscité un large débat, organisé en trois ateliers nationaux. Les points de convergence et de consensus issus de ces journées ont été validés par un atelier régional de synthèse. Ces points concernent notamment :

- la nécessité d'assurer la continuité des travaux portant sur l'amélioration de la connaissance du système et de son exploitation (évaluation des risques, gestion de la Base de Données commune, actualisation du Modèle, mise en place d'un réseau commun, formation, développement de la recherche),
- nécessité de la mise en place d'un mécanisme de concertation et de son ancrage institutionnel dans une première phase au sein d'un organisme international, l'OSS,
- nécessité d'une mise en place progressive, partant d'une structure efficace et légère, vers un mécanisme autonome plus élaboré et doté d'attributions plus importantes à terme.

Les principales caractéristiques, convenues lors de l'Atelier Régional, confèrent au mécanisme l'objectif de coordonner, promouvoir et favoriser la gestion rationnelle et concertée du SASS. Sa structure comporte, dans la phase de démarrage :

- a) un Comité de Pilotage composé des structures nationales chargées des ressources en eau agissant en tant que points focaux nationaux,
- b) une Unité de Coordination gérée et abritée par l'OSS,
- c) un comité scientifique ad-hoc. Ses attributions sont multiples et centrées autour de la production d'indicateurs de suivi, du développement des bases de données et des modèles, de la promotion d'études, de recherches et de formations, de la réflexion sur l'évolution future du mécanisme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANRH, DRISO-Adrar ; 1998 : Inventaire des foggaras du Touat et Tiddikelt.

AQUATER-IDROTECNECO ; 1981 : Hydrogeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. ; Sec Agr Reclam Land Dev. Tripoli

ARMINES & ENIT ; 1984 : Modèle mathématique du Complexe Terminal Nefzaoua-Djerid ; Min. agr. Tunisie.

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 plate-forme saharienne ; rapp. int. DGRE/OSS ; Mai 2002

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

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

Ben BACCAR ; 1987 : Hydrogéologie des Matmatas ; DGRE, 65p.

Ben DHIA H. ; 1983 : Les provinces géothermiques en Tunisie ; potentialités géothermiques de la Tunisie méridionale ; thèse doc. Es sc. Univ. Bordx I.

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

BISHOP WF. ; 1975 : Geology of Tunisia & adjacent parts of Algeria and Libya ; Bull Amer Assoc Petrol Geol, 59, 413-450.

British Geological Survey ; 1997 : Recharge characteristics and groundwater quality of the Grand Erg Oriental Basin ; EC rep.

BRL ingénierie ; 1997 : Ghadames Project water resources ; Final report – vol. 2 : Mathematical Model.

BRL ingénierie ; 1997 : Ghadames Project water resources ; Final report – vol. 1 : geology, hydrogeology, water cost.

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

BRL ingénierie ; 1999 : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes – Modélisation du Complexe Terminal.

BRL ingénierie ; 1999 : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes – Modélisation du Continental Intercalaire.

BRL ingénierie ; 2000 : Plan Dir. Gén. Dév. Rég. sahariennes – Note complémentaire sur le Modèle du CT.

BURGEAP & Direction des carburants ; 1963 : Etude du Continental Intercalaire Saharien.

BUSSON G. ; 1970 : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens ; CNRS.

BUSSON G. ; 1970 : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens ; CNRS.

CORNET A., ROGNON Ph. ; 1961 : Les débits circulant dans la nappe du CI Sahara alg. Pub 57 AISH (coll Athènes) et Chron. d'hydrog. n°11,1967

CORNET A. ; 1964 : Introduction à l'hydrogéologie saharienne ; Rev. de géogr. phys. et de géol. dyn. (2), vol. VI, fasc. 1 ; 5-72.

DANIEL J. M. ; 1967 : Etude des répercussions d'une exploitation de longue durée sur un système aquifère artésien. ; Chron. Hydrog. n°11 ; BRGM

De MARSILY G. & al ; 1978 : Modelling of large multilayered aquifer systems, theory and applications ; J. of Hydrology, 36, p 1-33.

De MARSILY G., KINZELBACH W., MARGAT J., PALLAS P., PIZZI G. : Observatoire du Sahara et du Sahel, Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), Avis du Comité d'Evaluation sur le Modèle du SASS, janvier 2002

DUBIEF J. ; 1963 : Le climat du Sahara, t1&t2 ; Mémoires Inst. Rech. Sahariennes ; Alger.

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

FABREF J. ; 1976 : Introduction à la géologie du Sahara algérien ; SNED, Alger.

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

FRANLAB ; 1972 : Etude et gestion des ressources en eau du Sahara septentrional. Modèles mathématiques ; proj. ERESS

FRANLAB; 1978 : Champ de Hassi Messaoud ; Possibilités de production d'eau sur les aquifères du Turonien et de l'Albien C.I. ; Sonatrach.

GEFLI ; 1978 : Survey for the development of the Central Wadi Zone & Golf of Sirte ; Groudwater resources ; Final synthesis report ; Text & App 2&3- tome1 : 151p ; tome2 : pp152-418 ; App2 : rill. rep ; App3 : water analyses, hydrogeol. cross sections, maps. - ref : AL-WR-205.

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

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

GONFIANTINI, CONRAD, FONTES; 1976: Etude isotopique du CI et relations autres nappes Sahara sept ; Isot. Tech. Gr. Wat. Hydr. ; AIEA ; vol. I, 227-241

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

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

IDROTECNECO ; 1982 : Hydrgeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. Annex 3 : Construction of the Model, Final Report – 93 p ; Append. 1, 2 & 3 ; 77 pl – ref : AS-751.

IDROTECNECO ; 1982 : Hydrgeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. Annex1 : Geology, Geometry of reservoirs ; Annex 2 : Hydrgeological data. – ref : AS-751.

IDROTECNECO ; 1982 : Hydrgeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. General Report .Texte & 18 pl HT – ref : AS-751.

LETOLLE R., BENDJOUDI H. ; 1997 : Histoires d'une mer au Sahara. Utopies et politiques. L'Harmattan, Paris.

LEVASSOR A. ; 1975 : Etab modèle de gestion et de mise en valeur des nappes aquifères du Complexe Terminal. Rapp. int. ENSMP - INRH.

LEVASSOR A. ; 1978 : Simulation et gestion des systèmes aquifères. Application aux nappes du CT du Sahara algérien., thèse doct. Paris VI.

MAMOU A. ; 1976 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la presqu'île de Kébili ; thèse univ. Paris.

MAMOU A. ; 1990 : Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien. thèse doct. es sc. Univ. Paris Sud.

MARGAT J., SAAD K. ; 1984 : Les nappes souterr. Prof : des mines d'eau sous les déserts ; Nature et Ressources, vol XX, août 1984, pp 7-13.

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

NAZOUMOU Y. ; 2002 : Impact des barrages sur l'alimentation des nappes souterraines de Kairouan, th. doc. ENIT, Tunis

NEDJARI, LATRECH & al ; 1999 : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal au Sahara algérien : organisation, extension, bilan et réflexion.

Nuovo castoro-AGID ; 1999 : Essais de débit de longue durée à Djamaa et El Mghaier.

PALLAS P. ; 1980 : Water resourc. Socialist People's Arab Libyan Republic. In Salem & Busrewille (ed) : the geology of Libya ; Ac.Press ; vol. II

PIZZI, SARTORI ; 1984 : Interconnected groundwater systems simulation ; J. of Hydrology ; 75 (1984/1985) ; pp255-285.

PNUD ; 1983 : Actualisation de l'Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional ; proj. RAB 80/011.

PNUD ; 1987 : Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord. ; proj. RAB 80/011.

ROUATBI R. ; 1970 : Note sur l'Exutoire Tunisien ; ERESS ; Gabès.

SALEM O., EI BARUNI. SS ; 1990 : Hydrogeology of the Kiklah Aquifer in NW Libya. Int. Conf on Groundwater in Large Sedimentary Basins ; Perth-Australia.

SOGREAH ; 1970 : Etude des nappes de l'Erg Occidental et du piedmont de l'Atlas ; Grenoble .

SRIVASTAVA ML. ; 1981 : Report on regional hydrogeological study in Ghadames-Derj-Sinawan area ; 155 p, 18 pl HT ; ref : AW-GA-682.

UNESCO ; 1972 : Etude des Ressources en Eau du Sahara Sptentrional. Nappe du Continental Intercalaire. Proj. ERESS.

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

ZAMMOURI M. ; 1990 : Contribution à une révision des modèles hydrogéologiques du sud tunisien – thèse doct. Fac. sc. Tunis.

Imprimerie : Finzi

Conception et réalisation de la couverture : Faiez TAARIT