



**SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL**



**UNE CONSCIENCE DE BASSIN**

# **HYDROGEOLOGIE**

**SYNTHESE**

**Octobre 2002**

# Table des matières

<b>I – LES FORMATIONS AQUIFERES</b>	<b>4</b>
1. Définition des réservoirs aquifères	4
2. Schématisation des aquifères	6
<b>II – HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME</b>	<b>6</b>
1. Piézométrie	
1.1. Configuration piézométrique	6
1.2. Historique piézométrique	11
2. L'alimentation actuelle : données et hypothèses	11
3. Les exutoires naturels	12
3.1. Les sources	12
3.2. Les chotts et les sabkhas	13
4. Les prélèvements	13
4.1. Prélèvements par aquifère et par pays	13
4.2. Conclusions	15
<b>III – QUALITE CHIMIQUE DES EAUX</b>	<b>16</b>
1. Evolution des salinités	16
1.1. Nappe du complexe terminal	16
1.2. Nappe du continental intercalaire	16
2. Variation verticale de la minéralisation	16
3. Evolution hydrochimique en fonction de l'exploitation	17
4. Evolution hydrochimique en fonction de l'éloignement des zones d'alimentation	17
<b>IV – CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES</b>	<b>18</b>
1. Nappe du continental intercalaire	18
1.1. Bassin du Grand Erg Oriental	18
1.2. Bassin du Grand Erg Occidental	19
1.3. Hamada El Hamra	19
2. Nappe du Complexe Terminal	20
2.1. Nappe du Bas-sahara	20
2.2. Nappes des Grands Ergs	21
2.3. Nappe du Turonien	22
3. Conclusion	22
<b>V – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>23</b>

<b>1. Fonctionnement hydrodynamique du système</b>	<b>23</b>
<b>2. Fonctionnement hydraulique du système aquifère</b>	<b>23</b>
<b>3. Recommandations sur le suivi et l'amélioration de certaines données</b>	<b>23</b>
3.1. Amélioration de la connaissance de certaines données	24
3.2. Amélioration du suivi	25
3.3. Acquisition de nouvelles données et mise à jour de la base de données	27
<b>4. Recommandations pour l'établissement d'un réseau de suivi</b>	<b>27</b>
<b>Annexe Bibliographique</b>	<b>28</b>

## I - LES FORMATIONS AQUIFERES

### 1. Définition des réservoirs aquifères

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye. Ce bassin englobe une série de couches aquifères qui, au cours des études qui se sont succédées depuis 1970, ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Le terme du « **Continental Intercalaire** » désigne d'après son auteur (C. Kilian, 1932), un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- au sommet, le cycle du Crétacé supérieur.

Le **Complexe Terminal** est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire et principalement du Miocène.

Ces définitions ont été adoptées, à l'origine, pour analyser et schématiser le fonctionnement hydrodynamique des aquifères algériens puis par extension, tunisiens.

Avec le projet SASS, l'ajout du bassin saharien libyen à l'étude a demandé une nouvelle analyse des informations géologiques, géophysiques et hydrogéologiques, se basant à la fois sur les études antérieures et sur la collecte de données nouvelles.

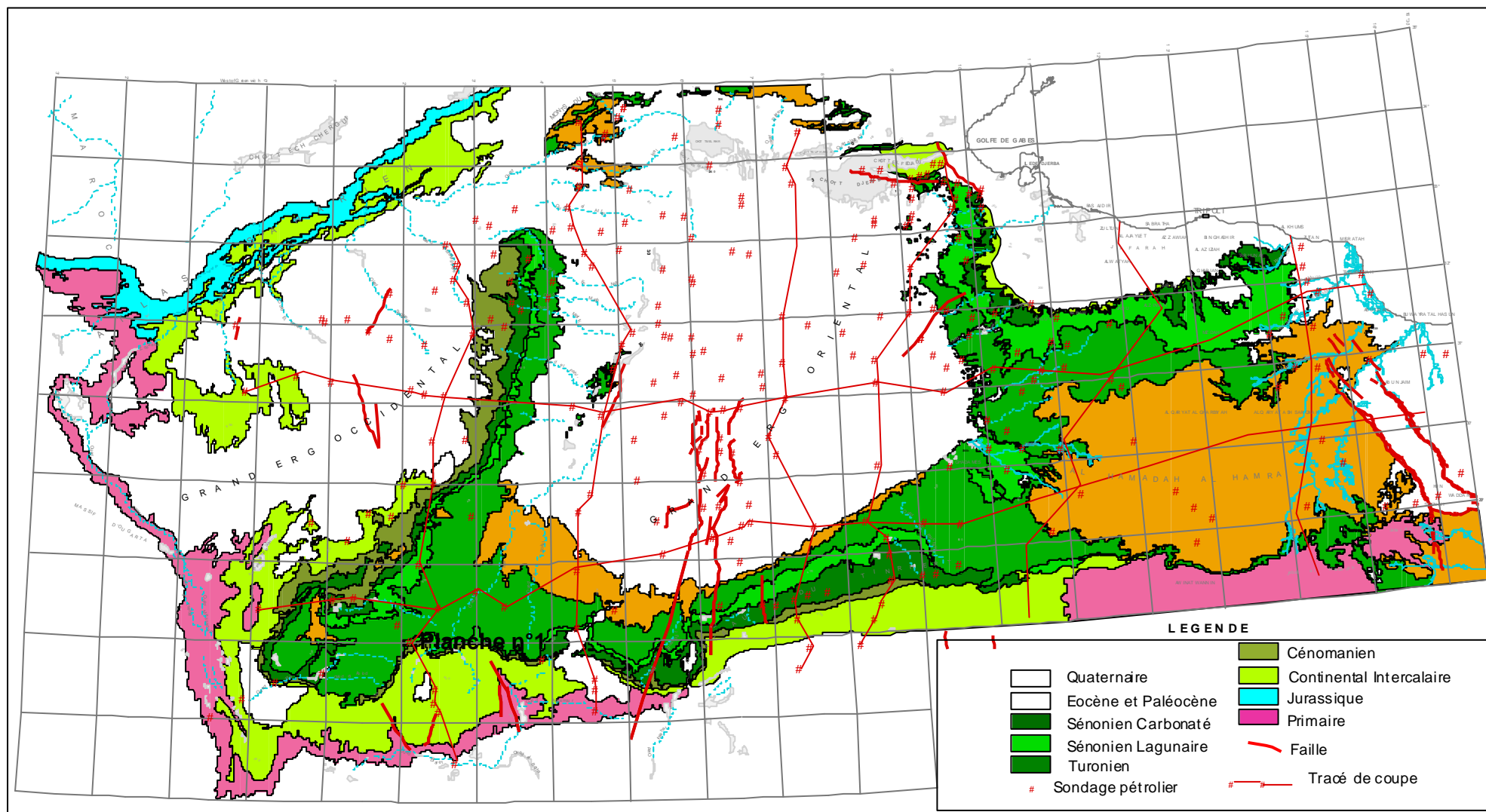
Les affleurements de l'ensemble du bassin saharien traduisent la structure de cette entité en deux cuvettes qui sont les bassins du Grand Erg Occidental (Algérie) et du Grand Erg Oriental (Algérie et Tunisie) et d'un plateau qui est la Hamada El Hamra (Libye). Les affleurements des formations les plus anciennes s'observent sur les bordures méridionale et occidentale du bassin. Les séries sédimentaires secondaires et tertiaires subissent un épaissement au milieu des deux cuvettes et en bordure de la flexure sud-atlasique.

Le sous-bassin du Grand Erg occidental est une entité géographique où la nappe du Continental intercalaire est en majeure partie libre et constitue de ce fait, une réserve en eau souterraine facilement accessible à l'aide d'ouvrages (Foggaras, puits et forages) de faible profondeur (quelques dizaines de mètres).

La géologie de cette partie du bassin montre que le passage de l'Atlas saharien au Nord, vers la vallée de la Saoura au Sud, s'accompagne de l'enfouissement des séries du Complexe terminal sous la dalle hamadienne qui est elle-même couverte par endroits, par les dunes de l'Erg occidental. Cette dalle fait parfois directement suite aux sables du Continental intercalaire.

L'émersion de la zone située au nord du môle paléozoïque du Gargaf (Jabal Fazzan, Jabal Hassawnah) a persisté pendant toute la période allant du Trias à la fin du Crétacé inférieur et s'est caractérisée par une prédominance de la sédimentation détritique d'origine continentale. Plus au nord, des épisodes marins ou lagunaires, favorisés par la subsidence du bassin, ont alterné avec des périodes émergées à sédimentation continentale ou marine peu profonde. La transgression marine n'a complètement envahi le bassin saharien libyen qu'au Cénomani.

# CARTE GEOLOGIQUE DU SASS



## 2 - Schématisation des aquifères

Les couches perméables qui ont apparemment des liaisons hydrauliques entre elles, se regroupent en un réservoir aquifère dont l'épaisseur varie en fonction des conditions locales de leur sédimentation. Les autres couches traitées en aquitards permettent d'assurer la continuité horizontale des aquifères sur l'ensemble du bassin.

L'adoption d'une représentation de l'ensemble des couches aquifères du bassin saharien en un seul système multicouche, permet de se rendre compte des liaisons latérales et verticales qui conditionnent les échanges hydrauliques et chimiques.

La séquence litho-stratigraphique commune aux trois pays, permettant de schématiser le système aquifère du Sahara septentrional sur le modèle, se présente de bas en haut comme suit :

### II – HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME

ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Toit imperméable	Toit imperméable	Toit imperméable
<b>Nappes du Complexe Terminal</b> Nappe des sables      Nappe des sables (Djérid)      Nappe des sables et calcaire du Miocène inf.(zone cotière) Nappe des calcaires      Nappe des calcaires (Nefzaoua)      Nappe des calcaires de Mizdah		
Semi-perméable	Semi-perméable	Semi-perméable
Nappe du Turonien	Nappe du Turonien	Nappe des dolomies du Nalut
Semi-perméable	Semi-perméable	Semi-perméable
<b>Nappe du Continental Intercalaire</b> Crétacé inférieur      Crétacé inf.      Crétacé inf.      Crétacé inf.- Jurassique Jurassique - Trias      Jurassique sup.      Jurassique sup.      supérieur - Trias		
Paléozoïque	Substratum imperméable Jurassique inf. - Trias	Jurassique inf. - Trias
		Carbonifère
		<b>Nappe du Cambro-Ordovicien</b>

## 1 – Piézométrie

### 1.1. Configuration piézométrique

- Complexe terminal**

Cette piézométrie met en évidence :

- la division du domaine saharien en deux principaux sous-bassins hydrogéologiques qui sont ceux du Grand Erg oriental et de la Hamada el Hamra.
- les mêmes principales zones d'alimentation que la nappe du CI/Kikla (Atlas saharien, Dahar-J. Nafusa et J. Hassawnah),
- les zones exutoires principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisiens et le Golfe de Sirt entre Misratah et Buwayrat Al Hasun.

La piézométrie de la nappe du CT/CS « Crétacé Supérieur » montre, dans le sous-bassin du Grand Erg oriental, le rôle du Bas-Sahara algéro-tunisien dans la focalisation de l'écoulement souterrain formant un bassin endoréique. Les Chotts Marouan-Melrhir en Algérie et Gharsa-Djérid, en Tunisie, constituent **l'exutoire de la nappe** et en même temps la région où se concentrent les prélèvements par sources et forages.

En Libye, l'alimentation à partir du Sud semble l'emporter sur celle du J. Nafusa. La zone de la Hamada El Hamra est une zone de « **replat** » où le gradient piézométrique est relativement faible mais où les directions d'écoulement semblent indiquer la Hamada comme une zone d'alimentation. Il s'agit plus probablement d'un vaste réservoir souterrain non alimenté actuellement et dont la lente vidange entretient un écoulement vers l'extérieur de la zone. Dans la partie Nord-Est du bassin libyen, les couches sédimentaires tertiaires et quaternaires semblent jouer un grand rôle dans la mise en charge de la nappe du CT/CS et dans ses pertes par drainance verticale, dans les zones d'exutoire.

**La piézométrie de la nappe du Complexe Terminal pour l'an 2000**, accuse un rabattement généralisé de la surface piézométrique qui est plus accentué au niveaux des zones de forte exploitation:

- la Bas-Sahara entre Touggourt au Sud et Biskra au Nord, où se localisent les principales oasis et agglomérations exploitant cette nappe,
- la région des chotts en Tunisie (Nefzaoua et Djérid) où se cantonnent les principales oasis tunisiennes,
- le flanc oriental de la Hamada El Hamra en Libye (Oued Zemzem – Ain Tawargha) où ont été créés entre 1972 et 1985, les principaux champs captants du développement agricole basés sur l'eau des aquifères du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

Les chotts algériens (chotts Marouen et Melghir) et tunisiens (chotts Djérid et Gharsa) continuent à être des exutoires de cette nappe.

#### **\* Continental intercalaire et raccord avec le Paléozoïque**

La piézométrie de la nappe du CI montre, dans le sous-bassin du Grand Erg Occidental, une indépendance quasi totale du reste de la nappe avec un écoulement de l'atlas saharien vers le Sud puis le Sud-Ouest, une ligne de partage des eaux souterraines sépare l'écoulement s'effectuant vers l'Ouest de celui qui intéresse la partie orientale du bassin.

Le dôme piézométrique centré sur le Dahar-Jabal Nafusa traduit une aire d'alimentation locale dans une zone où la nappe n'est pas jaillissante. Cette recharge actuelle se reflète dans la composition chimique de l'eau et ses caractéristiques isotopiques.

L'anomalie piézométrique sur la dorsale d'Amguid ne peut être expliquée que par une drainance verticale vers le Complexe terminal, à travers les failles de cette zone.

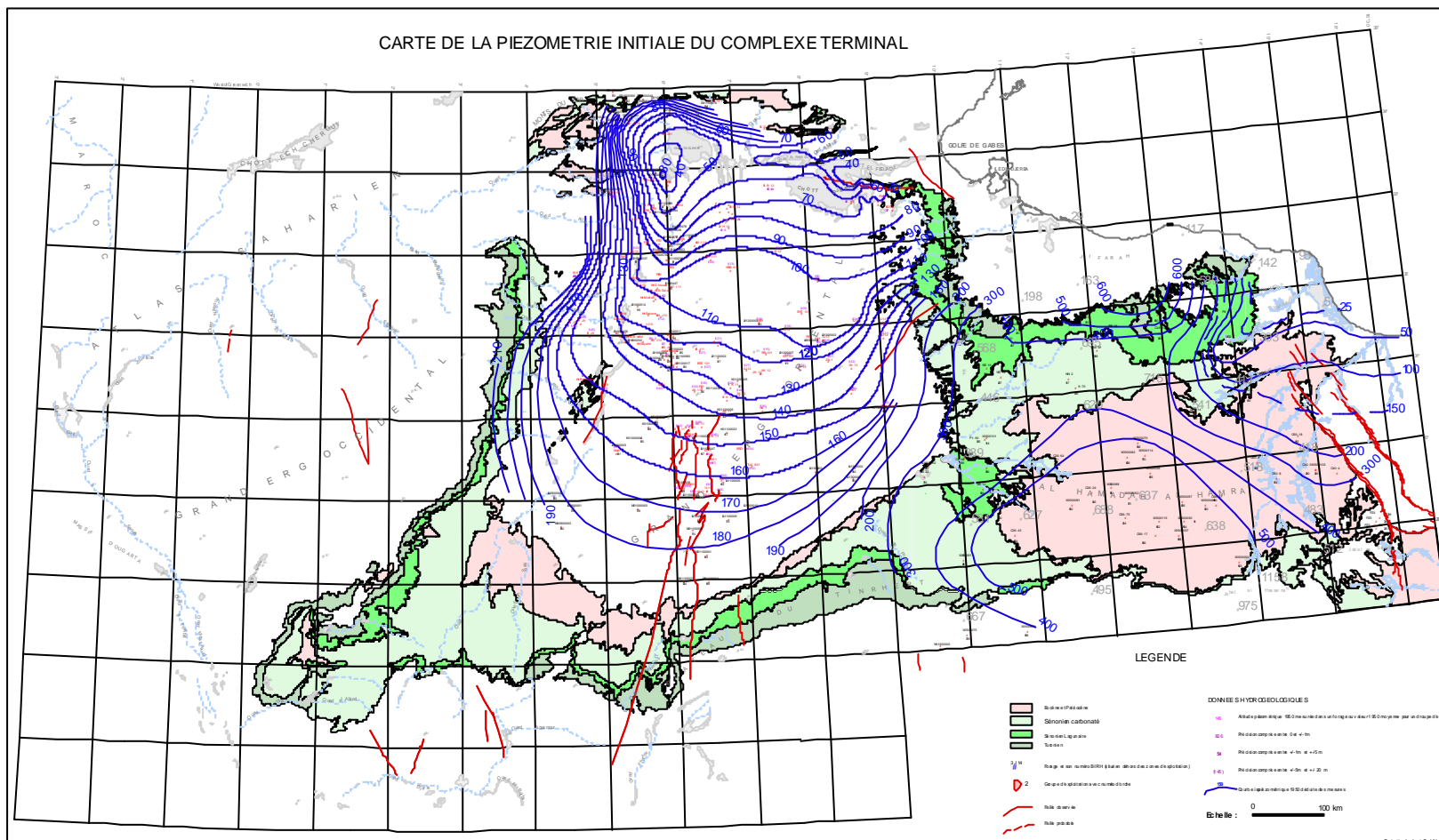
**La carte de la piézométrie du CI en l'an 2000** fait apparaître dans le sous-bassin du Grand Erg Occidental, des directions d'écoulement qui s'orientent vers l'exutoire de la nappe constitué par la zone d'affleurement des foggaras (In Salah-Reggane).

Dans la partie centrale de la nappe (sous-bassin du Grand Erg Oriental) l'écoulement, à partir du plateau de Tinrherth au sud vers le Grand Erg Oriental, est conservé et présente le même aspect qu'en 1950, dirigé du sud vers le nord au travers de l'extrême Sud tunisien. La région des chotts où se situe l'exutoire de la nappe vers la Djeffara est la zone vers laquelle converge cet écoulement ainsi que celui de l'Atlas saharien.

Dans la partie orientale du bassin saharien libyen, la zone d'alimentation située au sud (Jabal Hasawnah) est à l'origine de l'écoulement vers le flanc oriental de la Hamada dont l'exutoire est constitué par Ain Tawurgha et la mer. L'écoulement de la nappe vers Ghadames et le Sud tunisien domine l'écoulement à partir de Jabal Nafusah vers le Sud.

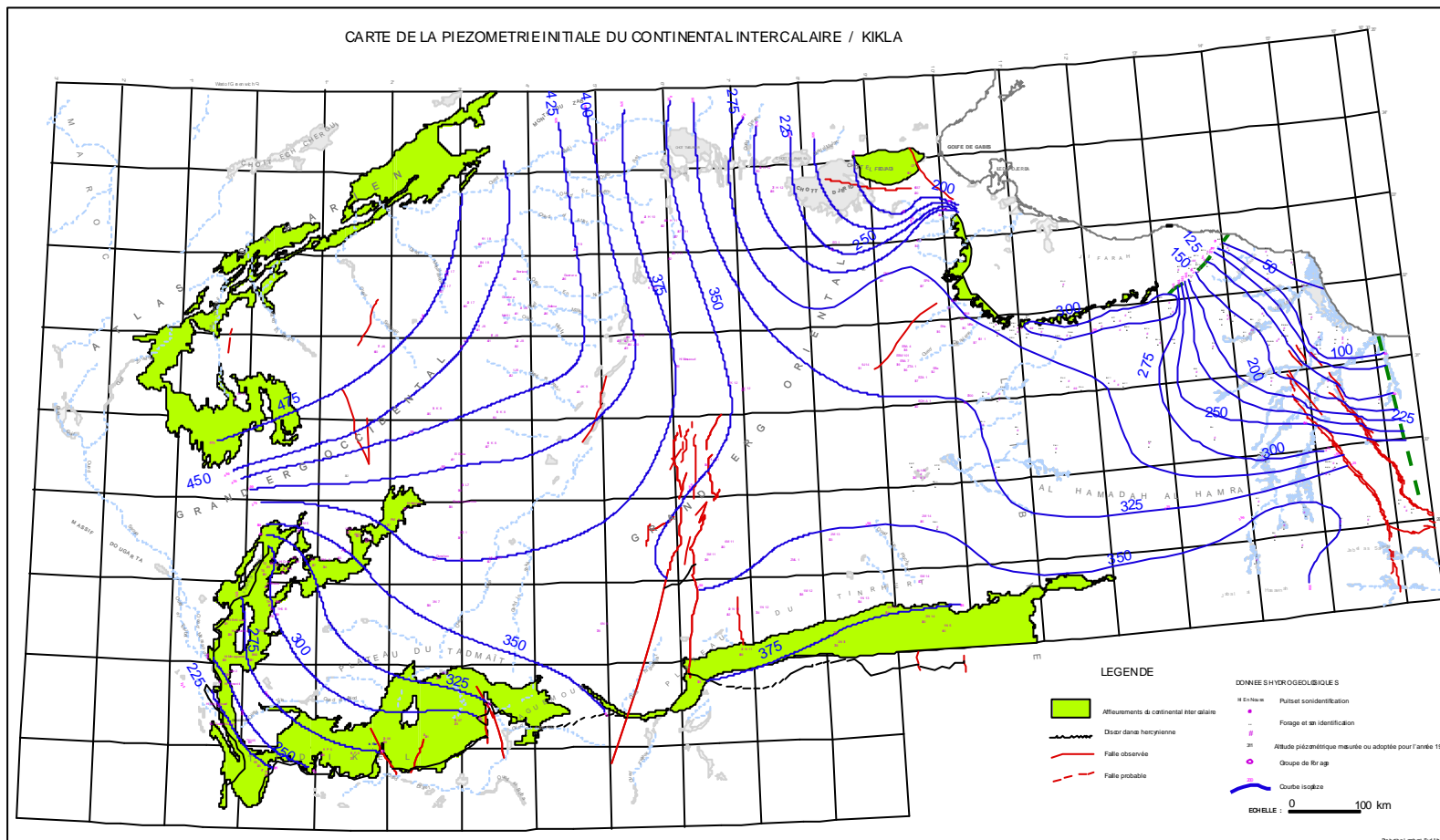


CARTE DE LA PIEZOMETRIE INITIALE DU COMPLEXE TERMINAL



OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL / SAHARA AND SAHEL OBSERVATORY  
 SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL / NORTH WESTERN AQUIFER SYSTEM

CARTE DE LA PIEZOMETRIE INITIALE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE / KIKLA



## 1.2 - Historique piézométrique

- **Complexe terminal**

**En Algérie**, sur l'ensemble du Bas-Sahara algérien, la baisse piézométrique du Complexe Terminal, va de **32m en 43 ans** dans l'**Oued Rhir** nord, à près de **50m en 30 ans** à Ouargla. Elle s'atténue vers les zones limitrophes où la densité des forages exploitant cette nappe est faible.

**En Tunisie**, l'évolution de la piézométrie du Complexe Terminal, entre 1950 et l'an 2000, accuse une baisse continue dont la pente s'est accentuée à partir des années 90. Cette baisse est plus sensible dans la péninsule de **Kébili (23 à 30 m en 25 ans)**. Elle est de **25-30 m en 50 ans**, dans le reste de la Nefzaoua et atteint 15 à 25 m en 50 ans. L'artésianisme a pratiquement disparu du Djérid. Il est de plus en plus faible dans la Nefzaoua où les plus fortes charges sont de **20 à 35 m**.

**En Libye**, la baisse piézométrique a commencé à être sensible au milieu des années 70 avec la création des projets agricoles exploitant des champs de plusieurs forages. Les basses piézométriques qui y sont enregistrées sont de **35 à 40 m en 20 ans**.

- **Continental intercalaire**

**En Algérie**, la piézométrie de la nappe du CI a accusé une baisse sensible dès le début des années 80, suite à la création d'un nombre important de nouveaux forages à Oued Rhir, Ouargla, El Oued et Hassi Messaoud. Dans ces zones, la baisse piézométrique dépasse souvent, les **2 m/an**.

Dans l'Adrar où la nappe du CI est libre sur une large superficie, la baisse piézométrique observée est de: **5 à 20 m en 20 ans, dans le Gourara, 3 à 28 m en 30-35 ans, dans le Touat et de 5 à 10 m en 30-35 ans dans le Tidikelt**.

**En Tunisie**, la baisse piézométrique de la nappe du Continental intercalaire, régulière et peu accentuée des années 50 aux années 70, est devenue plus sensible au cours des vingt dernières années. Elle est en 50 ans, de l'ordre de **50 m dans la région du Chott Fedjej, 30 à 40 m dans la Nefzaoua et 25 à 35 m dans l'extrême-sud tunisien**.

**En Libye**, la baisse du niveau piézométrique varie dans le bassin du Wadi Sufajjin, de **30 à 45m en 30 ans**. Elle est **près de la source de Tawurgha, de 24m** au cours de la période 1985-2000. Dans la **partie occidentale de la Hamada El Hamra**, cette baisse est **moins accentuée**.

## 2 - L'alimentation actuelle : données et hypothèses

L'alimentation actuelle des nappes se manifeste sur les bordures Nord du bassin saharien lorsque trois conditions sont présentes :

- des précipitations suffisantes et un relief relativement accentué pour produire un ruissellement dans des oueds,
- l'affleurement de formations perméables appartenant à un des systèmes aquifères ou en relation directe avec un des aquifères sahariens.

Quoiqu'il en soit, l'alimentation actuelle de ces nappes est faible par rapport aux prélèvements actuels et prévus dans le futur et quelque soit le résultat d'études

hydrologiques plus précises, celles-ci ne changeront pas le caractère non-renouvelable des ressources en eau du Sahara.

**En Algérie**, ces conditions sont réunies le long de la bordure Nord Ouest, au pied de l'Atlas saharien. Les écoulements en provenance de l'Atlas vont s'infiltrer dans les sables dunaires du Grand Erg Occidental pour rejoindre finalement le Continental intercalaire. La dorsale du Mزاب, bien que peu arrosée, est cependant le siège d'écoulements dans les oueds qui se dirigent vers l'Est et participent à l'alimentation des calcaires du Crétacé supérieur et de l'Eocène appartenant au Complexe terminal.

**En Tunisie**, l'alimentation des nappes du Complexe terminal et indirectement du Continental intercalaire dépend essentiellement des précipitations et des ruissellements sur le massif du Dahar. Des études hydrologiques portant sur les oueds du flanc occidental du Dahar ont permis d'aboutir à une estimation du coefficient de ruissellement et du débit spécifique. Cette alimentation évaluée également à partir de la vitesse de circulation souterraine déduite des activités en carbone-14, donne un débit de recharge de l'ordre de **190 l/s** (10% de la pluviométrie). Cette valeur est en concordance avec l'évolution piézométrique de la nappe qui présente dans l'extrême Sud tunisien, une tendance vers la baisse (**de 1 à 2,5 m/an**)

**En Libye**, l'alimentation des aquifères carbonatés du Crétacé supérieur se manifeste sur tout les flancs Ouest et Est du Jabal Nafusa. Deux grands bassins versants drainent les eaux de ruissellement vers la Méditerranée : wadi Sufajjin et Wadi Kaam. Une estimation des ruissellements du bassin du Wadi Sufajjin (GEFLI, 1976, 1978) montre que les zones de recharge préférentiels sont représentées par les lits d'oueds. Ceci a été confirmé par des analyses isotopiques. Le bassin occidental endoréique incluant les oueds qui s'écoulent vers le Sud-Ouest participe également à l'alimentation des nappes du Crétacé supérieur (12 000 km<sup>2</sup> de superficie) et **l'infiltration à partir du ruissellement dans les oueds** y est estimée à une vingtaine de Mm<sup>3</sup>/an.

### **3 - Les exutoires naturels**

#### **3.1 - Les sources**

**Dans le Sud tunisien**, les sources en provenance des nappes du Continental intercalaire et du Complexe terminal ont toujours fait l'objet d'un suivi plus ou moins régulier dans le temps. Celles qui sont rattachées au Complexe terminal sont de loin les plus importantes.

- **Les sources du Continental intercalaire** du Sud tunisien se localisent dans la région du chott Fedjej et intéressent plus particulièrement les deux niveaux des grès supérieurs et des grès à bois. Leur débit n'est souvent que de quelques litres par seconde et ne dépasse dans son ensemble, les **50 l/s**. Il est en baisse continue depuis 1950 et atteint en **l'an 2000**, près de **15 l/s**. Cette situation reflète la vidange que subit l'aquifère des grès supérieurs au sein du système multicouche de Chott Fedjej (**baisse de 70% du débit initial**).
- **Les sources du Complexe terminal** en Tunisie se localisent dans les deux régions du Djérid et de la Nefzaoua. Elles correspondent à des émergences qui fonctionnent sous l'effet de la pression de jaillissement de la nappe. Leur débit s'affaiblit à mesure que l'exploitation de la nappe augmente et que la décompression devient plus importante sous l'effet de la multiplication des forages.

L'évolution du débit des sources du Djérid qui était de près de **1600 l/s en 1950**, a accusé une nette tendance vers la baisse qui s'est accélérée depuis le début des **années 70 (1100 l/s)**. Cette baisse, plus accentuée depuis **1982 (350 l/s)**, traduit un net

régime de tarissement. Ces sources ont complètement tari en 1988. Avec un débit global de près de 450 l/s en 1950, les sources de la Nefzaoua ont accusé un régime de tarissement qui s'est accentué au début des années 70 pour baisser à moins de **100 l/s** au début des **années 80**. Actuellement, la **plupart de ces sources ont tari** et celles qui ne le sont pas ne présentent qu'un débit de quelques l/s.

**En Libye**, les deux principales sources du bassin saharien sont celles de Tawargha et Wadi Kaam. Elles correspondent à la manifestation en surface de différents niveaux aquifères.

- **La source Tawurgha**, située au milieu d'une zone marécageuse, continue à fournir un débit important qui a relativement peu varié au cours des cinquante dernières années malgré l'accroissement des prélèvements. En **1977**, ce **débit** était de **1,966 m<sup>3</sup>/s**. Il est en **février 2001**, de **55.9 Mm<sup>3</sup>/an**. Sur la base d'analyses chimiques et isotopiques (Pallas P. et Bufile T., 1978), le débit mesuré proviendrait à raison de 35% de la nappe du Crétacé supérieur du bassin de l'oued Sufajjin, et 65% des nappes profondes du Kikla et du Paléozoïque.
- **La source de Wadi Kaam** émerge dans le lit d'un oued dont elle porte le nom. Elle tire son origine des calcaires et calcaires dolomitiques du Crétacé supérieur. Son débit était de l'ordre de **450 l/s au début des années 70** mais a rapidement commencé à chuter avec la création des forages alimentant les projets agricoles de Wadi Kaam.

### 3.2 - Les chotts et les sabkhas

**En Algérie et en Tunisie**, l'eau des nappes sahariennes qui passe par drainance verticale dans la nappe superficielle des Chotts, est soumise à l'évaporation à travers l'ensemble de la surface du Chott. Une situation similaire est observée en Libye dans la partie orientale de la Hamada El Hamra. Le débit d'évaporation, ainsi perdu, est appelé à baisser avec le rabattement de la surface piézométrique de la nappe.

## 4 - Les prélèvements

### 4.1 - Prélèvements par aquifère et par pays

**Depuis 1950**, l'exploitation des deux nappes du CI et du CT n'a cessé d'augmenter. Leurs prélèvements qui étaient de l'ordre de **14 m<sup>3</sup>/s en 1950**, atteignaient **20 m<sup>3</sup>/s en 1970**, **29 m<sup>3</sup>/s en 1980** et **82.5 m<sup>3</sup>/s en l'an 2000**. Cette situation dénote une tendance, dans les trois pays, vers l'intensification de la mobilisation des ressources en eau de ces aquifères et ce, à travers l'augmentation des ouvrages d'exploitation (particulièrement les forages) ainsi que le recours de plus en plus net vers le pompage dans les zones où l'artésianisme s'est affaibli (Tunisie et Algérie). Le **débit des émergences naturelles** (Foggaras et sources) qui était au début du **20<sup>e</sup> siècle**, de l'ordre de **11.5 m<sup>3</sup>/s**, n'a cessé de diminuer pour atteindre en l'an **2000**, l'équivalent de **4.5 m<sup>3</sup>/s**.

- **Exploitation du Complexe terminal par pays**

La nappe du Complexe terminal est largement exploitée en Tunisie et en Algérie (Bas-Sahara ou région des Chotts) et en Libye (partie nord orientale du bassin). **L'exploitation globale** de cette nappe est en l'an **2000**, de l'ordre de **41.4 m<sup>3</sup>/s**.

**En Algérie**, cette exploitation est en l'an 2000, de l'ordre de **22.3 m<sup>3</sup>/s**. Elle a ainsi accusé une nette évolution depuis 1950 quand cette exploitation n'était que de **5.77 m<sup>3</sup>/s**. Cette évolution s'est nettement accélérée au début des années 80 suite à la création de nouveaux forages.

**En Tunisie**, cette exploitation a commencé dans le Djérid et la Nefzaoua, par sources. Elle a connu au début du 20<sup>e</sup> siècle, la création de forages jaillissants qui ont largement contribué à accroître les volumes exploités et à permettre la création de nouvelles zones irriguées. La multiplication du nombre des forages a vite influencé l'artésianisme et le débit des sources et à partir des années 60 le recours au pompage est devenu prépondérant. En l'an 2000, l'essentiel de cette exploitation provient du débit des forages pompés suite au tarissement des sources de Kébili et de Tozeur. Elle est passée de **3.4 m<sup>3</sup>/s en 1950**, à **14.4 m<sup>3</sup>/s en l'an 2000**.

**En Libye**, l'exploitation du Complexe terminal se fait principalement dans la zone côtière orientale et dans la zone de Al Jufrah. Elle est passée de près de **2.0 m<sup>3</sup>/s en 1950**, à **4.7 m<sup>3</sup>/s en l'an 2000**.

- ***Exploitation du Continental intercalaire par pays***

La nappe du Continental intercalaire est principalement exploitée en Algérie où les prélèvements sur ses ressources atteignent, en l'an 2000, l'équivalent de **29,9 m<sup>3</sup>/s** ce qui représente 84 % de l'ensemble de son exploitation dans le bassin saharien. En Libye, l'exploitation de cette nappe atteint **3,4 m<sup>3</sup>/s** ce qui équivaut à 9 % de son exploitation globale et en Tunisie, elle est de **2.4 m<sup>3</sup>/s** représentant 7% du total.

**En Algérie**, des jaugeages effectués sur les foggaras<sup>1</sup> du Gourara, Touat et Tidikelt, en 1932, 1950 et 1960, ont montré que si les débits unitaires de chaque foggara variaient, les débits globaux par palmeraie restaient à peu près constants. Le débit global prélevé sur la nappe par foggaras est estimé en 1960, à **3.6m<sup>3</sup>/s**. Jaugé en 1999, ce débit est de **2.7 m<sup>3</sup>/s**. L'exploitation de l'ensemble du CI est passé en Algérie de près de **4.0 m<sup>3</sup>/s en 1950**, à **29.8 m<sup>3</sup>/s en l'an 2000**.

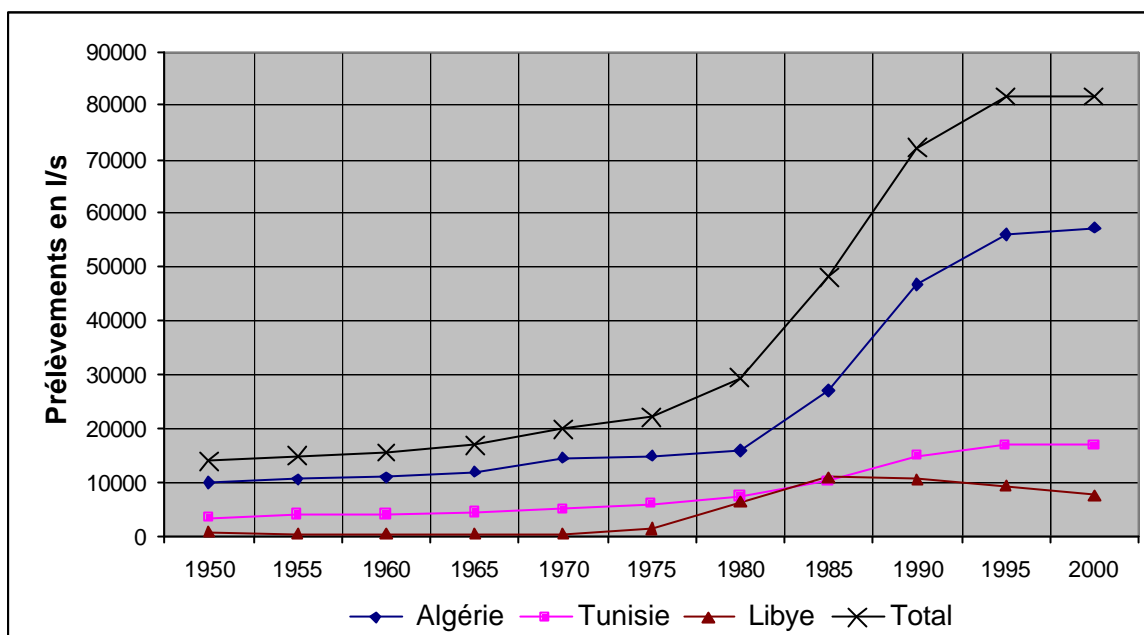
**En Tunisie**, l'exploitation de la nappe du Continental intercalaire se faisait jusqu'au début des années 80, à Chott Fedjej et dans l'extrême Sud. La création de forages profonds dans le Djérid et la Nefzaoua a contribué à étendre son exploitation à ces régions. L'exploitation par forages qui était de 52 l/s en 1950, est passée à 865 l/s en 1970 pour augmenter sensiblement par la suite et atteindre 2.54 m<sup>3</sup>/s en l'an 2000.

**En Libye**, la nappe du Continental intercalaire est exploitée dans la zone de Tawurgha, dans les vallées du wadi Sufajjin, dans les vallées en provenance du flanc oriental de la Hamada al Hamra et à Al Jufrah. Cette exploitation qui se limitait en 1950, au débit des sources (1.35 m<sup>3</sup>/s), s'est intensifiée avec la création des sondages pour atteindre en l'an 2000, près de 4.6 m<sup>3</sup>/s dont 1.2 m<sup>3</sup>/s à partir des sources.

Actuellement, un nouveau programme d'exploitation de cette nappe est à l'étude entre Derj et Ghadamis. L'objectif de ce programme est la fourniture d'eau potable aux villes de la partie occidentale de la Jifarah qui ne sont pas incluses dans les objectifs de la Phase II de la Grande Rivière en provenance du Jabal Hassawnah. Le débit qui sera prélevé de ce nouveau champ de forages n'est pas encore définitivement fixé mais il sera probablement compris entre 50 et 90 million m<sup>3</sup>/an.

---

<sup>1</sup> Galeries drainantes creusées par l'homme pour exploiter la nappe dont la surface piézométrique est à faible profondeur.



Parallèlement, un important programme d'exploitation de la nappe du Cambro-Ordovicien a été mis en place au sud-est du bassin saharien libyen, dans le Jabal Hassawnah. Ce programme consiste en un ensemble de plus de 500 forages dont le débit total prévu est de 912 Mm<sup>3</sup>/an (29 m<sup>3</sup>/s). L'eau pompée est destinée à l'alimentation de la Grand Rivière Artificielle transportant l'eau dans la plaine de la Jifarah.

#### 4.2 - Conclusions

L'exploitation des nappes du bassin saharien est passée durant les trente dernières années par une phase de mobilisation intensive des ressources ce qui s'est traduite par l'accroissement des prélèvements des forages qui ont négativement influencé le jaillissement des sources et les débits artésiens. L'accroissement des prélèvements par rapport à la situation du début du 20<sup>e</sup> siècle, est de 71 m<sup>3</sup>/s. Cette situation est à l'origine de la baisse du débit des foggaras en Algérie (23%), des sources du Chott Fedjej en Tunisie (70%) et de Ain Tawargha en Libye (11%). D'un autre côté, elle est à l'origine du tarissement des sources tunisiennes exploitant la nappe du Complexe terminal dans le Djérid et à Kébili.

L'accroissement des volumes pompés et le développement de l'agriculture saharienne se répercutent au niveau de ces nappes sahariennes sous forme du tarissement des sources et de l'affaiblissement de l'artésianisme. Cette exploitation croissante est susceptible d'entraîner à long terme, dans les zones vulnérables, des changements dans la qualité de l'eau.

### III - QUALITE CHIMIQUE DES EAUX

#### 1 - Evolution des salinités

##### 1.1 - Nappe du complexe terminal

La différenciation dans l'évolution de la minéralisation totale des eaux du CT est possible entre la nappe des sables et celle des calcaires. Ceci s'explique par le fait que les formations calcaires sénoniennes et éocènes sont plus accessibles à la recharge sur les bordures du bassin que les sables mio-pliocènes localisés dans la Bas-Sahara Tuniso-algérien. Des

phénomènes particuliers, comme l'exploitation intensive et le retour des eaux d'irrigation, sont à l'origine de certaines anomalies chimiques localisées.

La nappe des sables est en relation avec les apports en eau de surface. Celle des calcaires montre un accroissement de salinité dans les zones du Bas-Sahara orientale de la Hamada El Hamra qui sont des aires d'exutoire. Ces zones sont également le lieu d'approfondissement de la formation aquifère.

D'une manière générale, 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 accusé une certaine évolution. Les deux principales sources potentielles de l'augmentation de cette salinité, sont les eaux des chotts et le retour à la nappe des eaux de drainage dans les zones où son toit est peu épais. L'éventuelle contamination à partir des eaux du Turonien plus salé, est tributaire des différences de charge entre la piézométrie des deux nappes.

## **1.2 - Nappe du Continental intercalaire**

**En Algérie**, la salinité des eaux du bassin du Grand Erg Occidental est souvent inférieure à 1 g/l. Ceci n'est pas le cas dans le bassin du Grand Erg Oriental où la nappe est confinée à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

**En Tunisie**, la salinité des eaux du Continental intercalaire est relativement élevée ( $RS > 2\text{g/l}$ ), ce qui limite leur usage pour l'alimentation en eau potable. Cette situation s'explique par le fait que ces eaux se localisent assez souvent dans la partie confinée de la nappe où elles ont subi un long séjour (faible vitesse de circulation souterraine) en contact avec des formations encaissantes contenant des impuretés argileuses et gypseuses.

**En Libye**, les eaux de la formation Kikla d'El Hamada El Hamra présentent des résidus secs qui sont souvent inférieurs à 2.0 g/l. Ceci s'explique par le fait que la formation aquifère est propre et n'admet pas des inclusions argileuses.

## **2 - Variation verticale de la minéralisation**

L'évolution verticale de la minéralisation ne semble pas être progressive au sein de l'aquifère, mais apparaît avec les changements lithologiques. Les horizons de minéralisation différente sont séparés par des couches plus ou moins argileuses qui ont généralement une épaisseur de quelques dizaines de mètres.

Avec l'accroissement de l'exploitation, le déséquilibre piézométrique induit par les prélèvements opérés dans les couches les plus perméables, a entraîné des échanges verticaux par drainance entre les différents niveaux superposés. Il en résulte une certaine homogénéisation de la salinité de l'eau avec tendance vers l'accroissement. D'une manière générale, les minéralisations élevées observées dans certains horizons sont dues au fait que les niveaux aquifères qui les abritent sont relativement isolés de l'aquifère principal. La mise en charge contribue à rendre le temps de contact entre l'eau et la matrice rocheuse plus long.

**Au Sahara algérien**, les couches inférieures du Continental intercalaire sont les plus salées et ce n'est que dans la partie supérieure que se localisent les niveaux aquifères de bonne qualité (Barrémien et Ablén).

**En Tunisie**, la situation est inverse dans la région des chotts où le Continental intercalaire est dédoublé en plusieurs niveaux aquifères. La partie inférieure rattaché au Néocomien



(Série de Kébeur el Hadj) constitue l'aquifère principal dont l'eau présente la meilleure qualité chimique de la région. Les autres niveaux qui surmontent cette série (Barrémien et Aptien) contiennent de l'eau de plus mauvaise qualité.

**En Libye**, la salinité de l'eau du continental intercalaire est largement influencée par la l'apport souterrain à partir du Cambro-Ordovicien à moins de 1 g/l. Cette bonne qualité s'altère localement dans la partie orientale de la Hamada à l'occasion de l'enfouissement des couches du CI sous une épaisse couverture.

### 3 - Evolution hydrochimique en fonction de l'exploitation

Les variations de la minéralisation totale des eaux du CI dans les forages, pour lesquels on disposait d'une série d'analyses chimiques, accusent assez souvent des fluctuations qui restent dans la limite des erreurs d'analyse. Certains forages captant le CT affichent cependant, une légère tendance à l'accroissement dans le temps. C'est particulièrement le cas en Algérie (Oued Rhir et de Ouargla) et en Tunisie (Nefzaoua et Djérid).

Ce phénomène doit cependant être interprété avec prudence et il ne faudrait pas en déduire une nette tendance de l'accroissement de la salinité avec l'augmentation de l'exploitation. Dans le cas du CI, l'évolution constatée pourrait être le résultat d'une homogénéisation de la salinité au sein des différents niveaux aquifères. Dans celui du CT, la drainance des niveaux sus-jacents semble être à l'origine de cette eau salée.

### 4 - Evolution hydrochimique en fonction de l'éloignement des zones d'alimentation

**La rôle du Dahar** tuniso-libyen comme zone de recharge actuelle est bien mis en évidence par l'évolution de la minéralisation totale de l'eau du CI. L'accroissement des salinités ainsi que l'augmentation de la composition chimiques principalement en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  et accessoirement en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^-$  (A. Mamou, 1990) s'effectuent lors du passage de la partie libre de la nappe vers sa partie confinée. L'augmentation de pression et de température qui accompagnent la mise en charge de la nappe est également à l'origine d'un certain lessivage des sels lors du long trajet souterrain de l'eau.

**En Libye**, l'évolution chimiques des eaux du Kikla montre depuis le sud-est où il est en continuité avec le Paléozoïque jusqu'au niveau de Tawurgha et à la mer au niveau de Zliten, le passage d'un faciès chimique assez homogène au sud à un faciès sulfaté-calcique au niveau de Tawurgha puis à un faciès chloruré-sodique près de la mer à Zliten.

## IV - CARACTÉRISTIQUES ISOTOPIQUES

### 1 - Nappe du Continental intercalaire

#### 1.1 - Bassin du Grand Erg Oriental

**Dans le bassin du Grand Erg oriental**, les teneurs en isotopes stables sont en moyenne de  $\delta^{18}\text{O} = -8.4 \pm 0.4\text{‰}$  et  $\delta^2\text{H} = 61 \pm 3\text{‰}$ . Ces valeurs faibles sont caractéristiques de l'eau des nappes fossiles protégées de tout apport récent (Gonfiantini et al., 1974 & Gandouz A., 1985).

En se rapprochant des zones de bordure (Plateaux de Tinrhert et du Dahar), ces teneurs sont plus élevées. Ces eaux sont généralement à faible activité en  $^{14}\text{C}$ . Ce n'est que dans les aires de recharge ou à proximité de celles-ci que les teneurs en  $^{14}\text{C}$  deviennent assez élevées (54.7% de  $^{14}\text{C}$  à Laghouat sur le revers sud de l'Atlas saharien, de 44.9 à 53.3% sur le Dahar, de 22.8% à Fort Flatters et de 17.3% à Tabankort dans le Tinrhert). Ces teneurs

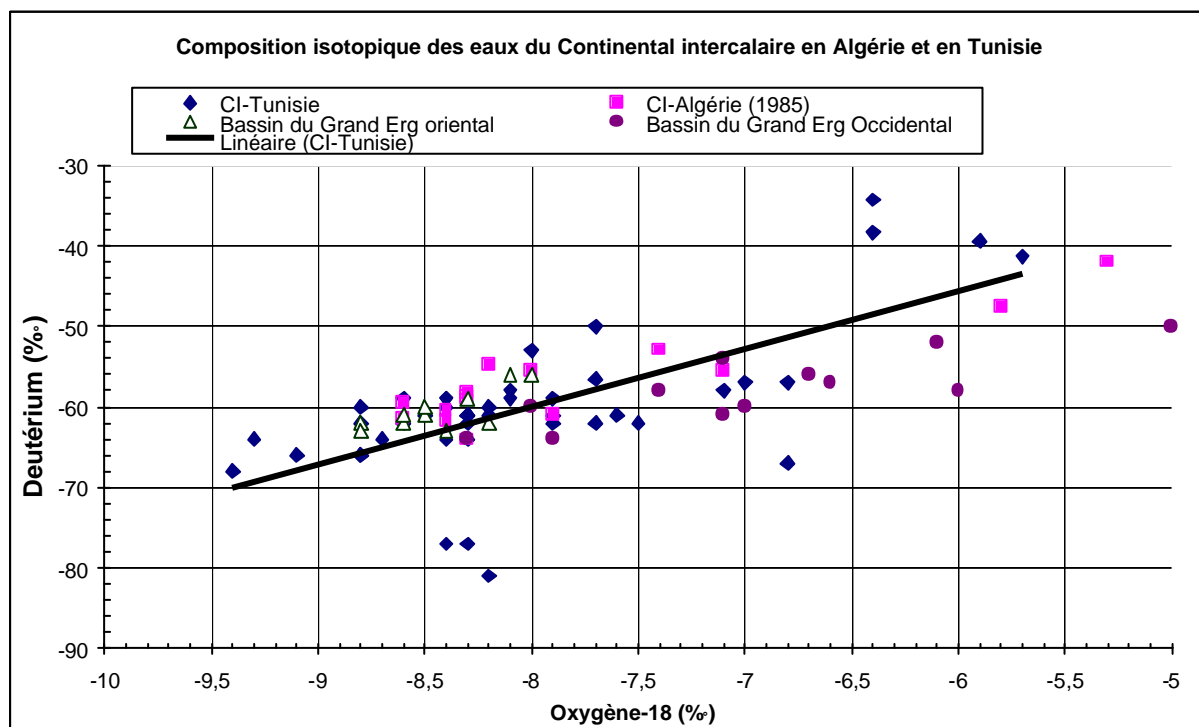
décroissent depuis les zones de recharge sous la Hamada de Tinrhert et les dunes du Grand Erg Oriental et rendent compte du temps de parcours souterrain.

D'une façon générale, en dehors des zones de recharge, l'eau du Continental intercalaire est dépourvue de  $^3\text{H}$  (moins de 30 ans d'âge). Ce sont donc essentiellement des eaux anciennes qui ont pris place dans la nappe durant une longue période. La mise en charge de la nappe a fait que les eaux les plus anciennes sont celles qui sont dans la partie confinée de la nappe. Celles ayant subi le mélange avec des eaux plus récentes se localisent à proximité des aires de recharge où la nappe est libre à ascendante.

Les âges les plus faibles et les moins homogènes de ces eaux s'observent sur le pourtour des zones de recharge comme le Dahar (1000 à 24 000 ans). Comparés à ceux des eaux de Kikla en Libye, ces âges se révèlent de même ordre de grandeur et traduisent la même dispersion (Salem O., & al, 1980, SRDOC D. & al, 1980), ce qui dénote un effet similaire de recharge.

La vitesse de circulation souterraine de la nappe est évaluée dans la zone confinée de la nappe et est estimée entre **3 et 6 m/an**. Certaines estimations de l'âge de l'eau (Gonfiantini et al., 1974), faites après correction et en se référant aux teneurs en  $\text{d}^{13}\text{C}$  et du pH, donnent des valeurs évoluant entre **46 000** (Oued Nekhla- Tunisie) et **18 000** ans (Ech Chouech-Tunisie). Les valeurs les plus élevées en âge (**>35 000ans**) sont proches de la limite de la méthode du  $^{14}\text{C}$ .

D'une façon générale, les plus vieux âges des eaux sahariennes s'échelonnent entre **50 000** et **20 000** ans avec des valeurs plus élevées dans la partie où la nappe est confinée et jaillissante. L'estimation des paléotempératures à l'aide des gaz rares (Rudolph J. & al 1984) a montré qu'à cette époque correspondraient des températures plus basses que l'actuelle de **2°C au moins**. La valeur de **18°C** a été estimée pour les eaux d'el Golea sur l'Erg occidental en Algérie ainsi que pour celles de Ksar Ghilane dans le Sud tunisien (Fontes J.Ch. & al, 1984).



## 1.2 - Bassin du Grand Erg Occidental

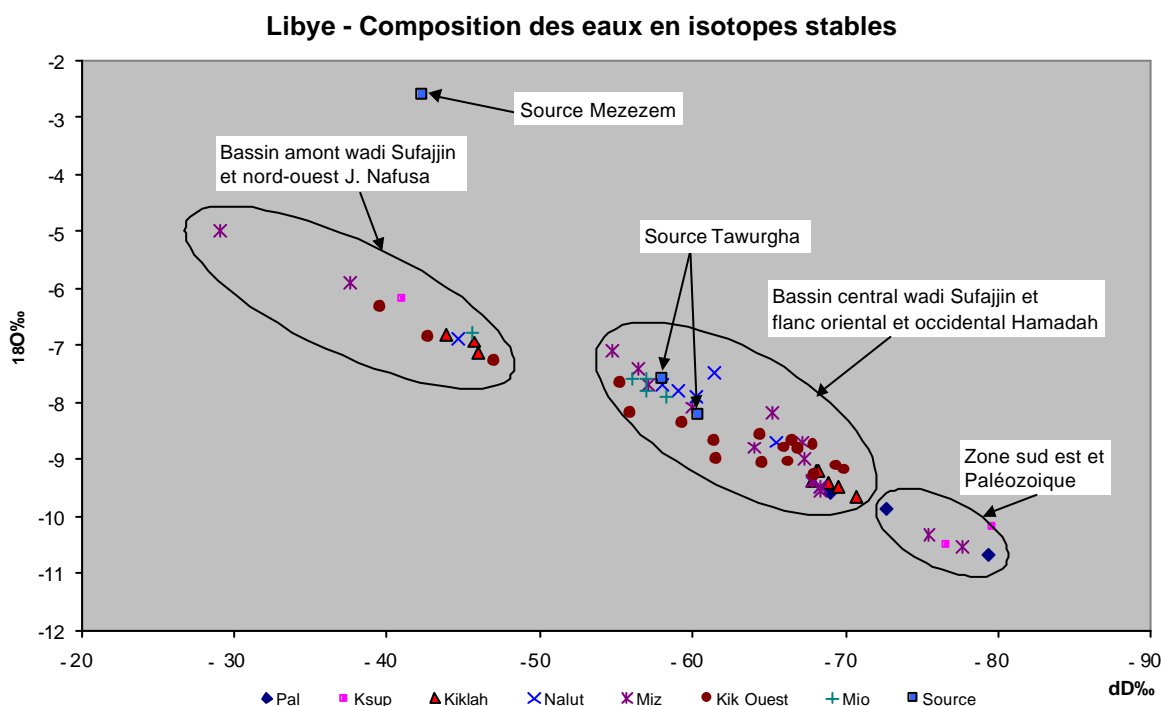
La nappe du CI est soit libre soit recouverte par les dunes du Grand Erg occidental. Les zones d'affleurement du Crétacé inférieur constituent les exutoires naturels de la nappe. Les teneurs en isotopes stables y sont très variables ( $\delta^{18}\text{O} = -9.6\text{‰}$  à  $-4.1\text{‰}$ ). La zone du Tidikelt présente des valeurs très proches de celles du bassin du Grand Erg oriental, mais sont avec une activité plus importante en  $^{14}\text{C}$  (4 à 40%), ce qui prouve une contribution locale à l'alimentation de la nappe.

Ces apports locaux sont à l'origine de mélanges d'eaux au sein de l'aquifère qui donnent des âges apparents étalés sur plusieurs milliers d'années. Dans le Touat et le Gourara où les eaux du CI affichent des activités élevées en  $^{14}\text{C}$  (jusqu'à 60%), les teneurs en isotopes stables sont variables mais plus élevées que celles rencontrées dans le Tidikelt. A l'Est et au Sud du Grand Erg occidental, les eaux du CI affichent des compositions isotopiques identiques à celles des eaux de la nappe de l'Erg. Cette région correspond à une vaste zone de déversement des eaux du Grand Erg dans la nappe du CI.

## 1.3 - Hamada El Hamra

Les teneurs en isotopes stables sont très dispersées sur l'ensemble de la Hamada. Ces valeurs sont parmi les plus faibles de la région et correspondent ainsi à celles trouvées pour l'eau du Continental intercalaire de la partie captive de la nappe (O. Salem et al., 1996). Dans les zones où la formation Kikla est en continuité avec le Cambro-Ordovicien, ces teneurs sont les plus faibles ( $^{18}\text{O} = -10.9\text{‰}$  et  $^2\text{H} = -80.7\text{‰}$ ). Les teneurs en  $^3\text{H}$  sont faibles (<2 UT) et les activités en  $^{14}\text{C}$  souvent faibles (de 1 à 5 %) donnant ainsi des âges de l'eau entre 16 800 et 31500 ans pour des profondeurs de captage de 600 à 1200 m.

**Les eaux à très faible teneur en isotopes stables** correspondent aux eaux des aquifères paléozoïques du Sud du bassin saharien et à celles du Crétacé supérieur (Mizdah) en relation directe avec l'aquifère cambro-ordovicien. Le Carbone 14 fournit pour ces eaux des âges supérieurs à 25000 ans.



## 2 - Nappe du Complexe terminal

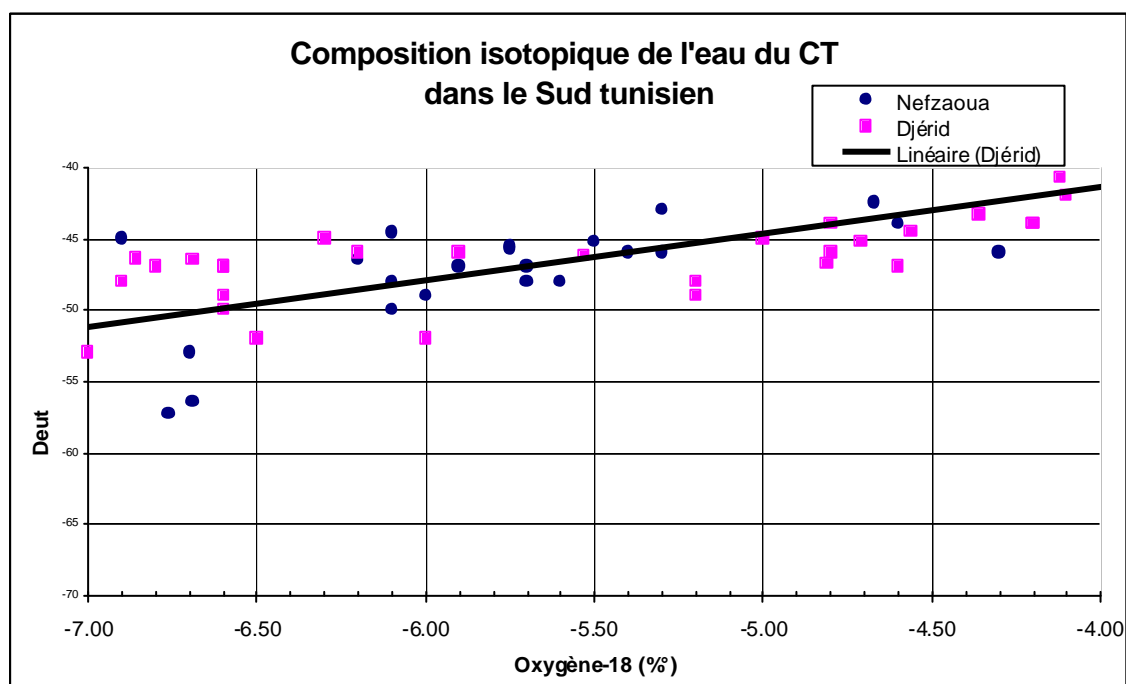
### 2.1 - Nappe du Bas-Sahara

La composition isotopique des eaux du Complexe terminal reflète l'hétérogénéité du réservoir aquifère ainsi qu'une plus grande accessibilité de ses différents niveaux aquifères à la recharge actuelle. Le domaine de variation des teneurs en isotopes stables est plus large dans le cas du CT que pour le Continental intercalaire, avec des valeurs allant de  $-9.3$  à  $-3.9\text{‰}$ . Les zones localisées sous les dunes des deux Grands Ergs se caractérisent par un enrichissement en isotopes lourds qui reflète l'effet du climat aride actuel.

Ces eaux portent un cachet d'eau marquée par l'évaporation et ce à travers un enrichissement en isotopes lourds qui reflète l'effet de l'aridité du climat. La recharge de la nappe du CT semble avoir varié dans le temps parallèlement à l'évolution du climat durant les derniers millénaires. L'enrichissement en isotopes lourds, qui s'observe même dans les eaux les plus confinées de cette nappe (El Oued en Algérie), s'explique par une recharge paléoclimatique qui a subi des modifications dans la composition isotopique des eaux au cours de l'évolution de l'aridité.

La composition en isotopes lourds de l'eau de la nappe des calcaires montre en Algérie, des teneurs assez dispersées avec une moyenne de  $d^{18}\text{O} = -7.42$  à  $\pm 0.47\text{‰}$  et  $d^2\text{H} = -49.3 \pm 3.6\text{‰}$  (excès de +10 en moyenne).

Dans la Nefzaoua en Tunisie, les teneurs en isotopes lourds sont plus élevées que celles des eaux des sables, mais accusent une dispersion qui résulte de la proximité de l'aire de recharge du Dahar.



Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  des points d'eau situés à proximité de l'aire d'affleurement de l'aquifère indiquent des activités relativement significatives d'une certaine contribution d'alimentation moderne de la nappe. Un gradient décroissant de concentration en  $^{14}\text{C}$  existe dans la Nefzaoua entre Douz et Kébili conformément au sens d'écoulement de la nappe. Ce gradient permet d'évaluer la vitesse d'écoulement souterrain de **1 à 2m/an** (A.Mamou, 1990). Les âges bruts de l'eau du CT s'échelonnent dans cette zone, entre **3500** (Douz) et **27 000** ans

(Aïn Tawurgha). Les plus faibles valeurs (<10 000ans) sont plus proches des zones de recharge et les plus élevées (**18000 à 27 000 ans**) correspondent aux eaux qui sont plus confinées et plus proches de l'exutoire.

## 2.2 - Nappes des Grands Ergs

La nappe du Grand Erg occidental circule dans la dalle de calcaire dolomitique de la Hamada supportant les dunes de l'Erg. Cette nappe est accessible à faible profondeur. Ses ressources proviennent essentiellement de l'alimentation actuelle à partir des eaux de pluies (après ruissellement). Les teneurs en isotopes lourds de ces eaux témoignent d'un enrichissement dû à l'évaporation avec :

- un groupe d'eaux non évaporées qui s'alignent sur la droite des eaux des précipitations actuelles. L'intersection de cette courbe avec la droite des eaux météoriques se situe au point  $^{18}\text{O} = -8\text{‰}$  et  $^2\text{H} = -60\text{‰}$ .
- un groupe d'eaux évaporées qui s'alignent suivant une pente de droite inférieure à celle des eaux météoriques

Ces deux groupes traduisent le mécanisme d'alimentation récente de la nappe à partir des eaux de pluie. Le premier groupe correspond à l'eau qui s'infiltre directement sur les dunes sans ruissellement et le deuxième groupe à celui des eaux de crues qui ruissellent dans les oueds.

## 2.3 - Nappe du Turonien

La nappe du Turonien est captée dans l'extrême Sud tunisien sur le piémont occidental du Dahar et entre Jabal Nafusa et Ghadamès. Les cachets isotopiques des eaux de cette nappe est proche de celui des eaux du Continental intercalaire. Ces eaux se caractérisent par de faibles teneurs en isotopes stables. L'âge des eaux logées dans ce niveau aquifère est souvent supérieur à **20 000 ans**.

## 3 - Conclusion

Les eaux du Système Aquifère du Sahara Septentrional résulte d'un long processus de mise en place des réserves qui s'échelonne sur plusieurs dizaines de milliers d'années. L'essentiel des réserves géologiques, localisées dans la partie confinée de la nappe, a pris place à une époque où le climat de la région était plus pluvieux (pluvieux quaternaires de – 150 000 à – 20 000). Cette phase a atteint son apogée avec la transformation des dépressions des chotts tuniso-algériens en de grandes lagunes (lacs à Cardium) dont l'extension était de deux à trois fois leur superficie actuelle. Cette phase correspond également à la mise en charge des niveaux confinés du système et à la manifestation des principales sources de la région tant au niveau du CI que du CT.

Avec l'aridification progressive du climat, a débuté la vidange lente et continue du système aquifère. Le jaillissement des sources était la manifestation du débordement de ces nappes, mais la mise en charge des niveaux aquifères n'a fait que régresser compte tenu de la réduction de l'alimentation sur les bordures. Depuis, le système aquifère connaît une décompression de plus en plus importante qui s'est accélérée avec la création des premiers forages. Ce phénomène s'est beaucoup intensifié avec la généralisation du pompage.

Les zones d'affleurement des formations aquifères ont continué à jouer le rôle d'aires de recharge, mais avec des apports faibles aux nappes compte tenu des quantités de pluie relativement faibles, irrégulières et espacées dans le temps. Les eaux qui rejoignent ainsi la nappe constituent des « mélanges » entre une eau qui s'infiltre directement et des réserves

hydriques du sol soumises à l'évaporation avant d'arriver dans la partie saturée de la nappe à l'occasion de grands événements pluviométriques. Cette situation s'explique par la présence d'eau à cachet évaporé et sous forme de « mélange » à proximité des aires de recharge du système.

Dans la partie confinée du système, l'eau est plus ancienne et à caractéristiques isotopiques plus homogènes. Sa mise en charge rend sa circulation souterraine plus lente et lui permet un temps de contact avec la matrice rocheuse plus long. C'est ainsi, sous l'effet de la pression élevée et de la température, que cette eau subit des échanges chimiques avec les formations encaissantes. Une partie du cachet chimique de l'eau est également acquis dans certaines zones, à l'occasion des communications latérales et verticales entre des niveaux aquifères différents. C'est particulièrement le cas lors des accidents tectoniques majeurs (Dorsale d'Amguid, Failles de Hun, faille de Kébili, etc...) et des passages latéraux de faciès (passage des calcaires vers les sables).

## V - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 1 - Fonctionnement hydrodynamique du système

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional dont l'extension dépasse le cadre des frontières nationales des trois pays qui l'abritent, est à l'origine **quasi exclusive des ressources en eau disponibles dans ce territoire**. Ces ressources d'un rôle prépondérant pour le développement économique et social de la région ont une dimension stratégique du fait qu'elles sont pour l'essentiel non renouvelables et qu'elles sont déjà entrées en **phase d'exploitation intensive ayant déjà provoqué des modifications notables dans le comportement des aquifères**. La gestion contrôlée et concertée de ces ressources est maintenant une nécessité pour prolonger au mieux la longévité du système économique qui en dépend.

### 2 - Fonctionnement hydraulique du système aquifère

Après une phase au cours de laquelle l'exploitation de ce système était essentiellement basée sur l'artésianisme (avant 1970), **ces aquifères sont de plus en plus sollicités par pompage**. Parallèlement à cette situation l'exploitation, qui auparavant se faisait au sein de certains groupes d'oasis relativement limités dans l'espace, est devenue plus intensive et mieux répartie en plusieurs nouveaux pôles de développement.

Cette nouvelle disposition s'est soldée par des rabattements piézométriques plus prononcés au niveau des groupes d'anciennes oasis, mais également par un rabattement général plus fort que ce qui était observé auparavant. **Il en est résulté le tarissement quasi total des principales sources (Nefzaoua, Djérid et Kaam) et la réduction de l'artésianisme d'une manière sensible dans les bassins du Grand Erg oriental et dans le bassin saharien libyen.**

Le recours de plus en plus fréquent et intensif au pompage se traduit, au niveau de l'ensemble du système aquifère, par des prélèvements plus importants sur les réserves géologiques ainsi que par des interactions entre les différents niveaux interconnectés soit directement soit par drainance à travers des horizons semi-perméables. Cette situation hydrodynamique se reflète sur le plan hydrochimique, par des échanges de sels entre :

- les niveaux aquifères rattachés à la même nappe ce qui aboutit à **une homogénéisation de la salinité de son eau autours d'une valeur moyenne**,
- les sources potentielles de salinisation (Chotts, Turonien, Aptien, etc...) et les nappes qui leurs sont adjacentes, faisant apparaître ainsi de plus en plus, **des zones d'anomalies chimiques localisées**.

### 3 - Recommandations sur le suivi et l'amélioration de certaines données

Le suivi du système aquifère du SASS est en même temps un complément de connaissances à acquérir et des nouvelles mesures à collecter.

**Le suivi actuel de l'exploitation des ressources en eau du système dans les trois pays concernés se fait d'une manière qui est insuffisante pour assurer l'actualisation périodique des modèles de gestion des nappes et pour être fixé sur les options à prendre dans le cadre de la gestion optimisée de ces ressources.** Ce suivi accuse des lacunes sensibles dans l'évaluation des prélèvements et dans l'évolution de la qualité

chimique de l'eau. Certaines zones (sous les ergs en particulier) non encore couvertes par les reconnaissances ou l'évaluation de certains paramètres hydrogéologiques nécessitent un recueil d'information complémentaire dans le but d'améliorer le calage des modèles.

### 3.1 - Amélioration de la connaissance de certaines données

- **Géométrie des réservoirs**

Les connaissances sur la géométrie des réservoirs aquifères et leurs communications restent encore à préciser et à analyser à travers **les nouvelles données géophysiques et celles des sondages profonds réalisés dans le cadre de l'exploration hydraulique et pétrolière**. Ceci est particulièrement le cas dans **le bassin du Grand Erg occidental en Algérie** où l'exploitation se faisait essentiellement jusqu'à ces dernières années à l'aide de Foggaras. Le besoin d'étendre l'exploitation à de nouvelles zones et la baisse piézométrique dans ce bassin font que la généralisation des forages à l'ensemble du bassin n'est qu'une affaire de temps, d'où **la nécessité de mieux connaître l'épaisseur et la profondeur du CI dans l'ensemble de ce bassin**.

Les rapports existants entre **les formations pré-cénomaniennes du bassin saharien et les formations triasiques de la Jifarah libyenne** méritent également une étude approfondie à partir des forages et des études géophysiques.

Le caractère multicouche de la nappe du Complexe terminal fait que la géométrie de son réservoir aquifère (sables et calcaires) est encore mal connue dans plusieurs zones dont particulièrement au niveau de Biskra (nappe de Tolga) et plus généralement en dehors des zones d'exploitation. **L'affinement de la géométrie de ce réservoir aquifère permet de mieux concevoir les modèles de gestion et les échanges d'eau et de solutés entre les différents niveaux aquifères.**

Le rôle de **la dolomie turonienne** dans l'écoulement des eaux du CT n'est partiellement bien connu que sur les bordures du bassin (Presqu'île de Kébili et Dahar tuniso-libyen). Son rôle **comme niveau aquifère à forte salinité sous le Grand Erg oriental (Hassi Messaoud et Extrême-sud tunisien), est à analyser avec beaucoup d'attention étant donné le danger potentiel de salinisation qui est associé à cet aquifère.**

- **Alimentation actuelle du système**

L'alimentation actuelle sporadique est essentiellement localisée sur les zones de bordures du bassin. Elle provient principalement de **l'infiltration directe de pluies exceptionnelles et plus généralement de l'infiltration des eaux de ruissellement**. L'estimation de cette infiltration devrait se baser sur **des mesures hydrologiques permettant de définir le régime d'écoulement de surface et de préciser l'occurrence des phénomènes hydrologiques et leur amplitude.**

L'approche géochimique se référant à **la vitesse d'infiltration et à la datation des eaux** peut dans certains cas permettre une meilleure évaluation de l'infiltration globale. Il semble cependant que, en raison de l'éloignement et de la difficulté d'accès des zones potentielles de recharge des aquifères, des mesures fiables, c'est à dire réalisées sur plusieurs années sont difficiles à imaginer.

**Il est fortement recommandé**, avant d'envisager de telles mesures, de procéder à des tests de sensibilité sur le modèle, pour déterminer si des erreurs d'appréciation de la recharge actuelle pourraient se traduire par des comportements très différents de la nappe dans les zones d'exploitation présentes et futures.



- **Débit des exutoires naturels et pertes par évaporation**

Les pertes par évaporation sont également estimées et souvent évaluées comme quantité permettant de boucler le bilan. La baisse du niveau piézométrique résultant de l'effet de l'exploitation dans les zones voisines diminue la remontée d'eau dans les couches superficielles soumises à l'évaporation ou à l'évapo-transpiration, mais le flux vertical a toujours été calculé en appliquant des formules théoriques (loi de Darcy) et en utilisant des valeurs de perméabilité verticale non vérifiables. **Là encore des recherches universitaires pourraient être encouragées pour essayer de déterminer les flux évaporatoires par l'analyse des bilans énergétiques au niveau du sol.**

- **Hydrochimie**

Les analyses chimiques réalisées au moment de la réception des forages sont relativement nombreuses en Libye et en Tunisie mais par contre plutôt rares en Algérie. Une première recommandation dans ce domaine pourrait être **d'augmenter le nombre des analyses chimiques complètes en Algérie**. Par contre, en Libye, une interprétation exhaustive des nombreuses analyses existantes est fortement recommandée afin d'expliquer l'évolution spatiale des teneurs en différents ions en relation avec la géologie d'une part et les caractéristiques de l'écoulement d'autre part.

- **Données relatives à l'utilisation et au coût de l'eau**

Les données relatives à **l'utilisation de l'eau** (irrigation, alimentation en eau potable, industrie, etc...), aux moyens d'exhaure (artésianisme, pompage, foggaras, etc...) et **aux coûts associés à l'exploitation** des eaux souterraines permettent de mieux évaluer les aspects socio-économiques de l'eau et d'orienter la gestion vers les usages optimisés.

Depuis que le pompage est devenu prépondérant dans le mode d'exploitation des eaux du bassin saharien (années 80), les coûts d'exploitation prennent une importance grandissante malheureusement non documentée par des données précises. **Le suivi de l'aspect économique est ressenti à chaque occasion d'actualisation des modèles du SASS comme une lacune qu'il y a lieu de combler par la collecte de certaines données socio-économiques** pour mieux évaluer les enjeux et asseoir les scénarios de développement futur des ressources en eau de ce système aquifère non seulement sur des bases hydrodynamiques et hydrochimiques mais également sur des critères socio-économiques.

### **3.2 - Amélioration du suivi**

- **Suivi des prélèvements**

Sur l'ensemble du bassin saharien, **le suivi périodique des prélèvements** est une nécessité pour permettre d'apprécier la fiabilité des modèles. Les difficultés liées à une approche directe de l'estimation des prélèvements par enquêtes sont énormes et limitent les chances d'un suivi sérieux et fiable sur l'ensemble du bassin.

**L'adoption des méthodes statistiques** (échantillonnage et zone représentatives) **recoupées par d'autres moyens d'évaluation** (superficies irriguées par interprétation d'images satellitaires, consommation d'électricité, etc...) permettrait de mieux assurer le suivi de l'exploitation et de disposer d'une information plus ou moins régulière sur les prélèvements sans pour autant demander la mise en œuvre de moyens considérables.

**La mise au point de la méthodologie, permettant de passer des lectures de compteurs électriques ou des superficies irriguées à partir des images satellitaires aux volumes**

**d'eau extraits du sous-sol**, pourrait faire l'objet de travaux de recherche par zone, pouvant aller jusqu'à la thèse de doctorat. Cette approche permettrait de faciliter la tâche des techniciens de l'administration qui disposeraient d'un moyen rapide de détermination des prélèvements par zone.

**La publication périodique des résultats des mesures sous forme d'annuaires accompagnés d'analyses critiques, permettrait d'assurer d'une manière efficace, une connaissance actualisée de cette information. Cette approche n'est pour l'instant assurée qu'en Tunisie. Elle pourrait constituer une option à mettre en œuvre dans le cadre de la gestion concertée du bassin saharien.**

- ***Suivi piézométrique***

La suivi piézométrique doit être mené dans les trois pays avec plus de régularité afin d'éviter le recours à l'extrapolation de mesures qui ne correspondent pas toutes à la même date. **Un réseau minimal doit être arrêté dans chaque pays** pour le suivi du Continental intercalaire et du Complexe terminal. Ce réseau doit répondre aux principaux critères suivants :

- **une bonne représentativité des variations de la piézométrie** dans les différentes parties du bassin particulièrement en bordure des zones à forte exploitation et à grande densité de points d'eau,
- **une régularité de la collecte de l'information** dans le temps qui permet d'en déduire la réponse de la nappe aux phénomènes qui perturbent son hydrodynamisme comme l'exploitation ou l'alimentation exceptionnelle,
- **un pas de temps adapté** aux variations piézométriques de chaque nappe.

Il est fortement recommandé aux trois pays de tenter d'obtenir **des séries d'observations les plus longues possibles (liaisons avec les forages de remplacement). L'acquisition de l'altitude des points de mesure est complémentaire à l'information piézométrique** et permet l'extrapolation entre les points situés dans la même zone d'influence.

- ***Suivi de salinité et de la composition chimique***

La qualité de l'eau et son évolution future constitue l'aspect le plus préoccupant dans la maîtrise de la gestion des ressources en eau du SASS; malheureusement, le suivi chimique **des aquifères du SASS est loin d'être bien assuré partout et quand ce suivi est plus ou moins assuré, il ne concerne que la salinité de l'eau.**

Avec l'accroissement de l'exploitation et la baisse des niveaux piézométriques au dessous du terrain naturel, **les risques d'inversion de l'écoulement au sein des formations aquifères est devenu plus grand.** C'est particulièrement le cas de la nappe du **Complexe terminal** dans les zones où son toit semi-imperméable est très peu épais. **Les risques de contamination de cette nappe par les eaux d'irrigation et celles des Chotts sont importants. Ce phénomène observé dans les oasis d'El Oued et de la Nefzaoua-Djérid demande à être mieux observé et analysé en conséquence.** Les risques d'invasion marine dans **les aquifères à proximité de la mer en Lybie nécessite également une surveillance qui fait encore défaut.**

**La gestion des ressources en eau de ce système n'est plus uniquement une gestion des volumes exploitables, mais également de la qualité de l'eau** qui sera prélevée dont la détérioration pourrait compromettre gravement son utilisation dans certains secteurs comme l'alimentation en eau potable et l'industrie qui exigent une bonne qualité chimique. **Ce suivi chimique devra graduellement être orientée vers la composition chimique de l'eau en plus de sa salinité globale.** C'est à travers l'analyse de cette composition que

seront mieux mises en évidence les origines de la contamination et les mesures à prendre pour y remédier.

### **3.3 - Acquisition de nouvelles données et mise à jour de la base de données**

**Les données des nouveaux forages**, contribuant à améliorer la connaissance de la géométrie des réservoirs aquifères (log géologique) et à actualiser l'information hydrogéologique (piézométrie, débit d'exploitation, transmissivité, résidu sec, chimie, analyse isotopique, etc...) **devraient systématiquement être archivées dans la base de données**, conformément aux formats définis dans le cadre du projet SASS. L'acquisition de cette information dans la base permettra en outre de faciliter son interprétation et son intégration dans les modèles.

## **4 - Recommandations pour l'établissement d'un réseau de suivi**

**Les mesures périodiques des débits, niveau piézométrique, salinité de l'eau et composition chimique doivent être acquises dans le cadre de réseaux nationaux de suivi bien structurés et répondant aux différents objectifs nationaux de surveillance et de gestion.** La structuration de ces réseaux s'intègre dans la politique de chaque pays d'assurer la gestion de ces ressources en eau.

Cependant la mise en place d'un **réseau minimum de surveillance des niveaux et de suivi des prélèvements et de la qualité des eaux** permettant de collecter l'information nécessaire à l'échelle de l'ensemble du bassin est **une orientation qui répond à l'objectif de mise en place "d'un mécanisme de suivi et de concertation"** permettant de coordonner la gestion de ces ressources.

**La définition de ce réseau minimum résultera de la simulation sur modèle des différents scénarios de développement permettant de localiser les zones sensibles** qui nécessitent une surveillance particulière et qui sont essentielles pour le calage des modèles.

## **Annexe Bibliographique**

### **1 Etudes régionales**

- 1.1 Etude des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESS, 1972)
- 1.2 Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara septentrional (RAB 80, 1983)

### **2 Etudes algériennes**

- 2.1 Etude sur modèle détaillé du Complexe Terminal dans la zone de l'Oued Rhir (Ecole des Mines de Paris, 1973)
- 2.2 Etude du plan directeur général de développement des régions sahariennes (BRL, 1998)

### **3 Etudes tunisiennes**

- 3.1 Modèle mathématique du Complexe Terminal: Nefzaoua – Djérid (ARMINES, 1985)
- 3.2 Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien (MAMOU, 1990)
- 3.3 Annuaire d'exploitation des nappes profondes de Tunisie (1971-99) et annuaire de la piézométrie des nappes de Tunisie (1991-99)

### **4 Etudes libyennes**

- 4.1 Report regional hydrogeological study in Ghadames-Derj-Sinawan area (M.L. Srivastava, 1981)
- 4.2 North-Western part of Libya – Ghadames-Hamada basin (Sinha, 1980)
- 4.3 Hydrogeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufra and Jabal Fezzan area (Idrotecneco, 1982)
- 4.4 Survey for the development of the Central Wadi Zone & Gulf of Sirt; Groudwater resources (GEFLI, 1978)
- 4.5 Western Jamahiria system hydrogeological modelling of aquifers and wellfields (GEOMATH, 1994)
- 4.6 Ghadames project: water resources (BRL, 1998)

Par ailleurs, durant la période 1970-2000, le Sahara algéro-tunisien a fait l'objet de plusieurs études universitaires portant sur l'hydrogéologie (Ben Dhia, 1985 et Mamou. A, 1990) et sur l'hydrochimie isotopique (Gonfiantini et al., 1974 et 1976 ; Yousfi, 1984 ; Guendouz, 1985 et Zouari, 1988). De nombreuses autres études à caractère local ont également été utilisées. L'ensemble de ces travaux dont la liste est fournie dans les références bibliographiques a permis d'apporter des éclaircissements sur le régime climatique de la région, la géologie du sous-sol saharien et le fonctionnement des nappes.