

**Apport de la Télédétection et des SIG pour l'estimation du rôle de la fracturation dans la contamination de la nappe du Maastrichtien comme suite à une exploitation des réserves phosphatées de la partie occidentale de Sra-Ouertane (Tunisie)**

**Contribution of remote sensing and GIS for the estimation of the fracturing role in the contamination of the Maastrichtian water table following an exploitation of phosphatic reserves in the western part of Sra-Ouertane (Tunisia)**

Helmi BAHRI\*, Noamen REBAI\*\* & Ali ZAIER\*

**Abstract:** The work consists in the assessment of the fracturing role in a possible contamination of the Maastrichtian water table of the western part of Sra-Ouertane (Tunisia). It is a preventive study for directing operations of exploitation and treatment of phosphatic ore in the area. Such operations will have without any doubt an environmental impact notably on the hydrological potentialities of the sector of which the water table is of good quality and of strategic character. For that was used multi-source data: ground analysis, remote sensing, GIS (geographic information system) and DRASTIC modelling.

Satellite image processing and analysis of ground's data show the presence of three major families of faults in the carbonated series of Lower Abiod: N 15-20, N 135 and East-West with varied proportions. The representation in a 3D block of these results allowed to conclude that the migration of water is, at the beginning, towards the West and then follows the general pattern of the structure for moving towards the East.

Then, to interpret this migration impact, one carried out several numerical thematic maps obtained from the satellite images and GIS tools. These charts are integrated in the DRASTIC program used to evaluate the intrinsic vulnerability. The final result consists to establish a map of distribution of the vulnerability in the area. The values obtained are classified from weak to very weak; the vulnerability varying between 39 and 102. Thus through the study of the fracturing and the cartography of the vulnerability one is able to delimit the zones where the risks of contamination are the more significant.

Key words: Tunisia, Maastrichtian, Water table, Phosphates, Contamination, Modelling (Remote sensing, GIS, DRASTIC)

**Résumé:** Le présent travail consiste à évaluer le rôle de la fracturation dans une possible contamination de la nappe du Maastrichtien de la partie occidentale de Sra-Ouertane. Cette étude est réalisée à titre préventif pour orienter l'exploitation éventuelle de la série phosphatée régionale et des opérations de traitement qui s'ensuivront. Les opérations précitées auront sans aucun doute un impact sur l'environnement et, notamment, sur les potentialités hydrologiques du secteur dans la mesure où il est doté d'un aquifère de bonne qualité et à caractère stratégique. Pour cela nous avons utilisé des données multisources (analyse de terrain, télédétection, S.I.G., et modélisation DRASTIC).

Le traitement de l'image satellitaire et l'analyse des données de terrain montrent la présence de trois familles majeures de fractures dans les calcaires de la formation Abiod : de direction N15-25, N135 et une famille presque E-O, avec des proportions variables. La représentation en un bloc 3D de ces résultats a permis de conclure que la migration de l'eau se fait au début vers l'ouest puis qu'elle suit l'allure générale de la structure en se dirigeant vers l'est.

Ensuite et pour estimer l'impact de cette migration sur la nappe, on a réalisé des cartes numériques thématiques à partir des images satellitaires et des outils SIG du secteur d'étude. Ces cartes sont

---

\* : Laboratoire des Ressources Minérales & Environnement (L.R.M.E), Faculté des Sciences de Tunis / Département de Géologie Campus Universitaire 2092 Tunis, Tunisia;

\*\* : 02 /UR./10-02 Dynamique des Bassins Sédimentaires, Paléoenvironnements et Structures Géologiques. Faculté des Sciences de Tunis / Département de Géologie -1060 Tunis, Tunisia.

intégrées dans la modélisation DRASTIC, méthode utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Le résultat final consiste à l'élaboration d'une carte de répartition de la vulnérabilité de la zone. Les valeurs obtenues sont classées de faible à très faible ; la vulnérabilité variant entre 39 et 102. Donc, à travers l'étude de la fracturation et la cartographie de la vulnérabilité, on a délimité les zones où les risques de contamination sont les plus susceptibles de se produire.

Mots-clés: Tunisie, Maastrichtien, Nappe aquifère, Phosphates, Contamination, Modélisation (Télé-détection, SIG, DRASTIC)

## INTRODUCTION

L'étude hydrogéologique des régions fracturées présente une complexité remarquable. La circulation de l'eau à travers les réseaux de fractures et la connaissance des systèmes géologiques ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (DE MARSILY 1985, DAVY *et al.* 1990, NERETNIEKS 1993, BOUR 1997, KOUAMÉ *et al.* 1999). Les résultats de ces études ont intéressé les spécialistes de plusieurs disciplines : hydrogéologie (BOUKARI *et al.* 1985, SAVADOGO 1984, DARCEL 2002), choix des sites d'enfouissement de déchets nucléaires (NERETNIEKS 1993 et DERSHOWITZ *et al.* 1991), contamination de nappes par les produits phytosanitaires et les rejets miniers (BAHRI *et al.* 2005, HAMZA 1999).

Dans le cas présent, le problème qui se pose est une éventuelle contamination de nappe par des rejets miniers, étant donné que le secteur d'étude (le Sra-Ouertane) se caractérise par des réserves considérables en phosphates sédimentaires (plus de sept milliards de tonnes exploitables) et des réserves en eau de très bonne qualité, emmagasinées aussi bien dans les calcaires de l'Eocène inférieur que dans ceux du Campanien supérieur-Maastrichtien (HACHMI 1982, ZAIER 1984, ZAIER 1999).

## PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Le secteur d'étude (Fig. 1) se situe à l'ouest de Sra - Ouertane, dans le centre-ouest de la Tunisie à environ 40 km au sud du Kef. Les coordonnées limitant la zone d'étude sont X : de 394000 à 402000 et Y : de 278000 à 286000 (projection Lambert, Nord tunisien).

La zone de Sra-Ouertane est constituée par une large cuvette synclinale orientée NE-SO, à pendage faible. Cette structure se prolonge par deux brachy-anticlinaux : au nord l'anticlinal de Jerissa-Fej Ettameur et au sud le demi-dôme de Bou El Hanéche.

Ce secteur est représenté essentiellement par un plateau peu incliné vers le SE, pierreux, raboté et raviné, affecté par des fractures de directions diverses. Certaines de ces fractures ont des rejets importants, dépassant parfois 150m et délimitant des zones peu inclinées. La série stratigraphique du domaine étudié a fait l'objet de plusieurs études (KASTANY 1952, BUROLLET 1956, HACHMI 1982, ZAIER 1984, ZAIER 1999, RANJBAR *et al.* 2004). Cette série est représentée par un ensemble à dominance carbonatée rattaché au Campanien - Maastrichtien inférieur (formation Abiod), représentée par des calcaires, généralement massifs, à patine blanche, organisés en deux barres séparées par un terme marneux renfermant des intercalations carbonatées. La barre supérieure est la plus puissante (plus de 180 m), alors que la barre inférieure est d'environ 30 m d'épaisseur, surmontée par les marnes du Maastrichtien supérieur-Paléocène (Formation El Haria). Enfin, nous retrouvons les séries phosphato-carbonatées de l'Yprésien, du groupe Metlaoui qui reposent directement sur les marnes paléocènes de la formation El Haria. Le groupe Metlaoui est représenté par une succession de couches phosphatées plus ou moins carbonatées et/ou marneuses, d'une puissance allant de 20 à plus de 65 m. Surmontées par environ 20 m d'alternances de calcaires, marnes et phosphorites, elles sont affectées par des accidents siliceux sous forme de lentilles avec rognons de silex, plus au moins continues, de couleur brune.

Les alternances sont couronnées par une dalle de calcaire à Nummulites. L'épaisseur de cette barre est d'environ 40 m, mais pouvant atteindre 90 m au SO du Jebel Ayata (sondage de prospection de la Société d'exploitation des phosphates de Sra Ouertane « SEPHOS ») (JACOBS, INTERNATIONAL INC 1984; JACOBS, INTERNATIONAL INC 1985).

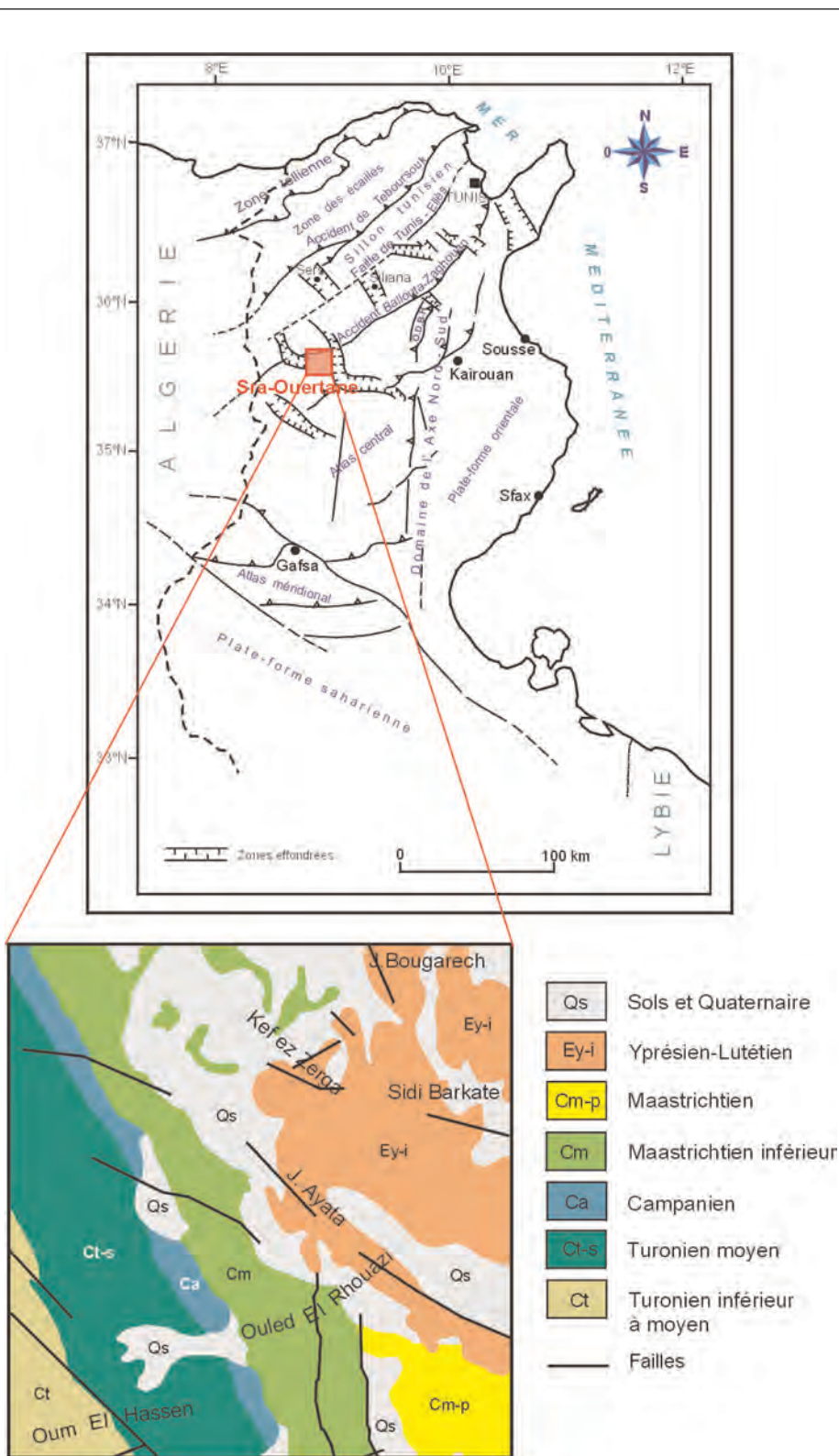


Fig. 1: localisation de la zone d'étude

## METHODOLOGIE

Afin de mener à bien les travaux, la méthodologie adoptée a consisté, dans un premier temps, en une étude télé-analytique portant sur le traitement d'une image satellitaire Landsat TM (Thematic Mapper) du satellite Landsat-5 acquise le 05-03-1993. Les résultats trouvés ont été, par la suite, vérifiés et validés par des campagnes de terrain. Enfin, l'élaboration d'un SIG a été entreprise dans le but de réaliser le modèle DRASTIC pour la cartographie et l'étude de la vulnérabilité de la nappe.

### Traitement de l'image satellitaire

#### *La correction géométrique*

On effectue ce traitement pour la correction des distorsions géométriques causées par plusieurs facteurs comme, par exemple, la variation de la géométrie Terre-capteur et la transformation des données en vraies coordonnées sur la surface de la Terre (exemple : en latitude-longitude) (CHABRILLAT *et al.* 2000, HIMYARI *et al.* 2002). L'image Landsat TM a été recalée par rapport à la carte topographique.

#### *La corrélation des canaux*

Pour évaluer et avoir une idée sur les informations contenues dans l'image, on a réalisé un grand nombre de sélections de canaux afin d'utiliser ceux qui contiennent le plus d'informations.

La première phase de cette étude a consisté en une appréciation visuelle des canaux bruts de l'image. Ensuite c'est l'analyse des histogrammes de fréquences qui montre généralement une

Tableau 1 : Coefficients de corrélation des canaux LANDSAT-TM

|     | TM1 | TM2  | TM3  | TM4  | TM5  | TM7  |
|-----|-----|------|------|------|------|------|
| TM1 | 1   | 0.97 | 0.94 | 0.73 | 0.84 | 0.25 |
| TM2 |     | 1    | 0.97 | 0.68 | 0.78 | 0.18 |
| TM3 |     |      | 1    | 0.51 | 0.75 | 0.80 |
| TM4 |     |      |      | 1    | 0.70 | 0.54 |
| TM5 |     |      |      |      | 1    | 0.20 |
| TM7 |     |      |      |      |      | 1    |

répartition unimodale. Enfin, on est passé au calcul des coefficients de corrélation (Tableau 1). Les canaux les moins corrélés sont ceux qui présentent un coefficient de corrélation faible, inférieur à 0.75 (TM1-TM4, TM1-TM7, TM2-TM4, TM2-TM7, TM3-TM4, TM4-TM5, TM4-TM7 et TM5-TM7).

#### *Choix du triplet de combinaisons*

Un certain nombre de combinaisons a été testé à partir des canaux de l'image Landsat TM (une vingtaine de triplets de combinaison). La combinaison des canaux à travers un système RVB (Rouge, Vert, Bleu) donne un nombre important de compositions colorées (on affecte à chaque canal, le rouge, le vert ou le bleu pour les 6 canaux TM). Vu le nombre important de combinaisons on s'est limité aux bandes les plus recommandées en science de la terre (TM2, TM3, TM5, TM7) (EL KOCHRI *et al.* 1987, SCANVIC 1983, EL HARTI *et al.* 2004, EMRAN *et al.* 1994, NICOLAS *et al.* 2005). Seules quelques unes de ces combinaisons ont été maintenues (les triplets utiles pour l'analyse structurale).

#### *Analyse en composantes principales*

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. Elle permet de rehausser la qualité d'une image multispectrale en éliminant la redondance des données contenues dans les différents canaux d'une image multispectrale (EMRAN *et al.* 1994, RANJBAR *et al.* 2004). Les trois premières composantes principales CP1, CP2 et CP3 sont les plus riches en informations avec un pourcentage respectif de variance



92,66%, 4,86% et 1,23%. Les pourcentages cumulés de CP1, CP2 et CP3 est de 98,75% (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs statistiques de l'analyse en composantes principales de l'image TM (TM1-2-3-4-5-7) du secteur

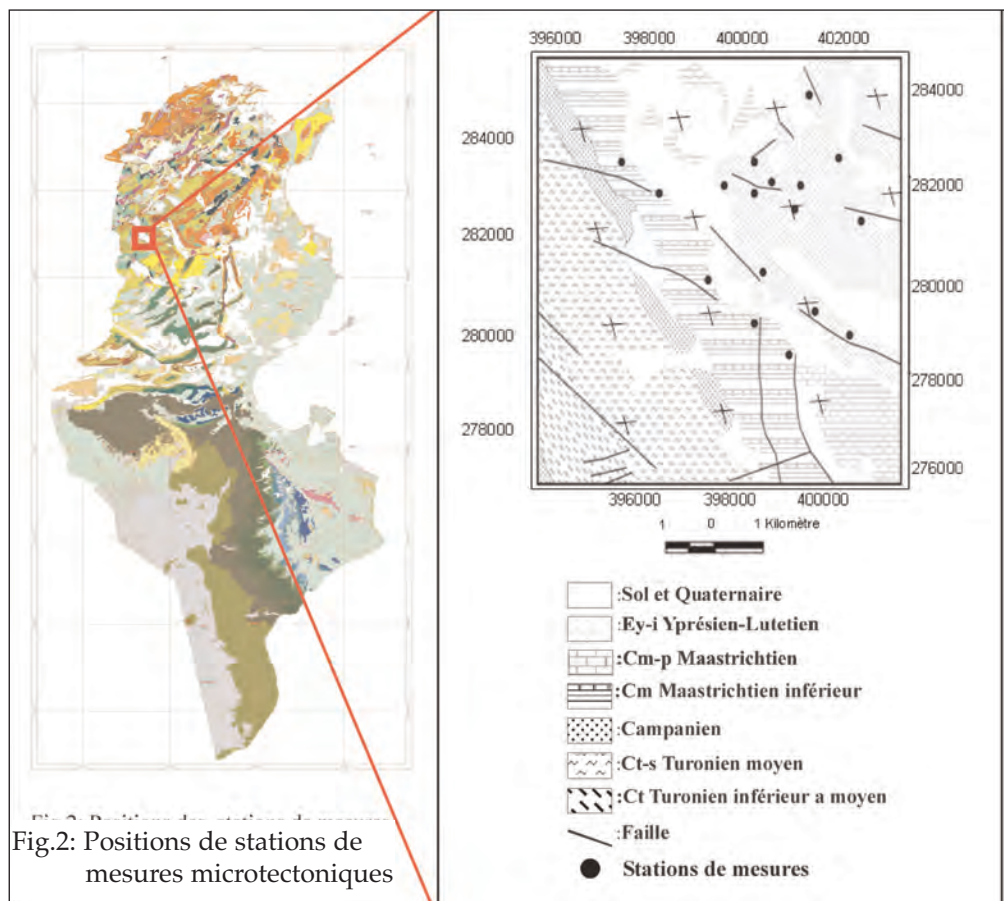
| Composantes     | CP 1    | CP 2  | CP 3  | CP 4  | CP 5  | CP 6 |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|-------|------|
| % variance      | 92.66   | 4.86  | 1.23  | 0.59  | 0.52  | 0.14 |
| % Cumulé        | 92.66   | 97.52 | 98.75 | 99.34 | 99.86 | 100  |
| Valeurs propres | 1217.71 | 63.83 | 16.20 | 7.81  | 6.79  | 1.84 |

### Filtrage de l'image

Un filtrage directionnel a été appliqué pour accentuer les linéaments de l'image. Ces filtres sont de type convolution directionnelle. Ils servent à montrer les discontinuités radiométriques et à les mettre en relief ; ils accentuent donc les contrastes, et agissent dans différentes directions suivant la matrice utilisée. On a utilisé les filtres directionnels Sobel (3\*3) et (7\*7), dans les directions suivantes : N-S, E-O, NO-SE et NE-SO. On a appliqué ces filtres sur la deuxième composante principale ce qui a permis d'augmenter de 20% l'ensemble des linéaments (BANNARI *et al.* 1995).

### Etude de terrain

Les formations géologiques visibles à l'ouest de Sra-Ouertane sont représentées par les calcaires du Campanien sup. -Maastrichtien inf. (formation Abiod), les marnes du Maastrichtien sup.-Paléocène (formation El Haria) et les phosphorites et calcaires de l'Yprésien (groupe Metlaoui). Une intense fracturation visible à toutes les échelles est développée aussi bien dans les calcaires yprésiens que dans ceux du Maastrichtien. Les mesures et les observations de surface ont été effectuées dans un premier temps dans 17 stations microtectoniques réparties sur le secteur d'étude (Fig. 2).



## Modélisation DRASTIC

Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation et l'étude de la vulnérabilité des eaux des nappes souterraines ; il n'y en a pas une absolue. Suivant les besoins et les données disponibles, on utilise la méthodologie appropriée. Dans notre cas, on a utilisé la méthode D.R.A.S.T.I.C. qui se base sur quatre hypothèses:

- \*les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- \*de la surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme de l'infiltration efficace;
- \*le contaminant présente la même mobilité que les eaux souterraines ;
- \*la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans la définition de la vulnérabilité.

### Les paramètres déterminants de la méthode DRASTIC

Les sept lettres de l'acronyme DRASTIC représentent les facteurs déterminants de la valeur de l'indice de vulnérabilité :

**D** : profondeur de la nappe d'eau (Depth to water table);

**R** : infiltration efficace (Recharge);

**A** : milieu aquifère (Aquifer media);

**S** : type de sol (Soil media);

**T** : pente du terrain (Topography);

**I** : impact de la zone vadose (Impact of vadose zone);

**C** : conductivité hydraulique (Conductivity).

$$ID = D + R + A + S + T + I + C$$

$$ID = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

Avec, p: poids et c : classe.

Une valeur numérique (poids paramétrique) comprise entre 1 et 5 reflète le degré d'influence de chacun de ces paramètres. Le tableau 3 présente les sept paramètres avec leurs poids. La superposition des différents paramètres nous donne le degré de vulnérabilité suivant l'indice.

Tableau 3 : Poids des paramètres utiles.

| Paramètre                    | Poids |
|------------------------------|-------|
| Profondeur de la nappe d'eau | 5     |
| Recharge efficace            | 4     |
| Milieu aquifère              | 3     |
| Type de sol                  | 2     |
| Pente du terrain             | 1     |
| Impact de la zone vadose     | 5     |
| Conductivité hydraulique     | 3     |

Le tableau 4 résume les différents intervalles de vulnérabilité (ALLIER *et al*, 1987).

\*Les classes 1 et 2 présentent une vulnérabilité extrême ;

\*la classe 3 présente une vulnérabilité élevée ;

\*les classes 4 et 5 présentent une vulnérabilité modérée ;

\*les classes 6 et 7 présentent une vulnérabilité faible ;

\*la classe 8 présente une vulnérabilité très faible.

Tableau 4 : Intervalles des valeurs de l'indice DRASTIC et classes correspondantes.

| Intervalle     | 23-79 | 80-99 | 100-119 | 120-139 | 140-159 | 160-179 | 180-199 | 200-226 |
|----------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Classe DRASTIC | 8     | 7     | 6       | 5       | 4       | 3       | 2       | 1       |

### Indicateurs et poids des paramètres du modèle DRASTIC

A chaque paramètre du modèle DRASTIC, on attribue une cote variant entre 1 et 10 en fonction des conditions locales. Les poids donnés aux sept paramètres varient entre 1 et 5.

## La profondeur de la nappe

Pour ce paramètre, plus la profondeur est faible, plus le temps de transit d'un polluant de la surface vers la nappe est rapide. Donc, la profondeur de l'eau, exprimée en mètres, est un paramètre principal dans l'étude de la vulnérabilité. Le tableau 5 présente la cote attribuée à chaque profondeur du plan d'eau.

D'après les forages effectués dans cette région 6600/3 (DGRE, 1987), 6664/3 (DGRE, 1989) et 6699/3 (DGRE, 2001), on remarque que la profondeur de la nappe est supérieure à 31 mètres. Donc, quelle que soit la position de la nappe, nous attribuons la cote 1 pour tout le secteur d'où :

$$DpDc=1*5=5$$

Tableau 5: Cote attribuée à chaque profondeur du plan d'eau.

| Profondeur de la nappe d'eau (m) |      |
|----------------------------------|------|
| Intervalle                       | Cote |
| 0 à 1,5                          | 10   |
| 1,5 à 4,5                        | 9    |
| 4,5 à 9                          | 7    |
| 9 à 15                           | 5    |
| 15 à 23                          | 3    |
| 23 à 31                          | 2    |
| 31 et plus                       | 1    |

Tableau 6 : Intervalles de recharge nette et leurs cotes

| Recharge annuelle (cm) |      |
|------------------------|------|
| Intervalle             | Cote |
| 0 à 5                  | 1    |
| 5 à 10                 | 3    |
| 10 à 18                | 6    |
| 18 à 25                | 8    |
| 25 et plus             | 9    |

## La recharge efficace

Le tableau 6 indique les différents intervalles de recharge nette et leurs cotes. La recharge nette est fonction de:

\* $P_i$  : la pluviométrie déterminée à partir des stations les plus proches du secteur d'étude.

\* $I_{ri}$  : la recharge artificielle. Dans notre cas, le secteur d'étude ne présente presque aucune activité agricole et aucun rejet industriel, donc la recharge artificielle est nulle.

\* $R/O$  : les ruissellements superficiels, qui sont donnés par la formule:

$$R/O = \left( \frac{P_i - 0,2S}{P_i + 0,8S} \right)^2$$

Avec:

P : pluviométrie (mm) ;

S : pertes maximales potentielles ou volume réservoir du sol (mm).

\*  $\Delta ST_i$  : la variation de l'humidité du sol

$\Delta ST_i = (P - R/O - ETP)$  avec:

P : précipitations ;

R/O : ruissellement superficiel ;

ETP : évapotranspiration potentielle.

On peut attribuer la cote 1 pour la recharge nette puisque cette cote correspond à un intervalle compris entre 0 et 5 cm. D'après les données du tableau 6 on a une valeur moyenne de l'excédent inférieure à 5 cm. Cet excédent correspond à la somme de l'infiltration et du ruissellement. Donc, dans les cas extrêmes la valeur de la recharge efficace est égale à la valeur de l'excédent.

$$R = R_p R_c = 1 * 4 = 4$$

## La lithologie de l'aquifère

Suivant la lithologie de l'aquifère on attribue une cote bien déterminée (tableau 7).

Tableau 7 : Cote pour quelques types lithologiques d'aquifère.

| CLASSES  | Cote |
|--|------|
| Schiste argileux fissuré   | 1-3  |
| Roches ignées/métamorphiques   | 2-6  |
| Flysch   | 5-7  |
| Grès et conglomérats   | 4-9  |
| Calcaire   | 4-9  |
| Sable et gravier   | 6-9  |
| Sable et gravier avec du silt et de l'argile en quantité significative | 5-8  |
| Basalte  | 5-10 |
| Calcaire karstique   | 9-10 |

Dans notre cas l'aquifère présente une lithologie de calcaire très fracturé à caractère karstique donc il a une cote égale à 9-10.

## Le type de sol de couverture

Dans le secteur d'étude, nous avons deux types de sols distincts :

- le premier type : limon argileux ; nous lui attribuons la valeur 3. Donc :  $SpSc=3*2=6$
- le deuxième type: ce sont des sols minces ou totalement absents. Donc :  $SpSc=10*2=20$

## La topographie

La carte des pentes a été élaborée après exploitation du modèle numérique de terrain issu de la vectorisation des cartes topographiques. A partir de la carte topographique numérique nous tirons les différentes classes de pentes. La pente est mesurée en pourcentage (%). Les différentes classes de la ponctuation attribuées au paramètre topographie sont présentées dans le tableau 9.

Tableau. 8 : Type de sol et leur cote

| TYPE DE SOL         |      |
|---------------------|------|
| NATURE DU SOL       | COTE |
| Sol mince ou absent | 10   |
| Gravier             | 10   |
| Sable               | 9    |
| Tourbe              | 8    |
| Argile fissurée     | 7    |
| Limon sableux       | 6    |
| Limon               | 5    |
| Limon silteux       | 4    |
| Limon argileux      | 3    |
| Terre noire         | 2    |
| Argile              | 1    |

Tableau 9 : cote attribuée au paramètre pente.

| CLASSE (%) | Indicateur |
|------------|------------|
| 0-2        | 10         |
| 2-6        | 9          |
| 6-12       | 6          |
| 12-18      | 4          |
| 18-22      | 2          |
| +22        | 1          |



## Les impacts de la zone vadose (lithologie de la zone non saturée)

On donne une cote à la lithologie de la zone non saturée ; cette cote est résumée dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Cote de la lithologie de la zone non saturée

| CLASSE                       | Indicateur |
|------------------------------|------------|
| Argile                       | 1-3        |
| Calcaire                     | 2-7        |
| Grès/conglomérats            | 4-8        |
| Flysch                       | 4-6        |
| Roches ignées/métamorphiques | 2-8        |
| Sable et gravier             | 6-9        |
| Calcaire karstique           | 10         |

Dans notre cas nous avons deux types de lithologie dans la zone non saturée :  
 -une partie argileuse avec :  $I_p I_c = 2 * 5 = 10$  (on a pris une valeur intermédiaire) ;  
 -une partie formée par des calcaires karstiques avec :  $I_p I_c = 2 * 10 = 20$ .

## La conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique a été déterminée à partir des données de la perméabilité. Les tableaux. 11 et 12 illustrent respectivement quelques types lithologiques avec leurs perméabilités et les différentes classes de la conductivité hydraulique.

Tableau 11 : Types lithologiques avec leur perméabilité.

| Types lithologiques  | Perméabilité (conductivité hydraulique) (cm/s) |
|----------------------|--|
| Gravier              | $10^1 < k > 10^2$                              |
| Sable                | $10^{-3} < k > 10^{-1}$                        |
| Argile               | $10^{-11} < k > 10^{-5}$                       |
| Roches non fissurées | $10^{-10} < k > 10^{-8}$                       |
| Grès                 | $10^{-3}$                                      |
| Calcaire             | $10^{-4}$                                      |
| Marnes+calcaire      | $10^{-9}$                                      |

Tableau 12 : Classes de conductivité hydraulique

| Classe | $< 10^{-7}$ | $10^{-6} - 10^{-5}$ | $10^{-5} - 10^{-4}$ | $10^{-3} - 10^{-2}$ | $10^{-1} - 10^{-1}$ |
|--------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Cote   | 1           | 2                   | 3                   | 2                   | 1                   |

La lithologie de notre aquifère est calcaire, donc on lui attribue une conductivité hydraulique égale à  $10^{-4}$  et une cote 3.

## ANALYSE ET DISCUSSION

Le rehaussement des discontinuités « images » assimilé à des linéaments géologiques a été assuré par une interprétation visuelle des images brutes et traitées. Cette carte est obtenue par le drapage des différents fichiers « vecteur » issus de la vectorisation de ces images. Dans cette carte linéamentaire, il est à signaler qu'on entend par « Linéaments d'ordres anthropiques » : les routes, les sentiers, les voies ferrées... ; en se référant aux cartes topographiques et aux données de terrain, on doit les éliminer. La figure 3 montre cette carte linéamentaire.

Sur la carte, les directions relevées sont N20, N60, N85, N95, N130 à 160 et une direction presque est-ouest. Ces directions concordent avec les directions tectoniques caractéristiques de la région.

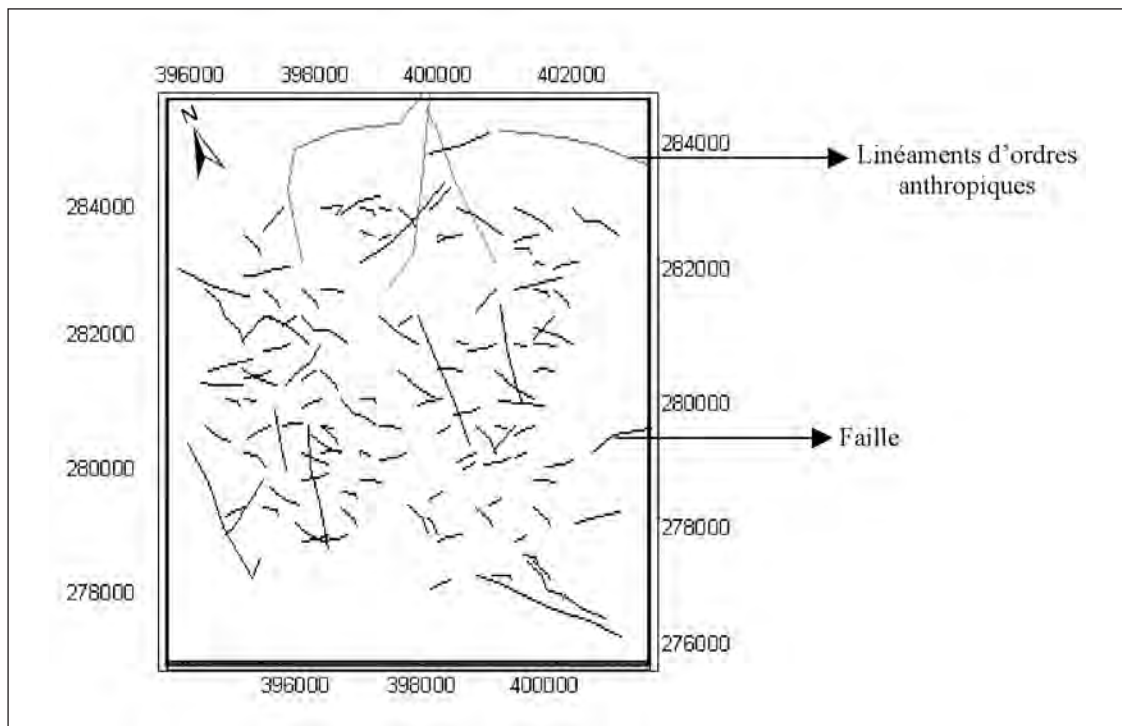


Fig.3: Carte linéamentaire

La combinaison des résultats obtenus à partir du traitement de l'image satellitaire Landsat TM ainsi que des observations et des mesures de terrain ont permis conclure que :

- au niveau des calcaires du Paléocène terminal - Yprésien (groupe Metlaoui) trois directions sont présentes: N120, N75 et N160 (Fig. 4).
- dans les calcaires éocènes on remarque que la majorité des fractures sont presque fermées, seules les grandes failles sont ouvertes et sont parfois remplies par de la calcite.
- dans le calcaire maastrichtien de la formation Abiod nous soulignons la présence de trois directions majeures: la première de direction N 85 ; la deuxième de direction N140 et une troisième de direction N20 (Fig. 5). Dans les calcaires de la formation Abiod les fractures présentes sont plus ou moins fermées. Les failles de direction N85 sont parfois remplies de calcite. On peut même trouver des failles qui sont remplies par des brèches surtout celles qui ont une direction N 140.



Fig.4: Rosace en nombre d'occurrences des failles affectant les calcaires du groupe Mélaoui. (A)

Fig.5: Rosace en nombre d'occurrences des mesures effectuées dans le calcaire maastrichtien. (B)

L'analyse statistique tenant compte de l'intensité de la fracturation des différentes familles a été aussi effectuée. Pour cela, on a procédé au levé de toutes les discontinuités dans une surface bien déterminée. Dans un carré de 1 m sur 1 m, puis on a mesuré les directions, les pentages et les longueurs de toutes les familles de failles se trouvant dans cette surface. Les résultats obtenus montrent la présence de 18 à 21 microfailles/m<sup>2</sup> avec une moyenne, pour les quatre stations, de 20 fractures/m<sup>2</sup>.

Le pourcentage des familles de failles est variable :

- N 130-140 : 54 % ; le pendage moyen est de 80°;
- N75-85 : 29.5% ; le pendage moyen est de 55°;
- N15-30 : 13% ; le pendage moyen est de 65°, rejet de faille le plus important ;
- Autres directions : 3.5%.

Pour mieux comprendre et interpréter le rôle de la fracturation dans le drainage de l'eau de la surface vers la nappe, les mesures de terrain sont représentées en bloc 3D (Fig.6).

D'après les résultats du terrain et le bloc diagramme représentatif des différentes familles de failles (directions et plongements) on peut conclure que les failles de direction N 15-30 qui

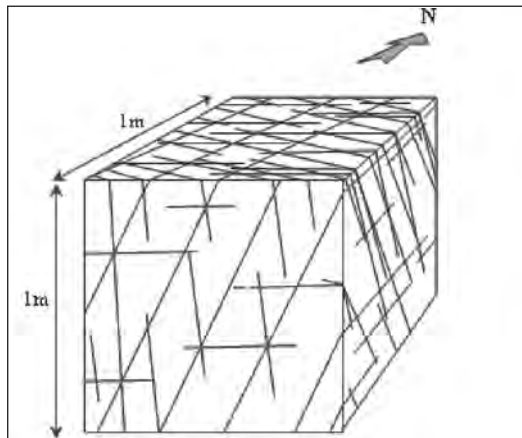


Fig. 6 : Bloc diagramme de la fracturation au niveau du calcaire maastrichtien

plongent souvent vers l'ouest et ayant un rejet important, vont permettre l'écoulement dans un premier temps vers l'ouest, cela malgré leur faible pourcentage. Mais en raison du plongement des couches qui se fait vers l'est, les mouvements des eaux évolueront en profondeur. Le réseau conjugué de ces failles avec celle de direction N130-140 et N75-85, favorise alors la circulation des eaux à l'intérieur de ces calcaires vers l'est (Fig.7).

Ce résultat est déjà confirmé par le sondage S 6664/3 (D.G.R.E. 1987, D.G.R.E 1989, et D.G.R.E 2001) implanté dans la partie ouest des calcaires maastrichtiens du secteur d'étude et dont les résultats sont négatifs.

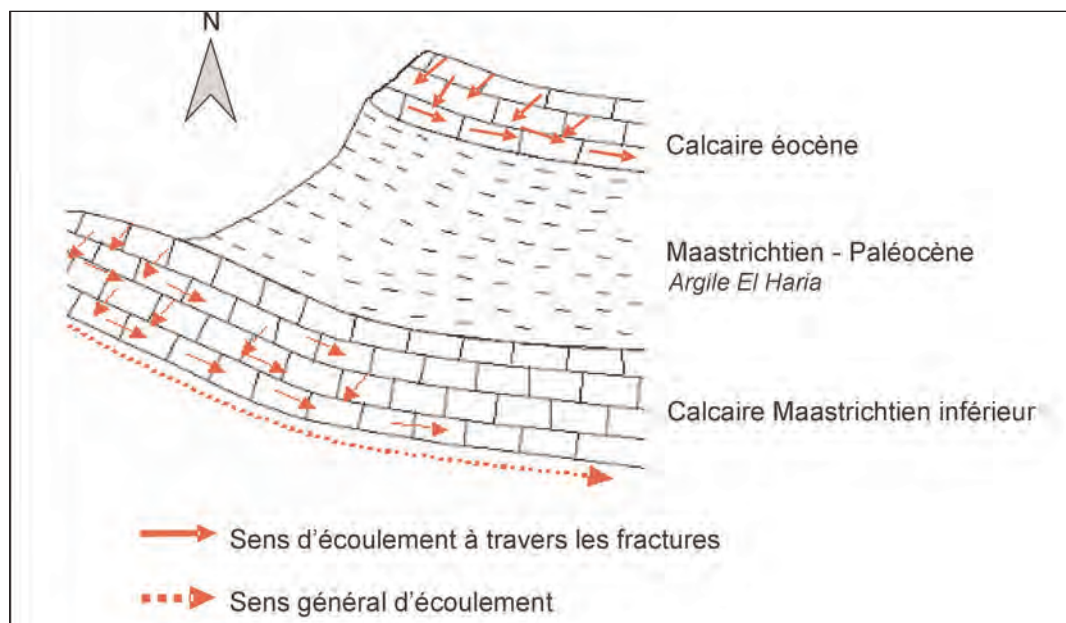


Fig. 7 : Mouvement des eaux d'infiltration dans les calcaires éocènes et maastrichtiens.

Nous estimons que l'aquifère est excentré vers l'est et, pour l'atteindre, il faut se déplacer davantage dans cette direction.

Le modèle DRASTIC est obtenu en superposant ces différentes composantes. Suivant la nature et le type de données disponibles, on a choisi la méthode d'élaboration de ce modèle.

L'exploitation des données raster se fait en assimilant l'image qui contient les données d'une couche à une matrice mathématique. Si on travaille manuellement, on fait un maillage

de l'image et on attribue une valeur numérique dans chaque case selon les indices. On fait ensuite la superposition des différentes couches. Le calque final représente le modèle DRASTIC.

Dans notre cas, nous avons utilisé des images scannées représentatives de chaque paramètre. Ensuite avec des logiciels de traitement d'images (IDRISI 32) nous avons procédé à leur reclassification en attribuant les cotes spécifiques à chaque classe. Ces images ont été ensuite multipliées par le poids accordé à chaque indice. A la fin, par l'étape de drapage de toutes les couches, nous obtenons le modèle DRASTIC :

- Chaque couche est représentée par une image de répartition d'un paramètre assimilé à une matrice et exportée vers le logiciel IDRISI
- On applique la commande « reclass », pour donner la valeur de la cote du paramètre pour chaque polygone de l'image. C'est une reclassification de la matrice de l'image.
- On multiplie l'image avec le poids du paramètre avec la commande « scalar ».
- Lorsqu'on termine l'élaboration des différentes couches, on fait leur somme avec la commande « overlay ». On obtient alors le modèle DRASTIC représenté à la figure 8.

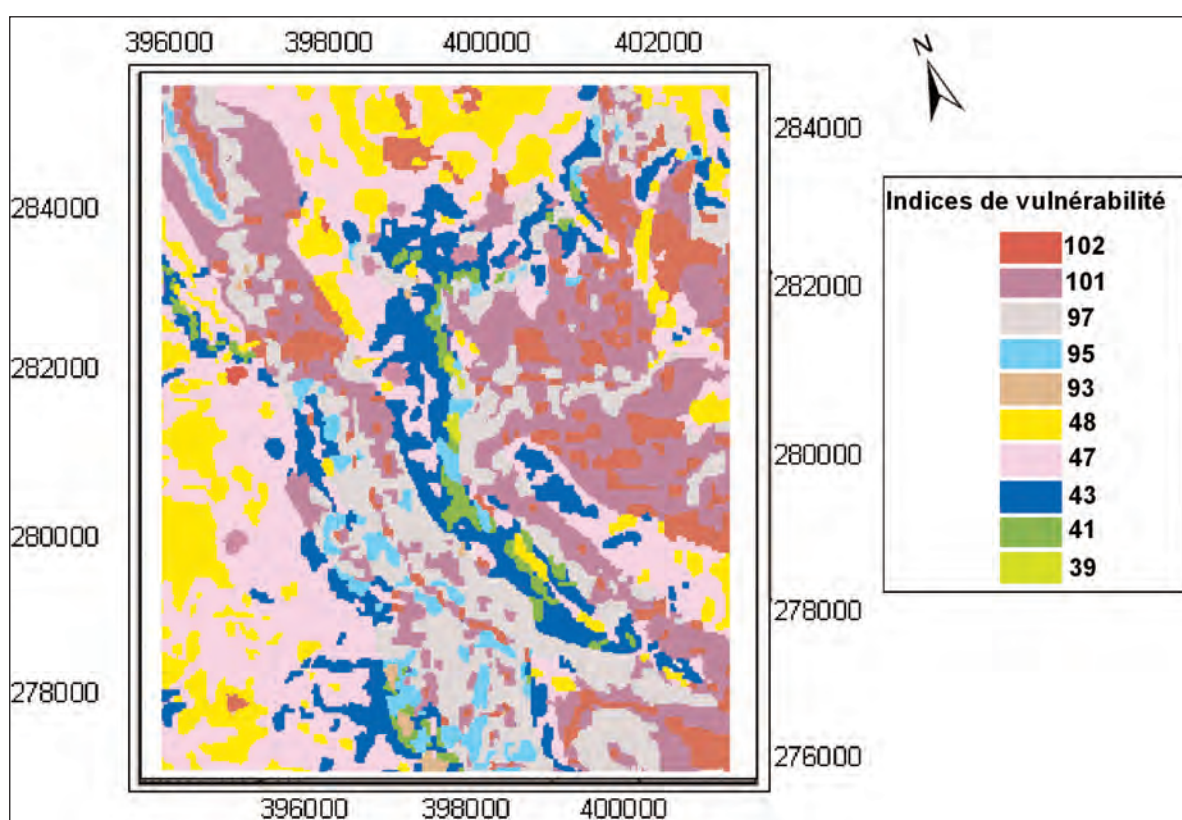


Fig. 8 : Carte de l'indice de vulnérabilité DRASTIC

## CONCLUSIONS

Les données de télédétection multispectrale issues de l'image Landsat TM et les levés de terrain sont conformes et corrélables avec un coefficient important. Ceci prouve une fois de plus l'intérêt et l'utilité de la télédétection pour les sciences de la terre. Les directions trouvées sont N 130-140, N 75-85 et N15-30. Ces résultats ont permis d'apporter des précisions sur le sens de l'écoulement souterrain de l'eau (de l'ouest vers l'est).

La contamination de la nappe par les rejets miniers est possible, bien que la nappe soit encore excentrée vers l'est. Ceci est dû essentiellement au réseau conjugué des failles et au pendage des couches. Ainsi, en cas d'une éventuelle exploitation des phosphorites, les laveries devront s'installer là où les risques de contamination de la nappe sont minimales.

La carte obtenue est une carte d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la partie ouest de Sra-Ouertane où le comportement d'éventuels polluants n'était pas pris en



considération. Il faudra aussi tenir compte de ce qui concerne la charge d'un éventuel barrage: en cas d'installation d'une telle structure destinée à la récupération et au recyclage des eaux de lavage, la carte de l'indice de vulnérabilité va changer.

La répartition de la vulnérabilité dans la région varie entre 39 et 102. L'indice DRASTIC est divisé en 10 groupes dans la carte. Suivant les normes utilisées on peut répartir la vulnérabilité de la zone en deux familles. La première est formée des zones où l'indice est inférieur à 80, ce sont les zones à vulnérabilité très faible. La deuxième englobe les parties dont la vulnérabilité est comprise entre 80 et 120, ce sont les zones à vulnérabilité faible. Tout le secteur présente donc une vulnérabilité très faible à faible. Pour plus de précisions, les 10 groupes de vulnérabilité ont été maintenus sur la carte.

Vu la faible étendue du secteur d'étude, il y a des paramètres qui se sont manifestés de la même manière dans tout le secteur. Les facteurs lithologie et topographie sont les plus influents dans ce cas d'étude. Les terrains les moins vulnérables se trouvent dans les régions à lithologie argileuse et à pente forte.

Il est toutefois recommandé de réaliser des travaux plus approfondis pour détecter les erreurs, toujours possibles, qui peuvent se présenter sur la carte de vulnérabilité DRASTIC. Ceci permettra, si on prend des décisions basées sur de telles cartes, à tenir compte des incertitudes. Ces cartes restent cependant parmi les meilleurs documents qui sont utiles pour l'aménagement des terrains et pour l'examen de projets d'étude de l'environnement (MENANI, 2001). Dans le cas de Sra-Ouertane, les aménagements associés à l'exploitation, stockage et transformation des phosphates doivent impérativement tenir compte des données de vulnérabilité considérées.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLER L., *et al.* (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings. Prepared by the National water Well Association for the US EPA Office of Research and Development, Ada, USA.
- BAHRI H., REBAI N. ET ZAIER A., 2005, Contribution de la télédétection dans l'évaluation et l'estimation du rôle de la fracturation dans la contamination de la nappe du Maastrichtien inférieur de la bordure occidentale de Sra-Ouertane. (Centre Ouest de la Tunisie). Dix-septième journée de l'SSNT.
- BANNARI A., D. MORIN, G.B. BENIE, F. BONN, A 1995, Theoretical Review of Different Mathematical Models of Geometric Corrections Applied to Remote Sensing Images, *Remote Sens. Rev.* 13 : 27-47.
- BOUKARI M. ET R. GUIRAUD, 1985, "L'hydrogéologie de régions de socle de l'Afrique intertropicale: l'exemple de Dassa- Zoumè (Bénin méridional)". *Journ. Afr. Earth Sci.*, 3 (4) : 491-503 .
- BOUR O. 1997, Transfert de fluide dans les milieux fracturés : effets d'échelle. Thèse Univ. Rennes 1, 200 p.
- BUROLLET P. F. 1956, Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale. *Ann. Mines Géol.*: 350
- CHABRILLAT S., PINET P., CEULENEER G., JOHNSON P & MUSTRAD J 2000. Ronda Peridotite Massif Methodology for its Geological Mapping and Lithological Discrimination from Airborne Hyperspectral Data, *International Journal of Remote Sensing* 21,(12): 2363-2388.
- D.G.R.E. 1987 : Compte rendu de fin de travaux du Forage Fedj Tameur 6600/3. p5 .
- D.G.R.E. 1989 : Compte rendu de fin de travaux du Forage Fedj TameurII 6664/3. p5 .
- D.G.R.E. 2001 : Compte rendu de fin de travaux du Forage El goazi 6699/3. p5 .
- DARCEL C., 2002 Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques. Thèse Univ. Rennes 1, 223 p .
- DAVY P., A. SORNETTE, ET D. SORNETTE, 1990 "Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting". *Nature*, 348: 56-58.
- DE MARSILY, 1985. Flow and transport in fractured rocks: connectivity and scale effect. Edited by: I.A. Hydrol.
- DERSHOWITZ W.S., P. WALLMANN, J.E., GEIER, & G. LEE, 1991, Discrete fractured network modeling of tracer migration experiments at the SCV site. Swedish Nuclear Power and Waste Management Co., Stockholm, *Sweden, SKB Report*: 91-23.

- EL HARTI A., BANNARI A., BACHAOUI E., AARAB E., GIROUARD G. & GHMARI A. 2004. Synergie entre la télédétection multispectrale et les données de terrain pour la conception d'un nouveau modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales (Maroc). *C. R. Geoscience*, 336 :1311-1320 .
- EL KOCHRI A., ALEM E. M. & CHOROWITCZ J. 1987. Apport de la télédétection et de l'analyse microtectonique à l'étude du Haut Atlas centro-oriental: géométrie et mécanismes, Rabat. *Bull. Sci. Terre*, 3 : 25-36.
- EMRAN, A., J. CHOROWICZ, B. CERVELLE, N. LYBERIS, G. TAMAIN & E.M. ALEM, 1988 "Cartographie géologique et analyse de la fracturation du sud de l'anti-atlas central (Maroc) à partir d'une image Landsat MSS", *Photo-Interprétation* : 1-7
- HACHMI H. 1982, Contribution à l'étude hydrogéologique du plateau de Sra-Ouertane. Thèse doctorat de troisième cycle Université des sciences et technique du Languedoc. 96 p .
- HAMZA M. H. 1999, Etude de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe de Ras Jebel par les SIG. Mémoire de DEA. Faculté des sciences de Tunis. Université Tunis El Manar, 101 p.
- HIMYARI, M.S., C. HOEPFFNER, M. BENZAKOUR & D. EL HADANI, 2002. Étude structurale du Haut Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéaire des images HRV (XS) de « SPOT ». *Télédétection*, 2, (4) : 243-253.
- JACOBS ,INTERNATIONAL INC 1984. Rapport interne de la société d'études des mines de phosphate de Sra-Ouertane .
- JACOBS ,INTERNATIONAL INC 1985. Rapport interne de la société d'études des mines de phosphate de Sra-Ouertane .
- KASTANY G. 1952. Les fossés quaternaires d'effondrement de Tunisie. Rep. 18 th int. Géol. Congress-London,1948, 1952: part XIII, GBR .
- KOUAMÉ F.K., GIOAN P., BIÉMI J. & AFFIAN K. 1999. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Télédétection*, 1, 2 : 139-156.
- MENANI M. R. 2001. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher (Nord-Est algérien) selon la méthode DRASTIC. *Science et changements planétaires/sécheresse*, 12 : 95-101 .
- NERETNIEKS I. 1993. Solute transport in fractured rock. Applications to radionuclide waste repositories In : Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Edited by Bear, J., C-F. Tsang, & G. De Marsily, pp. 39-127.
- NICOLAS BAGHDADI ,, GILLES GRANDJEAN , DIDIER LAHONDERE , PHILIPPE PAILLOU & YANNICK LASNE 2005. Apport de l'imagerie satellitaire radar pour l'exploration géologique en zones Arides. *C. R. Geoscience*, 337: 719-728.
- RANJBAR H, HONARMAND M & MOEZIFAR Z ,2004. Analysis of ETM+ and Airborne Geophysical Data for Exploration of Porphyry Type Deposits in the Central Iranian Volcanic Belt, Using Fuzzy Classification. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS applications, and Geology III, SPIE* : 165-173.
- SAVADOGO A.N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse d'Etat, Univ. Grenoble 1, 350 p .
- SCANVIC J. Y. 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. *B.R.G.M. Manuel et Méthodes*. n° 7, 62 fig, 5 tab, 158 p.
- ZAIER A. 1984. Etude stratigraphique et tectonique de la région de Sra-Ouertane (Atlas tunisien central); lithologie, pétrographie et minéralogie de la série phosphatée. Thèse doctorat de troisième cycle Faculté des sciences de Tunis. Université Tunis El Manar, 158 p.
- ZAIER A. 1999. Evolution tectono-sédimentaire du bassin phosphaté du centre Ouest de la Tunisie. Minéralogie, Pétrographie, Géochimie et Genèse des phosphorites. Thèse doctorat ès sciences. Faculté des sciences de Tunis. Université Tunis El Manar .