

# COLLOQUE INTERNATIONAL

« Les Ressources en Eau Souterraine au Sahara »

ABHS, Ouargla le 13-14/ 12/ 2005

" UN APERCU DE QUELQUES RESULTATS  
D'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE IMPORTANTS  
OBTENUS AU SAHARA ALGERIEN "

par Adnane S. MOULLA et al.

CENTRE DE RECHERCHE NUCLEAIRE D'ALGER

Département des Applications en Hydrologie et en Sédimentologie

2, Bd Frantz Fanon, BP 399, Alger-Gare, 16000, ALGER

[as.moulla@comena-dz.org](mailto:as.moulla@comena-dz.org) / [asmoulla@gmail.com](mailto:asmoulla@gmail.com)

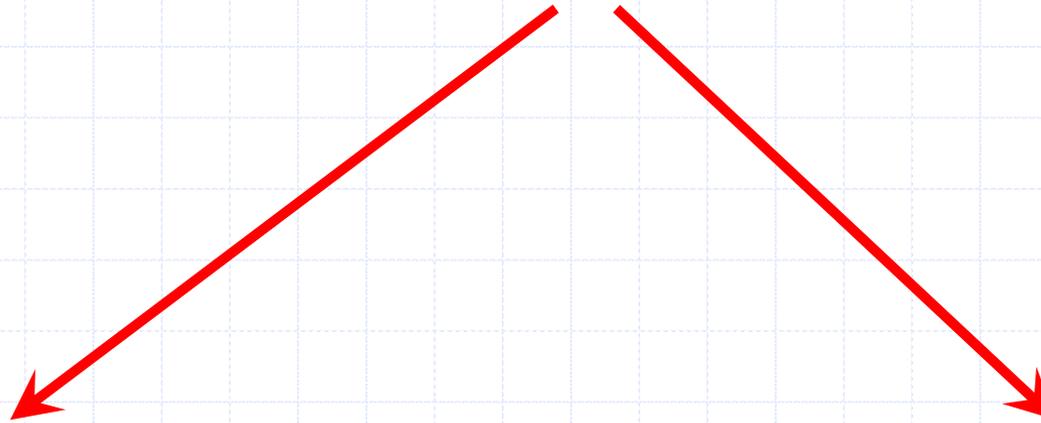
# INTRODUCTION

Le recours systématique aux réserves en eau souterraine dans les zones arides et semi-arides



l'exploitation mal pensée des systèmes aquifères

pose aujourd'hui le double problème de leur



surexploitation

détérioration de leur qualité

Les systèmes aquifères, notamment ceux du Sahara en Algérie, n'échappent malheureusement pas à cette règle.

Les développements agricole et industriels d'une part,

+ la croissance démographique d'autre part

ont induit

des besoins en eau très importants

lesquels, avec le concours de conditions climatiques défavorables

a inévitablement conduit à

une baisse quasi-généralisée des niveaux piézométriques

une perte de qualité

Ce phénomène est susceptible d'induire à la longue une inversion de gradients au niveau des chotts et par conséquent une salinisation.

Au cours de ces 30-40 dernières années,

il s'est développé une nouvelle méthodologie basée sur l'application de techniques nucléaires en sciences de l'eau

L'hydrologie isotopique est devenue actuellement l'un des principaux outils de recherche appliquée dans ce domaine.

Sa capacité à obtenir des informations très difficiles voire impossibles à acquérir par les méthodes classiques, est devenue incontestable.

# L'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE

C'est une méthodologie **améliorée** ou **à valeur ajoutée** pour étudier les ressources en eau et l'impact de l'exploitation et des pratiques agricoles sur la dégradation de leurs qualité dans les aquifères. Elle permet entre autres :

- Une meilleure connaissance du mécanisme de la recharge des nappes aussi bien à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale de la zone non saturée.
- La détermination de l'origine des différentes masses d'eau et des mélanges éventuels dans un système.
- La connaissance du mécanisme d'acquisition de la salinité des eaux et de son évolution spatio-temporelle.
- L'identification de l'origine de pollution notamment pour les nitrates.
- L'élaboration de cartes de vulnérabilité à la pollution et à la salinisation...

# RAPPEL SUR LA DEFINITION DES ISOTOPES

Un atome se caractérise par son nombre de **protons** (identique à celui des **électrons**) et par son nombre de **neutrons**. Il est appelé par le nom de son symbole chimique suivi de son nombre total de nucléons (nombre de masse).

## Les isotopes

L'hydrogène  ${}^1\text{H}$



1 électron  
Noyau { 1 proton }

Le deutérium  ${}^2\text{H}$  ou D



1 électron  
Noyau { 1 proton  
1 neutron }

Le tritium  ${}^3\text{H}$  ou T



1 électron  
Noyau { 1 proton  
2 neutrons }

Les **isotopes** sont en quelque sorte des atomes "**frères**" qui possèdent les **mêmes propriétés chimiques** mais un nombre différent de neutrons. 6

# RAPPELS D'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE

Les isotopes les plus communément utilisés sont logiquement ceux qui font partie de la molécule d'eau à savoir : l'Oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ), le Deutérium ( $^2\text{H}$ ) et le Tritium ou Hydrogène radioactif ( $^3\text{H}$ ), Les autres isotopes sont ceux de la forme dissoute : le Carbone-13 qui est stable ( $^{13}\text{C}$ ) et le Carbone-14 ( $^{14}\text{C}$ )...

Deux mécanismes ayant lieu au sein du cycle de l'eau peuvent modifier la composition en isotopes d'une eau naturelle. Ce sont, comme illustré ci-dessous pour l'O-18 :

- les changements de phase :  $\text{H}_2^{16}\text{O}_{\text{liq}} + \text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{vap}} \rightleftharpoons \text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{liq}} + \text{H}_2^{16}\text{O}_{\text{vap}}$
- les réactions d'échange isotopique:  $\frac{1}{2} \text{C}^{16}\text{O}_2 + \text{H}_2^{18}\text{O} \rightleftharpoons \frac{1}{2} \text{C}^{18}\text{O}_2 + \text{H}_2^{16}\text{O}$

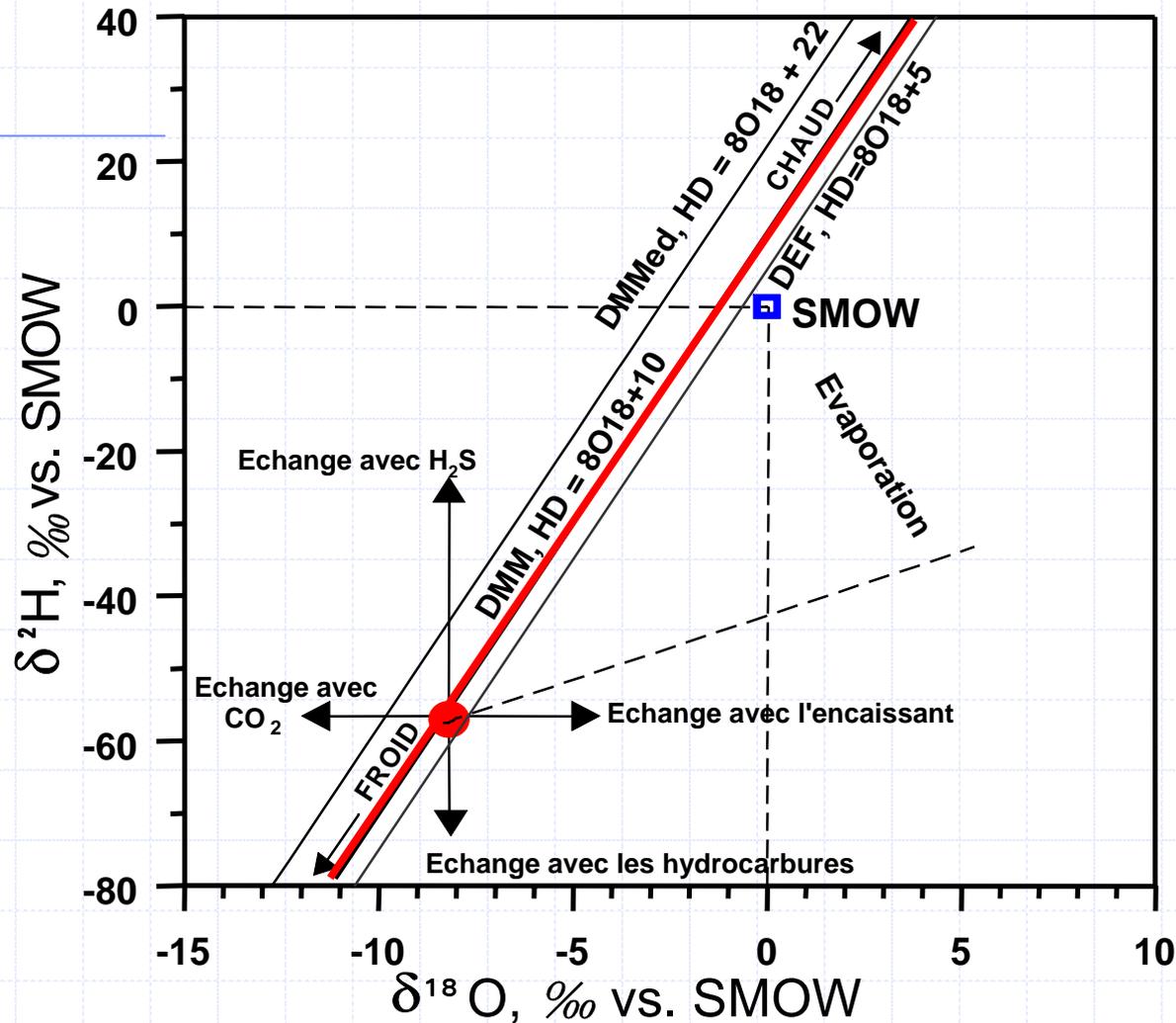
Les résultats sont exprimés en différence appelée communément  $\delta$  de rapports isotopiques entre deux substances, l'échantillon E et un standard donné S. Le  $\delta_E$  s'exprime en pour mille (‰) et est défini comme suit :

$$\delta_E = \left[ \frac{R_E}{R_S} - 1 \right] \cdot 10^3$$

La connaissance temporelle des variations de la teneur isotopique des eaux météoriques est nécessaire pour établir l'origine des eaux des formations qui ont pu être mélangées et/ou rechargées. Ces variations en isotopes des eaux de pluies peuvent résulter :

1. de la variation de la teneur isotopique des océans,
2. du changement des conditions climatiques à l'aire de recharge.

Les précipitations mondiales montrent une corrélation linéaire de pente **8**, caractéristique du phénomène de condensation, qui se produit toujours à saturation, donc à l'équilibre:  $\delta^{2}\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$



L'ordonnée à l'origine, peut varier d'une région à une autre en fonction de l'origine de la vapeur qui se condense. La vapeur océanique, qui est le cas le plus répandu, donne des eaux de pluies dont l'excès en deutérium est de **+10**. Pour le domaine oriental du bassin méditerranéen on relève **+22** et pour les eaux souterraines fossiles on relève **+5**, comme illustré ci-dessus.

Les isotopes radioactifs sont instables et sont ainsi régis par la loi exponentielle de décroissance radioactive, chaque élément ayant sa propre période de demi-vie.

Les radioisotopes **H-3** et le **C-14** sont produits dans les hautes couches de l'atmosphère par l'action de la composante neutronique des rayons cosmiques sur la composante atmosphérique avant d'intégrer les différents cycles naturels dont celui de l'eau.

L'intérêt du **tritium** réside dans le fait qu'il est partie intégrante de la molécule d'eau. Compte tenu de cela et de sa période (**12,32 ans**), il est utilisé pour **tracer** les masses d'eau dans les cycles hydrologiques relativement courts.

Contrairement au tritium, le **radiocarbone** possède une période de demi-vie bien plus longue (5730 ans). Il peut donc être utilisé comme **radiochronomètre** pour la matière carbonée avec un spectre d'utilisation pouvant atteindre **~40.000 ans**.

Par des processus chimiques et biochimiques complexes, le C-14 se retrouvera dans l'eau à travers la forme carbonatée et bicarbonatée dissoute :

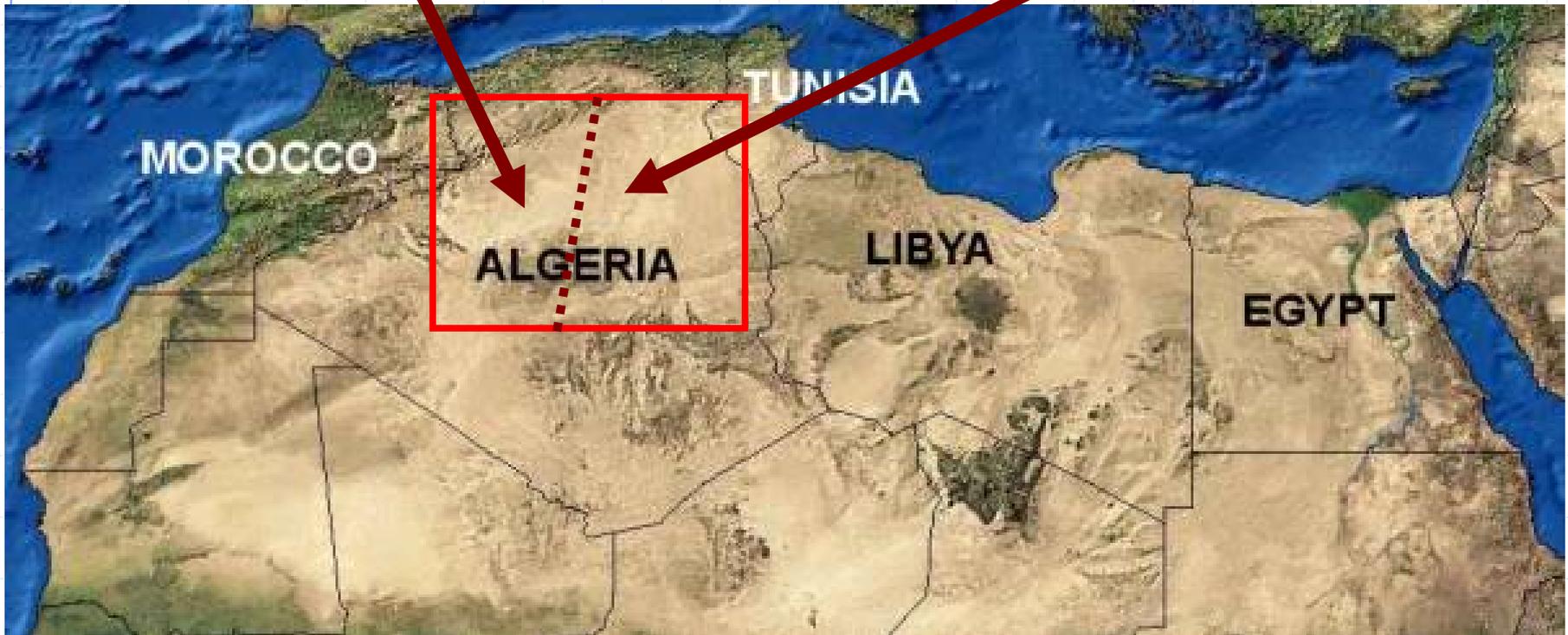


C'est cette dernière qui pourra permettre à l'eau d'être datée

# CARACTERISTIQUES DES EAUX SOUTERRAINES PROFONDES AU GRAND ERG ORIENTAL

Grand Erg Occidental

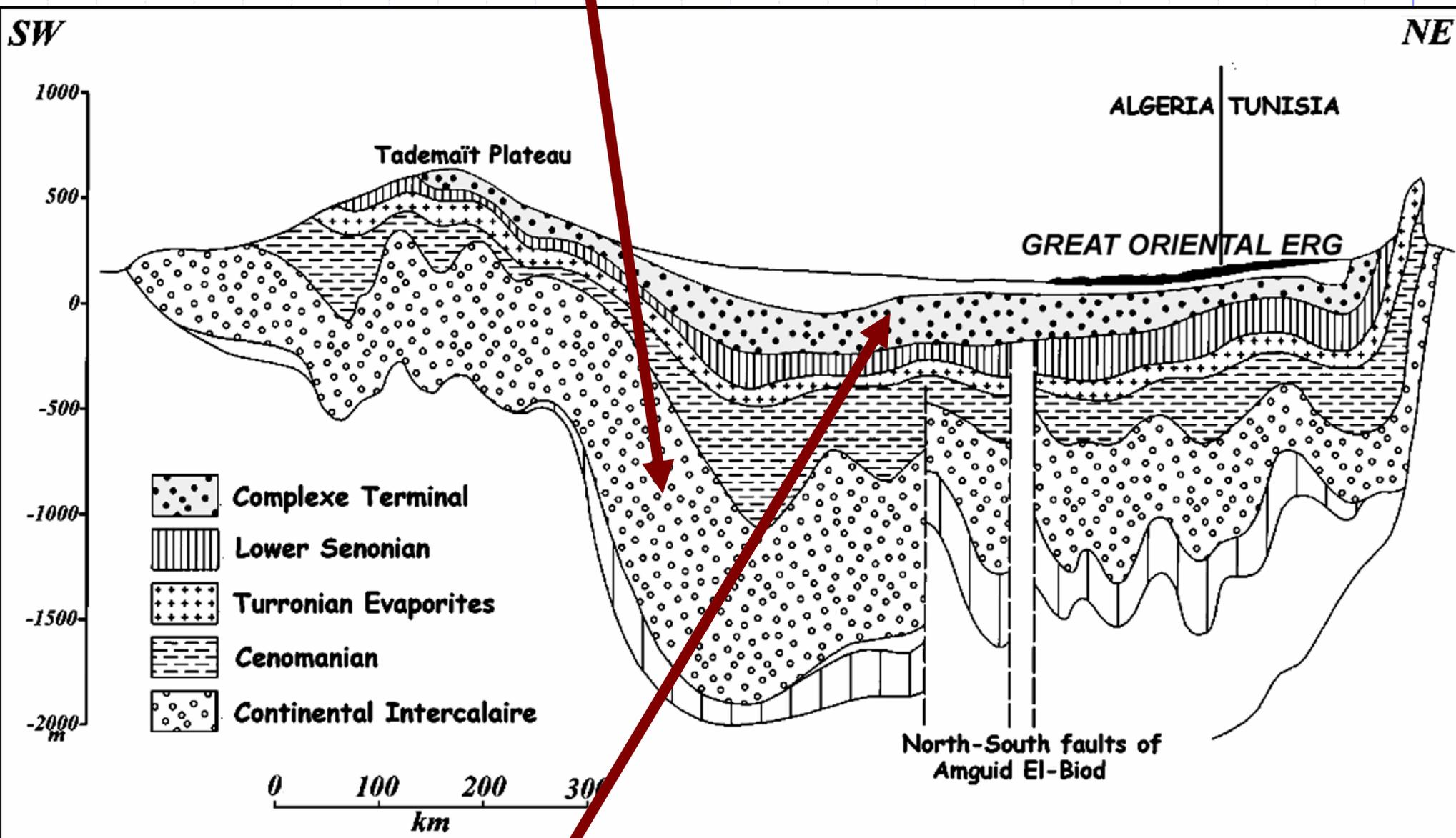
Grand Erg Oriental



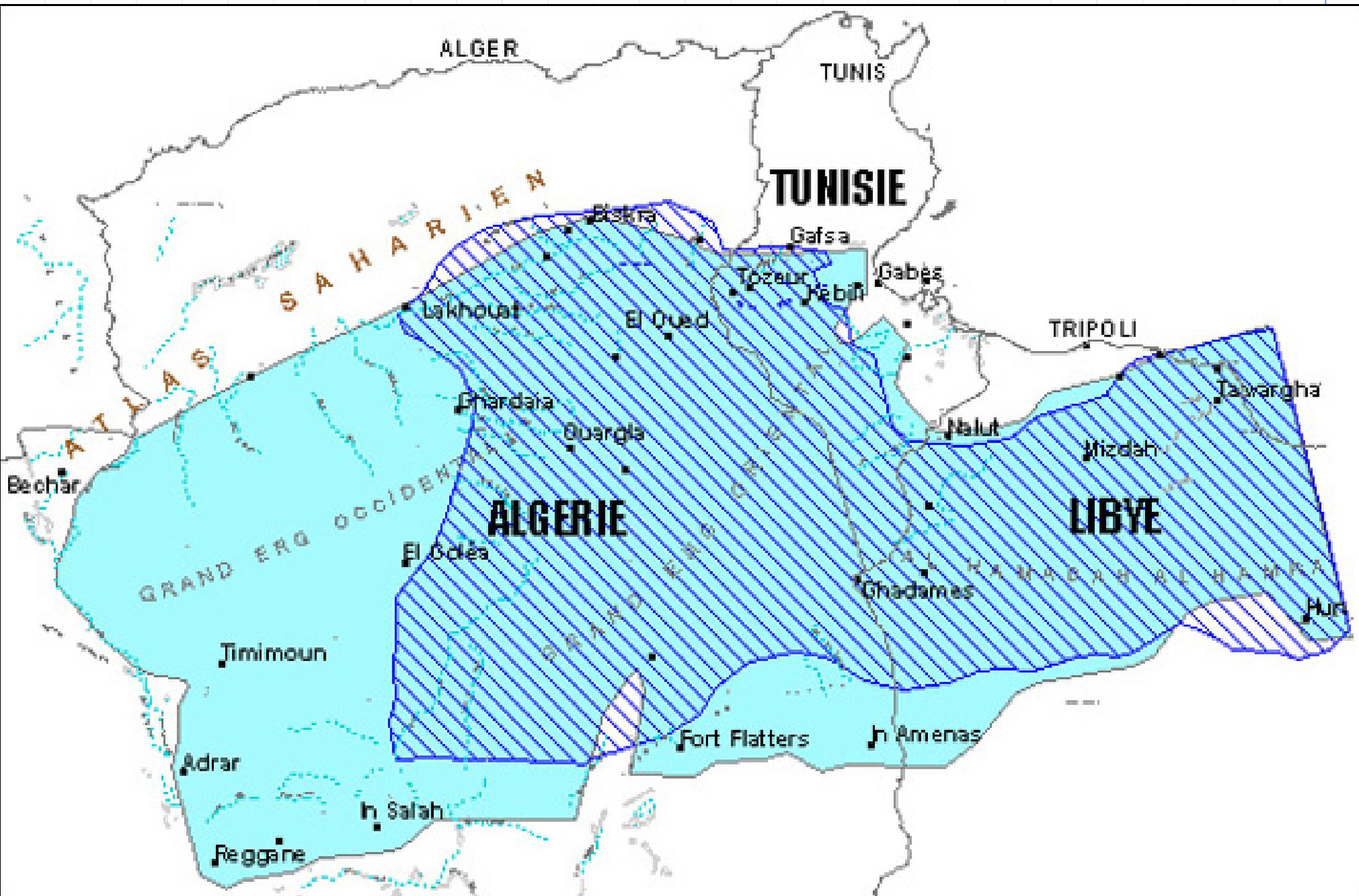
Cette étude s'est concentrée principalement sur les nappes profondes présentes dans le bassin sédimentaire du Sahara nord-est septentrional algérien qui s'étend sur  $\sim 700.000 \text{ Km}^2$ . Il comprend deux grands systèmes aquifères qui sont:

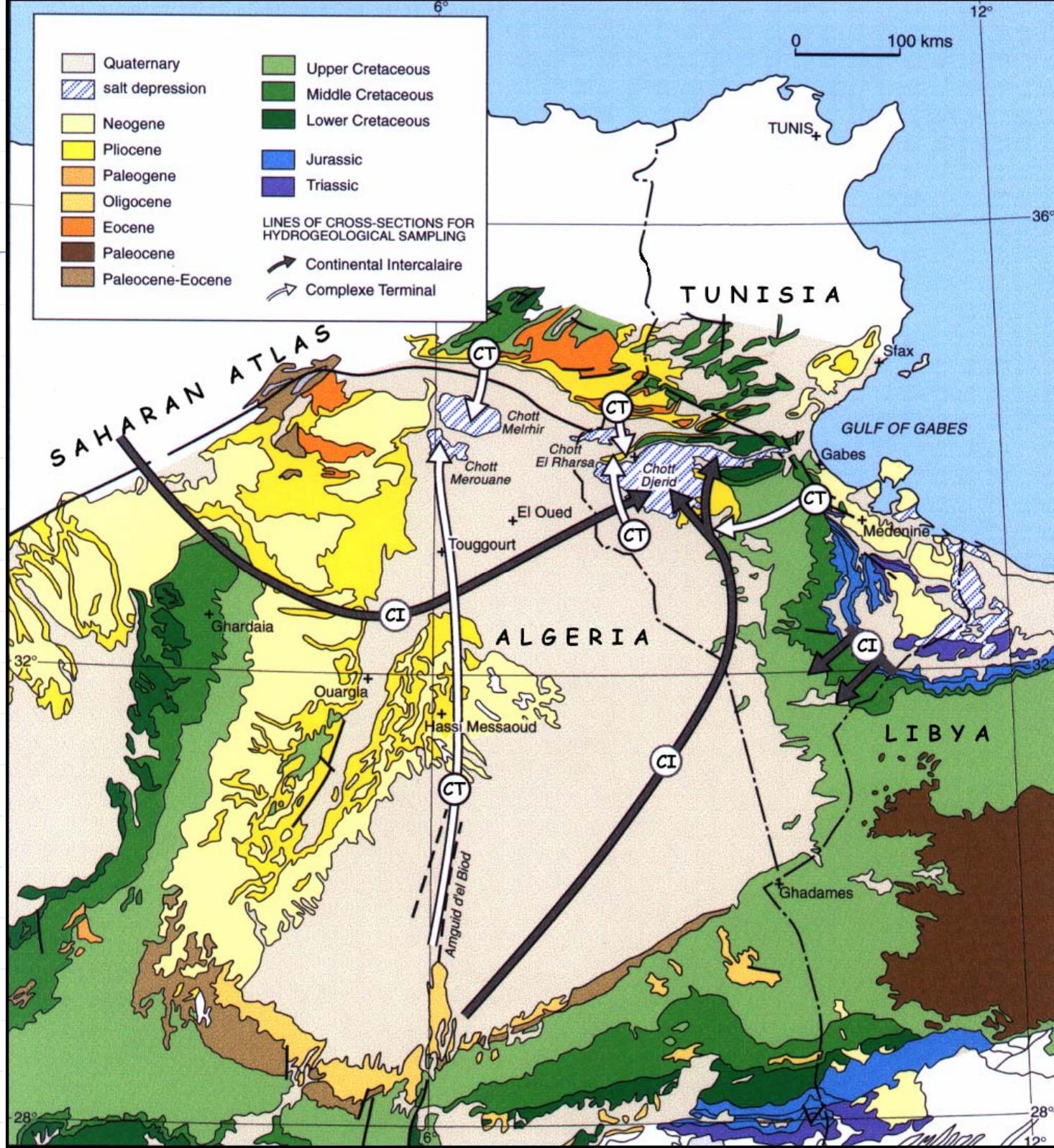
le **Continental Intercalaire** et le **Complexe Terminal**.

Le réservoir du Continental Intercalaire s'étend sur ~600.000 Km<sup>2</sup>. Il est contenu dans les formations continentales des horizons sableux et argilo-gréseux du Crétacé inférieur.



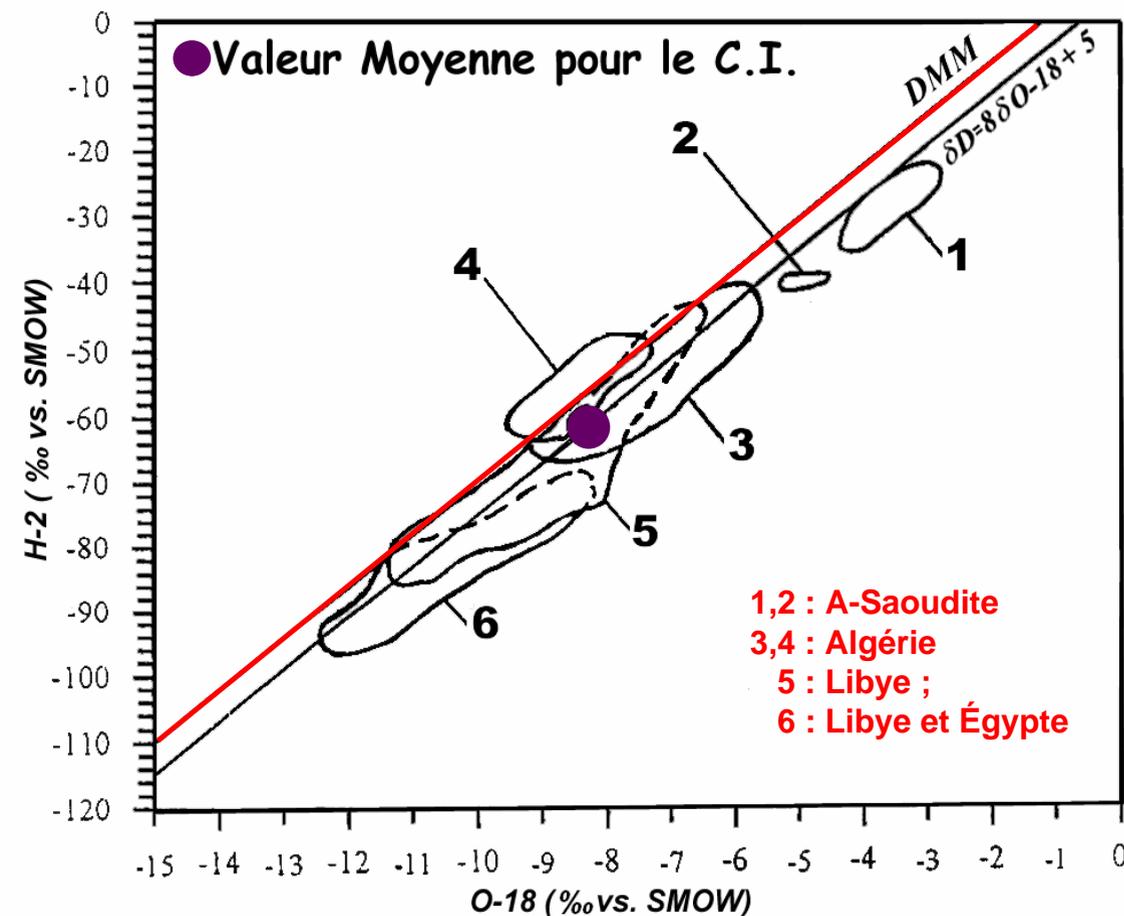
Le réservoir du Complexe Terminal groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes.





**Isotopes stables:** Le C.I. est captif sur la plus grande partie de la région étudiée. Ceci lui confère un caractère très homogène reflété par des teneurs en  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moy}} = -8.4\text{‰}$  (n=100) et en  $\delta^2\text{H}_{\text{moy}} = -61\text{‰}$  (n=70). Ces valeurs très caractéristiques du C.I. font qu'il est un aquifère très protégé, exempt de toute contribution à partir d'autres nappes.

Par comparaison, d'autres réservoirs de même dimensions sis en zones arides, montrent le même caractère homogène et appauvri en isotopes lourds. Ceci est directement lié aux conditions sous lesquelles ces nappes ont été rechargées.



Le diagramme ci-contre montre que les eaux du C.I. se positionnent sous la Droite Météorique Mondiale (DMM) tout en s'alignant parallèlement à celle-ci.

Droite des eaux fossiles:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 5$$

L'excès en deutérium de  $+5\text{‰}$  suggère une température plus basse et une humidité atmosphérique supérieure à celle des conditions climatiques actuelles.

Isotopes Radioactifs (H-3, C-14, Cl-36): Les eaux du C.I. sont quasiment exemptes de tritium. Leurs activités en  $^{14}\text{C}$  varient entre 0 et 6 pmc dans la partie centrale et entre 50 et 80 pmc au NW de Laghouat en Algérie et 50 pmc sur les monts du Dahar en Tunisie. Ces dernières valeurs élevées correspondent à des zones de recharge.

Les âges corrigés déterminés à partir du C-14, pour l'ensemble du bassin du Grand Erg Oriental (hors zones de recharge) varient entre 20 et 40 ka.

D'un point de vue paléoclimatologique, les eaux du C.I. seraient liées à la phase humide majeure de recharge du Pléistocène inférieur, qui a été reconnue dans plusieurs ensembles aquifères du globe et plus récemment encore dans le Tidikelt autour de In-Salah (sud du Grand Erg Occidental).

Les rapports  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ , ont montré une diminution dans le sens de la direction principale d'écoulement, *i.e.* de l'Atlas saharien en Algérie vers le golfe de Gabès en Tunisie. Les valeurs mesurées varient entre  $3.5 \times 10^8$  et  $0.9 \times 10^8$  at/l. Cette diminution est simplement attribuée à la décroissance radioactive.

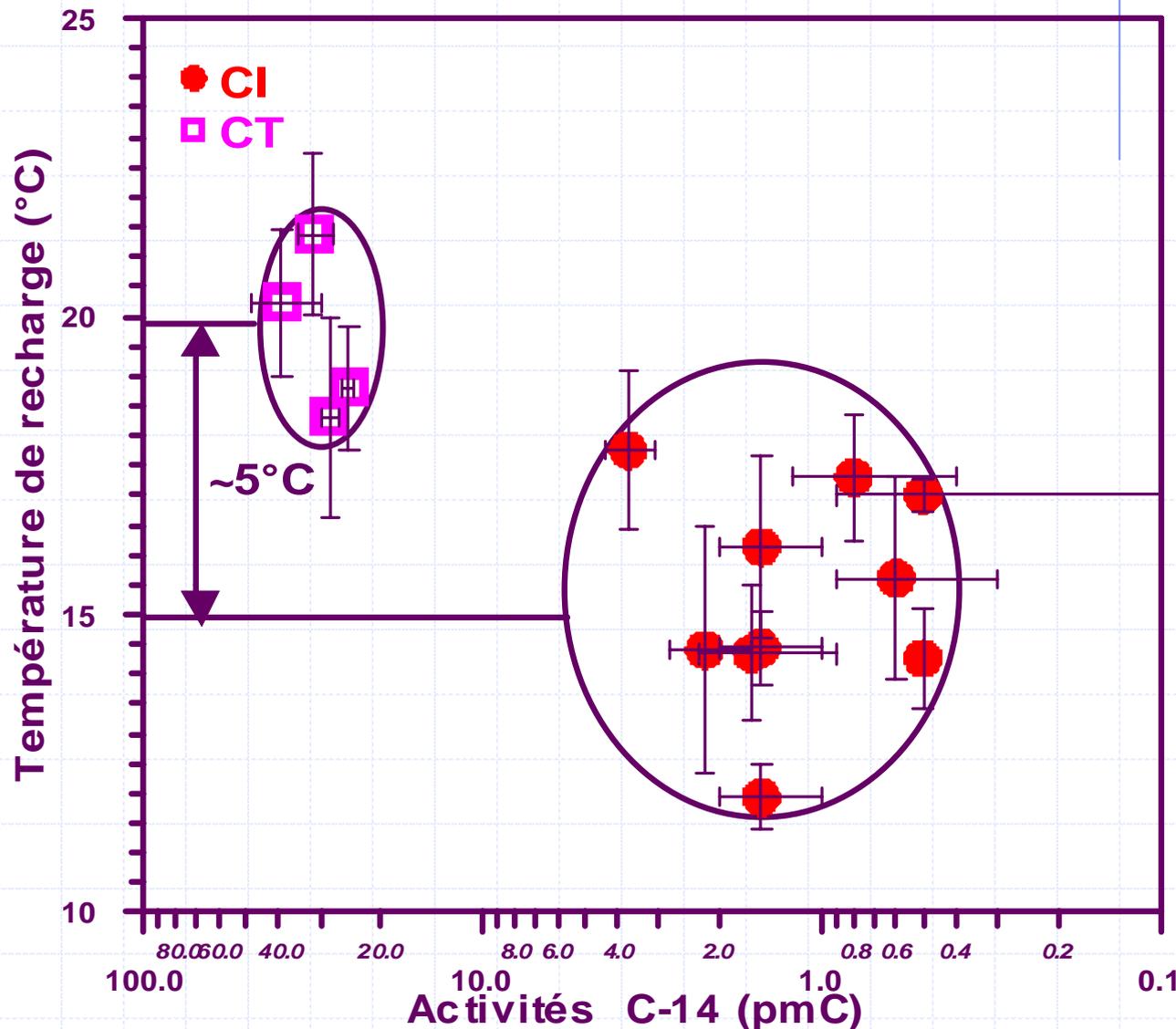
Ainsi, entre la dorsale du M'Zab et la vallée de l'Oued Rhir, le temps de résidence calculé le long de cette direction d'écoulement varierait entre 50 et 600 ka.

**Les Gaz Nobles:** Les gaz nobles ou rares (Ne, Ar, Kr, Xe, He) proviennent de leur mise en solution à partir de l'air. La teneur des eaux en ces gaz suit la loi de solubilité de Henry et dépend essentiellement de la température. Pour les eaux souterraines, cette concentration dépendra logiquement de la température qui prévalait lors de la recharge.

Les teneurs en gaz rares du C.I. ont permis de calculer des températures de recharge avec une moyenne autour de **15°C**.

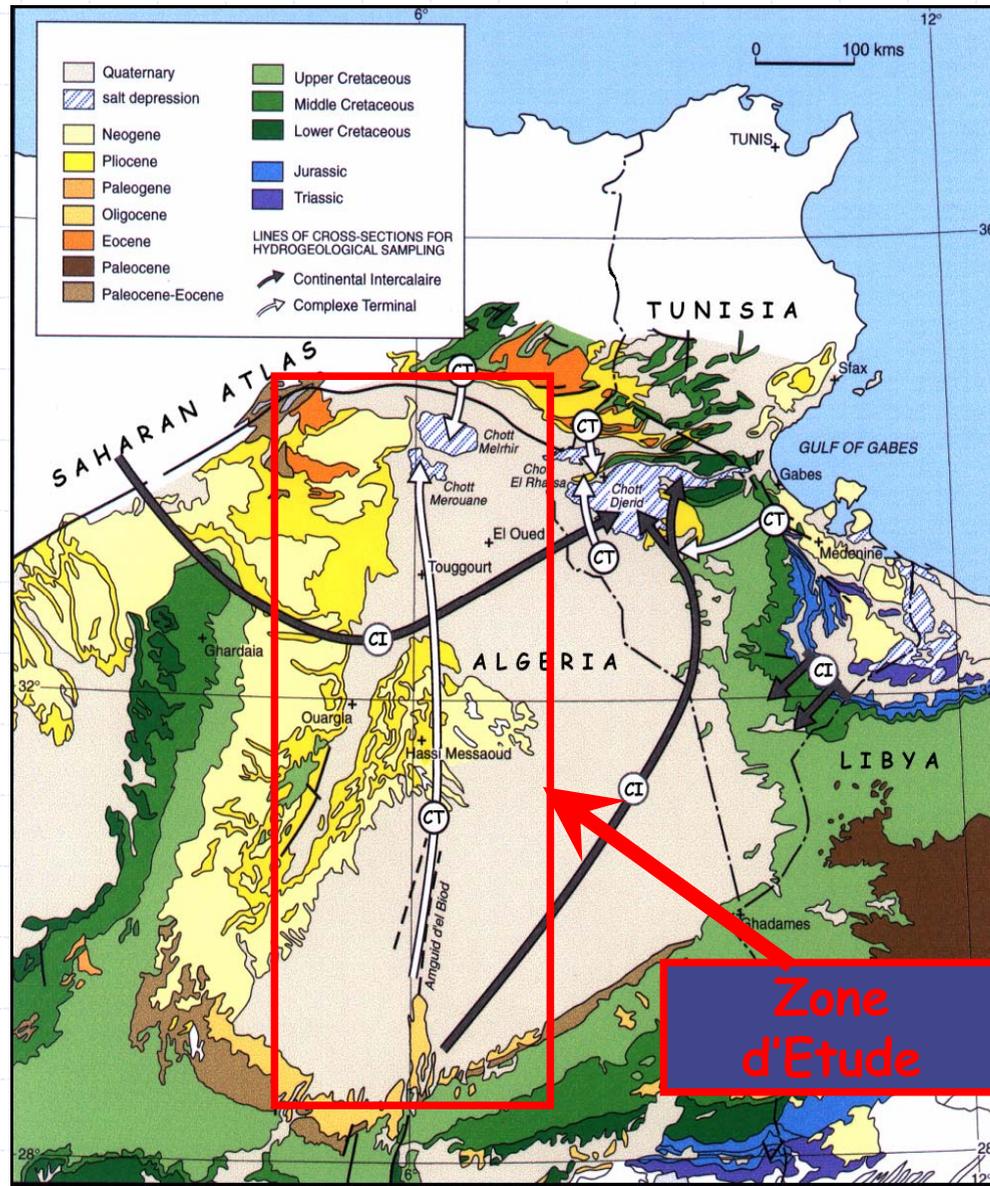
Quant au C.T., il a exhibé des températures reflétant la valeur moyenne annuelle prévalant actuellement sur les zones d'études (**~20°C**).

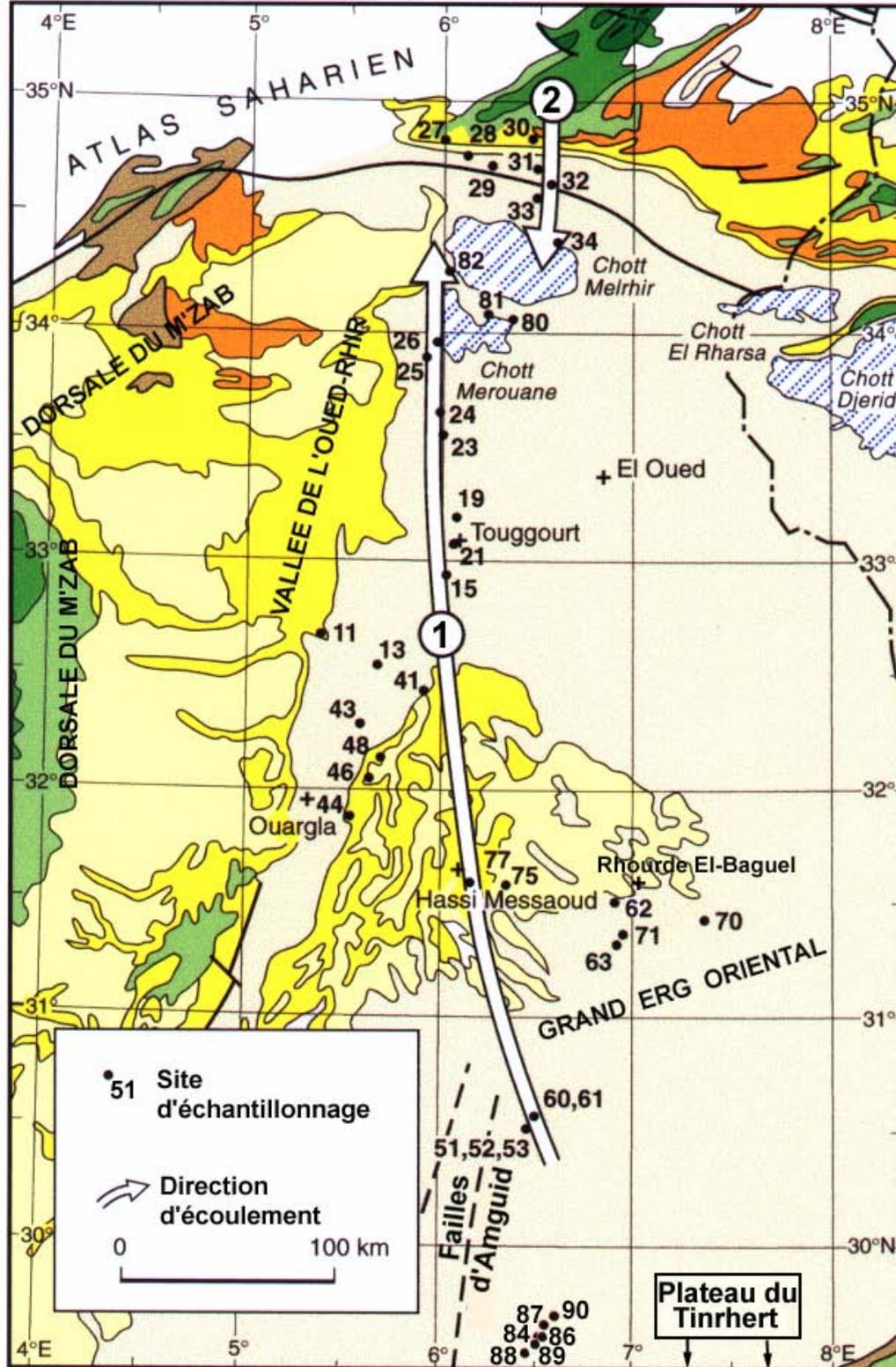
La différence de **~5°C** confirme que les eaux du C.I. se seraient infiltrées dans des conditions climatiques plus humides, signature d'une paléo-recharge datant du Pléistocène inférieur.



# CARACTERISTIQUES DU COMPLEXE TERMINAL

En Algérie, la nappe du Complexe Terminal s'étend sur la majeure partie du sous bassin oriental mais aussi en Tunisie et Libye. C'est une région comprise entre la dorsale du M'Zab à l'ouest, le plateau de Tinrhert au Sud, la région des Chotts au Nord et les frontières Tunisienne et Libyenne à l'est.

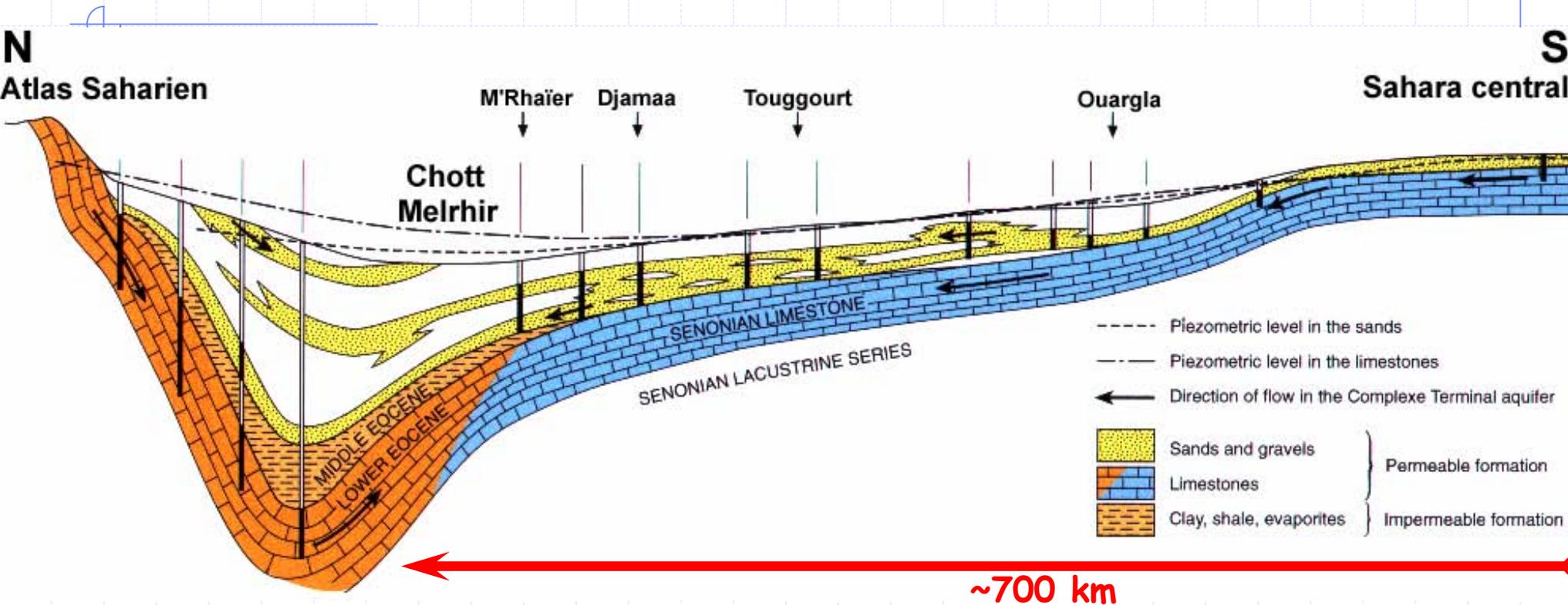




On étudiera ainsi la variation des caractéristiques isotopiques des eaux souterraines du CT en Algérie, le long d'une direction d'écoulement Sud-Nord sur près de 700 km, s'étalant du plateau du Tinrhert vers la zone des Chotts Merouane et Melrhir.

Les caractéristiques hydrogéologiques et géochimiques globales des eaux du CT ont été bien établies par plusieurs auteurs.

La région d'étude est formée par un long synclinal dont la base est plate et étendue. Elle est limitée par les affleurements Crétacés de la dorsale du M'Zab à l'ouest et du Dahar à l'Est en Tunisie, par le Plateau du Tinrhert au Sud et enfin par la flexure sud Atlasique au Nord.

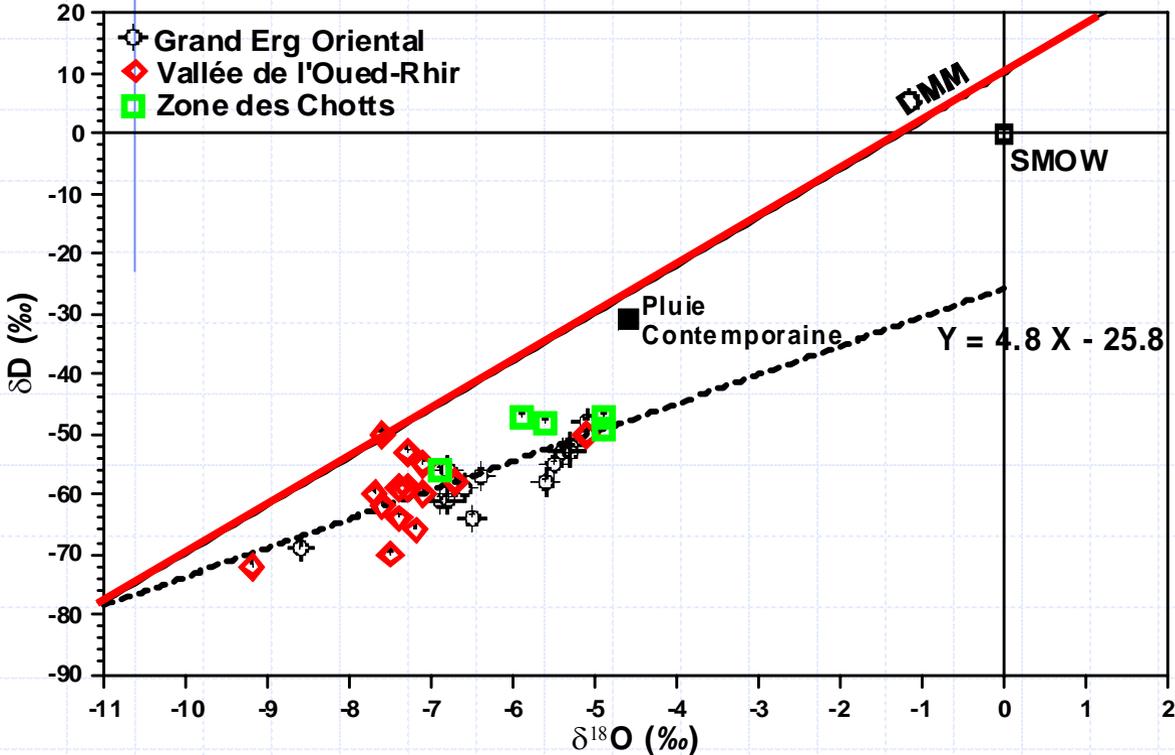


✿ Le Grand Erg Oriental: Dans cette zone, les sables du Miopliocène et les carbonates du Sénonien sont présents autour de la ville de Ouargla où ils sont adjacents et moins profonds que nulle part ailleurs dans la région. Leur épaisseur ne dépasse pas les 100m. Au sud de Hassi-Messaoud et de Rhourde El-Baguel, l'aquifère des sables du Miopliocène est la seule formation qui est exploitée.

# DONNEES ISOTOPIQUES

Les isotopes stables de la molécule d'eau (O-18 et H-2) sont utilisées comme traceurs conservés (intrinsèques) de l'origine de l'eau.

Leurs teneurs exhibent une large variation s'échelonnant entre  $-4.9$  et  $-9.2\text{‰}$  pour le  $\delta^{18}\text{O}$  et  $-44$  à  $-72\text{‰}$  pour le  $\delta^2\text{H}$ , le long de la section considérée.

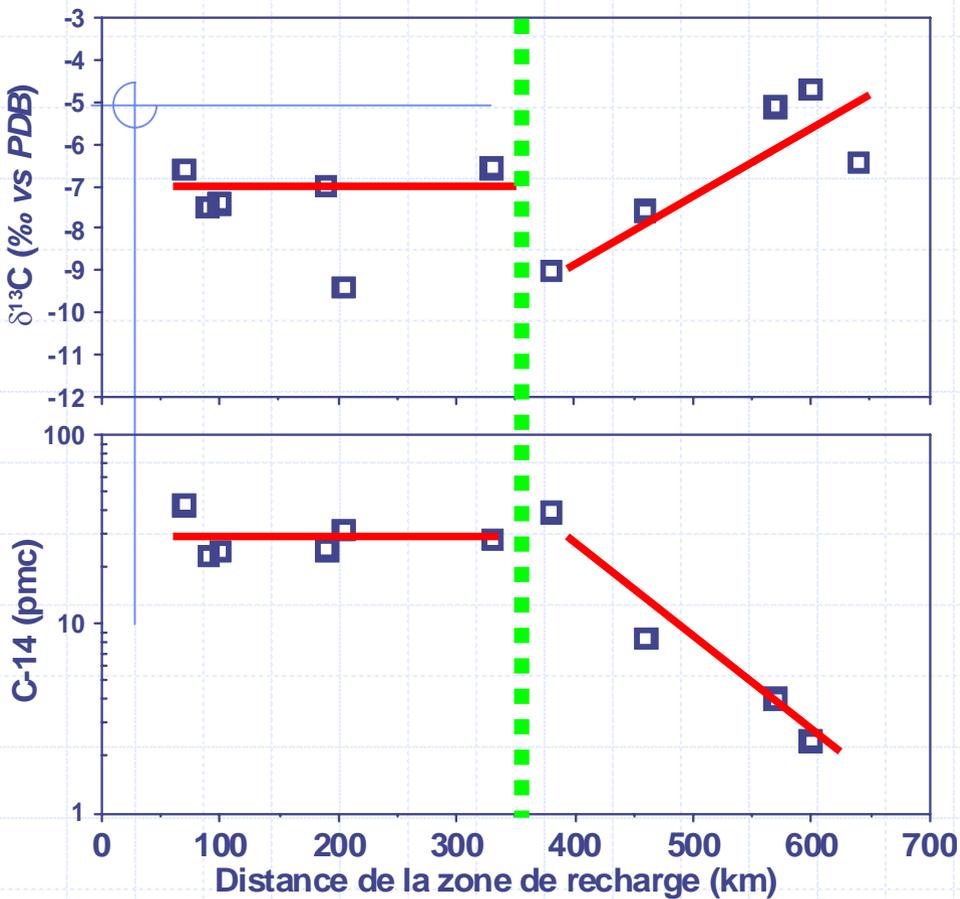


Il y a appauvrissement par rapport à la **DMM** et à la pluie contemporaine représentée par une moyenne sur 3 ans à Ain-Oussera



Le CT n'est pas affecté par une recharge moderne mais plutôt par une **paléorecharge**

Les résultats en Carbone-14 quant à eux montrent deux tendances :

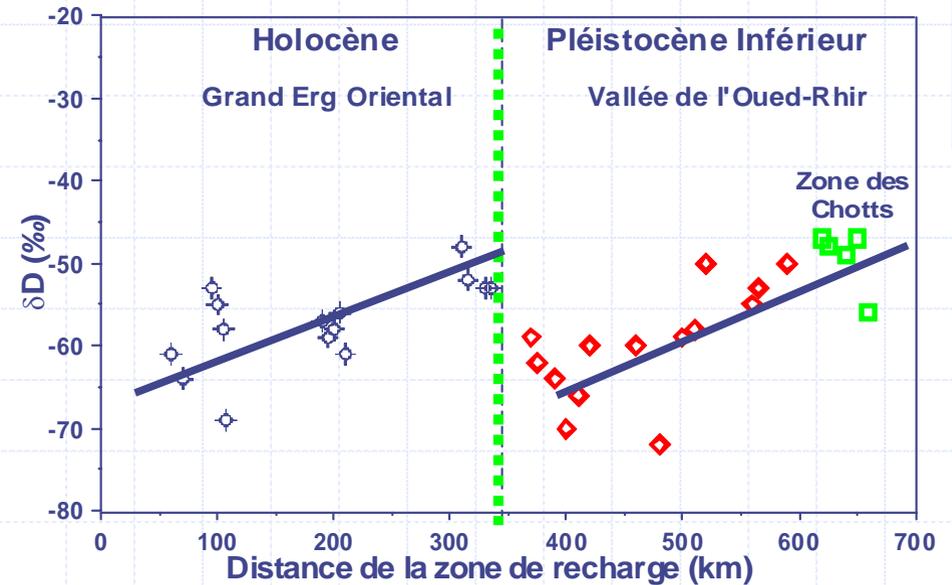
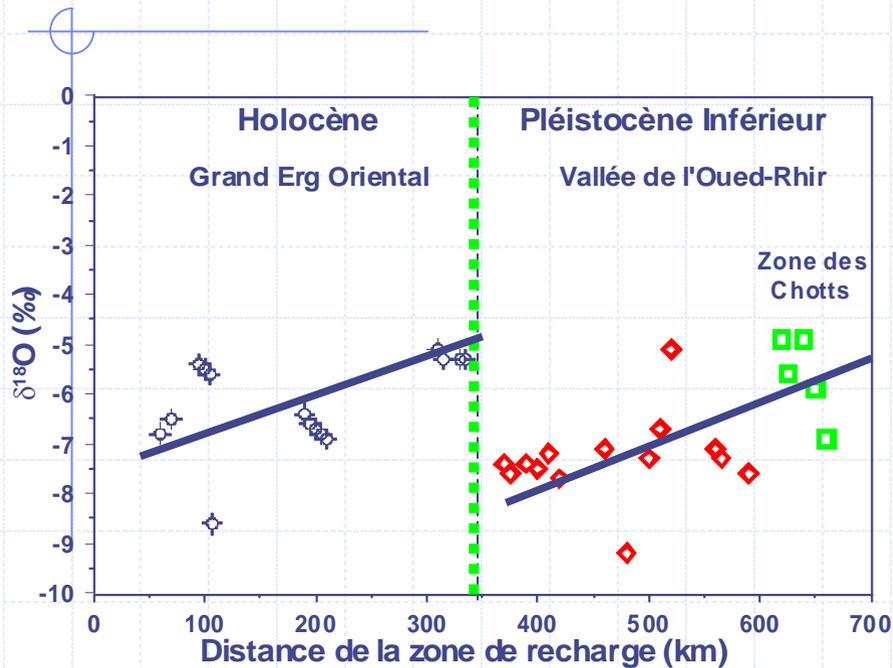


➤ une plus ou moins stable avec des activités comprises entre **20 et 40 pmc** dans la partie sud du profil sur ~350 km correspondant à des âges de **l'Holocène**.

➤ une autre, décroissante de **8.4 à 0 pmc** au delà de 350 km, à partir de la vallée de l'Oued-Rhir vers les Chotts, correspondant à des âges du **Pléistocène inférieur**.

Ces deux tendances sont plus ou moins retrouvées avec le C-13, d'où une zonation en deux périodes de paléorecharge.

En revenant aux isotopes stables traceurs conservés de l'origine de l'eau, cette zonation est encore une fois clairement identifiée.

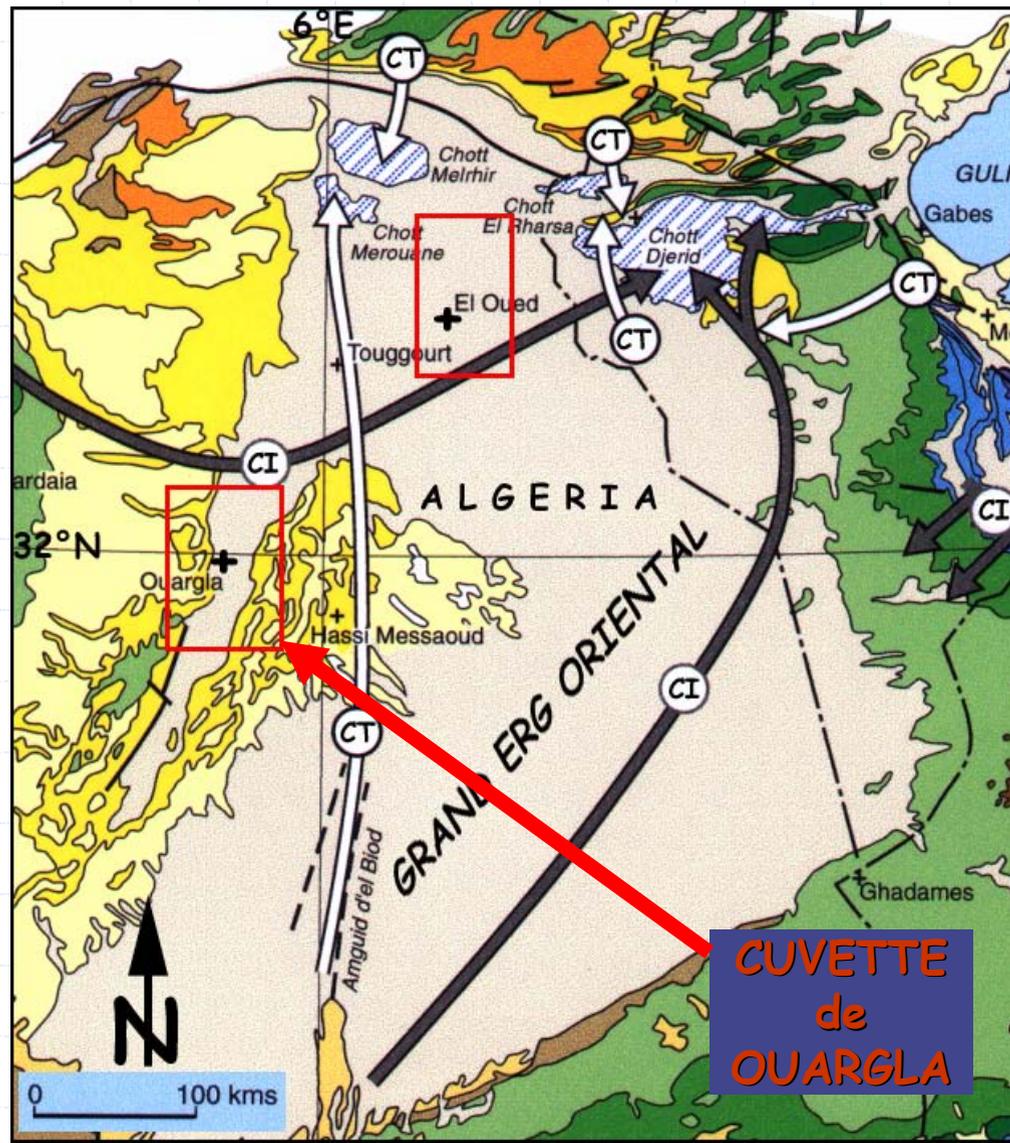


La tendance des variations n'étant pas linéaire et directe, la discontinuité dans le renouvellement des eaux ressort.

Les isotopes étant affectés par la température, ce changement serait donc lié principalement à une variation des conditions climatiques ayant prévalu en ces temps là.

# ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA CUVETTE DE OUARGLA

La cuvette de Ouargla est une dépression naturelle d'une superficie de 990 km<sup>2</sup>. Elle est actuellement confrontée à un problème d'évacuation des eaux usées. Le manque de drains et de stations de pompage, le bouchage et l'entretien déficients des forages détériorés, ont contribué à accentuer ce problème. L'objectif de cette étude était de préciser les mécanismes de ce phénomène.



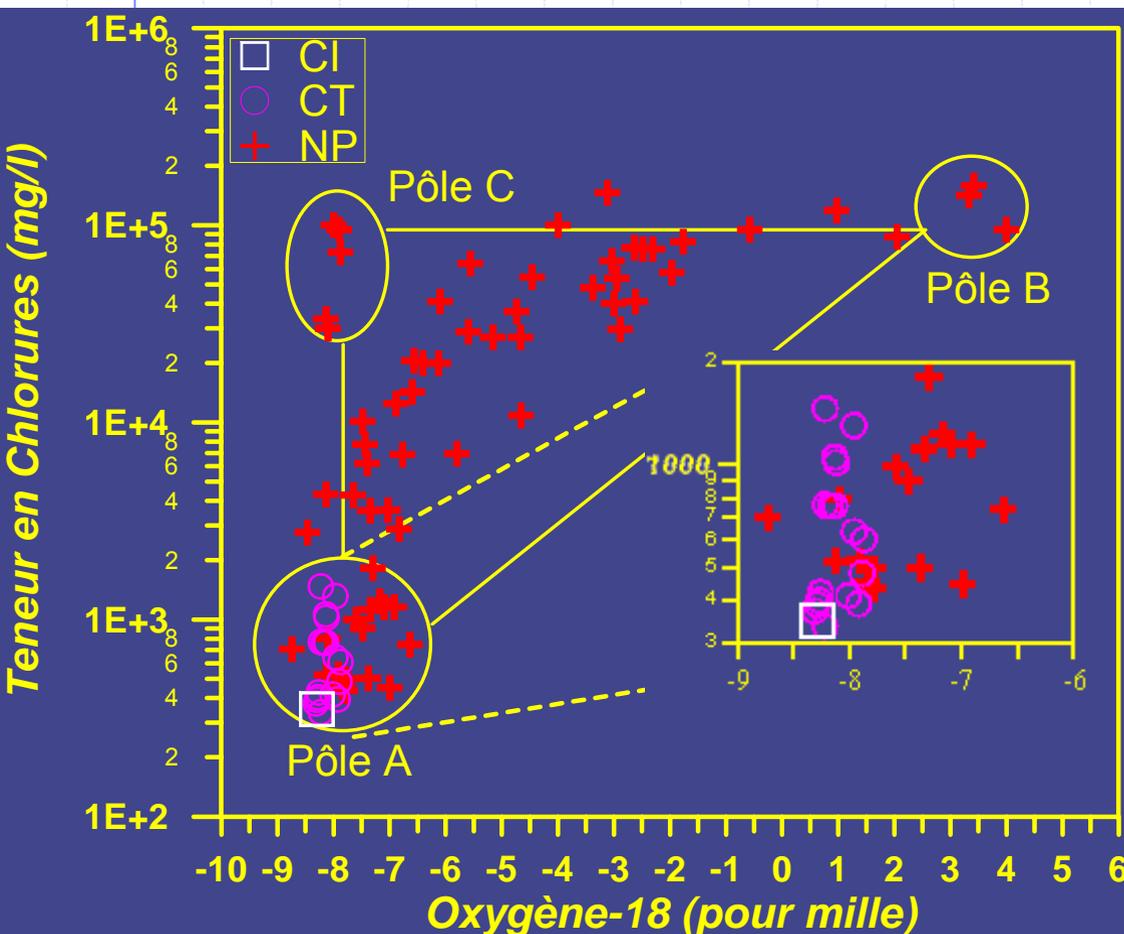
La nappe du Continental Intercalaire: Les teneurs en isotopes stables  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  sont très homogènes sur l'ensemble du bassin oriental, et en particulier dans la région de Ouargla. Les valeurs moyennes sont respectivement de  $-8.3\text{‰}$  et  $-63\text{‰}$  (n=50) pour la région de Ouargla.

La nappe du Complexe Terminal: Alors qu'ailleurs sur le reste du bassin oriental, le C.T. exhibe des teneurs très variables et enrichies en O-18 allant de  $-7.0$  à  $-3\text{‰}$ , autour de Ouargla ces eaux sont homogènes et isotopiquement proches de celles du C.I. Les teneurs détectées sur une vingtaine de forages varient entre  $-8,0$  et  $-8,3\text{‰}$  pour les  $\delta^{18}\text{O}$  et  $-64$  et  $-65\text{‰}$  pour les  $\delta^2\text{H}$ .

La nappe phréatique: Les valeurs obtenues en O-18 sur 98 échantillons de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla sont comprises entre  $+3\text{‰}$  et  $-8.5\text{‰}$  en O-18. La comparaison de ces données à celles du C.I. et du C.T. a permis de confirmer, outre une contribution par réinfiltration des eaux d'irrigation et d'A.E.P., l'existence d'un apport ascendant à partir d'anciens forages dont les tubages se sont détériorés.

A Ouargla et ses environs, bien que les aquifères superficiels se trouvent séparés du C.I. par des formations argileuses et anhydritiques épaisses de 300-400 m, **un mélange d'eaux différentes se confirme.**

La relation **Chlorures- $\delta^{18}\text{O}$**  ci-dessous, montre que les points représentatifs s'ordonnent selon un schéma triangulaire qui correspondrait à un mélange de trois types d'eau:



**(Pôle A):** une eau bien homogénéisée contenant près de **0.5 g/l** de chlorures et une teneur en O-18 de **-8.3‰** qui correspondrait à la nappe du C.I.

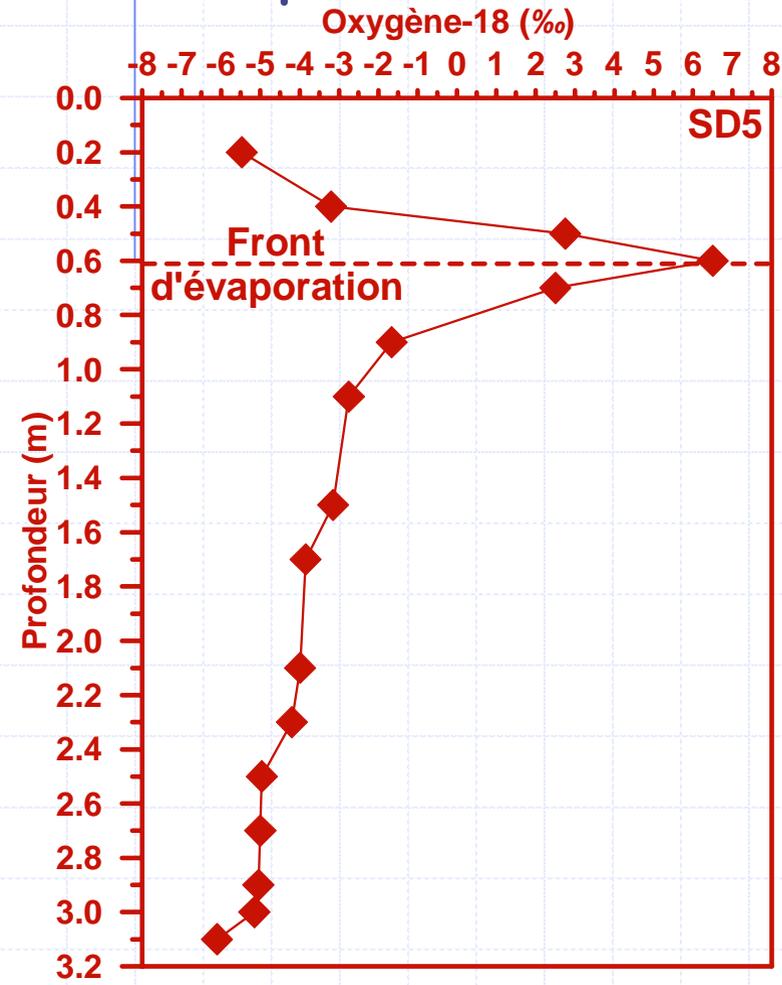
**(Pôle B):** une eau très évaporée contenant près de **100 g/l** de chlorures et une teneur en  $^{18}\text{O}$  enrichie de **+3.5‰** qui correspondrait à la masse d'eau de la nappe phréatique dont le niveau statique est proche du sol,

**(Pôle C):** une eau très chargée mais isotopiquement non évaporée contenant près de **70 g/l** de chlorures, dont  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moy.}} = -8.3‰$ , est similaire à celle de la nappe profonde du C.I.

# ESTIMATION DES PERTES EVAPORATOIRES EN ZONE NON SATUREE

La méthode appliquée pour estimer le terme 'évaporation' du bilan hydrique consiste à prélever à l'aide d'une tarière manuelle et à différentes profondeurs, des carottes de sol de la zone non saturée et de procéder aux analyses isotopiques et chimiques de l'eau interstitielle qui y est extraite.

Une formulation mathématique modélisée tenant compte, et des caractéristiques pédologiques et des conditions climatiques, permet à partir du profil en isotopes ou en ions conservateurs dissous (chlorures) de déterminer le flux évaporatoire.



Plusieurs travaux sur la ZNS ont été réalisés sur différents sites au Sahara septentrional. Des sondages à la tarière ont été réalisés à l'embouchure de l'oued M'Zab afin d'estimer le taux d'évaporation de la nappe phréatique.

La relation entre l'Oxygène-18 et la profondeur du sondage *SD5* est reportée sur la diagramme ci-contre. L'application des modèles de Barnes et Allison a permis de déterminer un taux d'évaporation équivalent à  $\sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ .

# CONCLUSIONS

Les techniques isotopiques qui ont été appliquées en Algérie surtout durant les 15 dernières années ont contribué principalement à différencier plusieurs types d'eaux en présence dans les ensembles aquifères sahariens étudiés.

Au niveau du bassin du Grand Erg Oriental, ces outils ont permis en outre, de mettre en évidence globalement et localement les informations suivantes:

❖ Les eaux homogènes et fossiles du Continental Intercalaire, proviendraient d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur. Cette assertion est également confirmée au niveau du Tidikelt dans le bassin occidental.

❖ Le problème de stagnation et de remontée des eaux au niveau de Ouargla (et du Souf) trouve principalement sa cause dans l'utilisation abusive des eaux profondes pour les besoins d'irrigation par le biais de techniques inadaptées et en l'absence d'un réseau d'assainissement. Les eaux du C.T. sont anciennes et ont été rechargées *en discontinuité*, durant les périodes humides passées de l'Holocène et du Pléistocène inférieur.

❖ Le même schéma se répète au niveau de la cuvette de Ouargla où le C.I., artésianisme aidant, contribue également au phénomène, à la faveur d'une drainage ascendante par le biais de forages détériorés mais aussi des prolongements des failles d'Amguid El-Biod.

Les implications immédiates de tout cela devraient nous orienter vers une adaptation du programme de gestion des eaux en considérant les données actuelles. Bien que les ressources en eau soient considérables, l'avenir des biens et des populations et le développement régional *est donc directement lié à la sagesse et la circonspection dans la prise de décisions durables.*

**Merci**  
**de votre aimable**  
**attention**







