SIMULATION DU COMPORTEMENT DES ECOULEMENTS D'EAU EN UTILISANT LE RESEAU HYDROLOGIQUE D'UN BASSIN VERSANT : CAS DE L ´OUED BENIMESSOUS, ALGÉRIE

Faiza HOCINE, Mostefa BELHADJ AISSA,
Fifa HADDOUD, Mounira OUARZEDDINE & Aichouche BELHADJ AISSA

Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement
Faculté d'Electronique et d'Informatique,
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB) Alger Algérie
Courriel : h.belhadj@mailcity.com

Soumis le 2 avril 2007 ; révisé le 15 avril 2008 ; accepté le 7 mai 2008 - © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 1, p. 179-191

Résumé

L'Algérie, pays vaste, connu pour ses chaînes montagneuses est confronté aux problèmes des écoulements et des ruissellements des cours d'eau et d'accumulation des eaux dans les zones à fortes dépressions. Un des aspects les plus importants dans la gestion des ressources en eau est le réseau hydrographique des différentes régions. Dans ce contexte, le travail que nous présentons est une contribution dans une démarche méthodologique de traitement des images satellitaires et d'extraction de réseaux hydrologiques des bassins versants à partir de Modèles Numériques de Terrain (MNT). Nous l'avons appliquée sur une région située à l'Ouest d'Alger (la capitale) et nous nous sommes intéressés, à l'aspect applicatif de cette méthodologie pour l'étude du bassin versant de Oued Benimessous situé dans cette région. Dans la première étape, nous avons développé un processus interférométrique de génération de MNT à partir d'un couple d'images radar ERS1/2 en tandem puis nous avons calculé les paramètres de géomorphométrie. Pour la description du comportement des écoulements d'eau, nous avons déterminé, dans la deuxième étape, la carte des directions d'écoulement selon le modèle D8, la carte de drainage local et global ainsi que le réseau hydrologique. Nous avons proposé ensuite, une procédure de simulation avec différentes situations en modifiant la quantité d'eau des précipitations.

***Mots clés** : Images satellitaires, MNT, paramètres hydrologiques, bassin versant, SIG, simulation.*

Abstract:

Algeria, vast country, known for its mountain chains is confronted with problems related to runoff, strong rivers flow and flooding in depressions zones. One of the most important aspects for the management of water resources is the good knowledge about the hydrographic network. In this context, the work presented is a contribution for a methodological approach using satellite image data for the generation of Digital Terrain Models (DTM) and the extraction of hydrological networks parameters. We have applied this methodology in a study of the Oued Benimessous drainage area located to the west of Algiers(the capital).In the first step, we have developed an Interferometric processor for the generation of a DTM from a radar image couple of ERS1 / 2 tandem data set and we calculated geomorphometry parameters. For the description of the water runoff we determined, in the second step, flow map directions using the D8 model, local and global drainage and the hydrological network. Also, we have proposed, a simulation of different weather situations by changing precipitation water quantities.

***Key words**: satellite imagery, DTM, hydrological parameters, catchments area, GIS, simulation*

INTRODUCTION

La gestion de la réserve en eau dans le monde est devenue actuellement une des préoccupations majeures des scientifiques, des gestionnaires et des décideurs au plus haut niveau gouvernemental. L'Algérie, pays vaste, connu pour ses chaînes montagneuses (l'atlas tellien et l'atlas saharien) est confrontée aux problèmes des écoulements et des ruissellements des cours d'eau qui se perdent dans la nature et aux problèmes d'accumulation des eaux de manière optimale, dans les zones à fortes dépressions. Avec la diminution des précipitations annuelles sur le pays, un grand nombre d'applications nécessitent une gestion efficace des ressources en eau, telles que la gestion de périmètres irrigués, le contrôle des crues et des inondations pendant les fortes pluies occasionnelles, l'implantation de barrages collinaires pour lutter contre la sécheresse, l'étude des zones à versants instables et à risque de glissement de terrain, l'étude de l'érosion, etc. Ces préoccupations constituent des enjeux majeurs pour la population tant sur le plan de la prévention des catastrophes que sur le plan de l'indispensabilité de l'eau. Un des aspects les plus importants dans l'obtention, la gestion et l'exploitation des ressources en eau est le réseau hydrographique des bassins versants. L'intensité et la densité des écoulements, dans un bassin versant, distribués dans l'espace et dans le temps peuvent avoir deux impacts : un impact positif pour alimenter les réserves en eau et un impact négatif s'ils se manifestent sous forme d'inondations et d'écoulements intenses.

Dans ce contexte, le travail que nous présentons s'inscrit dans une démarche méthodologique de traitement d'images satellitaires et de cartographie des paramètres topographiques et hydrographiques des bassins versants. En effet, le développement de la technologie spatiale a permis une meilleure connaissance et une exploitation efficace du cycle de l'eau par l'utilisation des images satellitaires optiques et radar. Ces images sont exploitées, principalement pour la modélisation de la topographie à travers les Modèles Numériques de Terrain générés par la technique interférométrique. La cartographie du réseau hydrographique à partir de ces MNT a un double objectif : le premier est la détermination des descripteurs de la topographie (pentes, crêtes, vallées, etc.) des bassins versants et de leurs paramètres hydrologiques afin de cartographier les zones de récupération des ruissellements et le deuxième est la modélisation synthétique de la géomorphologie des bassins versants pour une meilleure connaissance de l'occupation du sol (Nanée C., 2004). Cette modélisation permet de prévoir la réponse des bassins versants à des évènements pluvieux et de connaître l'évolution au cours du temps de ses caractéristiques d'écoulement.

Le bassin hydrographique, ou bassin versant est l'élément essentiel dans toute étude hydrologique associée à la topographie d'une région donnée. Il se définit comme une portion de la surface terrestre à l'intérieur de laquelle les pentes topographiques amènent tout le ruissellement qui s'y produit vers un seul et même exutoire. L'exutoire d'un bassin est le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux drainées par le bassin. Dans un bassin versant, les pentes définissent la trajectoire des écoulements et l'organisation du drainage des versants. A cet effet, l'ensemble des cours d'eau, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement linéaire de la surface topographique représente le réseau hydrologique. Il peut prendre une multitude de formes, sa diversité est due à quatre facteurs principaux : la pente du terrain, la géologie, le climat et la présence humaine (Xiaomin C., et *al*, 2004). L'approche méthodologique permet d'extraire les paramètres topographiques, à partir de modèle numérique de terrain, de cartographier le réseau hydrologique des bassins versants et de développer des procédures de simulation du comportement de ce dernier en fonction de l'intensité des crues et de l'infiltration qui dépend de l'occupation des sols (nature du couvert végétal, urbanisation, obstacles artificiels, etc..).

Nous décrivons, dans la première partie, le processus interférométrique et nous donnons un exemple d'application sur une région située à l'ouest d'Alger (capitale d'Algérie). La deuxième partie, portera sur l'extraction du réseau hydrologique, nous présentons les procédures développées, les résultats obtenus avec le logiciel « FOUGGARA » que nous avons réalisé en langage IDL ((Interactive Data Language) sous environnement Windows. Nous donnons, à la fin de cette partie les principales caractéristiques du bassin versant étudié. Dans la troisième partie, nous présentons le codage en mode vecteur du réseau hydrologique, les résultats et les procédures de simulation que nous proposons dans l'espace raster.

1. INTERFÉROMÉTRIE ET MNT

Un Modèle Numérique de Terrain est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude. Il fournit des renseignements non seulement sur les formes du relief mais également sur leur position. La pente et l'orientation sont obtenues à partir des dérivées premières du MNT. Les dérivées secondes nous renseignent sur les courbures du terrain. L'ensemble de ces informations représente les plans dérivés du MNT. La pente est une des données fondamentales à partir de laquelle le réseau hydrographique sera déterminé.

Les procédés d'obtention des élévations sont divers : soit des relevés de terrain, soit par acquisition d'images aériennes ou satellitaires optiques et radar avec des prises de vue stéréoscopiques. Ainsi les méthodes de génération des reliefs ou des MNTs varient en fonction de la nature de l'information. Le grand nombre de satellites radar SAR mis sur orbites (ERS 1-2, JERS, ENVISAT, RADARSAT 1-2, etc.) et l'amélioration de leurs caractéristiques technologiques (résolutions, plage des angles de visée, multipolarisation, …) ont permis l'exploitation des signaux radar SAR pour l'estimation des élévations des cibles au sol, excitées par l'onde radar, il s'agit de l'interférométrie radar. Elle exploite

la différence de phase de deux signaux radar, rétrodiffusés par la même cible et acquis selon deux angles de vue légèrement différents. Cependant le développement et la mise en application de cette nouvelle technique interférométrique pose plusieurs problèmes liés, principalement à la géométrie de prise de vue radar, à l'intervalle d'acquisition des signaux et à la nature même de la zone observée. Le nombre de groupes de recherche et de publications dans ce domaine dénote la diversité des idées, les difficultés quant à sa mise en application et la précision exigée de l'information obtenue. A chaque niveau d'un processus interférométrique, des questions restent encore posées et les solutions apportées par différents travaux sont adaptées aux conditions spécifiques des données images utilisées. Le recalage du couple interférométrique, la présence des résidus dans un interférogramme, le filtrage adapté aux interférogrammes (Wang et *al*, 2001), la méthode de déroulement de phase appropriée, etc. sont les niveaux de traitement des données interférométriques qui sont encore loin d'être maîtrisés. Notre contribution (Belhadj-aissa A. et *al*. , 2004), (Belhadj-aissa A. et *al*.., 2005) dans ce domaine, a porté sur le développement d'un processus interférométrique, qui, à partir d'un couple images radar permet de générer le modèle Numérique de Terrain de la région d'étude.

1.1. Principe de l'interférométrie radar RSO

L'interférométrie radar est une technique de traitement d'images basée sur l'utilisation de deux images RSO Single Look Complex Image (SLCI) d'une même scène acquises par deux capteurs radar séparés par une distance appropriée dite baseline (b) (fig. 1).

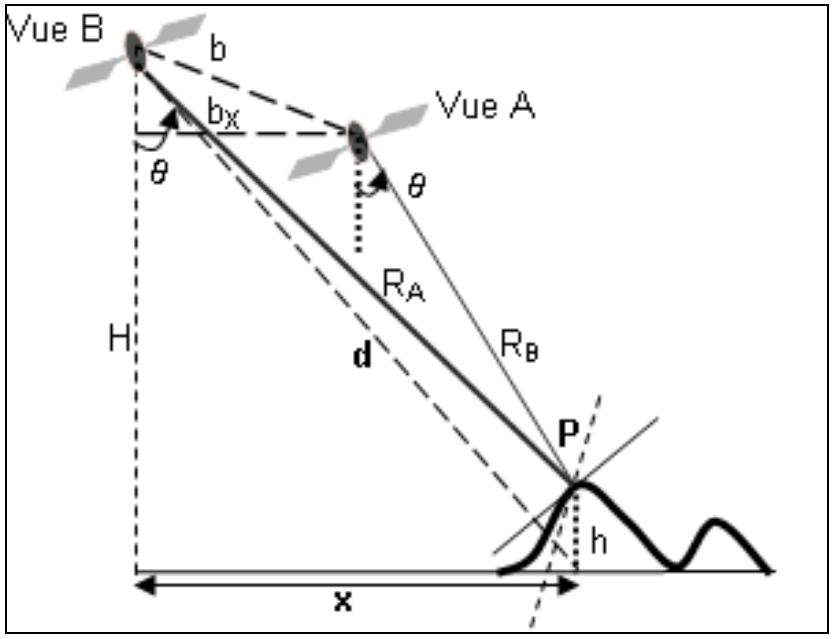


Figure 1. Géométrie d'acquisition interférométrie

Cette technique exploite l'information de phase du signal radar rétrodiffusé par la cible.

Soit $S_A(p) = \rho_A(p)e^{j\phi_A(p)}$ et $S_B(p) = \rho_B(p)e^{j\phi_B(p)}$ les signaux rétrodiffusés par la cible P et mesurés par les deux capteurs A et B. L'ensemble des réponses constituent, pour chaque capteur, l'image SLSI(A) et SLCI(B). La phase de chaque signal est donnée par : $\varphi_{A,B}(p) = \varphi_{trajet}^{A,B} + \varphi_{propre}^{A,B} + \varphi_S^{A,B}$

Elle est composée principalement de trois termes : la phase propre, la phase due à l'aller-retour de l'onde et qui proportionnelle à l'élévation de la cible et la phase de bruit.

1.2. Processus interférométrique

La première étape du processus interférométrique est le recalage des deux images. Pour cela, nous avons développé une méthode, basée sur la corrélation de phase dans l'espace de Fourrier (Chelbi S., et *al*, 2007). Cette méthode exploite les propriétés de la Transformée de Fourrier Discrète (TFD) pour calculer le déplacement entre images. En effet, la TFD transforme une translation en un déphasage fréquentiel. Pour calculer cette translation entre deux images, il faut détecter le maximum de la TFD inverse de la decorrélation de phase calculée entre les deux images. La position du maximum détecté est utilisée pour recaler la première image (A) par rapport à la deuxième image (B).

Le produit interférométrique est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\eta(p) = \frac{\langle \rho_A(p) e^{j\varphi_A(p)} \rangle * \langle \rho_B(p) e^{-j\varphi_B(p)} \rangle}{\sqrt{\langle |S_A(p)|^2 \rangle * \langle |S_B(p)|^2 \rangle}}$$

Le module de cette expression forme l'image de cohérence, elle traduit la corrélation entre les deux images A et B. Plus elle proche de un (1) meilleurs sont les résultats interférométriques (Labrousse D., 1996). Cependant la décorrélation du couple images est due principalement à l'angle de visé (décorrélation spatiale), aux changements de l'état de surface entre les deux acquisitions A et B en mode double passe (décorrélation temporelle) et aux bruits électronique et atmosphérique.

L'argument du produit représente l'image Interférogramme, donné par :

$$\Delta\varphi(P) = \varphi_A(P) - \varphi_B(P) = \frac{4\pi}{\lambda}(R_A - R_B) + \Delta\varphi_{propre} + \Delta\varphi_s$$

Sous l'hypothèse de faible décorrélation inter images (A,B) (Hocine, 2004), l'expression précédente se réduit

à : $\Delta\varphi(P) = \varphi_A(P) - \varphi_B(P) = \frac{4\pi}{\lambda}(R_A - R_B)$ où $\Delta R = (R_A - R_B) = \frac{xb_x}{d} + \frac{xb_x H}{d^3} h$

Le premier terme est indépendant de l'altitude h de la cible p, il est proportionnel à la composante horizontale du baseline b. La phase engendrée, dite phase de terrain plat, est représentée par les franges orbitales, qu'il faut retrancher de la phase globale (Trouvé E., 1996) afin de restituer la phase proportionnelle à l'élévation h qui correspond au deuxième terme.

La simulation des franges orbitales et leur élimination peuvent se faire de deux manières soit en utilisant la géométrie d'acquisition et les données orbitales (b, bx) (Dupont S., 1997), dans ce cas, la méthode et dite, méthode géométrique, soit en exploitant directement l'interférogramme bruit, la phase du terrain plat est localisée dans les hautes fréquences dans l'espace de Fourrier. Dans ce cas la méthode est dite spectrale. Nous avons testé les deux méthodes, les résultats obtenus ont montré que la méthode spectrale est plus efficace car elle est indépendante de l'échantillonnage de l'angle de visé pour chaque cible suivant l'axe des distances (Chelbi S. , 2008).

Les franges (les phases) formant l'interférogramme, corrigé des franges orbitales, sont données en modulo 2π. La phase absolue, proportionnelle à l'élévation, est obtenue par une étape de déroulement de phase. C'est l'étape essentielle dans le processus interférométrique. Bien qu'elle ait fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et de publication (Cutis W., 2001) (Huot E., et *al*, 2001) (Labrousse D., 1996) (Zebker H.A and Lu Y., 1998) les résultats restent dépendant de la qualité des interférogrammes, de la corrélation du couple interférométrique et de la géométrie de la région d'étude.

Son principe (fig. 2) consiste à calculer la phase exacte (absolue) $\Phi(P) = \varphi(P) + 2k\pi$ avec $\varphi \in [0, 2\pi]$ et $k \in Z$ en chaque pixel à partir de la phase mesurée par l'interférogramme.

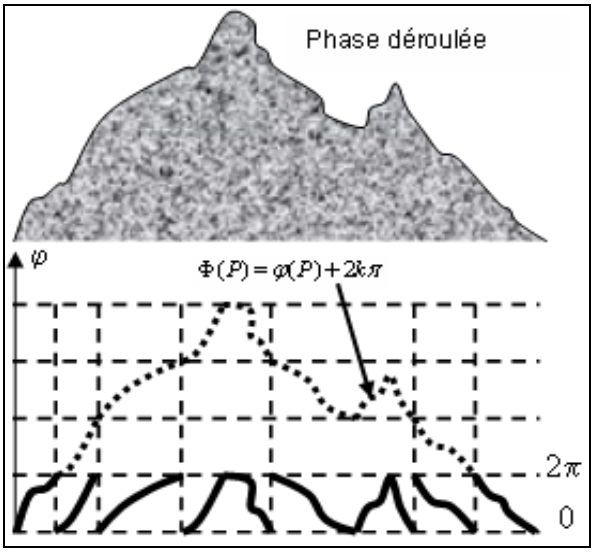


Figure 2. Principe de déroulement de phase

Nous avons, à cet effet, développé trois approches : la première approche, dite locale, déroule la phase de proche en proche. En présence de bruit, résidus, elle pose un problème de discontinuité de la phase déroulée. Nous l'avons améliorée par la détection et l'évitement optimal des résidus. Nous avons, aussi, développé l'approche de déroulement par les moindres carrés. D'après les tests menés sur différentes régions (à forte reliefs et à relief doux), nous avons constaté que l'erreur est globale et que l'absence de discontinuité ne garantit pas la qualité de la phase topographique obtenue.

La troisième approche développée est basée sur la modélisation locale des interactions des phases relatives aussi bien à l'intérieur d'une frange qu'au niveau des transitions des franges. Elle nécessite des étapes de traitement des interférogrammes (Belhadj-aissa A. et *al*, 2004). Les résultats obtenus sont concluants relativement aux deux premières approches. Néanmoins, le temps de calcul est assez important.

1.3. Résultats interférométriques

Nous avons utilisé, dans ce travail, un couple d'images Radar de type SLC sur la région d'Alger. Les images sont acquises le 3 et 4 janvier 1996 par les satellites ERS1 et ERS2 en tandem. La figure 3 représente l'image 'Amplitude' du 4 janvier 1996 et l'image 'cohérence' est donnée par la figure 4.

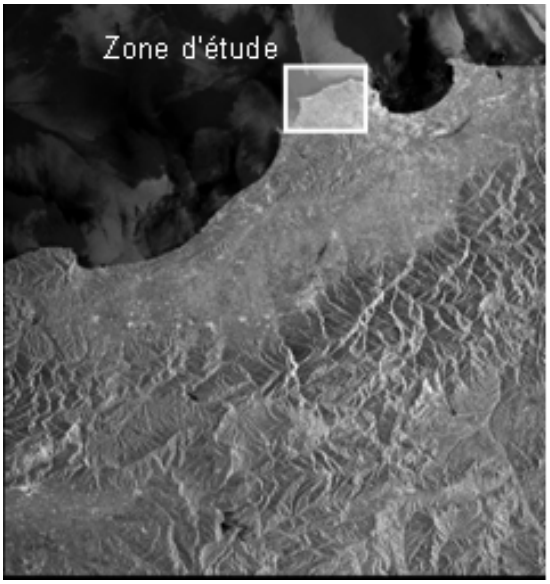


Figure 3. Image Amplitude

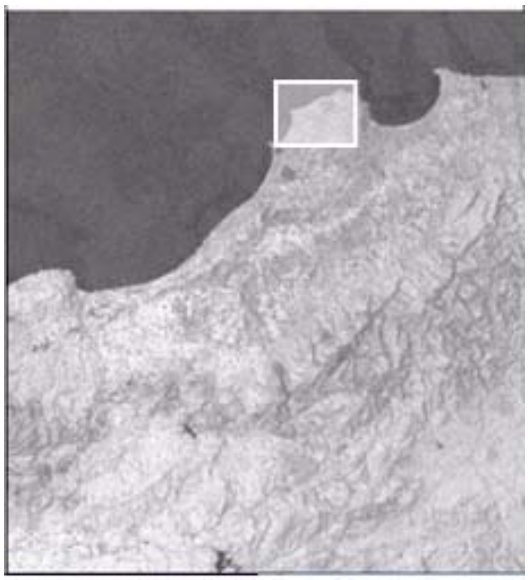


Figure 4. Image de cohérence

Nous remarquons que le coefficient de corrélation du couple interférométrique est plus faible dans la mer (zone sombre). La zone d'étude, délimitée par le rectangle et son interférogramme sont donnés de par les figure 5 et figure 6 respectivement.

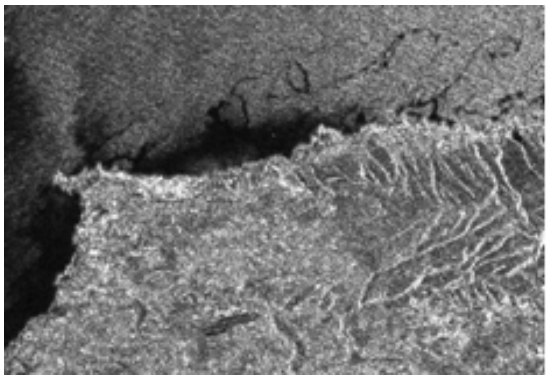


Figure 5. Région d'étude

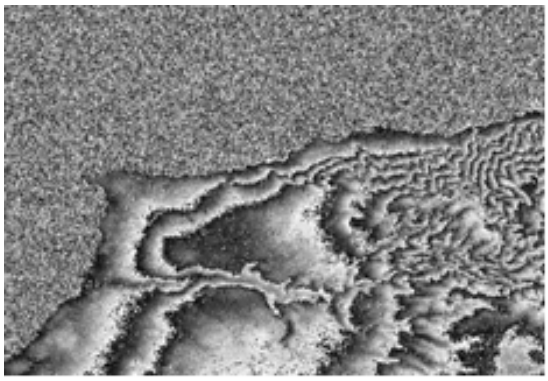


Figure 6. Interférogramme

Nous avons appliqué la méthode de déroulement de phase par modélisation markovienne. Pour l'initialisation, nous avons localisé, sur une carte topographique, quelques points dont les altitudes ont été prises comme référence. Nous donnons dans la figure 7, le modèle numérique de terrain interférométrique obtenu.

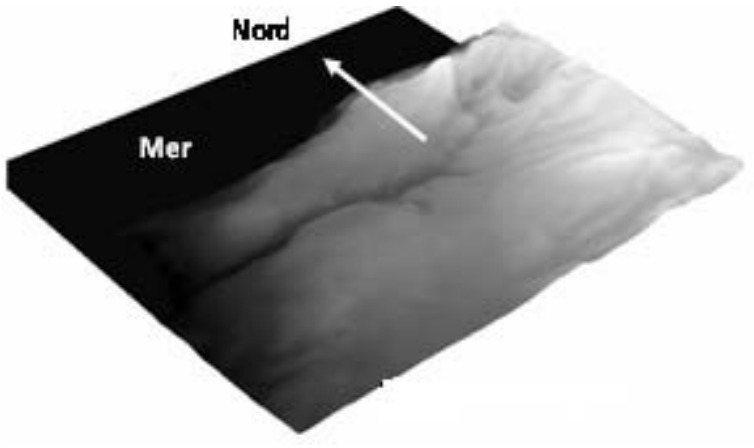


Figure 7. MNT interférométrique de la région d'Alger

L'occupation du sol de la région d'étude, caractérisée par le bassin versant de oued Benimessous est donnée par la composition colorée d'une image ETM7+ superposée au MNT (fig. 8).

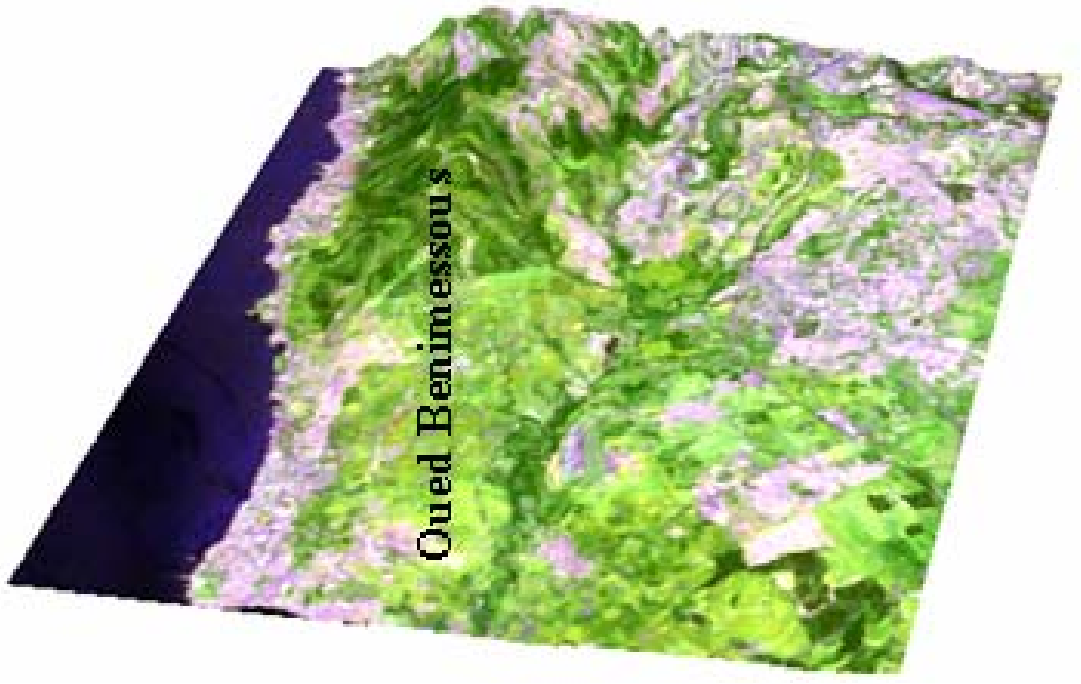


Figure 8. Image ETM (ETM1 + ETM3 + ETM4) sur le MNT

2. Processus d'extraction du réseau hydrologique

Les techniques d'extraction du Réseau Hydrologique à partir d'un MNT raster se décomposent, essentiellement en deux approches: celles qui reposent sur une analyse géomorphologique par caractérisation locale des variations altimétriques et celles à inspiration hydrologique en se basant sur le suivi du ruissellement de l'eau. Dans la première approche, plusieurs méthodes ont été développées (Charleux-Demargne J, 2001) basées sur la morphologie du terrain, les paramètres descripteurs de la géométrie du voisinage, l'étude des profils, etc. Un inconvénient majeur de ces méthodes est la représentativité relative des maxima et minima locaux. Le réseau hydrologique extrait par ces méthodes est fragmenté et présente des discontinuités le rendant inexploitable pour des applications ultérieures. Quant aux méthodes apparentées à la deuxième approche, elles retiennent le principe d'un cheminement naturel des eaux entraînées par la gravité et guidées par la topographie. Elles s'appuient sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chaque cellule de résolution ou pixel à partir des valeurs altimétriques du MNT, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente. Ainsi, les cellules se déversent les unes dans les autres en fonction de la pente

locale, un ensemble cohérent de talwegs principaux pourra en être déduit. L'approche d'extraction du réseau hydrologique développée est basée sur une analyse hydrologique qui utilise le MNT. Les étapes de traitement sont schématisées par le diagramme fonctionnel donné par la figure 9.

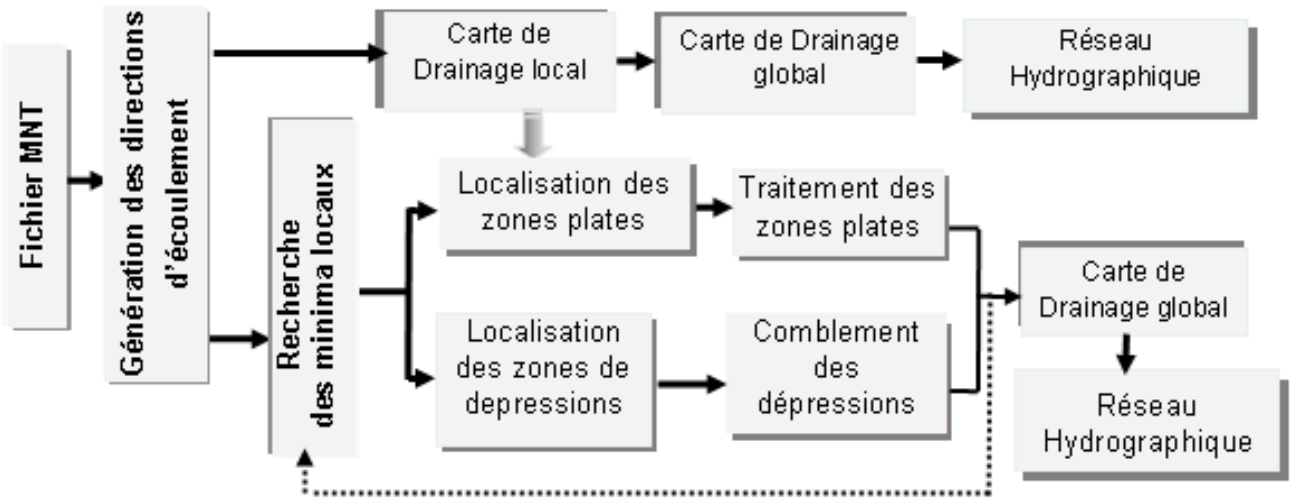


Figure 9. Diagramme d'extraction du réseau hydrologique

2.1 Génération des directions d'écoulement

La première étape du processus est l'extraction des directions d'écoulement. Nous avons, pour cela, développé une procédure basée sur l'exploration du voisinage immédiat correspond aux 8-connexités (Jenson S.K and Resenfled E.G., 1988). L'Algorithme de Descente Altimétrique (ADA) permet de calculer les différences d'altitudes entre le pixel central et ses pixels voisins et localiser, ainsi, le pixel (ou cellule de résolution) correspondant à la descente maximale. Les directions d'écoulement qui pointent vers ces cellules correspondant sont identifiées par le code de Freeman et forment l'image des plans d'écoulement. Cette image est codée entre 0 et 8 où, le code zéro (0) est affecté à une cellule qui n'a pas de direction (cellule isolée)

$$\text{Algorithme: } Min\{Z(x,y)-z(x_i,y_j)\} \quad où \quad x_i=(x-1,\ x,\ x+1); \quad y_j=(y-1,\ y,\ y+1)$$

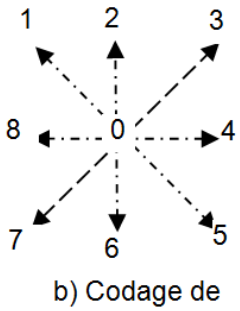
Z(x,y) : l'altitude du pixel central et $z(x_i, y_j)$ sont les altitudes des 8 voisins.

Quant à l'algorithme de drainage local, il permet de calculer, au niveau de chaque cellule, le nombre de cellules voisines se déversant à l'intérieur de la cellule centrale (pixel central). Le résultat est codé entre 1 et 9.

L'exemple suivant (tab. 1a, 1b, 1c, 1d) illustre les procédures de génération des directions d'écoulement et de drainage local.

103.7	103.7	103.6	103.5	103.5	103.5
102.8	103.0	102.9	102.8	102.7	102.6
100.9	102.0	102.2	102.1	102.0	101.7
101.0	100.2	101.1	101.2	101.3	100.9
100.2	100.0	100.3	100.4	100.4	100.1
99.0	99.1	99.4	99.5	99.6	99.7

a)



b) Codage de Freeman

7	7	5	5
6	7	7	5
6	7	7	5
7	7	7	7

c) Directions d'écoulement

	1	1	
	2	1	

d) Drainage local

Tableau 1 : a) Exemple de création de l'image direction d'écoulement et de l'image drainage local. b) codage de Freeman. c) Direction d'écoulement. d) Drainage local

Les cartes des directions d'écoulement et de drainage local sont données, sous forme d'images à la figure 10a et 10b.

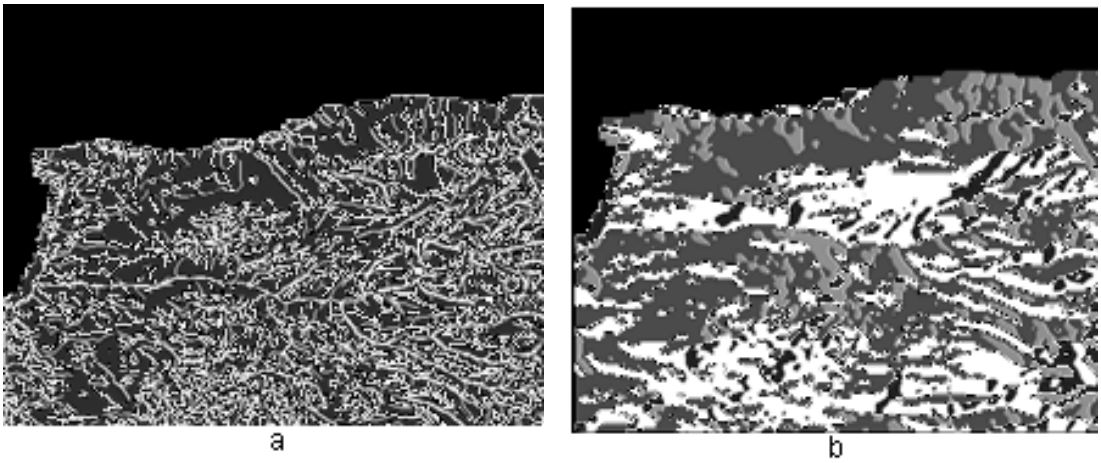


Figure 10 **a**) Image des directions d'écoulement **b**) Image de drainage local

Généralement, les modèles numériques de terrain présentent des zones de dépression, formées par des cellules isolées dont les cellules voisines possèdent des altitudes plus élevées et des zones plates ou les altitudes des 8 voisins sont égales à l'altitude du pixel central. La présence de ces zones pose un problème de discontinuité du réseau: l'eau stagne dans les zones de dépression et se disperse dans les zones plates (Lawrence W.M. and jurgen G., 1998). Pour cela, nous avons intégré dans le processus d'extraction du réseau hydrologique, un Algorithme de Recherche des Minima locaux (ARML) qui consiste à localiser les cellules de dépressions (Zones de Dépressions=ZD) et les cellules adjacentes à altitudes égales (Zones Plates=ZP).

Les conditions de l'ARML sont :

Si $\forall z(x_i, y_j) \in V_Z, \{Z(x,y) - z(x_i, y_j) \prec 0\}$ alors le pixel central constitue une dépression

Si $\forall z(x_i, y_j) \in V_Z, \{Z(x,y) - z(x_i, y_j) = 0\}$ alors le voisinage V_Z représenté par une fenêtre 3x3 est considérée comme une zone plate.

La qualité du réseau dépendra de nombre et de la taille des ZD et ZP. Leurs traitements permettent d'améliorer ainsi la structure extraite et la continuité du réseau.

2.2. Traitement des dépressions et des zones plates

Afin de pallier aux problèmes des discontinuités des chemins d'écoulement des eaux causées par les dépressions et les zones plates, nous avons traité le MNT en comblant les dépressions qui piègent l'eau et en forçant l'eau à s'écouler dans une même direction à l'intérieur des zones plates. Pour ce faire, nous avons déterminé les minima locaux par comparaison de l'altitude de chaque cellule à celles de ses huit voisines puis à celles de ses 24 voisines.

$$Z_{ZD} = Min\{z(x_i, y_j)\} \text{ où } z(x_i, y_j) \in V_{3x3}, V_{5x5}$$

En effet, ce traitement est une simulation du remplissage par l'eau et la présence d'un exutoire permet à l'eau de suivre son chemin selon la pente maximale. L'algorithme va engendrer la formation de nouvelles ZP artificielles qui seront traitées avec les zones plates naturelles.

Quant au traitement des ZP, l'algorithme scrute les contours des zones plates et affecte des directions d'écoulement suivant la droite joignant l'amont à l'aval présumé de chaque zone, puis il force toutes les cellules de la zone à se déverser dans cette même direction. Notons que la direction d'écoulement attribuée à une zone plate dépend de la dimension de cette dernière et de la vitesse de ruissellement.

Nous donnons un exemple illustratif de la présence et du traitement des ZP et ZD d'une imagette d'un MNT (fig. 11a, 11b et 11c).

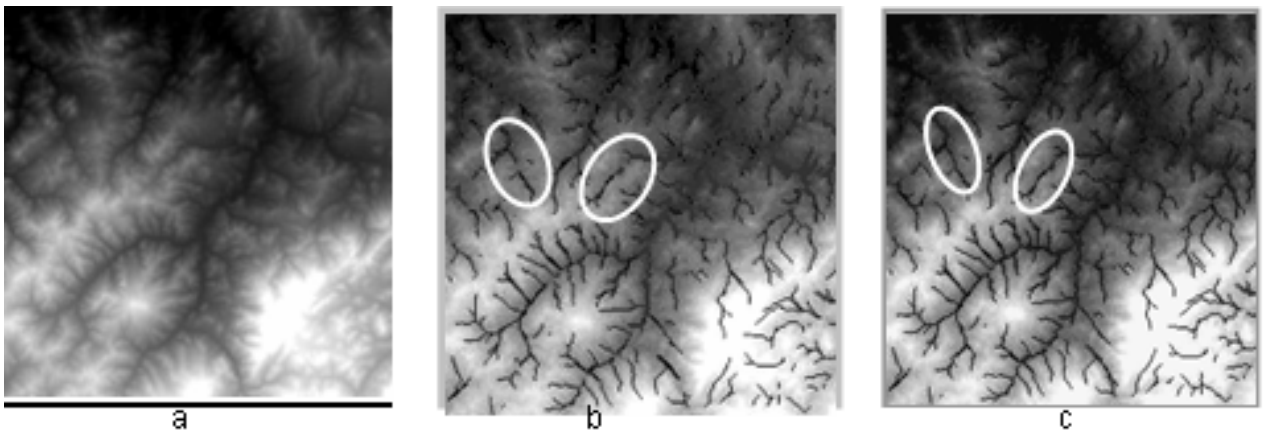


Figure 11. a) MNT **b**) Réseau hydrologique avant traitement des ZP et ZD **c**) Réseau hydrologique après traitement des ZP et ZD

2.3. Drainage global et extraction du réseau hydrologique

Le principe du drainage global est de détecter l'orientation du réseau hydrologique au niveau de chaque cellule en fonction des écoulements des différents chenaux situés en amont. L'Algorithme de Drainage Global permet de calculer le nombre de pixels total, en, amont déversant à l'intérieur du pixel considéré (cellule traitée). La plus grande valeur est attribuée à l'exutoire principal. Les différents chenaux du réseau hydrologique sont tracés à partir des cellules drainées. L'exemple numérique suivant (tab.2) montre le principe de ces algorithmes.

7	6	6	5	5	7
	7	6	6	8	75
8	7	7	9	76	12
8	8	10	77	13	13
46	24	104	19	49	31
14	13	13	7	5	4
13	13	12	12	6	4
12	12	12	11	11	5
11	11	11	11	10	10

Tableau 2. Principe du tracé du RH

Il est tiré directement des résultats obtenus sur le bassin versant étudié. La figure 12 représente le réseau hydrologique global de la région d'étude.

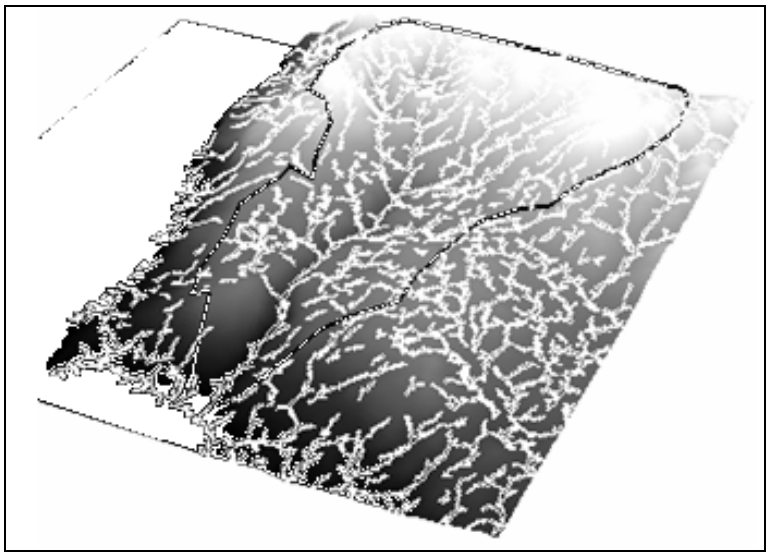


Figure 12. Réseau hydrologique global de la région d'étude

Les limites du bassin versant sont obtenues par la détection et la localisation des crêtes (les lignes de partages des eaux) dans un profil multidirectionnel.

L'ensemble des algorithmes développés pour l'extraction du réseau hydrologique constitue un outil logiciel que nous avons appelé « FOUGGARA». Il est développé en langage IDL.

2.4. Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant de oued Benimessous est situé à l'ouest d'Alger. Ses paramètres géométriques déduits à partir de la courbe limitant sa superficie sont : la surface projetée (A) qui est de 44.28 km², la longueur du contour (P) qui est de 28.46 km et son indice de compacité K est de 1.197 (K = 0.28 P/ √A). Le rectangle équivalent au bassin versant a une longueur L = 9.621 Km et une largeur l = 4.602 Km où L est calculé par l'expression suivante:

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-(\frac{1.12}{K})^2}\right]$$

Sa courbe de répartition hypsométrique est donnée par la figure 13b. Elle est tracée en reportant en ordonnée l'altitude *Y* et en abscisse le pourcentage de la surface du bassin (fig.13a) dont l'altitude est supérieure ou égale à *Y*, rapportée à la surface totale du bassin.

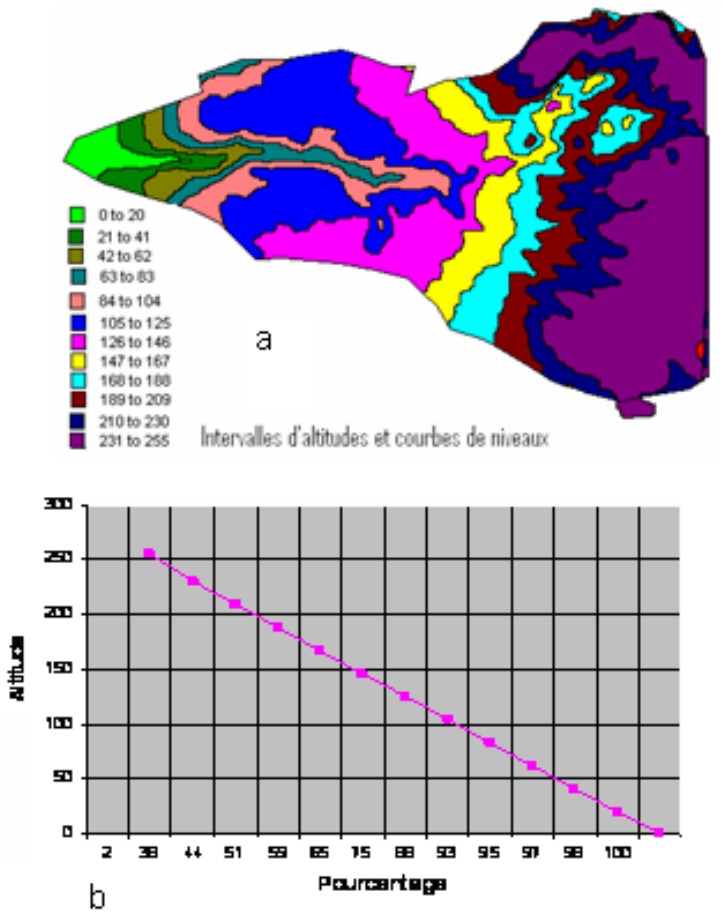


Figure 13. a) Intervalles d'altitudes et courbes de niveaux b) courbe hypsométrique

D'après sa forme, les pentes des versants varient lentement et de manière uniforme (variation pratiquement linéaire).

3. SIG et Simulation

Les principaux objectifs de la simulation sur le bassin versant sont essentiellement : les préventions du comportement de ce dernier aux pluies torrentielles, l'étude des effets de l'érosion et le transport de la matière sur la structure des bassins versants particulièrement ceux qui alimentent les barrages, l'impact des glissements de terrain sur la topographie du bassin versant et l'estimation du débit du bassin versant alimentant les oueds, en particulier dans les zones sahariennes. Les procédures de simulation sont conditionnées par les données multisources telles que les données géologiques, les données météorologiques, les données géomorphologiques, etc. Nous avons abordé cette partie du processus par l'intégration, graduellement, des différentes couches dans une base de données associée à la région du bassin versant étudié. Pour ce faire, nous avons créé la topologie du réseau hydrologique afin d'identifier chaque

chenal (fig.14b) et avoir les exutoires des différents affluents. Ces derniers sont classifiés selon le sens d'écoulement en attribuant un rang n (fig. 14a) égal à la somme de tous les chenaux précédents (qui lui déversent l'eau).

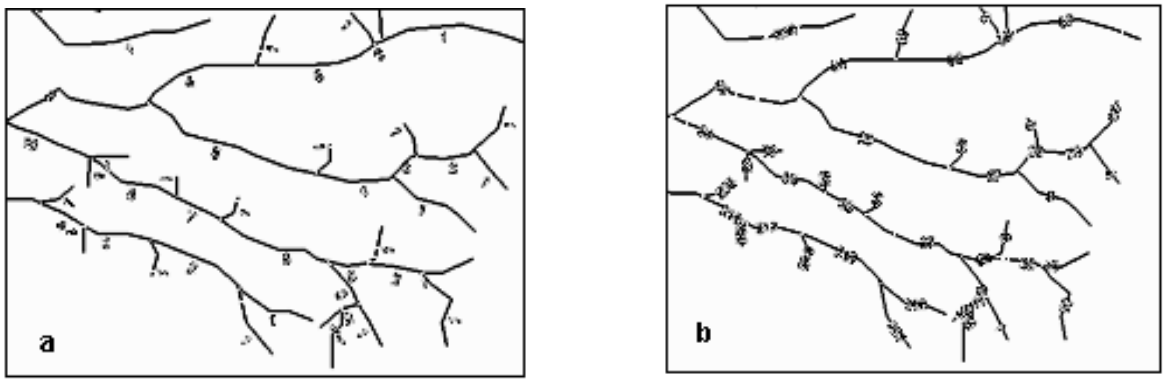


Figure 14. **a**) Codification des chenaux **b**) Identification des chenaux

La combinaison du mode raster et le mode vecteur en format {(x, y, R, id)} où (x, y) sont les coordonnées de la cellule, R est le rang du tronçon et id est l'identificateur de l'arc permet obtenir le réseau classifié avec tous les pixels qui le constituent. Les procédures de simulation sont implémentées sur ce dernier, en mode image (fig.15) ou le comportement de chaque cellule de résolution peut être modélisée par des paramètres différents (pente, infiltration, etc.…).

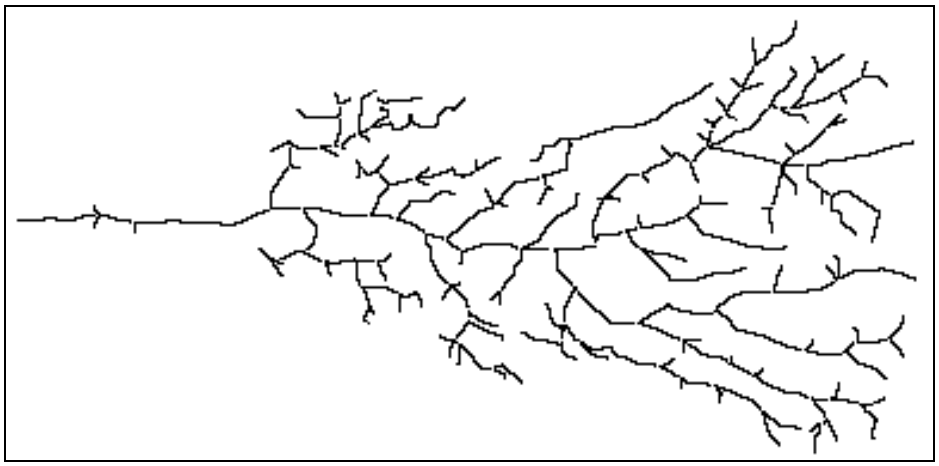


Figure 15. Image du réseau

En effet, le bilan hydrologique (Bernard T. et al, 1999) d'un bassin versant peut s'exprimer par la relation suivante :

$$P = E + Q + I + U + dR,$$

Où : P - précipitation; E - évaporation + évapotranspiration; Q - écoulement; I - infiltration; U - utilisation humaine; dR - stockage.

Dans notre cas, nous avons négligé les paramètres E, U et dR et l'équation se ramène à : $Q = P - I$.

Par ailleurs, nous avons considéré que la pluie est uniforme sur l'ensemble du bassin versant. Nous avons pris en compte uniquement l'écoulement correspond au ruissellement de surface avec une faible infiltration et un intervalle pluviométrique d'une heure avec des valeurs qui reflètent les situations pluviométriques très variables (allant de la pluie fine à une situation torrentielle).

L'algorithme de simulation est donné par :

$$\mathbf{Q_{p,i,k} = \alpha_{p-1,\,i,\,k}\ \ Q_{p-1,\,i,\,k} + P_j - \beta_{p,\,I,\,k}\ \ I_{p,\,i,\,k}}$$

Où:

p : représente la cellule courante

$Q_{p,\,i,\,k}$: la quantité d'eau de la cellule courante du tronçon de rang i et d'identificateur k,

$Q_{p-1, i, k}$: la quantité d'eau récupéré à partir de la cellule précédente du tronçon de rang i et d'identificateur k,

P_j : la jème valeur considéré de la pluviométrie,

$I_{p, i, k}$: la quantité d'eau infiltrée de la cellule courante du tronçon de rang i et d'identificateur k

j : représente la valeur utilisée de la pluviométrie.

$\alpha_{p-1,i,k}$: représente la vitesse d'écoulement de la cellule précédente du tronçon de rang i et d'identificateur k,

$\beta_{p,i,k}$: le coefficient d'infiltration de la cellule courante du tronçon de rang i et d'identificateur k,

La vitesse d'écoulement ($\alpha_{p-1,i,k}$) dépend de la pente moyenne de la cellule tandis que le taux d'infiltration ($\beta_{p,i,k}$) dépend de la nature du sol. Dans notre cas nous avons pris la vitesse d'écoulement égale à un (faible pente) et le taux d'infiltration égale à 0.2% pour toutes les cellules du réseau hydrologique (sol identique).

Le tableau 3 nous donne les résultats de la simulation concernant la quantité d'eau qui passe au niveau des exutoires 1 et 2 (fig. 15).

	Pluviométrie (mm/h)	Quantité d'eau exutoire1 (m^3)	Quantité d'eau exutoire2 (m^3)
0	0,8	116,873	247,745
1	1,1	160,701	340,648
2	2,9	423,666	898,071
3	3,7	540,538	1145,81
4	6,4	934,987	1981,96
5	12,6	1840,76	3901,93
6	15,3	2235,21	4738,12
7	20,8	3038,69	6441,27
8	18,9	2761,13	5852,93
9	9,9	1446,31	3065,82
10	2,5	365,229	774,2
11	0,1	14,6092	30,9682

Tableau 3. Résultats de la simulation

Pour une simulation 'réaliste', il faut tenir compte de plusieurs paramètres tels que: la quantité d'eau de saturation du sol pour chaque cellule car il ne peut y avoir d'écoulement que si le sol est saturé ou lors d'une pluie torrentielle; la vitesse d'écoulement qui dépend de la pente; l'évaporation + évapotranspiration si le bassin est très étendu avec des dépressions; la quantité de stockage si l'eau est récupérée dans des bassins et le couvert végétal. En effet, le SIG est un des meilleurs moyens pour représenter tous ces paramètres sous forme de couvertures.

CONCLUSION

La difficulté fondamentale dans l'extraction du réseau hydrologique réside dans la représentativité du relief réel par l'MNT interférométrique. En effet, la visée latérale du radar des terrains accidentés introduit des déformations géométriques réversibles et non réversibles au niveau des images. La correction de ces dernières nécessite la connaissance des paramètres de prise de vue ainsi que des points géodésiques. Bien que le traitement des zones plates et les dépressions a amélioré la qualité du MNT pour cette application, le réseau présente toujours des discontinuités non réalistes des cours d'eau. Par ailleurs, la localisation des zones d'émergences des rivières et le choix du seuil, lors de l'extraction du réseau conditionnent aussi la qualité du réseau.

Les procédures de simulation que nous avons mis au point permettent d'estimer la quantité d'eau au niveau de chaque exutoire. Elles sont appliquées sur le réseau hydrologique en mode image afin d'introduire les paramètres, qui sont variables dans l'espace et dans le temps, de chaque cellule (pixel) du réseau hydrologique. La simulation 'réaliste' nécessite l'intégration du modèle pluviométrique de la région, des caractéristiques géologiques, des paramètres d'infiltration qui dépendent de l'occupation des sols, de la vitesse de ruissellement en fonction de la pente, etc... Nous comptons généraliser cette application sur d'autres régions plus accidentées et urbanisées telle que la région d'Alger touchée par les inondations de novembre 2001.

Par ailleurs, l'évaluation, par les thématiciens, des résultats de cette application nous aidera à définir des procédures de simulation plus appropriées et d'exploiter les images de télédétection aussi bien dans la cartographie topographique (MNT) que dans la description géologique et la caractérisation des états de surface.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELHADJ-AISSA A., HOCINE F., BELHADJ-AISSA M., OUARZEDDINE M., SMARA Y., 2004 - Processus interférométrique opérationnel pour la génération d'un modèle numérique de terrain Appliqué au couple d'images ERS-1 ERS-2 sur la région d'Alger. *X^{ème} Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF*, Ottawa.

BELHADJ-AISSA A., HOCINE F., OUARZEDDINE M., BELHADJ-AISSA M., Mai 2005- Topographie des zones sismiques à partir des images SLCI des radars SAR. *Séminaire International sur «l'utilisation des technologies spatiales pour la prévention et gestion des catastrophes naturelles*» organisé par : ASAL, BAS-ONU et ESA Alger, Algérie

BERNARD T., YANN H., MARC M., 1999 - Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base». *Gestion et protection de la ressource en eau office federal de l'education et de la science/suisse* (no 96.01)s_jep 09781/95 editions *h*g*a*, bucarest

CHARLEUX-DEMARGNE J., 2001 - Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues des bassins versants. *Thèse de Sciences de l'Information Géographique*, Université de Marne la Vallée, France. 350 p

CHELBI S., BENAOUICHA K., HOCINE F., BELHADJ-AISSA A., 2007: Interférométrie radar SAR et génération de modèles numériques de terrain. *2^{ième} conférence sur la vision artificielle*, Tizi-ouzou, Algérie.

CHELBI S., 2008- Estimation des élévations et des mouvements de terrain par interférométrie SAR. *Thèse de magister*, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie. 90 p

CUTIS W., 2001: Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry- *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.*

Dupont S., 1997: Génération de modèles numériques de terrain par interférométrie ROS. *thèse présentée à université de Nice-Sophia antipolis*, France. 146 p.

HUOT E., 2000 - Etude de l'évaluation temporelle de phénomènes terrestres au moyen de l'imagerie radar. *Thèse de doctorat*. Université de CAEN, Sciences Ecole doctorale SIMEN, France. 235 p.

JENSON S.K., RESENFLED E.G., 1988 - Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engoneering and remote sensing, pp 1593-1600

LABROUSSE D., 1996 - modélisation markovienne pour le déroulement de phases interférométriques sar. *Thèse de doctorat.* Université de Nice Sophia Antipolis, France 160 p.

LAWRENCE W. M., JURGEN G., 1998 -The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological process*, volume 12, issue 6.

NANEE C., 2004- Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. Thèse de doctorat de l'Ecole doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau à l'Université Montpellier II . 264 p.

TROUVE E., 1996- Imagerie interférentielle en radar à ouverture synthétique. *Thèse de doctorat*. École nationale supérieure des télécommunications (Paris), France. 297 p.

WANG F., PRINET V., SONEDE M., 2001 - A vector filtering technique for SAR interferometric phase image, *Applied Informatics Innsbruck* Austria.

XIAOMIN C., SEQUEIRA J., 2004 - Extraction du réseau hydrographique à partir du Modèle Numérique de Terrain. *Rapport du laboratoire L S I S* (UMR-CNRS 6168).

ZEBKER H.A., LU Y., 1998 - Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least squares, and synthesis algorithms. *Journal of optical society American*, vol. 15, no. 3, pp. 586-598.