

**CARACTERES DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE A PARTIR
D'IMAGES SATELLITE : IMPLICATION POUR LA GESTION DES
RESSOURCES EN EAUX**
**CHARACTERISTICS OF THE HYDROGRAPHIC NETWORK IN
SYRIA FROM SATELLITE IMAGES. IMPLICATIONS FOR THE
MANAGEMENT OF WATER RESOURCES**

Ahmad BILAL. Université de Damas. B.P. 9487. Damas. SYRIE. bilka@scs-net.org.

RESUME: La gestion des ressources en eau revêt une grande importance dans les pays méditerranéens, arides et semi-arides. Parmi les techniques récentes de gestion des ressources en eau, l'imagerie satellitaire apparaît comme l'une des plus adaptées. A partir des images spatiales, on a pu établir des cartes de drainage permettant de suivre l'hétérogénéité de la typologie du réseau hydrographique dans des zones géologiques, géomorphologiques et surtout climatiques (humide, sub-humide, semi-aride et aride) de Syrie. La connaissance des trajets d'écoulement permet d'optimiser le réseau de petits barrages et lac collinaires qui sont les structures les mieux adaptées à la région méditerranéenne pour intercepter les eaux de surface. Dans ce travail, les images satellitaires TM de Landsat 1995, ont été utilisées, après correction à l'aide du programme ERDAS utilisant l'ensemble des bandes. Les résultats ont été obtenus pour trois régions syriennes, qui reflètent les caractéristiques de la totalité du pays : l'une humide et sub-humide, (le littoral septentrional), la seconde semi-aride, (Sahel Akkar), et la dernière aride, (Al-Qualamoun). Une carte de zonation d'hétérogénéité du réseau hydrographique syrien est proposée, ainsi que les implications sur la gestion des ressources en eau dans ce pays méditerranéen.

Mots clefs: réseau hydrographique, aménagement des eaux, Syrie.

ABSTRACT: A good management of water resources is of major interest in the Mediterranean countries. Satellite imagery is one of the most advanced techniques for a better management of water resources. From space imagery, drainage maps have been established for several areas of Syria. Obtained maps allow following the heterogeneity of hydrographical networks in different geologic, geomorphologic, and climatic zones (humid, semi-humid, arid and semi-arid). Therefore, knowing the surface water

itineraries, permit to optimize the network of small dams and hillside ponds, which are the most efficient structures to intercept water in the Mediterranean regions. Landsat TM (1995) images have been used, after correction by the ERDAS software using all bands. Results for three Syrian areas, representative of the whole country are presented: the humid or semi-humid Northern coast, the semi-arid Sahel Akkar and the arid Al-Qalamoun area. A zonation map of network hydrographic heterogeneity is proposed, and implications for the management of the water resources for this Mediterranean country are discussed.

Key words: hydrographic network, water management, Syria

INTRODUCTION

Le problème de l'eau reste une des préoccupations majeures des nations et des peuples, en particulier pour les pays arabes, où domine un climat semi aride et aride. La sécurité et une bonne gestion de l'eau y revêtent une grande importance (Rossi, 1997 ; Albergel et Slemt, 1997 ; Hreiche *et al.*, 2007). L'imagerie satellitaire est un outil efficace pour l'évaluation et le suivi des ressources en eau (Bilal et Ammar, 2002, 2003 ; Cudennec *et al.*, 2007).

La morphologie du réseau hydrographique dépend de nombreuses conditions, en particulier géologiques, climatiques et anthropiques (Schlumberger *et al.*, 2001; Cudennec *et al.*, 2002 ; Nasri *et al.*, 2004). Par ses caractéristiques, sa morphologie et son extension, ce réseau joue un rôle très important puisqu'il trace le trajet des eaux de surface (Moussa *et al.*, 1993 ; Touya, 2007). La carte de drainage établie d'après les images satellite (Bilal et Ammar, 2002), permet de localiser des constructions adaptées : barrages, tranchées, lacs collinaires... etc, pour intercepter les eaux de surface (Bilal et Ammar, 2001 ; Albergel *et al.*, 2004 ; Benlaoukli et Touaibia, 2004 ; Cudennec *et al.*, 2004 ; Nasri *et al.*, 2004a ; Nasri, 2007).

La dimension du réseau hydrographique varie depuis les très petits fleuves côtiers, le type le plus largement répandu en Syrie et ailleurs, aux grandes rivières (Chorowicz et Fabre, 1997 ; Novicen et Arousseau, 2008). Ses caractéristiques et son rôle dans la gestion des ressources en eaux ont fait l'objet de nombreuses études (Hubert, 2001). La littérature internationale mentionne de nombreuses classifications des réseaux hydrographiques (Howard, 1967 ; Gregory and Walling, 1973 ; Ichoku et Chorowicz, 1994), sur la base de critères très variés.

La méthodologie adoptée consiste en premier lieu, à établir les cartes de drainage dans les régions étudiées, selon les contextes géologiques, géomorphologiques et climatiques (Hadipriono *et al.*, 1990 ; Bilal et Ammar, 2002), puis à dresser une typologie du réseau hydrographique afin de déterminer la meilleure procédure répondant au besoin d'une gestion optimale des précipitations. Les conditions déterminantes sont, en premier lieu, la géomorphologie et l'étanchéité de l'édifice adopté.

Ce travail est basé sur l'analyse de l'imagerie spatiale avec application sur le terrain, pour le choix des procédures appropriées pour intercepter les écoulements d'eau de surface avant leur arrivée en mer ou leur infiltration. C'est ainsi que de nombreux sites ont été choisis pour établir des barrages, des tranchées ou lacs collinaires.

REGIONS ETUDIEES

L'objet de ce travail est donc la connaissance de la typologie du réseau hydrographique en Syrie, selon les normes internationales (Gregory and Walling, 1973). Dans ce but, trois régions ont été étudiées : le Littoral (climat semi-humide), le Sahel Akkar (climat semi-aride) et l'Al-Qualamon (climat aride) (Fig.1), dont la géologie et la géomorphologie sont bien connues (Ponikarov, 1967).

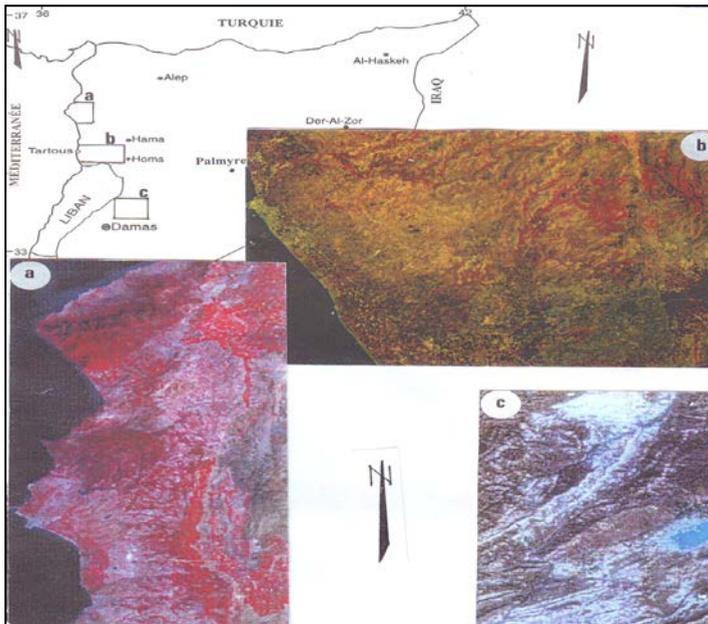


Fig.1. Carte montrant les trois régions étudiées, et leurs photos satellitaires : le Littoral (a), Sahel Akkar (b), Al-Qualamoun (c).

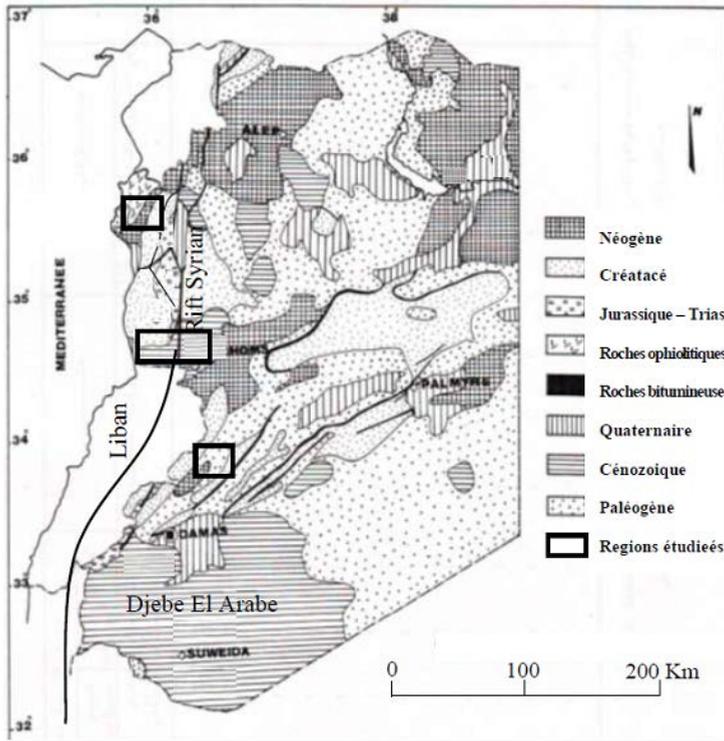
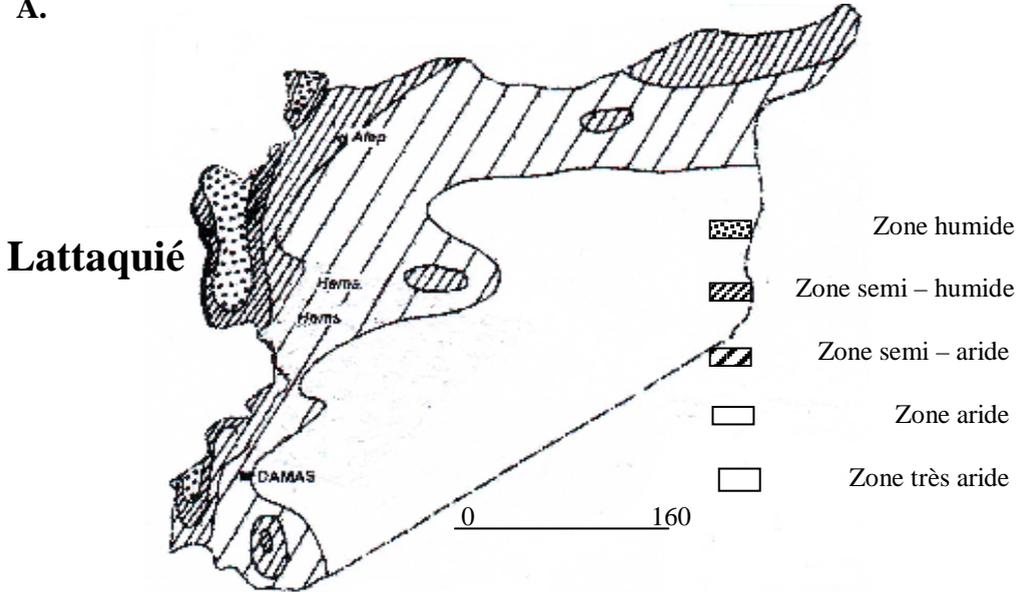


Fig.2. Carte géologique de Syrie montrant la localisation des régions étudiées et leurs formations lithologiques.

La tectonique varie d'une région à l'autre. Elle est active dans le littoral, présentant des failles et des cassures, liées au complexe ophiolitique et au rift syrien. Dans les deux autres régions, la tectonique est plus calme. On y rencontre des sources et des oasis, dans des fissures ou petites failles. La morphologie est accidentée sur le littoral, où la variation d'altitude entre le sommet des montagnes et les fonds de vallées dépasse souvent 1000 mètres, tandis que dans les deux autres régions la morphologie est plus régulière, dominée par des bassins sableux quaternaires, traversés de petites dépressions à l'emplacement des anciens réseaux hydrologiques. Les formations géologiques les plus anciennes sont des calcaires et dolomies d'âge Jurassique, surmontés de calcaires Cénomaniens et Turoniens (Crétacé). Le Néogène affleure au-dessus du Turonien, constitué par des sédiments marins (calcaires et marnes) ou des dépôts continentaux sablonneux. Le Quaternaire est représenté par des sédiments littoraux récents sablonneux et

des grès. Des formations basaltiques sont localisées le long des fissures transversales au rift syrien, en filons ou en petites coulées de laves (Fig.2).

A.



B.

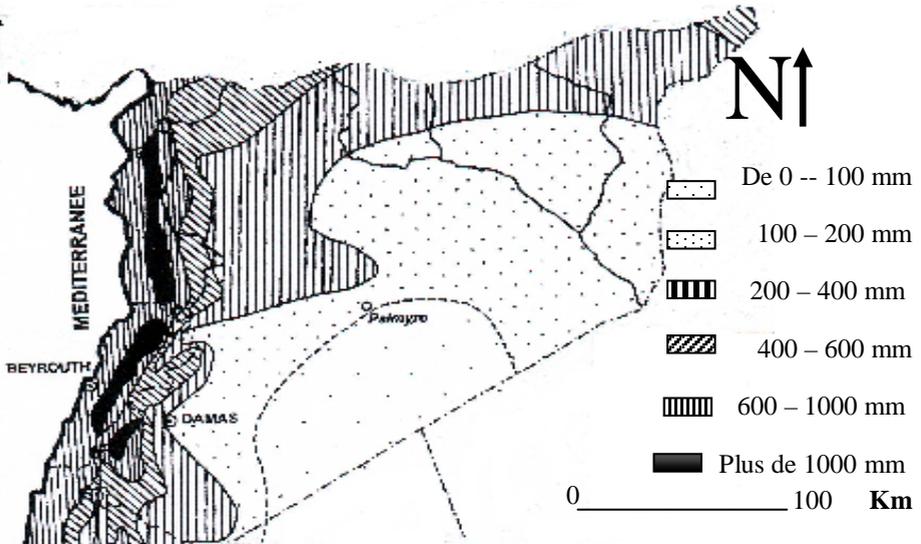


Fig.3-A : Carte bioclimatique de la Syrie. **B** : Carte des précipitations annuelles en Syrie.

Le climat en Syrie est très varié, d'humide à très aride. On peut distinguer trois grandes régions climatiques en Syrie (Fig.3,A et B, Bilal et Kassem, 1998). Le Littoral a un climat humide à semi-humide, Sahel Akkar a un climat semi-humide à semi-aride, Al-Qualamon a un climat aride à très aride, ce qui permet de suivre le développement de la typologie du réseau hydrographique en fonction du climat.

Dans le littoral septentrional, la température varie de 5 à 12 °C en hiver, et de 20 à 30 °C en été. En été, l'évaporation est moyenne, et la pluviométrie est de l'ordre de 500 à 1200 mm/an. Dans le Sahel Akkar, la température varie de 10° à 15°C en hiver, de 25° à 30°C en été. L'évaporation est relativement élevée avec une pluviométrie de l'ordre de 300 à 500 mm/an. A Al-Qualamoun, la température varie de -1° à +15°C en hiver et de 30° à 38°C en été ; donc, l'évaporation y est très élevée et la pluviométrie est de l'ordre de 150 à 200 mm/an.

MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE

L'essentiel de ce travail d'établissement des cartes hydrographiques est basé sur l'imagerie satellitaire. Une image satellitaire TM de Landsat 1995 a été utilisée et corrigée à l'aide du logiciel ERDAS (9.2), en utilisant sept bandes spectrales, six bandes visuelles de 0,4-1 micron-mètre, et une thermique de 1,3-1,4 micron-mètre (Bilal et Ammar 2002).

Une combinaison appropriée entre ces bandes est effectuée lors de l'interprétation, avec une échelle variant de 1/50000-1/100000 selon la clarté de l'imagerie (Bilal et Ammar, 2002).

La classification (typologie) des réseaux hydrographiques est connue depuis le dernier quart du vingtième siècle. Elle a d'abord été proposée par Howard (1967) et Gregory and Walling (1973), puis elle a été développée par O'Callaghan and Mark (1984), Argialas *et al.* (1988), Hadipriono *et al.* (1990), Chorowicz and Fabre (1997), Bilal et Ammar (2002 ; 2003). Cette typologie est basée sur des critères comme l'hydromorphométrie, la morphologie et la densité (Howard, 1967 ; Moussa et Bocquillon, 1993).

Dans ce travail, nous avons utilisé la classification de Gregory et Walling (1973), la plus fréquemment adoptée. Elle distingue six types de réseaux hydrographiques : dendritique, parallèle, rectangulaire, en treillis, en pennage et non classifié (Fig.4). La morphologie du réseau hydrographique et sa densité est alors établie en fonction des conditions géologiques et climatologiques.

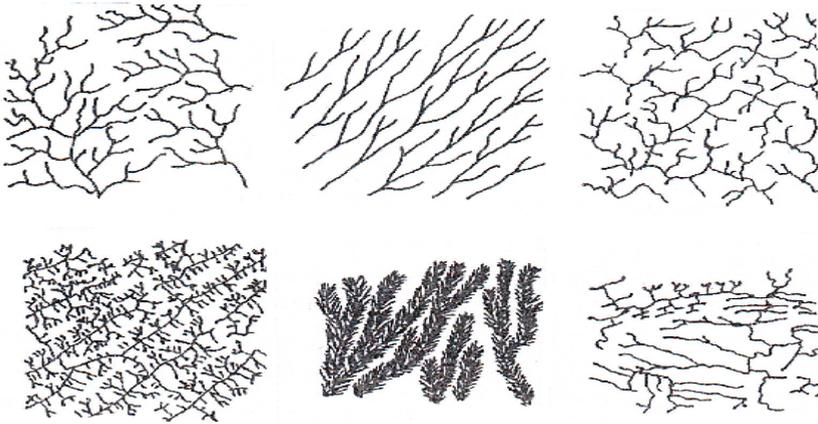


Fig.4. Classification internationale du réseau de drainage (Gregory and Walling, 1973)(de haut en bas et de gauche à droite) : 1, dendritique ; 2, parallèle ; 3, rectangulaire ; 4, treillis ; 5, pennage ; 6, non classifié.

RÉSULTATS

La typologie des réseaux hydrographiques a été définie dans les trois régions étudiées en tenant compte des conditions géologiques, géomorphologiques et climatologiques. Comme ces régions sont représentatives de la totalité du pays, nous avons extrapolé la carte de zonation hydrographique à l'ensemble du pays.

Les cartes de drainage ont été établies à partir de l'image satellitaire. Elles sont présentées sur la figure 5 (A, B, C). Les réseaux hydrographiques développés dans les trois régions sont ainsi décrits et classés en comparaison avec la classification de Gregory and Walling (1973).

Dans la région Littoral se développent deux types de drainage (Fig. 5A), un type en treillis, qui correspond à une densité élevée et un climat humide à semi-humide dans le Nord (a sur Fig.5A) et un type dendritique de densité moyenne dans le Sud, sous climat semi-humide à semi-aride (b sur Fig.5A). Dans cette région la tectonique est plutôt active ; les formations géologiques sont variées, dominées par des formations calcaro-dolomitiques, et la géomorphologie est accentuée. Ces conditions climatiques, géologiques et géomorphologiques sont favorables aux types treillis et dendritique.

Les cartes de Sahel Akkar indiquent l'existence de trois types de drainage : en treillis, dendritique, et parallèle. Le type en treillis correspond à une densité de drainage élevée, liée au climat humide à semi-humide. Ce type se développe à l'Est, qui présente des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et climatologiques proches de la partie Nord du littoral. Le type dendritique correspond à une densité moyenne, liée à un climat semi-

humide à semi- aride, comparable à ce qui apparaît dans la partie Sud du littoral. Enfin, le type parallèle correspond à une densité faible, en climat aride à très aride (Fig.5B, a, b, c successivement).

Dans la région Al-Qualamoun, où domine un climat aride à très aride, voire désertique, le drainage est de type parallèle, et à densité faible (Fig.5C, b). Rappelons que la géologie dans cette région consiste en des formations sablonneuses (marines et continentales), d'âge Néogène à Quaternaire. Il s'avère donc que la typologie de drainage est liée aux conditions géologiques, géomorphologiques et surtout climatologiques qui varient d'une région à l'autre, voire à l'intérieur d'une même région (Littoral et Sahel Akkar. On peut extrapoler ces résultats à l'ensemble du territoire syrien :

- le type en treillis se forme dans les régions humides à semi-humides, dans lesquelles la géologie et la géomorphologie sont variées, actives et accentuées ;
- le type dendritique domine dans les régions semi-humides à semi-arides ;
- le type en treillis existe dans les régions désertiques arides et très arides.

La figure 6 illustre ces différents types des réseaux hydrographiques (a, b, c) pour les trois régions considérées, alors que la figure 7 représente tout le pays. Trois zones sont identifiées :

- une zone (A), bande étroite côtoyant le littoral avec le type en treillis ;
- une zone (B), parallèle à la première, mais plus large, dans laquelle se développent deux types, soit en treillis (dans les régions Ba), soit dendritique (dans les régions Bb) ;
- une troisième zone (C), qui couvre, vers le Sud-est, la majorité du pays, dans laquelle se développe le type parallèle.

Les résultats obtenus permettent bien le choix et la localisation de l'édifice le plus convenable pour intercepter l'eau en surface. Ceci implique :

- une géomorphologie appropriée,
- un écoulement principal dans une vallée étroite, qui se termine par une large surface dont le fond est peu incliné, pour réduire la hauteur du mur de l'édifice, et par conséquent les dépenses, à l'aide des modèles numériques d'élévation (DEM), en 3D,
- une infiltration nulle ou très faible, traduite par une étanchéité très élevée, et une fissuration absente ou trop faible pour garder l'eau très longtemps (Bilal et Ammar, 2001).

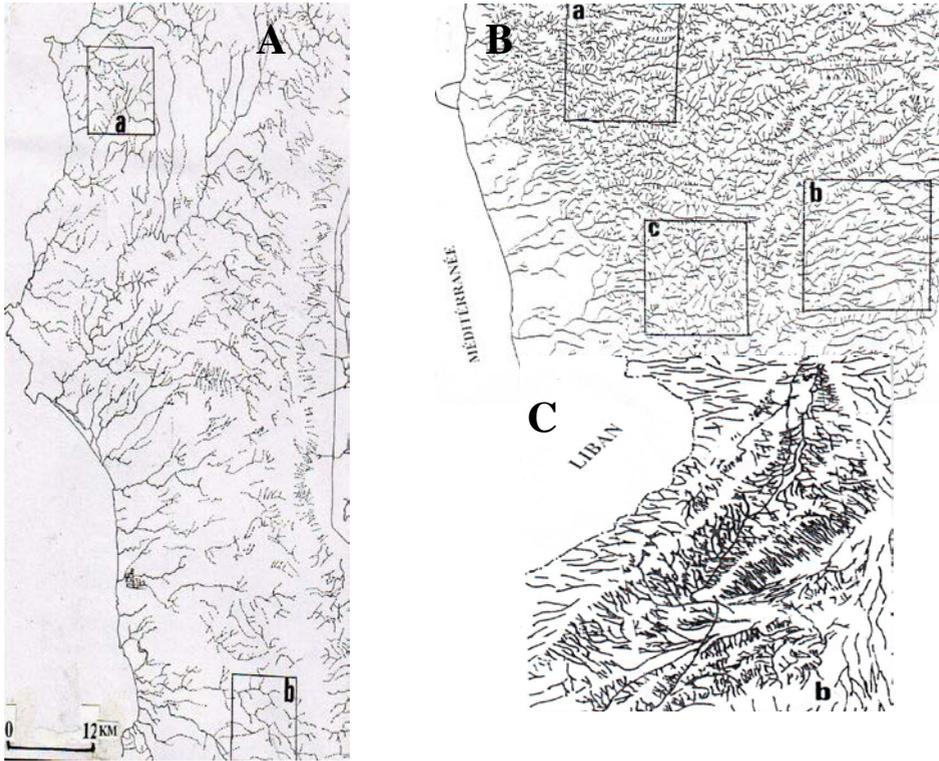


Fig.5. Cartes de drainage des trois régions étudiées : le Littoral (A), Sahel Akkar (B), et Al-Qualamoun (C), montrant l'évolution des réseaux de drainage. a : type treillis ; b : type parallèle ; c : type dendritique.

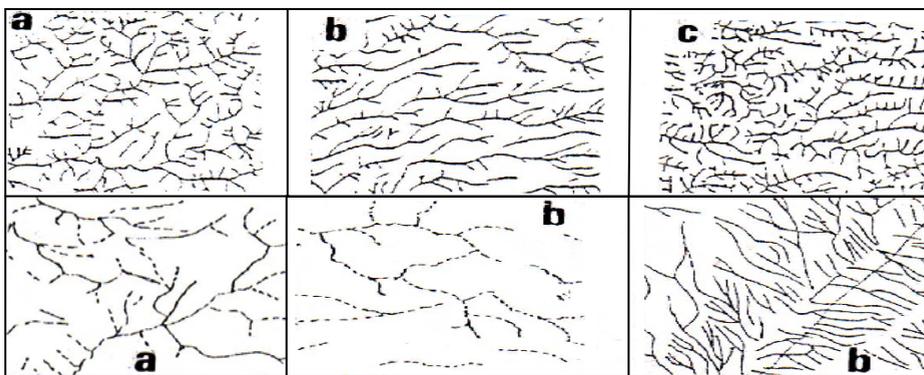


Fig.6. A (haut)-Typologie des réseaux de drainage dans les régions étudiées. B (bas)- Une approche schématique de l'évolution de la typologie des réseaux hydrographiques en Syrie.

Dans le cas du réseau hydrographique de type parallèle, ce sont les mares et tranchées qui sont adoptées pour retenir l'eau. Car la morphologie est douce, et la pluviométrie est faible mais peut être occasionnellement accentuée.

Par contre dans le cas des réseaux dendritiques ou en treillis, on préférera des barrages ou tranchées ou la morphologie est accentuée, montagneuse avec des vallées favorables a ces édifices (Bilal et Ammar 2001).

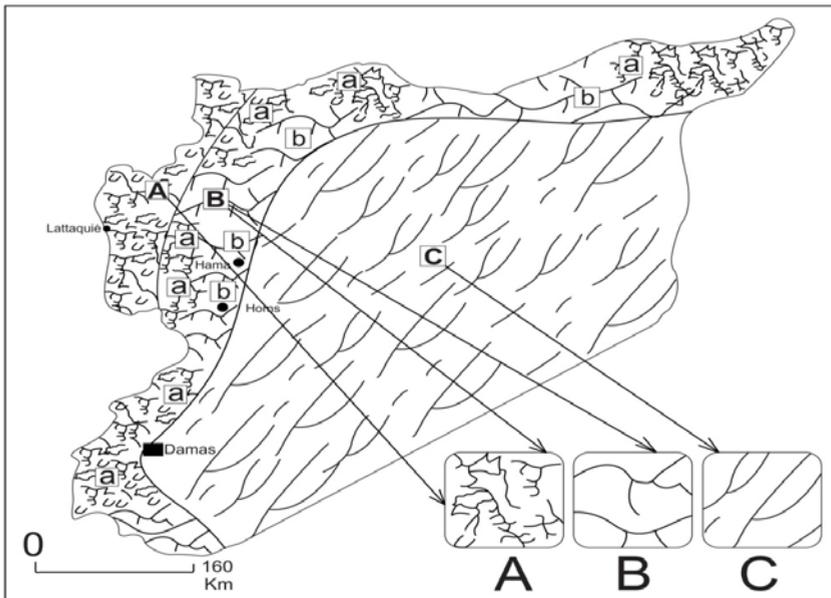


Fig.7. Une approche cartographique de zonation de la typologie du réseau hydrographique de la Syrie : A-zone du type en treillis ; B-zone de type en treillis (régions Ba), et de type dendritique (régions Bb) ; C-zone de type parallèle.

CONCLUSION

Une approche pour l'aménagement des ressources en eaux à partir de l'imagerie satellitaire est présentée. Il s'agit de définir la typologie de réseaux hydrographiques en fonction des contextes géologiques, géomorphologiques et climatologiques, afin de bien choisir la technique appropriée pour intercepter les eaux de ruissellement. L'étude menée sur trois régions, dont les caractéristiques sont variées et représentatives de la totalité du pays, a permis de distinguer trois types de réseaux hydrographiques : en treillis, dendritique, et en parallèle. On passe ainsi du

type en treillis dans le climat humide, au types en treillis et dendritique dans un climat semi-humide à semi-aride, et enfin à un type parallèle en climat aride à très aride. Ces résultats permettent d'extrapoler une carte de zonage du réseau hydrographique de l'ensemble du pays. Cet outil participe au choix et à la localisation du meilleur aménagement pour intercepter les écoulements de ruissellement. Les résultats obtenus sont prometteurs pour l'aménagement des ressources en eaux dans les territoires arides et semi-arides, très répandus dans les pays méditerranéens.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albergel, J. & Slemt, 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*, 17 p, Rabat, Morocco.
- Albergel, J., Nasri, S. & Lamachère, J.M. (2004) Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour Méditerranéen. *Revue des Sci. de l'eau*, 17(2):133-151.
- Argialas, D.P., Lyon, J.G. & Mintzer, O.W. (1988) Quantitative description and classification of drainage patterns. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 54: 505-509.
- Benlaoukli B. et Touabia B. (2004). L'expérience algérienne dans le domaine des études de retenues collinaires. *Revue des Sci. de l'eau*, 17(2):153-162.
- Bilal, A. & Ammar, O. (2001) A proposed model for localization of the small dams using remote sensing applications. *Séminaire International "Les petits barrages dans le monde méditerranéen"*. Tunisie 28-31 Mai.
- Bilal, A. & Ammar, O. (2002) Rainfall water management using satellite imagery. *International Jour. Remote Sensing*, vol.23, 2: 207-219.
- Bilal, A. & Ammar, O. (2003) 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. *J. de Télédétection*, vol.3, 1: 49-58.
- Bilal, A. & Kassem, A.R. (1998) Conditions hydrogéologiques de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de l'Al Badiya (Syrie). *Hydrogéologie*, no 3: 27-34.
- Chorowicz, J. & Fabre, J. (1997) Organization of drainage network from space imagery in the Tanezrouf plateau (Western Sahara). Implications for recent intra - cratonic deformations. *Geomorphology*, 21: 139-151.
- Cudennec, C., Gogien, F., Bourges, J., Duchesne, J. & Kallel, R. (2002) Relative roles of geomorphology and water input distribution in an extreme flood structure. *IAHS publ.*, 271: 187-192.

- Cudennec, C., Sarraza, M. & Nasri, S. (2004) Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. *Revue des Sci. de l'eau*, 17(2): 181-194.
- Cudennec, C., Leduc, C. & Koutsoyiannis, D. (2007) Dry land hydrology in Mediterranean regions -a review. *Jour. Hydro. Sci.*, 52(6): 1077-1087.
- Gregory, K.J. & Walling, D.E. (1973) *Drainage basin form and process: a Geomorphological Approach*. Edward Arnold, London, 458p.
- Hadipriono, F.C., Lyon, J.G., Li, W.H.T. & Argialas, D.P. (1990) The development of a knowledge-based expert system for the analysis of drainage patterns. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 56 (6): 905-909.
- Howard, A.D. (1967) Drainage analysis in geologic interpretation. *Bull. Am. Assoc. Pet. Géol.*, 5(11): 2246-2259.
- Hreiche, A., Najem, W, & Bocquillon, C. (2007) Hydrological impact simulation of climatic change on Lebanese coastal rivers. *Jour. Hydro. Sci.*, 52(6): 1119-1133.
- Hubert, C. (2001) Evolution des réseaux hydrographiques au contact Cévennes-Grands Causses Méridionaux ; conséquence sur l'évaluation de la surrection tectonique. *Bull. Soc.Geol. Fr.*, 172, 5: 549-562.
- Ichoku, C. & Chorowicz, J. (1994) A numerical approach to the analysis and classification of channel networks patterns. *Water Resources Research*, vol.30, 2: 161-174.
- Moussa, R. & Bocquillon, C. (1993) Morphologie fractale du réseau hydrographique. *Jour des. Sci. Hydro.*, 38(3): 187-201.
- Nasri, S. (2007) Caractéristiques et impacts hydrologiques de banquettes en cascade sur un versant semi-aride en Tunisie Centrale. *Hydro. Sci. Jour.*, 52(6): 1134-1145.
- Nasri, S., Albergel, J., Berndtsson, R. & Lamahère, J.M. (2004a) Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Rev. Sci. Eau* 17(2): 265-289.
- Nasri, S., Cudennec, C., Albergel, J. & Berndtsson, R. (2004b) Use of a geomorphological transfer function to model design floods in small hillside catchments in semi-arid Tunisia. *Journal of Hydrology*, 287 (1-4): 197-213.
- Novicen, E. & Aourousseau, P. (2008) *Réseau hydrographique et bassins versants*. www.eaubretagne.fr
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. (1984) The extraction of drainage network from digital elevation data. *Computing and Vision Graphics Image Processing*, 28: 323-344.
- Ponikarov, V.P. (1967) *The geological map of Syria, Explanatory notes on the geological map of Syria, Scale 1/150 000*. Ministry of Industry, Syria.

- Rossi, G. (1997) Water management strategies to mitigate drought in the Mediterranean dry areas. *Workshop on rainfall water management*, 33p. Rabat, Morocco.
- Schlumberger, O., Sagliocco, M. & Proteau, J.P. (2001) Biogéographie du silure : causes hydrographiques, climatiques, et anthropiques. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 359: 485-498.
- Touya, G. (2007) Un processus de sélection du réseau hydrographique, basé sur la détection de structures. *CFC*, n.194, 46-56.

&&&