Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 49-58
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

UN MODÈLE DE RECHARGE POUR L'AMÉNAGEMENT DES RESSOURCES EN EAU DANS LES PAYS SEMI-ARIDES ET ARIDES À L'AIDE DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE

AHMAD BILAL[a] et OSAMA AMMAR[b]

a Université de Damas, Département de géologie, Faculté des Sciences, B.P. 9487, Damas, Syrie. Téléphone : +963 11 6622418. Télécopieur : +963 6115498.

b General Organization of Remote Sensing (GORS), B.P. 12586, Damas, Syrie. Téléphone : +963 11 3910787. Télécopieur : +963 11 3910700.

(soumis le 13 mai 2002 ; révisé le 4 juillet 2002 ; accepté le 7 octobre 2002)

À la veille de XXIe siècle, le problème de l'eau est la préoccupation majeure des nations. Les ressources en eau doivent être mieux aménagées. Parmi les techniques récentes, l'imagerie satellitaire apparaît être l'une des mieux adaptée dans ce domaine. À partir d'une image spatiale, on peut établir un certain nombre de cartes thématiques telles que des cartes tectoniques, des cartes de linéaments et de leur densité, des cartes du réseau hydrographique et de sa densité, ainsi que des cartes lithologiques. L'ensemble de ces cartes conduit à l'établissement de la carte de recharge, exprimant ainsi le modèle cartographique proposé. Celui-ci permet de suivre les eaux, tant en surface qu'en milieu souterrain, pour les exploiter ultérieurement à l'aide de barrages ou au moyen de forages. Dans ce travail, nous avons appliqué ce modèle de cartographie à l'étude de deux régions, l'une semi-aride (Sahel Akkar) dans la partie sud de la chaîne littorale syrienne et l'autre aride (Al-Qualamoun) localisée entre Damas, Homs et Palmyre. Les résultats obtenus ont été vérifiés et confirmés sur le terrain à l'aide d'une étude géophysique, prouvant l'efficacité de la méthode utilisée pour l'aménagement et l'exploitation des ressources en eau.

Mots-clefs : modèle de recharge ; aménagement des ressources en eau ; image satellitaire ; télédétection, Syrie.

A RECHARGE MODEL FOR WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE SEMI-ARID AND ARID LANDS USING SATELLITE IMAGERY

Water issues are going to be dominant in the XXI century. Therefore the water resources must be better managed. Remote sensing is one of the most advanced techniques towards such an objective. From satellite images, several thematic layers can be established : tectonic, lineament, drainage and lithology maps. Alltogether they allow the construction of the recharge map. This document is basic for an improved rainfall water management, at the surface using dams, lakes and trenches, and in the subsurface for exploring ground water reservoirs and exploiting them by wells. In this study, the mapping model based on satellite imagery was used to manage rainfall water in a semi-arid climate region (Sahel Akkar) in the southern part of the Syrian coastal chain, and in an arid climate region (Al-Qualamoun) located between Damascus, Homs and Palmyrid chains. The results were checked and confirmed in the field by geophysical measurement and water wells. These positive results have proved the efficiency of this technique for management and exploitation of water resources in arid and semi-arid lands.

Keywords : recharge model ; water resources management ; satellite imagery ; remote sensing, Syria.

1. INTRODUCTION

Parmi les préoccupations majeures des nations et peuples arabes, à la veille de XXIe siècle, le problème de l'eau reste le plus important (Saad, 1993a, b). Ceci implique de bien gérer des ressources de plus en plus limitées. L'imagerie satelllitaire s'avère être, entre autres, un moyen efficace dans ce domaine (Bilal, 1997 ; Rossi, 1997 ; Albergel et Selmt, 1997 ; Travaglia et Ammar, 1998).

Une méthodologie diverse et complète peut être utilisée : traitement visuel des images satellitaires multibandes ou radar, modèles numériques d'altitude, etc. (Ichoku et Chorowicz, 1994 ; Sykioti *et al*. 1996 ; Chorowicz et Fabre, 1997). Elle permet de mieux aménager et exploiter les ressources en eau par l'établissement d'un certain nombre des cartes thématiques (tectonique, de linéaments linéaires, du réseau hydrographique, de la lithologie et de recharge) qui, ensemble, forment le modèle proposé. L'application de ce modèle réduit la perte en eau de pluie, soit en la retenant par des barrage du par d'autres techniques comme les tranchées et lacs collinaires ou en exploitant les réservoirs souterrains par des puits (Ammar, 1993 ; Bilal, 1997, 1999, 2000). Les images satellitaires TM de Landsat de 1995 ont été utilisées, après correction à l'aide du

programme d'ERDAS utilisant l'ensemble des bandes et en effectuant une combinaison appropriée lors de l'interprétation.

L'objectif de ce travail est l'application de cette approche dans deux régions de Syrie : la première à climat semi-aride (Sahel Akkar), la seconde à climat aride (Al-Qualamoun) (figure 1). Ces deux régions présentent des caractères climatologiques différents : à Sahel Akkar, la température varie de 10° C à 15° C en hiver, de 25° C à 30° C en été. L'évaporation est alors relativement élevée et les précipitations sont de l'ordre de 300 à 500 mm/an. À Al-Qualamoun, la température varie de –1° C à +15° C en hiver et de 30° C à 38° C en été. L'évaporation est très élevée et les précipitations sont de l'ordre de 150 à 200 mm/an.

Les réservoirs des eaux souterraines et l'emplacement optimal des ouvrages de surface (barrage) ont été localisés par ladite méthode, qui a ensuite été vérifiée par des travaux sur le terrain (sondages géophysiques). L'approche adoptée apparaît donc valable pour la mise en valeur des ressources hydriques en milieu arid (Bilal et Ammar, 1998, 2001a, b, 2002 a, b).

2. MÉTHODOLOGIE

Les méthodes utilisées sont basées sur l'imagerie satellitaire, elles peuvent être classées en quatre catégories :

– le principe de la fenêtre mobile, conçu et développé par Bilal (1997, 1999, 2000) et Bilal et Ammar (1998, 2002) ; à partir d'une fenêtre témoin que l'on déplace sur la carte, on définit la proportion de fractures par unité de surface, ce qui permet d'établir la carte des linéaments et de leur densité ;

– une nouvelle classification du réseau hydrographique, à partir des normes internationales correspondant aux caractéristiques des régions semi-arides et arides ; (Georgy et Walling, 1973 ; Hadipriono *et al*., 1990 ; Ichoku et Chorowicz, 1994) ;

– les cartes thématiques classiques : 1) une carte tectonique, indiquant les failles et les fractures identifiées sur les cartes géologiques traditionnelles, 2) une carte hydrographique, connue et utilisée depuis une quinzaine d'années (Hadipriono *et al.*, 1990 ; Chorowicz et Fabre, 1994), mais récemment perfectionnée et établie en Syrie (Bilal, 1997, 1999 ; Bilal et Ammar, 1998, 2002a, b) et, finalement, 3) une carte lithologique, tenant compte des différents faciès du substratum rocheux.

– la combinaison de ces documents permet l'établissement d'un document synthétique, dit « carte de recharge », qui correspond au modèle proposé. Cette combinaison s'effectue à l'aide d'un programme de SIG par lequel on traite ces documents sous forme de couches successives en donnant à chacune d'elles en fonction de leur propension à la recharge.

3. RÉSULTATS

Le modèle proposé dans ce travail représente la combinaison de plusieurs cartes thématiques, qui seront discutées successivement : tectonique, de linéaments, du réseau hydrographique et de la lithologie.

3.1. Carte tectonique

D'après la carte géologique traditionnelle, les régions étudiées apparaissent stables, sauf en ce qui concerne le rift syrien pour la région de Sahel Akkar et quelques zones fracturées pour la région d'Al-Qualamoun (Ponikarov, 1966, 1967). Mais, en raison de l'épaisse couverture de formations meubles et d'une échelle inappropriée, de telles cartes sont peu utilisables pour des études hydrologiques. Par contre, les images satellitaires (figure 1) permettent de mieux identifier les déformations tectoniques fragiles, surtout les failles et les fractures. On constate ainsi que la région de Sahel Akkar est plus faillé et fracturé, selon deux directions principales : NO-SE et NE-SO. En deuxième ordre, interviennent des failles longitudinales de direction N-S et transversales de direction E-O (figure 2A,C). Quant à la région d'Al-Qualamoun, plusieurs zones déformées, identifiées sont dues à un système complexe de failles : A (faille de Damas), B (faille de Jéroud) et d'autres failles en C, D et E (figures 2B, D). Ces nouvelles observations montrent que les régions étudiées sont moins stables qu'on ne le pense. Ces structures décelées sur les images satellitaires ont été vérifiées et confirmées sur le terrain.

3.2. Cartes des linéaments rectilignes

Pour comprendre en détail la densité des déformations, on établit des cartes des linéaments rectilignes et de leur densité (figure 3). Les linéaments reflètent le réseau hydrologique en relation avec les systèmes de déformations tectoniques, surtout ouverts et fonctionnels (figures 3C, D). Cinq zones de densités ont été distinguées. La densité des linéaments augmente de la zone de cinquième degré à la zone de premier degré. On remarque que la densité élevée des linéaments se concentre près des zones faillées principales. En général, cette densité augmente du NO (zone montagneuse à climat semi-aride) vers l'est et le SE où domine un climat aride (figures 3E, F). Ces constatations sont ensuite vérifiés et confirmés sur le terrain d'après les indications de l'imagerie satellitaire.

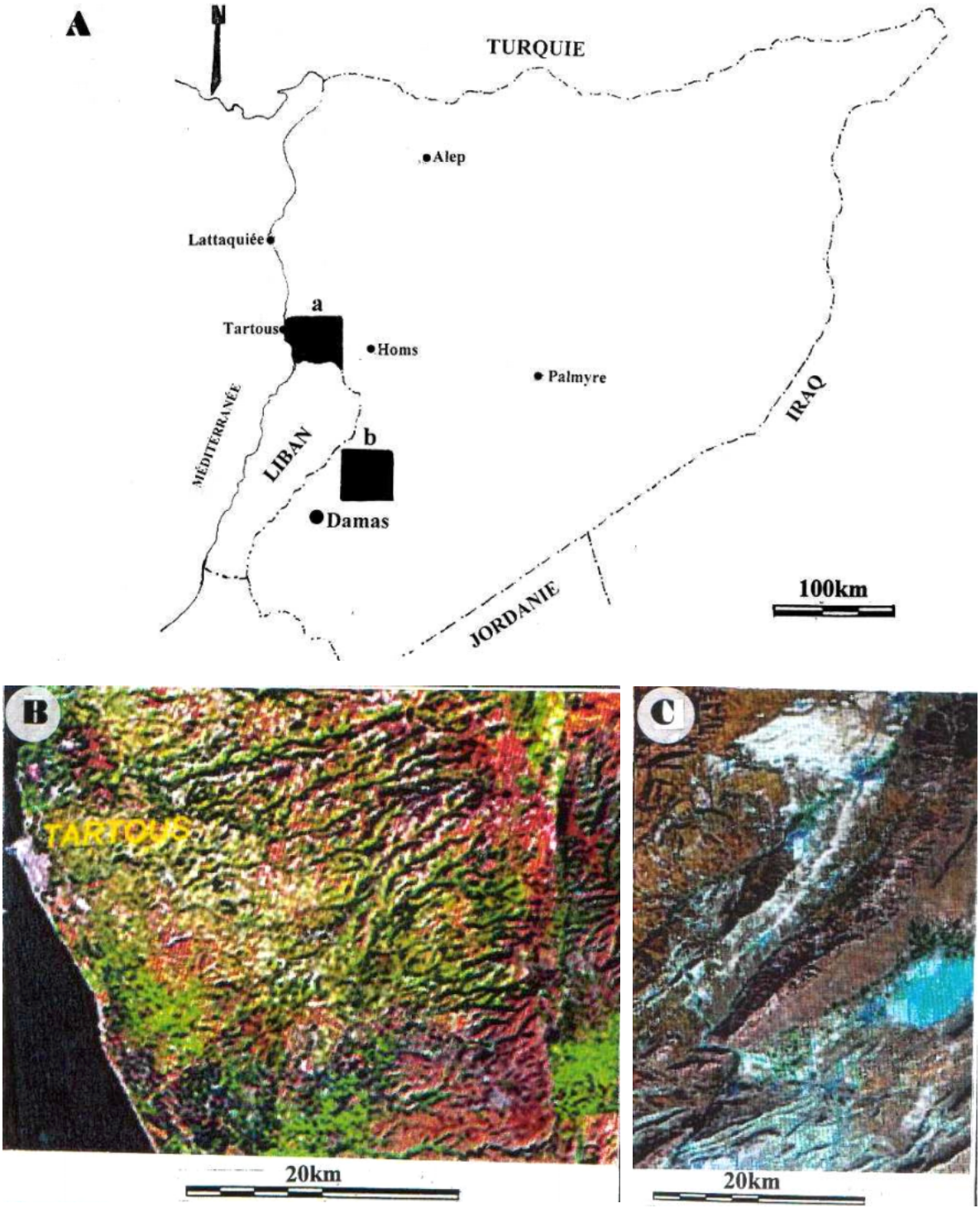


FIGURE 1 Localisation des régions étudiées (A) : Sahel Akkar (a), Al-Qualamoun (b). Image satellitaire TM de 1995 des régions de Sahel Akkar (B) et d'Al-Qualamoun (C). *Location of the study areas (A) : Sahel Akkar (a), Al-Qualamoun (b), TM image (1995) of Sahel Akkar (B) and Al-Qualamoun (C) areas.*

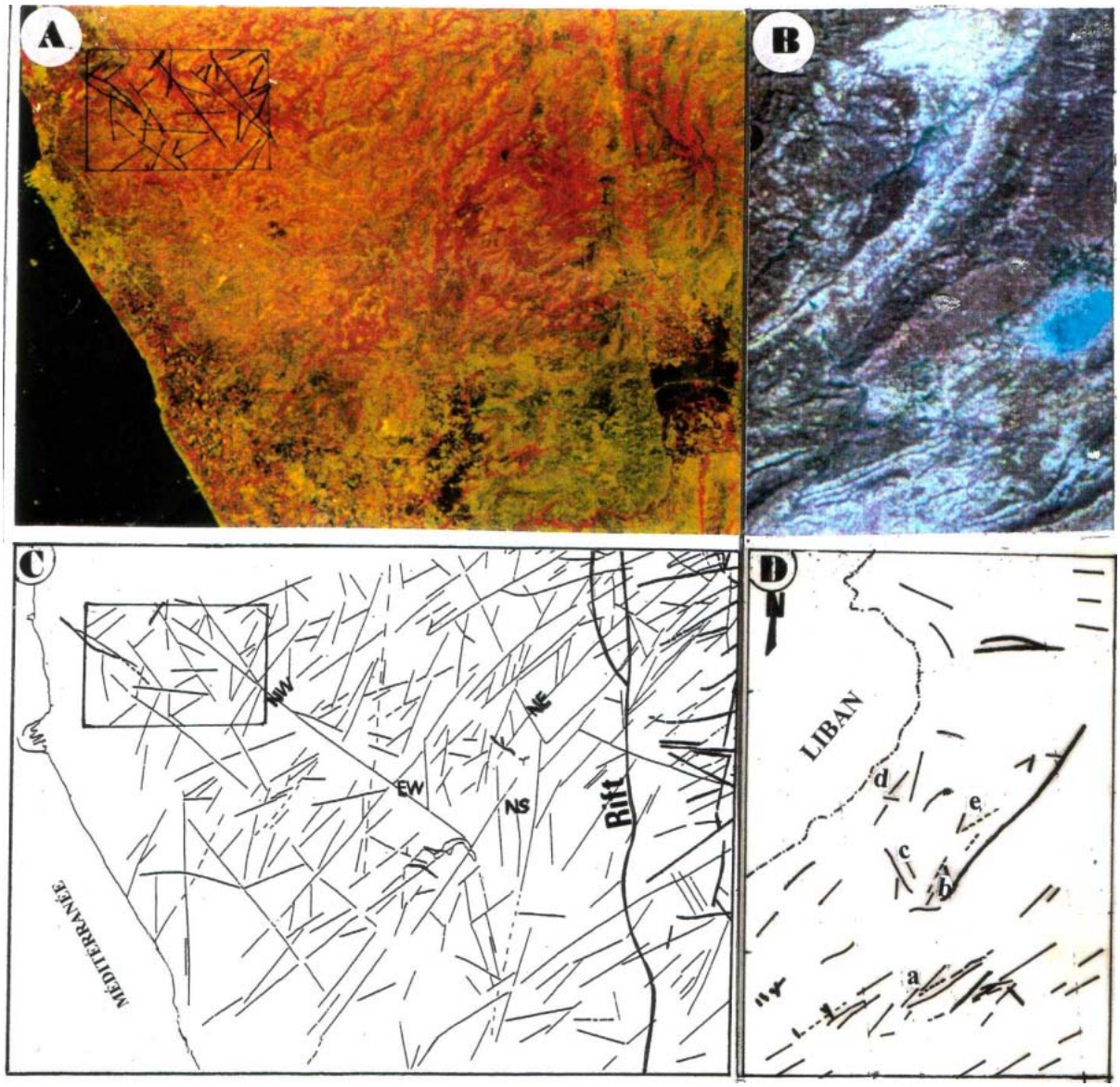


FIGURE 2 Carte tectonique des régions de Sahel Akkar (A) et d'Al-Qualamoun (B). Sur C et D en traits gras: failles selon la carte géologique traditionnelle, en traits légers : failles et fractures identifiées d'après l'image satellitaire. Dans la fenêtre, un exemple d'identification de systèmes fracturés. a, b, c, d et e de la figure D représentent des systèmes de failles détectés. *Tectonic map of Sahel Akkar (A) and Al-Qualamoun (B) areas. On C and D in thick lines faults after the geological map, an thin lines faults and fractures after the satellite image. In the square an example of detecting fractures on a satellite image is shown. a, b, c, d and e of the figure D represent systems of identified faults.*

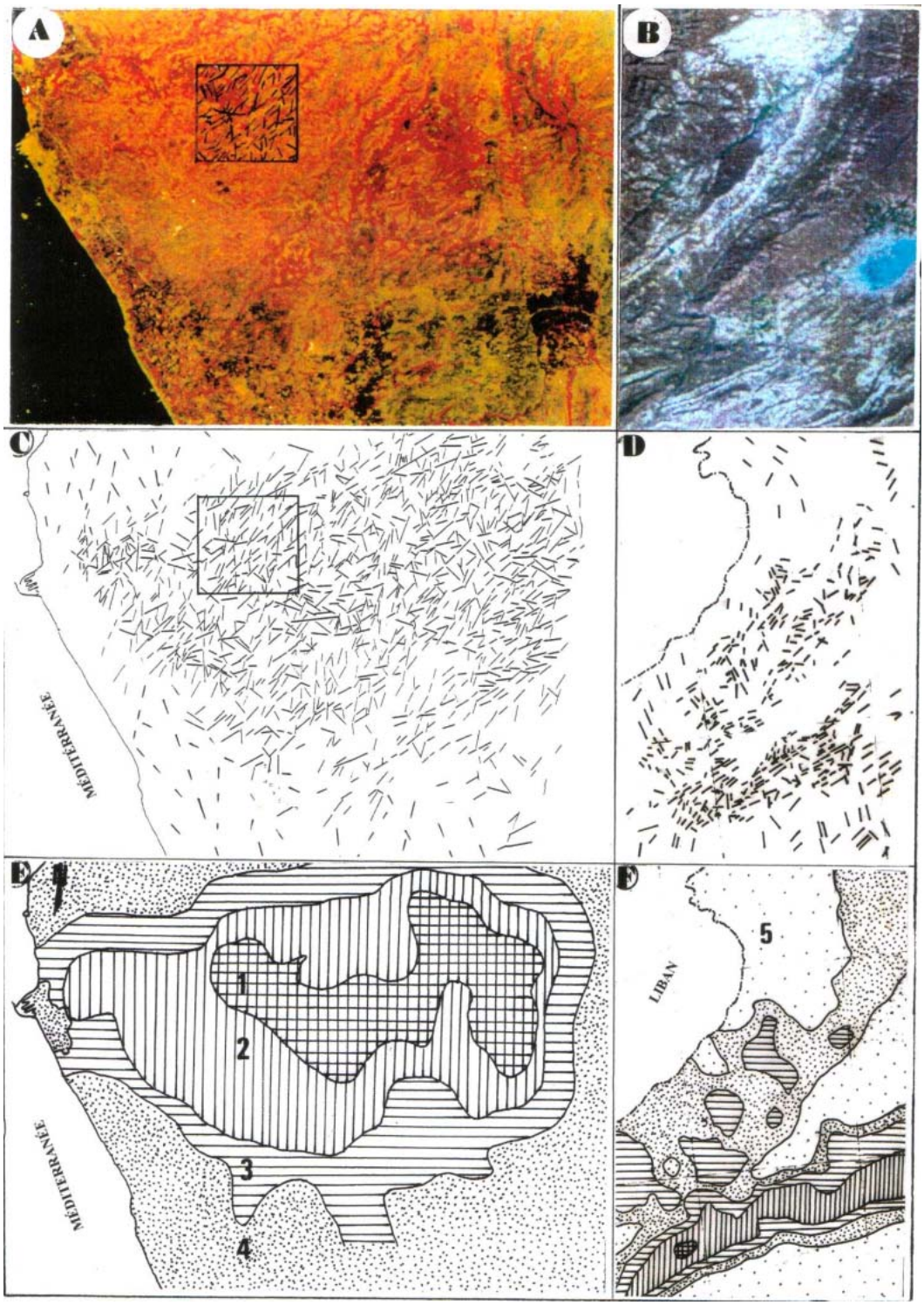


FIGURE 3 Cartes des linéaments de la région de Sahel Akkar (C) et de leur densité (E) et de la région d'Al-Qualamoun (D et F). Dans la fenêtre, exemple de l'identificatio des linéaments linéaires sur une image satellitaire. 1 à 5 = degré de densité de linéaments où 1 = degré le plus élevé, 5 = degré le plus faible. *Linear lineaments map of Sahel Akkar (C) areas and its density (E) and Al-Qualamoun (D and F) area. In the square, an example of detecting linear lineament on a satellite image. 1 to 5 density degrees of lineament : 1 = higher density degree, 5 = lower density degree.*

3.3. Cartes du réseau hydrographique

Les cartes de drainage et de la densité de drainage sont présentées sur la figure 4. Celles de la région de Sahel Akkar indiquent l'existence de trois types de drainage (Georgy and Walling, 1973 ; Bilal et Ammar, 2002), soit dendritique, parallèle et en treillis, en relation avec la densité des réseaux. Le type parallèle correspond à une densité faible (figure 4C, a), le type dendritique à une densité moyenne (figures 4C, b, 4D), et le type en treillis à une densité élevée (figure 4C, c). Par ailleurs, le type de drainage varie selon le climat dominant si bien qu'il peut changer au sein d'une même région. Par exemple, dans la région de Sahel Akkar, le type de drainage change de treillis dans le NO où domine un climat semi-humide, à dendritique dans le secteur où domine un climat semi-aride. Il devient parallèle dans le S-E, où le climat dominant est aride. Ces résultats sont confirmés dans la région d'Al-Qualamoun, où domine un climat aride, et ou intervient un type de drainage parallèle (figure 4D). Le mode de drainage contrôle la circulation de l'eau des précipitations et influe donc sur la recharge. Le rôle de ce vecteur est plus clair sur la carte de densité de drainage (figures 4E, F). Cinq zones sont identifiées : la zone 1 représente la densité la plus élevée alors que la zone 5 représente la plus basse. On constate que la zone de basse densité de Sahel Akkar se situe dans le sud-est, où existe un type parallèle de drainage. Ce type de drainage prend un grand développement dans la majorité de la région Al-Qualamoun, où domine un climat aride comparable à celui du sud-est de Sahel Akkar. Ce résultat est très important, car il relie directement le climat et le type de drainage, lui-même lié à la morphostructure.

3.4. Carte de lithologie

Afin de bien comprendre le mouvement souterrain de l'eau des précipitations, ou celui des eaux de surface, il faut prendre en considération la lithologie, car celle-ci influence autant que les fractures la circulation souterraine. Le lien entre les cartes précédentes et le substratum rocheux permet d'établir une carte de lithologie (figure 5). On distingue quatre zones : les roches calcaires, où l'infiltration est facilitée par les systèmes de fractures, suivies par les roches calcaro-gréseuses, le basalte fissuré et, enfin, la marne, qui est la formation la plus étanche.

4. INTERPRÉTATION : UNE NOUVELLE APPROCHE - LA CARTE DE RECHARGE

Tous les facteurs qui contrôlent le mouvement de l'eau des précipitations, à la surface comme en sub-surface, ont été pris en considération : déformations, topographie et lithologie, par l'établissement des cartes thématiques définies ci-dessus. Celles-ci permettent ensembles, à l'aide d'un programme de SIG, d'établir la carte de recharge, document synthétique qui indique pour une région donnée les zones où l'infiltration, donc la recharge des nappes souterraines, est la plus facile. Six zones de degré de recharge sont identifiées (figure 6). Dans la première, le mouvement vertical de l'eau est rapide et le transfert aux réservoirs souterrains ou à la mer est important. Par contre, dans la zone de sixième degré, l'eau circule à la surface ou en profondeur sans former de réservoirs en dehors de petites lentilles ou cavités. Cette dernière zone est étanche et protège très bien l'eau souterraine de la pollution de surface. Les zones de degré intermédiaire représentent la valeur d'étanchéité face aux infiltrations, le degré augmentant en fonction de l'étanchéité.

Dans la région de Sahel Akkar, les zones de recharge les plus importantes se situent dans une zone centrale orientée est-ouest, marquée par les zones denses de linéaments et de drainage (figure 6A). Dans la région d'Al-Qualamoun, la zone de recharge élevée prend la forme d'un système des lentilles de direction NE–SO (figure 6B). Cette carte de recharge a permis de localiser les sites où les eaux souterraines peuvent être pompées à partir de forages, après confirmation à l'aide d'études géophysiques. Sur la figure 7, on montre un exemple de cette localisation des réservoirs souterrains dans la région de Sahel Akkar. Certains de ces sites choisis correspondent à des sources auparavant inconnues, d'autres ont été confirmés à l'aide d'études géophysiques et ensuite au moyen de forages. Il s'avère donc que la carte de recharge permet de mieux gérer les réseaux en eau disponible. Cette carte permettra de mieux aménager les ressources en eaux dans les régions étudiées.

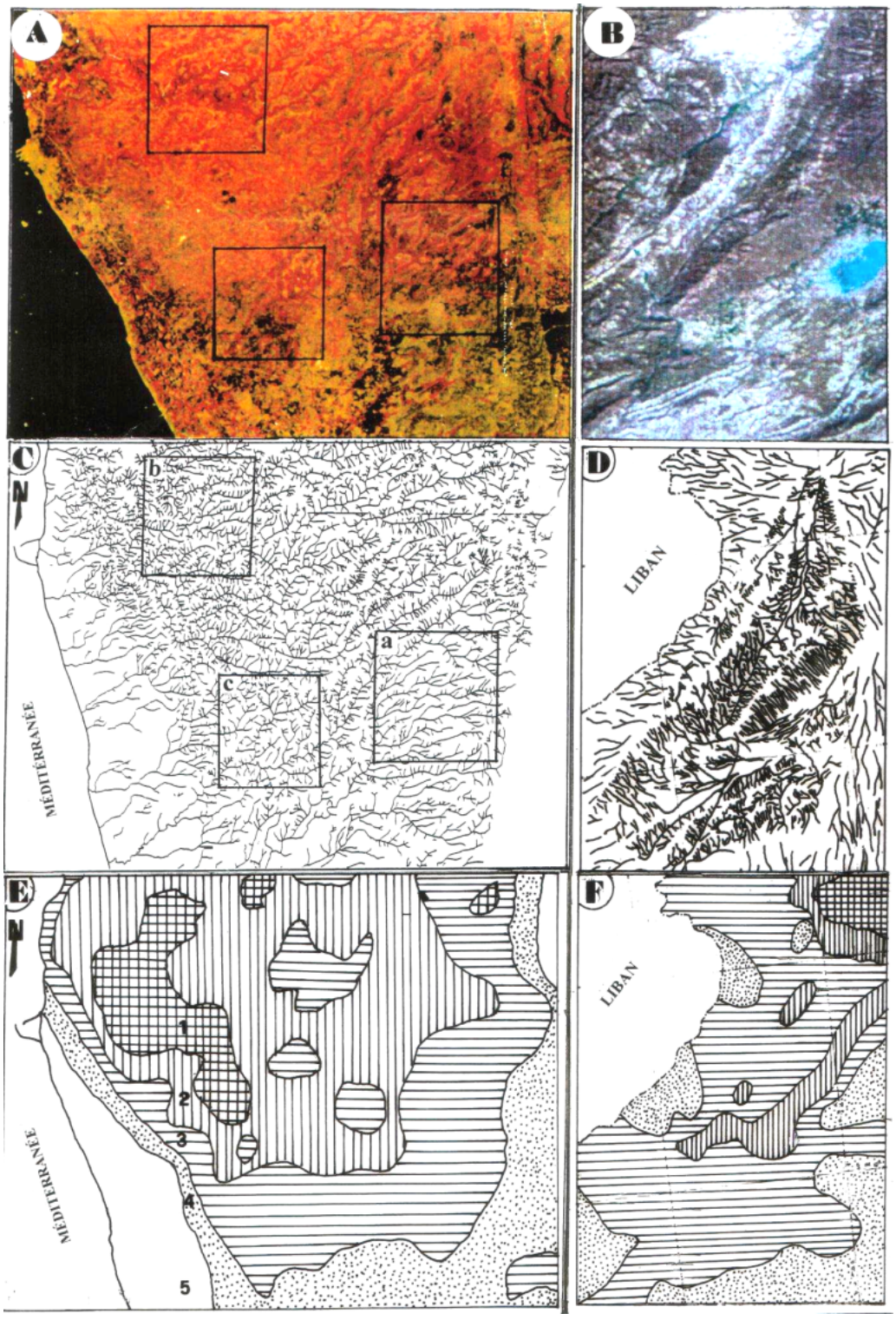


FIGURE 4 Carte hydrographique de la région de Sahel Akkar (C) et de sa densité (E) et de la région d'Al-Qualamoun (D et F). 1 à 5 = degrés de densité de drainage où 1 = degré le plus élevé et 5 = degré le plus faible. *Channel network map of Sahel Akkar (C) area and its density (E) and Al-Qualamoun (D and F) area. 1 to 5 density degrees of drainage : 1 = the higher density, 5 = the lower density.*

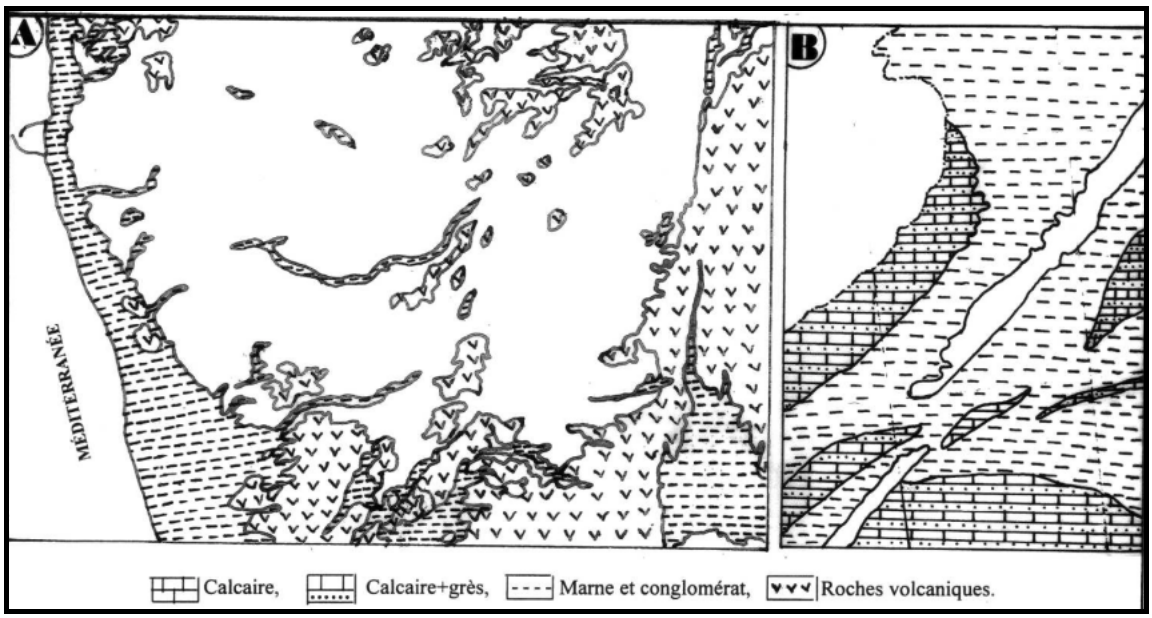


FIGURE 5 Carte de lithologie des régions de Sahel Akkar (A) et d'Al-Qualamoun (B). *Lithology map of Sahel Akkar (A) and Al-Qualamoun (B) areas.*

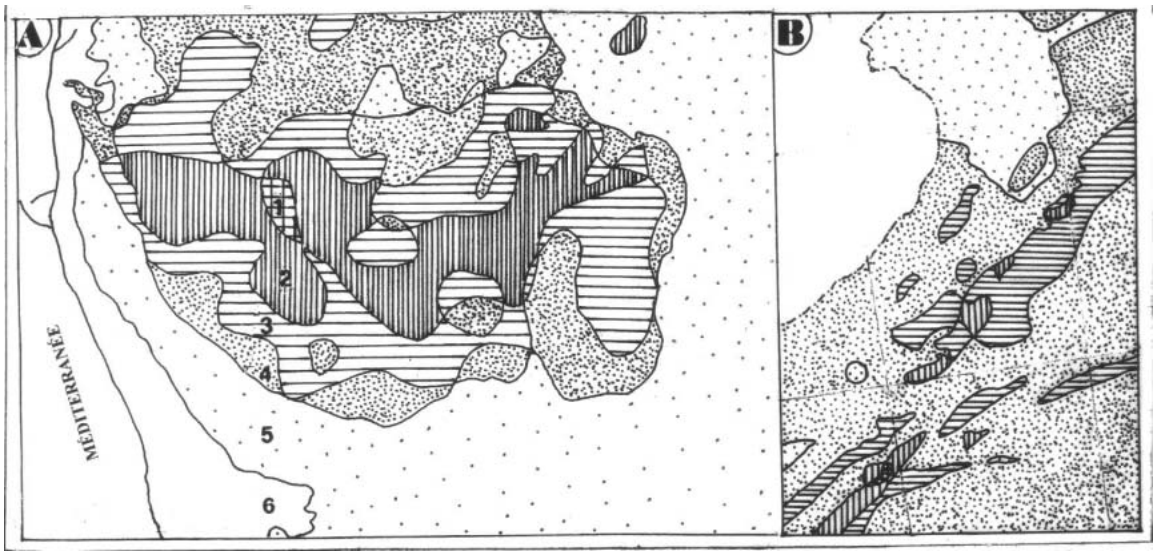


FIGURE 6 Carte de recharge des régions de Sahel Akkar (A) et d'Al-Qualamoun (B). 1 à 6 = degré de recharge où 1 = degré le plus élevé et 6 = degré le plus faible. *Recharge map of Sahel Akkar (A) and Al-Qualamoun (B) areas. 1 to 6 recharge degree : 1 = the higher recharge degree, 6 = the lower recharge degree.*

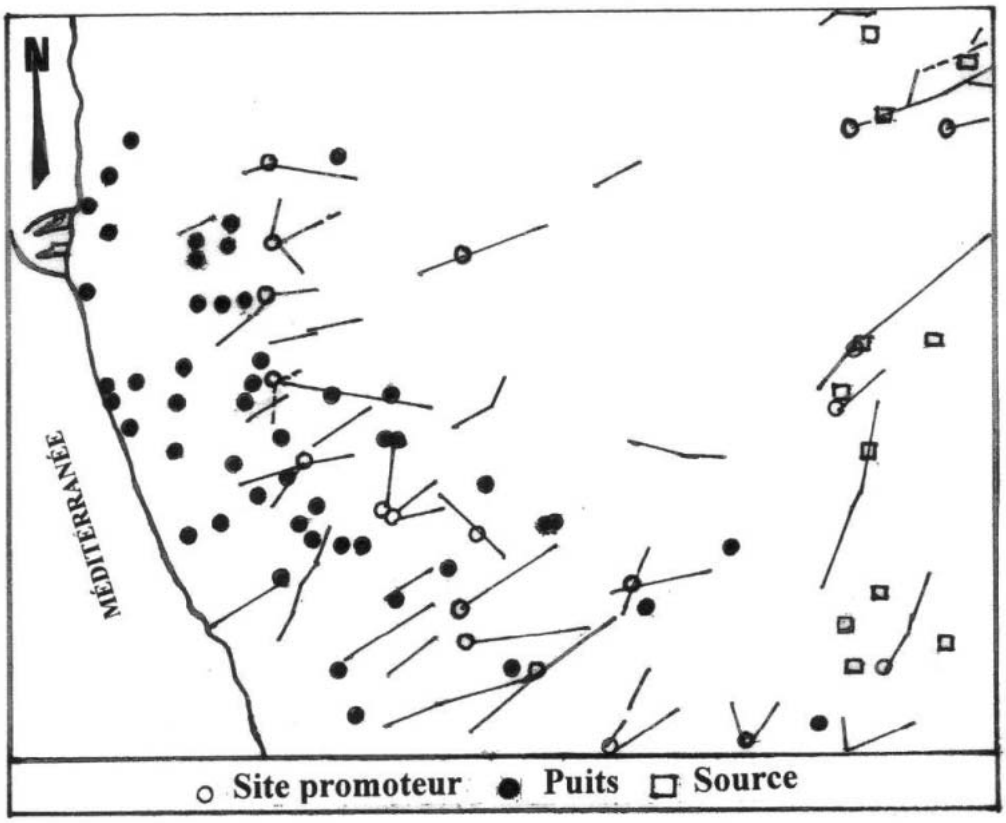


FIGURE 7 Répartition des sources et des puits dans la région de Sahel Akkar et sites prometteurs vérifiés par sondages géophysiques. *Distribution of springs and wells in Sahel Akkar area and verified located promising sites by geophysical sounding.*

5. CONCLUSION

Dans ce travail, on propose une nouvelle approche pour l'aménagement des ressources en eau par l'utilisation de l'imagerie satellitaire. Un modèle cartographique est élaboré, comprenant la réalisation d'un certain nombre de cartes thématiques (tectonique, de linéaments, du réseau hydrographique et lithologique) qui conduisent ensemble à établir une carte de recharge. À la lumière de ce modèle, les ressources en eaux peuvent être mieux aménagées. À la surface, elles seront retenues derrière des barrages, dans des tranchées ou des lacs collinaires, localisés d'après la carte de recharge. En sous-sol, les réservoirs d'eau souterraine sont localisés et exploités à l'aide de forage. En outre, une nouvelle signification est donnée à la classification du réseau hydrographique. On passe en général du type en treillis dans le climat semi-humide, au type dendritique dans un climat semi-aride et, enfin, à un type parallèle en climat aride. La densité de drainage est faible dans ce dernier climat, alors qu'elle est élevée dans le climat semi-humide. En conséquence, la notion de carte de recharge, définie dans ce travail, offre plusieurs indications : le mouvement de l'eau, verticalement et horizontalement, la délimitation des zones perméables et étanches, permettant de mieux protéger les eaux de la pollution et de bien localiser les différents constructions. Les résultats obtenus sont prometteurs pour l'aménagement des ressources en eau dans les territoires semi-arides et arides, où dominent de tels climats. Ils montrent que l'imagerie satellitaire est une méthodologie particulièrement efficace dans ce domaine, en particulier quand on dispose des données de terrain.

Remerciements

Nous remercions les lecteurs anonymes qui ont beaucoup aidé à améliorer la qualité de notre manuscrit.

Références

Albergel, J. et Selmt, S. (1997) Les aménagements intégrés de petits bassins versants avec des petits barrages (lacs collinaires et barrages collinaires) dans la zone semi-aride tunisienne. Workshop on rainfall water, ACSAD, 9-13 June, Rabat, Maroc, 17 p.

Ammar, O. (1993) Geological and hydrological characteristics of Southern Syria. by using remote sensing methods. Thèse de doctorat, Université de Moscou, Russie, 155 p.

Bilal, A. (1997) Étude géologique, structurale, hydrogéologique et possibilités économiques de la partie Nord de la chaîne littorale. General Organisation of Remote Sensing, Damas, Syrie, 67 p.

Bilal, A. (1999) Remote sensing- a good tool to water resources management in the Arab world. 4th Gulf water conference, Water Golf Society, 13-19 Feb., Manama-Bahrain, 17 p.

Bilal, A. (2000) Étude géologique, structurale, hydrogéologique et ressources naturelles de la région Al-Qualamoun. General Organisation of Remote Sensing, Damas, Syrie, 96 p.

Bilal, A. and Ammar O. (1998) The use of remote sensing application to rainfall water management. IGARSS,98 , Los Angeles, U.S.A., 8 p.

Bilal, A. and Ammar, O. (2001a) Non renewable water resources management using remote sensing techniques, on the example of Southern in Syria. Fifth Gulf water conference, Water Golf Society, Doha-Qatar, 24 – 28 March.

Bilal, A. and Ammar, O. (2001b) A proposed model for localization of the small dams using remote sensing applications. Seminar international "Les petits barrages dans le monde méditerranéen" HYDROMED, Tunis, Tunisie, 28-31 mai, 23 p.

Bilal, A. and Ammar, O. (2002a) Rainfall water management using satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 2, p. 207-219.

Bilal, A. and Ammar, O. (2002b) Water resources management in arid and semi arid lands using remote sensing techniques. International conference on water resources management in arid regions, 23-27 mars, Kuwait.

Chorowicz, J. and Fabre, J. (1997) Organization of drainage network from space imagery in the Tanezrouf plateau (Western Sahara)- Implications for recent intracratonic deformations. Geomorphology, n° 21, p. 139-151.

Georgy, K.J. and Walling, D.E. (1973) Drainage basin form and process: A Geomorphological Approach. Edward Arnold, London, 458 p.

Hadipriono, F. C., Lyon, J.G., Li, W.H.T. and Argialas, D.P. (1990) The development of a knowledge-based expert system for the analysis of drainage patterns. Photogrammetry. Engineering Remote Sensing, vol. 56, n° 6, p. 905-909.

Ichoku, C. and Chorowicz, J. (1994) A numerical approach to the analysis and classification of channel networks patterns. Water Resources Research, vol.30, nO 2, p 161-174.

Ponikarov, V.P. (1966) The geological map of Syria. Ministry of Industry, Syria, carte au 1/100000

Ponikarov, V. P. (1967) The geological map of Syria, Explanatory notes on the geological map of Syria. Ministry of Industry, Syria, carte au 1/150 000.

Rossi, G. (1997) Water management strategies to mitigate drought in the Mediterranean dry areas. Workshops on rainfall water management, ACSAD, 9-13 June, Rabat, Morocco, 33 p.

Saad, K.F. (1993a) Assessment of water resources in the Arab region. Part 2, Ground water resources. Arab Center for the Studies in the Semi-arid and dry lands, Damascus, 86 p.

Saad, K.F. (1993b) Water policies in the Arab region, year 2000th. Arab League Educational, Cultural and Scientific Organization, vol. 21, 93 p.

Sykioti, O., Deffontaines, B., Chorowicz, J., Obert, D., Marsily, G.de, Lauverjat, J. et Carvalho, J. (1996) Imagerie numérique multisource de la surface topographique. Application hydrogéologique en milieu karstique – Verneuil-sur-Avre (Perche). Bulletin de la Société Géologique de France, vol. 167, n° 2, p 269-284.

Travaglia, C. and Ammar, O. (1998) Groundwater exploration by satellite remote sensing in the Syrian Arab Republic. FAO and General Organization of Remote Sensing, Rome, 33 p.