

## Use of stable and radioactive isotopes in the determination of the recharge rate in Djefara aquifer system southern Tunisia

R. Trabelsi <sup>(1)</sup>, K. Zouari <sup>(1)</sup>

(1) : Radio-Analysis and Environment Laboratory in National School of Engineers of Sfax, BP 11733038-, Sfax, Tunisia.

### إستخدام النظائر المشعة و المستقرة في تحديد معدل شحن المياه الجوفية

#### في سهل الجفارة بجنوب تونس

ر. الطرابلسي<sup>(1)</sup>، ك. الزواري<sup>(1)</sup>

(1) مخبر العلوم الإشعاعية والبيئة بالمدرسة الوطنية للمهندسين بصفاقس ص.ب.1173. 3038 صفاقس. تونس

#### الخلاصة:

يتميز الجنوب التونسي بوجود العديد من الأحواض الهيدروجيولوجية الهامة التي تتعدى الحدود المحلية. ويعتبر خزان سهل الجفارة أحد أهم هذه الخزانات، حيث يشتمل على عدة طبقات مائية متصلة فيما بينها. يهدف هذا البحث الذي يعتمد على دراسة خصائص النظائر المستقرة ( $\delta^2\text{H}$ ،  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^{13}\text{C}$ ) و المشعة ( $^3\text{H}$ ،  $^{14}\text{C}$ ) لتقييم آليات التغذية وزمن إقامة المياه الجوفية في حوض الجفارة (Djefara).

تتميز المنظومة المائية الجوفية بسهل الجفارة بوجود قسمين ، الأول غير عميق و متجدد و يتمركز في غرب فالق مدنين، حيث يتميز بتركيبية نظائرية واضحة المعالم. أما القسم الثاني الذي يقع بشرق الحوض فهو عميق وغير متجدد. و قد لعبت الحركات التكتونية دورا هاما في ضمان عملية الاتصال الأفقي بين هذه الطبقات.

أظهرت النتائج المتعددة أن المياه الجوفية بسهل الجفارة تتميز بمصادر وأعمار مختلفة. إذ تم شحن المياه الجوفية في غرب الحوض خلال زمن الهولوسين. كما أن معدلات تغذية المياه الجوفية المتحصل عليها بالإعتماد على نشاط الكربون 14، هي متراوحة ويمكن أن تصل إلى 3.5 مم / سنة. بينما تشير تركيبية النظائر مستقرة ومحتوى  $^{14}\text{C}$  من المياه الجوفية في الجزء

العميق من الحوض إلى وجود مياه قديمة تم شحنها في زمن سابق خلال الفترات الباردة أواخر العصر الجليدي.

### Abstract

Southern Tunisia is characterized by the presence of several hydrogeological basins, which extend over Tunisian borders. The Djeffara aquifer is one of the most important aquifer systems in this area and contains several interconnected aquifer levels.

Stable ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) and radioactive isotopes ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ) have been used to evaluate recharge mechanisms and groundwater residence time in the Djeffara multi-aquifer. This aquifer presents two compartments; the first one (west of the Medenine fault system) is unconfined with a well defined isotope fingerprint; the second compartment is deeper and confined. Multi-tracer results show groundwater of different origins, and ages, and that tectonic features control groundwater flows.

The unconfined part was mostly recharged during the Holocene. The recharge rates of this aquifer, inferred by  $^{14}\text{C}$  ages, are variable and could reach 3.5 mm/year. However, stable isotope composition and  $^{14}\text{C}$  content of the confined groundwater indicates earlier recharge during late Pleistocene cold periods.

### المقدمة:

في المناطق القاحلة وشبه القاحلة ، تلعب الموارد المائية الجوفية دورا هاما في توفير الحاجيات المتزايدة من المياه للاستهلاك الفلاحي، السياحي و الحضري . لضمان استدامة هذه الموارد من الضروري دراسة مختلف العناصر المتداخلة في تحقيق التوازن الطبيعي للموائد المائية و اللازمة لتحسين إدارة الموارد المائية. تعتبر التقنيات الجيوكيميائية و النظائرية من أهم الوسائل التي تمكن من معالجة العديد من المسائل في مجال الهيدرولوجيا و المتعلقة بترشيد التصرف في الموارد المائية كتحديد معدل شحن المياه الجوفية و زمن إقامتها في الأحواض الهيدرولوجية و معدل تدفقها. الهدف من هذا البحث يكمن في استعمال التقنيات النظائرية في دراسة وتقدير معدل شحن الموارد المائية الجوفية في حوض الجفارة بالجنوب التونسي.

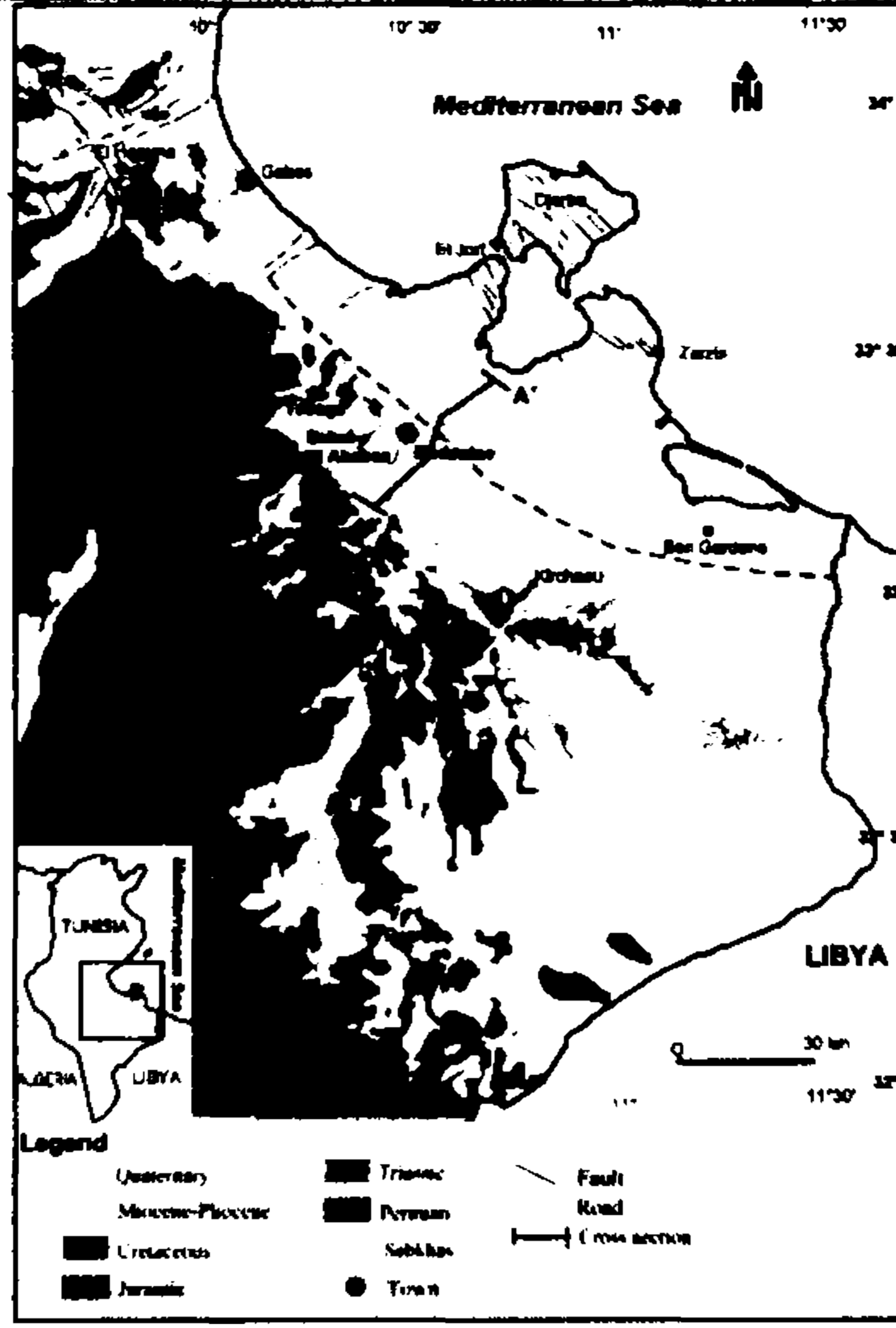
يتميز جنوب شرق تونس بمناخ جاف و شبه جاف حيث لا يتجاوز المعدل السنوي للأمطار 230 مم في السنة بسبب فترات الجفاف الطويلة [1]. في ظل غياب موارد مائية سطحية، تم في السنوات الأخيرة مضاعفة عدد الآبار السطحية و العميقة لتغطية الحاجيات المتزايدة من المياه. وأدى الإستغلال المكثف للطبقة المائية الجوفية إلى انخفاض منسوب المياه و تراجع الضغط الإرتوازي للآبار بالإضافة إلى جفاف غالبية الينابيع . لتقييم موارد المياه الجوفية في ظل هذه الظروف، هناك حاجة إلى معلومات دقيقة عن مسارات التدفق، ومعدلات التغذية الحالية وزمن إقامة المياه في الطبقة الجوفية لحوض الجفارة.

#### الخصائص الجيولوجية و الهيدروجيولوجية:

يمتد سهل الجفارة المشترك بين تونس وليبيا على مساحة 15000 كم<sup>2</sup>. يحده من الشمال منطقة الصخيرة، من الغرب مجموع فوالق الحامة وجبال الظاهر ومطماطة ومن الجنوب جبل نفوسة في ليبيا و من الشرق البحر الأبيض المتوسط. تتركز هذه الدراسة على جفارة تونس التي تقع في الجزء الشمالي من هذا السهل ( شكل 1).

تبرز الخريطة الجيولوجية المبسطة لجنوب شرق تونس [2] وجود عدة فوالق صدعية قسمت حوض الجفارة إلى عدة أجزاء على شكل انهدامات و نجود ، يعتبر فالق مدينين ذي الإتجاه شمال غرب – جنوب شرق، أهم هذه الصدوع التي نتج عنها انهدام الحوض الشرقي لسهل الجفارة مما أدى إلى وجود قسمين رئيسيين. يقع القسم الأول غرب الحوض و يمتد من الغرب من حدود جبال الظاهر ذي الإتجاه شمال جنوب إلى حدود فالق مدينين في الشرق. يحتوي هذا الجزء على رسوبيات تتراوح أعمارها بين الترياسي المتواجد خاصة في ساحل العبابسة ، الجوراسي و الكريتاسي الذي يغطي المنحدر الشرقي لجبال الظاهر. و يحتل القسم الثاني المنطقة الشرقية الواقعة بين فالق مدينين و البحر المتوسط. وهو عبارة عن سهل ينحدر تدريجيا نحو البحر تغلب عليه الرسوبيات الميوليبورباعية. ترتب عن تنوع الرسوبيات و الحركات التكتونية عدة طبقات مائية حيث يوجد (شكل 2):

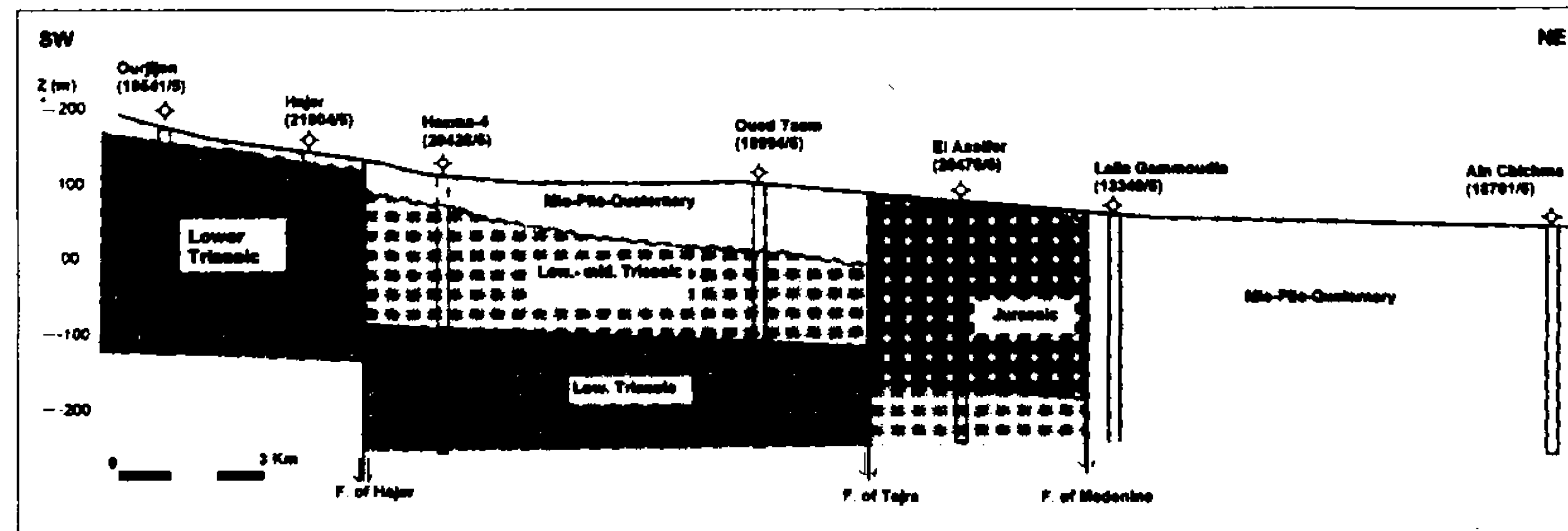
• الطبقة المائية الجوفية للميوسين القاري : تمثل هذه الطبقة المورد المائي الرئيسي في منطقة شمال قابس. تتكون أساسا من حجر رملي و بعض الرسوبيات الطينية.



شكل 1: خريطة جيولوجية تبين موقع منطقة الدراسة [2]

- الطبقة المائية الجوفية للكريتاسي والجوراسي: تتمركز أساساً في جنوب قابس حيث تحتوي على موارد مائية هامة. وهي عبارة على صخور كلسية تتكشف في غرب الحوض في جبال الظاهر أين تتغذى عن طريق تسرب مياه الأمطار.
- الخزان المائي للترياسي: و يتكون أساساً من حجر رملي ذا نفاذية جيدة و ينقسم إلى جزئين ذوي خصائص هيدروديناميكية مختلفة يفصل بينهما فالق مدنين. يقع الجزء الأول في غرب الفالق حيث تتكشف طبقة هذا الخزان عند ساحل العبابسة و يتم شحنها بشكل رئيسي عن طريق تسرب مياه الأمطار. أما الجزء الثاني فيقع في شرق الحوض حيث تتعمق الطبقة المائية للترياسي تحت تأثير انهدام المنطقة الساحلية. تغطي هذه الطبقة مئات الأمتار من الرواسب الميوليورباعية، مما يجعل عملية شحنها عن طريق تسرب مياه الأمطار صعبة جداً.
- الطبقة المائية الجوفية للميوسين جربة جرجيس: توجد هذه الطبقة في الحوض الانهدامي لسهل الجفارة وتتكون من رسوبيات رملية طينية بحرية، تمتد على كامل المنطقة الساحلية لخليج قابس. يزداد غمق و سمك هذه المائدة كلما اتجهنا نحو الشرق

بسبب الانهدامات التكتونية. يختلف عمق استغلال هذه الطبقة المائية من 250 إلى 300 م و تتغذى أساسا عن طريق التسرب الأفقي لمياه الترياسي عن طريق فالق مدنين. نتيجة لنمو الاحتياجات المائية، ارتفعت نسب استخراج المياه الجوفية من الطبقات المائية الجوفية لسهل الجفارة إلى حد كبير منذ سنة 1970. إذ يتم استغلال المياه الجوفية للميوسين و الكريتاسي للاستهلاك الزراعي والسياحي والصناعي والاستخدامات المنزلية، أما مياه الترياس المتجددة فتستعمل أساسا للتزود بمياه الشرب لعدد من القرى والبلدات الواقعة جنوب وشرق منطقة ساحل العبابسة. تسبب الاستغلال المكثف خلال السنوات الثلاثين الماضية، في انخفاض كبير في منسوب المياه الجوفية على كامل المنطقة الساحلية.



شكل 2: مقطع هيدروجيولوجي AA' لحوض الجفارة

#### الأعمال الحقلية و التحاليل

تم جمع 106 عينة مائية من منطقة الدراسة لإجراء التحاليل النظائرية للعناصر المستقرة (الأكسجين 18  $(\delta^{18}O)$  و الدوتريوم  $(\delta^2H)$  و الكربون 13  $(\delta^{13}C)$ ) و المشعة (التريتيوم  $(^3H)$ ، و الكربون 14  $(^{14}C)$ ) أجريت تحاليل النظائر المستقرة و التريتيوم بمخبر هيدرولوجيا النظائر بالوكالة الدولية للطاقة الذرية بالنمسا. وتم قياس نشاط الكربون 14 بمخبر التحاليل الإشعاعية والبيئة بالمدرسة الوطنية للمهندسين بصفاقس.

دراسة مصادر المياه الجوفية بحوض الجفارة

يهدف استعمال النظائر المستقرة لجزيء الماء (الأكسيجين - 18 و الدوتريوم) في دراسة الخزانات الجوفية إلى التعرف على مصادر المياه و عمليات التبادل بين مختلف الطبقات و طرق تغذية هذه الخزانات.

ويبرز الرسم البياني لنظيري الأكسيجين-18 و الدوتريوم (شكل 3) أن بعض النقاط التي تمثل المياه الجوفية للترياسي (unconfined aquifer) و الكريتاسي توجد بين خط التساقطات العالمي [3] (GMWL) و خط الأمطار المحلي بصفاقس (LMWL) [4]، مما يبرز مدى تأثير كل من الكتل الهوائية للبحر الأبيض المتوسط و المحيط الأطلسي في تكوين مياه الأمطار المغذية لهذين الخزائين و يؤكد وجود بعض إسهامات لمياه السيول و الأمطار عبر جبال الظاهر التي تتسرب عبر انكشافات الترياس في ساحل العبابسة [5] و الكريتاسي في مرتفعات مطماطة.

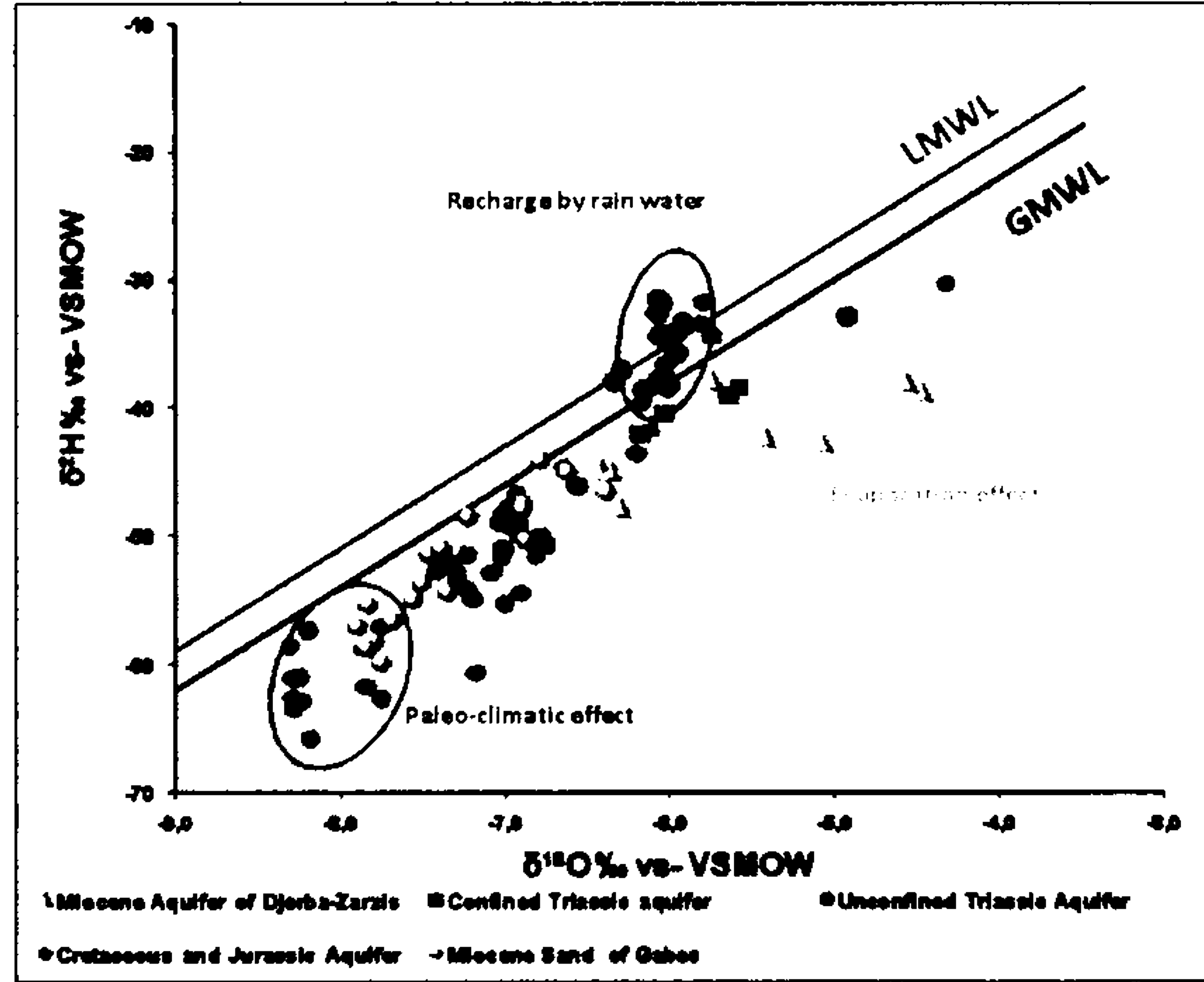
يمكن تفسير القيم المرتفعة للنظائر المستقرة المسجلة في العينة رقم 26 الذي يقع في ساحل العبابسة بتأثر المياه الجوفية بعملية التبخر خاصة و أن عمق البئر ضعيف.

من جهة اخرى، تتميز المياه الجوفية للترياسي شرق فالح مدنين ومياه كل من الكريتاسي و الميوسين في شمال منطقة قابس بتركيبية نظائرية ضعيفة بالمقارنة بمياه ساحل العبابسة ممل يدل على زمن شحن قديم في العصور المناخية الباردة [5].

بالقرب من فالح مدنين تتميز المياه الجوفية للميوسين بمحتوى نظائري مماثل لمياه الترياسي بساحل العبابسة و يمكن تفسير هذا التجانس بعملية خلط بين هذه الخزانات أو بالتسرب المباشر لمياه الأمطار من خلال الفوالق التكتونية [5].

تميل المياه الجوفية للميوسين إلى أن تكون أكثر ثراء بالنظائر المستقرة كلما اتجهنا إلى المنطقة الساحلية للحوض، وتشير إلى تأثير عملية التبخر أثناء عمليات الشحن. من جهة اخرى، تنسم جميع المياه الجوفية للحوض الساحلي بسهل الجفارة بقيم ضعيفة من  $^3\text{H}$  بحيث لا تتجاوز 0,5 وحدة تريتيوم وهو ما يؤكد المصدر القديم للمياه الجوفية بهذه الجهة. ترتفع نسبيا قيم التريتيوم في المياه الجوفية بمنطقة ساحل العبابسة و جبال الظاهر

لتتجاوز 1 TU وهو ما يبرز المصدر الحديث للمياه و يؤكد تسرب مياه الأمطار عبر انكشافات الترياسي في المنطقة .



شكل 3: العلاقة بين نظيري الأكسجين-18 والديوتيريوم لمياه الجوفية بسهل الجفارة

### تحديد زمن إقامة المياه الجوفية

من الممكن تقييم زمن إقامة المياه الجوفية و تحديد الفترات الكبرى التي تمت فيها تغذية المياه في الخزانات الجوفية العميقة، بالإعتماد على نشاط الكربون 14 وقيم الكربون 13 الذي يمكن من تقييم المصادر المختلفة للكربون المعدني الذائب في المياه [6] . تتراوح أنشطة  $^{14}\text{C}$  في المياه الجوفية لحوض الجفارة من 76,3 إلى 1,5% . تتمركز القيم المرتفعة في غرب الحوض حيث تتكشف الحوامل المائية. أما في شرق فالق مدنين و شمال منطقة قابس فتتميز المياه العميقة بأنشطة  $^{14}\text{C}$  منخفضة جدا مما يدل على زمن إقامة طويل للمياه الجوفية. كما تتخفض أنشطة  $^{14}\text{C}$  في المياه الجوفية ، تدريجيا من الغرب نحو البحر حسب مسار تدفقها.

إن تقييم عمر المياه الجوفية يعتمد على تقدير دقيق للنشاط الأولي ( $A_0$ ) للكربون 14 زمن تغذية الخزان المائي، لذلك تم استخدام عدة نماذج تصحيحية لتقدير زمن إقامة المياه حسب مصادر إجمالي الكربون الغير العضوي الذائب (TDIC). وتعتمد هذه النماذج على

مبادئ عمليات خلط وتبادل مختلفة: تبادل كيميائي [7] ونماذج من الاختلاط والتبادل الكيميائي والنظائري [8, 9, 10, 11].

لقد تم تقييم أعمار المياه الجوفية بحوض الجفارة باستخدام 5 نماذج تصحيحية [7, 8, 9, 10, 11]. حسب النتائج المتحصل عليها يمكن تصنيف نماذج التصحيح إلى مجموعتين وفقا لأعمار المياه الجوفية. وتشمل المجموعة الأولى نماذج بيرسون و إيفانز [8, 9] الذين يستندان على عمليات التبادل النظائري والكيميائي.

و تتكون المجموعة الثانية من نموذج الوكالة الدولية للطاقة الذرية ونموذج فونتيس وغارنييه [10, 11] اللذان يعتمدان أساسا على عمليات التبادل النظائري. و تؤدي هذه المجموعة إلى أعمار أعلى بكثير من المجموعة الأولى، حيث قدر أقصى فارق بينهما ب 4000 سنة. في إطار هذه الدراسة تم استبعاد نموذج Tamers [7] الذي يعتمد على التبادل الكيميائي فقط، حيث أن محتويات  $\delta^{13}\text{C}$  تتغير بتغير نشاط  $^{14}\text{C}$  مما يشير إلى وجود عملية تبادل نظائري. إثر مناقشة الأعمار المتحصل عليها بالمحتوى الأكسجين 18 و التريتيوم تبين أن المجموعة الأولى هي الأكثر ملائمة للاستخدام في منطقة الدرس.

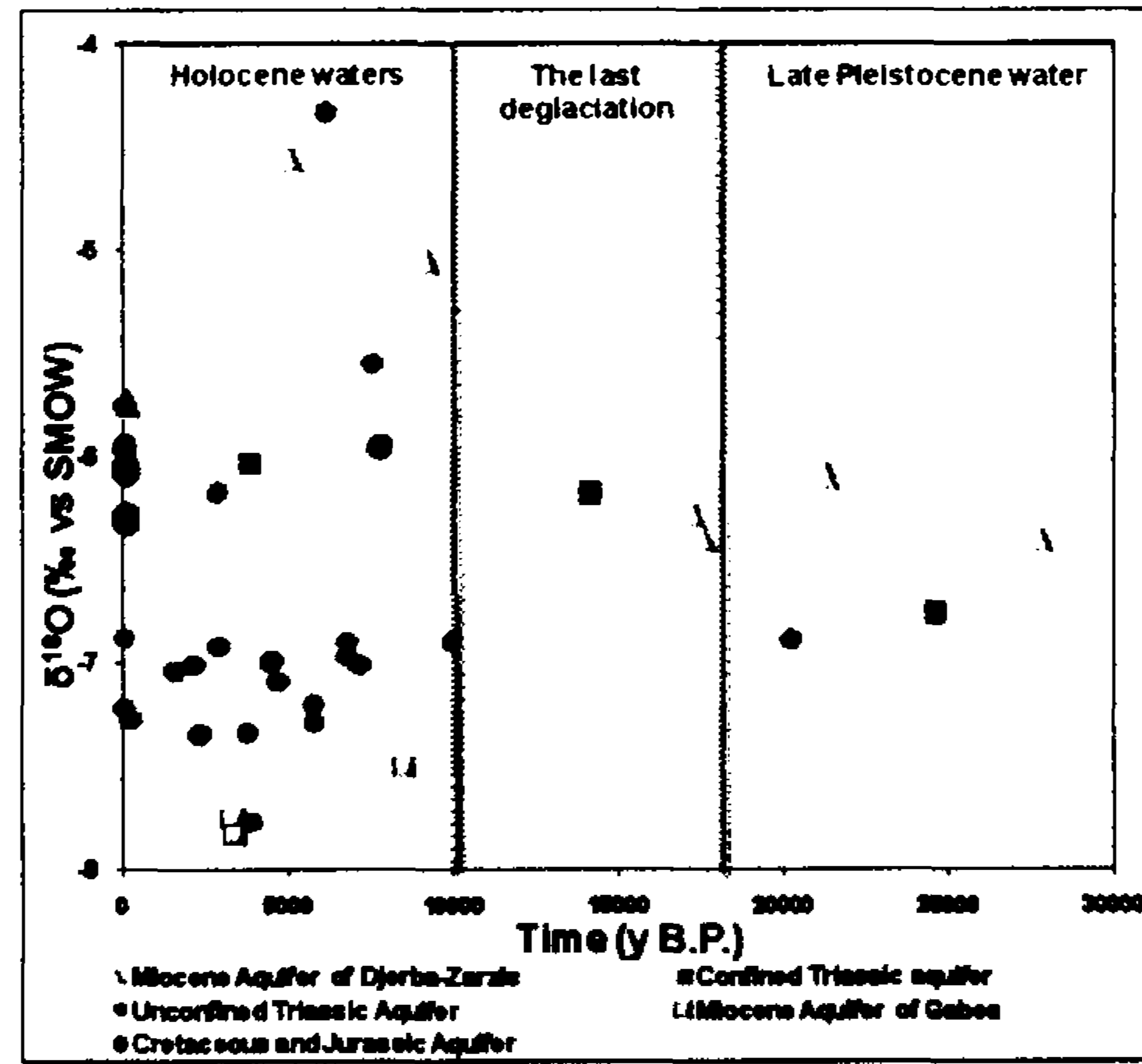
إذ تتراوح أعمار بيرسون بين الحاضر و 27795 سنة قبل الحاضر بالنسبة للمياه الجوفية للميوسين بمدنين و بين الحاضر و 20172 بالنسبة للمياه الجوفية بقابس، وبين الحاضر و 7755 سنة قبل الحاضر بالنسبة لطبقة المياه الجوفية للترياسي في ساحل العبابسة، وتصل إلى حدود 38780 سنة قبل الحاضر بالنسبة للجزء العميق من طبقة المياه الجوفية العميقة للترياسي مما يدل على عدم تجدد مياهه. تشير هذه الأعمار المختلفة إلى عدة فترات تغذية (شكل 4):

- من زمن الحاضر إلى فترة الهولوسين السفلى (>10000 سنة قبل الحاضر) بالنسبة لطبقة المياه الجوفية الترياسي في ساحل العبابسة و بعض عينات الكريتاسي الموجودة بمرتفعات الظاهر.



- الفترة الأخيرة من عصر ذوبان الجليد (Last deglaciation period) (10000 - 18000 سنة قبل الحاضر) بالنسبة لبعض عينات المياه من طبقات الميوسين الترياسي العميق.

- العصر الجليدي المتأخر (Late Pleistocene) (< 20000 سنة قبل الحاضر): بالنسبة لمياه الترياسي العميق.



شكل 4: العلاقة بين نظير الأكسجين-18 و أعمار الكربون 14 حسب نموذج بيرسون

تقييم معدل تغذية المياه الجوفية:

يمكن تقدير معدلات التغذية الحالية (R) عبر تسرب مياه الأمطار بالنسبة للطبقات المائية السطحية باستعمال المعادلة التالية [12]:

$$R = H\lambda\theta \cdot \ln \left( \frac{H}{H-Z} - \frac{A_0}{A} \right) \quad (1)$$

With :

R : recharge rate (L/T)

H : total thickness of unconfined aquifer (L)

Z : depth of mid point of screened interval (L)

$\theta$  : porosity (L<sup>3</sup>)

$\lambda$  : decay constant (T<sup>-1</sup>)

A : measured activity of carbon-14

A<sub>0</sub> : initial activity of carbon-14

تم تطبيق المعادلة (1) باستخدام أنشطة الكربون-14 ، لتحديد معدل تغذية الطبقة المائية الجوفية في ساحل العبابسة و مرتفعات الظاهر. أثبتت النتائج أن معدلات التغذية متفاوتة من جهة إلى أخرى، إذ تتراوح ما بين 0.5 إلى 3.5 ملم / سنة. و يرجع ذلك أساسا إلى خصائص التربة والظروف الجيولوجية للمنطقة. يمكن تفسير انخفاض هذه القيم بقلّة الأمطار إذ نادرا ما تتجاوز 200 مم في السنة، وارتفاع معدلات التبخر كما هي العادة في المناطق القاحلة.

#### الإستنتاجات

تعتبر الطبقة المائية الجوفية بالجفارة من أهم الموارد المائية في جنوب شرق تونس. إذ تتكون من عدة طبقات مائية متمركزة في رسوبيات الترياسي و الميوسين و متصلة فيما بينها عبر الفوالق التكتونية.

ساهمت هذه الدراسة في تقييم آليات التغذية وزمن إقامة المياه الجوفية كما أبرزت أهمية استعمال النظائر المستقرة في معرفة مصادر تغذية الحوامل المائية بحوض الجفارة بمدنين. و تبين من خلال النظائر المشعة الإسهامات المحدودة لمياه الأمطار في تغذية هذا الخزان المتكون أساسا من مياه جوفية قديمة. حيث أثبتت الأعمار المتحصل عليها أن شحن الطبقات المائية تم في زمن سابق خلال الفترات الباردة أواخر العصر الجليدي. كما تعتبر معدلات التغذية الحالية المتحصل عليها ضعيفة نسبيا و متفاوتة من جهة إلى أخرى حسب نوعية التربة و تغير كمية الأمطار، والغطاء النباتي.

لضمان استدامة الموارد المائية في الجهة، يجب الأخذ بعين الاعتبار نتائج هذه الدراسة في أخذ القرارات والعمل على ترشيد الاستهلاك المائي في جميع الميادين.

#### المراجع:

- [1] : Kallel R. (2003) – Hydrologie de la Jeffara tunisienne. Rapport interne. CRDA de Gabès.
- [2] : Bouaziz S. (1995) – Etude de la tectonique cassante dans la plate-forme et l'atlas saharien (Tunisie Méridionale) : Evolution des paléochamps de contraintes et implications géodynamiques. Thèse de doctorat essciences géologiques, Université de Tunis II, Faculté des Sciences de Tunis.

- [3] :Craig H. (1961) –Isotopic variations in meteoric water. *Science* 133, 1702-1703.
- [4] : Zouari K, Trabelsi R, Abid K (2005) –Chemical and isotopic composition of Rain Water of Station of Sfax. Tunisia. Workshop on Chemical and isotopic composition of Rain Water of some Arab countries Beyrouth, Liban 25-26 December 2005.
- [5] : Zouari, K., Trabelsi, R., Chkir, N., 2010– Using geochemical indicators to investigate groundwater mixing and residence time in the aquifer system of Djefara of Medenine (Southeastern Tunisia). *Hydrogeology Journal* HJ-2010-1529. *Hydrogeol J* (2010) 19:209-219.
- [6] : Le Gal La Salle C, Marlin Ch, Savoye S and Fontes JCh (1996) – Geochemistry and <sup>14</sup>C dating of groundwaters from Jurassic aquifers of North Aquitaine Basin (France). *Applied Geochemistry*, Vol. 11, PP433-445, 1996.
- [7]: Tamers MA (1975) –Validity of radiocarbon dates on groundwater. *Geophys. Survey*2, 217-239.
- [8]: Pearson F J and Hanshaw BB (1970). –Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating, *Isotope Hydrology*. Vienna, Agence Internationale de l'Énergie Atomique: 271-285.
- [9]: Evans G V, Otlar R L, Downing A., Monkhouse R A. and Rae G (1979) – Some problems in the interpretation of isotope measurements in United-Kingdom aquifers. In *Isotope Hydrology Vol.2, Proceedings of a Symposium, Neuherberg, 19-23 June 1978, IAEA-SM228/34*, pp. 639-708.
- [10]: Salem O, Visser JH, Dray M and Gonfiantini R (1980) – Groundwater Flow patterns in the western Libyan Arab Jamahiriya. In *Arid Zone hydrogeology: Investigations with Isotope Techniques*, IAEA, Vienna, pp. 165-179.
- [11]: Fontes JC and Garnier JM (1979) – Determination of the initial activity of the total dissolved carbon. A review of the existing models and a new approach. *Water Resources Research*. 12, 399-413.
- [12]: Walker GR and Cook PG (1991). – The importance of considering diffusion when using carbon -14 to estimate groundwater recharge to an unconfined aquifer. *Journal of Hydrology* 128, 41-48.