

Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du Nord

Modelling rainfall-discharge data at a mean annual scale in northern Algeria

M. TOUAZI^{1*} J.-P. LABORDE²

Reçu le 6 mars 2003, accepté le 5 mars 2004**.

SUMMARY

Modelling the hydrological behaviour of drainage basins is very important for solving problems related to the evaluation and optimal management of water resources. This is illustrated quantitatively in countries such as Algeria where water supply is a limiting factor. The principal aim of this paper was to explain the relationship between hydrological conditions and the availability of surface water. A model of rainfall-discharge was developed on a yearly scale, taking into account physical and climatic parameters. The application was carried out in northern Algeria where the total land surface is about 325 000 km².

The development of this model required a database, which was acquired during previous studies where maps of median rainfall and permeability as well as the digital elevation model were developed. In order to complete this database, the cartography of rainfall for the years for which we have discharge data was carried out using a methodology entitled "mapping standardized rainfall". To estimate and map annual rainfall, the kriging method was used. Two problems were encountered:

- The presence of a drift highly altered the variogram and made it very difficult to infer a sub-structure function.
- The variogram is significant only if the hypothesis of ergodicity is valid, which was not easy to assume for any given year.

In order to resolve these difficulties, a homogeneous random and secondary stationary order function (same mean at all points and same covariance function) must be calculated. A previous study by ANRH (1993) allowed us to know the statistical parameters of the distribution at each point. These parameters were mapped, taking into consideration the topographical relief and

1. UFR Espace et Culture, U.M.R 6012 du CNRS - 98, boulevard E.-Herriot - BP 3209, 06204 Nice Cedex 3. Tél. : (418) 656-2131 poste 8298. Fax : (418) 656 2978.
Centre d'Études Nordiques Université Laval, Sainte Foy, Québec G1K 7P4 Canada.
2. UFR Espace et Culture, U.M.R 6012 du CNRS - 98, boulevard E.-Herriot - BP 3209, 06204 Nice Cedex 3. E-mail: laborde@unice.fr. Tél. : (33) 493 37 54 61. Fax : (33) 493 37 54 30.

* Correspondance : mustapha.touazi@cen.ulaval.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2005.

distance to the sea. For every year and at each rainfall measure point, the standardized rainfall could be deduced. The correlogram gave information about the spatial variability of the phenomenon and its range, and subsequently the standardized rainfall was then interpolated. Annual rainfall was calculated by combining the grids of the means, the variances and the standardized rainfall (TOUAZI and LABORDE, 2000). Thus, the data of 467 rainfall gauges were used in order to create maps of the yearly isohyets.

The rainfall-discharge relationship on an annual scale was based on 50 hydrometric stations distributed throughout the study area. The methodology used was derived from the production function of the SCS (Soil Conservation Service). This production function was part of modelling, which transformed total rainfall to net rainfall. This method was very representative of the natural hydrological processes. Indeed, it takes into account rainfall and the maximum infiltration capacity (S), which depends on the nature of the soil (lithology), vegetation and soil moisture content. In the current study, the basin surface and a regional parameter (a) were introduced in order to calibrate the model. This production function was implemented by supplying different values for the parameter (S). The values ($n+1$) were obtained by increasing the previous value (n) by 10%. We evaluated the different values of (S) in the same way to obtain the last value (i). We calculated for these different values of the parameter (S) the square of the difference between the measured and estimated discharges for each year by measuring the discharge at different stations. For each station, we calculated the sum of these values for all the years and we retained the value of (S) that gave the minimal value. The results demonstrated that the values of (S) obtained were not significant because they tend to the infinite. For this reason, (S) was considered as a constant. In order to improve the model, we repeated the same operation, but instead of (S), we used the parameter (a) and performed the same calculation. After calibration of the model the results gave a coefficient of determination of 0.75, which means that 75% of the variance was explained by the mean rainfall, the surface and the parameter (a).

To explain the parameter (a), we calculated the correlation between its value at each station with the corresponding geology. This latter variable was characterized by the average storage capacity, which corresponds to the weighted average of the surfaces of the basin assigned to each permeability category (TOUAZI, 2001). The results demonstrated a coefficient of determination of 0.1. The correlation with the topographical relief was not necessary because it was taken into account in the cartography of the rainfall. We then proceeded to the cartography of the parameter (a). The results demonstrated an east-west gradient that was constant and a north-south gradient that decreased from north to south. With the digital elevation model, we used a geographical information system to deduce the slopes. For each basin, the average slope was calculated by taking the average of the values of the slopes of all the pixels that constituted the individual basin. The correlation between slopes and corresponding values of the parameter (a) gave a coefficient of correlation of 0.6.

The results obtained by this model after calibration gave a coefficient of determination of 0.75, which means that 75% of the variance was explained by the mean rainfall, the surface and a coefficient (a), which corresponds to the average slope of the drainage basins.

Key words: *Northern Algeria, soil conservation service production function, discharge, drainage basin, automatic mapping, kriging, geographical information system.*

RÉSUMÉ

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à l'évaluation et la gestion optimale des ressources en eau. Ceci s'illustre par un aspect quantitatif, dans les pays comme l'Algérie où l'alimentation en eau est un facteur limitant. L'objectif principal de cet article est d'explicitier les relations entre les conditions hydrologiques et la disponibilité en eau de surface. À cet effet, un modèle pluie-débit à l'échelle annuelle qui prend en compte les paramètres physiques et climatiques a été mis au point. L'application porte sur l'Algérie du Nord dont la superficie est de 325 000 km².

La mise au point de ce modèle nécessite au préalable une base de données qui a été acquise lors des travaux antérieurs incluant la carte des pluies médianes, la carte des perméabilités et le modèle numérique de terrain. Afin de compléter cette base de données, la cartographie des pluies des différentes années pour lesquelles on dispose des débits a été réalisée en utilisant une méthodologie intitulée « cartographie de la pluie centrée réduite ». Ainsi, les données de 467 postes pluviométriques ont été traitées et ont permis de tracer les cartes des isohètes annuelles.

L'étude de la relation pluie-débit à l'échelle annuelle est basée sur les données de débits de 50 stations hydrométriques réparties à travers la zone d'étude. La démarche utilisée s'est inspirée de la fonction de production du SCS (Soil Conservation Service). Les résultats du modèle après calage ont permis d'obtenir un coefficient d'explication de 0,75, ce qui signifie que 75 % de la variance est expliquée par la pluie moyenne, la surface et un coefficient (a) qui correspond à la pente moyenne des bassins versants.

Mots clés : Algérie du Nord, bassins versants, cartographie automatique, débits, krigeage, système d'information géographique, fonction de production du SCS.

1 - INTRODUCTION

L'irrégularité qui singularise les régimes hydrologiques alimentés par des précipitations annuelles dans les régions semi-arides, rend difficile la détermination quantitative des divers paramètres hydrologiques des bassins versants. Il est possible de mesurer en différents points les diverses composantes du bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leurs variabilités spatiales s'avère très difficile.

La mise en œuvre du modèle à l'échelle d'une année donnée nécessite au préalable la connaissance de la pluie moyenne de chaque année pour les différents bassins versants où on dispose de mesures de débits.

Des tentatives de modélisations à l'échelle moyenne inter-annuelle ont été déjà réalisées par MEDINGER (1948), COUTAGNE (1949), PADOUN (1974), DERY (1977), KABOUYA (1990), TAÏBI (1990), BELDJOUÏI et LARBI (1995), BELDJOUÏI et OULD YAHIA (1997) et TOUAZI (2001). À cette échelle, il y a tendance à une régularisation artificielle des régimes par compensation des années humides et sèches. Par contre, à l'échelle d'une année donnée, aucun modèle qui permet d'estimer les débits n'a été mis en œuvre sur l'ensemble de l'Algérie du Nord. L'objectif principal de cette étude est donc de mettre au point une relation

pluie-débit à l'échelle annuelle qui prendra en compte les paramètres physiques et climatiques et de la variabilité temporelle des précipitations. La base de données existante sera préalablement complétée en procédant à la cartographie des pluies annuelles de toutes les stations dont on dispose des débits.

2 – RÉGION D'ÉTUDE

L'Algérie est située sur la rive sud de la Méditerranée ; elle est bordée à l'Est par la Tunisie et la Libye, au Sud par le Niger et le Mali, au Sud-Ouest par la Mauritanie et le Sahara occidental et à l'Ouest par le Maroc (figure 1). Avec une superficie de 2 381 741 km² dont 85 % de cette étendue correspond à une zone désertique, l'Algérie est caractérisée par un contraste physique et climatique bien marqué entre les régions nord et sud. La zone d'étude située le long de la côte de la Méditerranée s'étend sur environ 1 000 km de long sur 325 km de large.

La répartition spatiale des précipitations est caractérisée par un gradient Nord-Sud bien marqué et un gradient Est-Ouest plus faible (CHAUMONT et PAQUIN 1971 ; ANRH, 1993 et TOUAZI, 2001). La moyenne des précipitations annuelles est estimée à environ 600 mm. Le minimum pluviométrique est enregistré dans les régions du Sud, il est de l'ordre de 50 mm alors que le maximum est enregistré dans le massif du Djurdjura situé en Kabylie et le massif de l'Edough situé un peu plus à l'Est, où il dépasse les 1 500 mm.

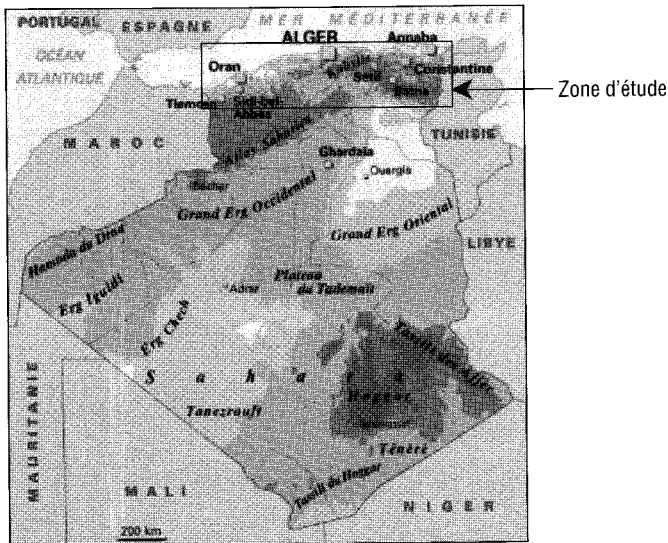


Figure 1 Localisation de la zone d'étude.
Localisation of the study area.

En ce qui concerne les températures, le contraste est bien marqué entre l'hiver et l'été. Les températures moyennes mensuelles les plus basses se rencontrent au mois de janvier ou février (inférieures à 10 °C), alors que les maxima sont atteints en juillet ou août (entre 25 et 30 °C). Le contraste entre l'hiver et l'été s'accroît fortement en s'éloignant de la mer. En effet, dans les régions telliennes les températures enregistrées en hiver sont en dessous de 0 °C dès que l'on dépasse les 1 000 m et elles peuvent atteindre - 10 °C.

Du point de vue orographique, deux ensembles orientés Est-Ouest forment l'ossature des massifs montagneux. Il s'agit de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien, entre ces deux massifs s'intercalent les plaines du Chelif et de Sidi Bel Abbès à l'ouest, de la Mitidja au centre et la plaine d'Annaba à l'est. Plus au sud, on retrouve une région de Hauts-Plateaux désertiques qui se présente sous forme de cuvettes, ce qui explique la présence de nombreux lacs salés (Chotts) collectant les eaux de surface (le point le plus bas est le Chott Melrhir qui est à - 40 m).

3 – BASES DE DONNÉES DISPONIBLES ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Données pluviométriques et hydrométriques

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées proviennent de la banque de données de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) en Algérie. Elles sont structurées suivant l'année hydrologique allant du 1^{er} septembre au 31 août. La répartition spatiale de ces postes est très hétérogène. En effet, les bassins versants du Nord sont mieux équipés que ceux du Sud. Le nombre de postes pluviométriques utilisés est de 467, alors que nous ne pourrions disposer que des données hydrométriques de 50 stations de jaugeage fiables. D'autres points de mesures existent, mais les observations y sont courtes et de fiabilité moindre au regard des difficultés de mesures.

3.2 Données géologiques et contours des bassins et sous-bassins versants

Le support d'origine de la base de données géologique est une carte au 1/800 000^e qui a été réalisée par les services de la carte géologique de l'Algérie. Cette carte géologique a été numérisée par TOUAZI (1997). Les différents terrains ont été regroupés en fonction du type de perméabilité (très perméable, perméable, semi-perméable et imperméable) (TOUAZI, 2001). Ce regroupement a permis d'identifier les terrains qui sont susceptibles de représenter de bons réservoirs aquifères et d'établir ainsi la carte de perméabilités de la zone d'étude. En ce qui concerne les bassins versants et sous-bassins versants, ils ont été délimités à partir des cartes topographiques TOUAZI (2001).

3.3 Méthodologie

La méthodologie utilisée fut inspirée de la fonction de production du SCS « Soil Conservation Service ». Cette fonction de production est la partie de la

modélisation hydrologique qui transforme la pluie brute en pluie nette. La pluie nette est la partie de la pluie brute qui arrive par voie de ruissellement à l'exutoire des bassins versants. Elle constitue le reste de la pluie brute après déduction de toutes les pertes par infiltration, évaporation et rétention superficielle. Cette formule semble être assez bien représentative des processus hydrologiques naturels. Un seul paramètre (S) sert au calage du modèle. (S) est donc fonction de la nature du sol (lithologie), de son couvert végétal, et de son état d'humectation initial. Le détail de cette fonction de production est décrit dans LABORDE (1997). La mise en œuvre de cette méthode ne fut pas concluante dans notre cas, à cet effet, des modifications ont été apportées de façon à l'adapter à notre zone d'étude. Les résultats se résument comme suit :

4 - RÉSULTATS

La variabilité spatio-temporelle des précipitations d'une année à une autre peut osciller du simple au double, suivant les stations (figure 2).

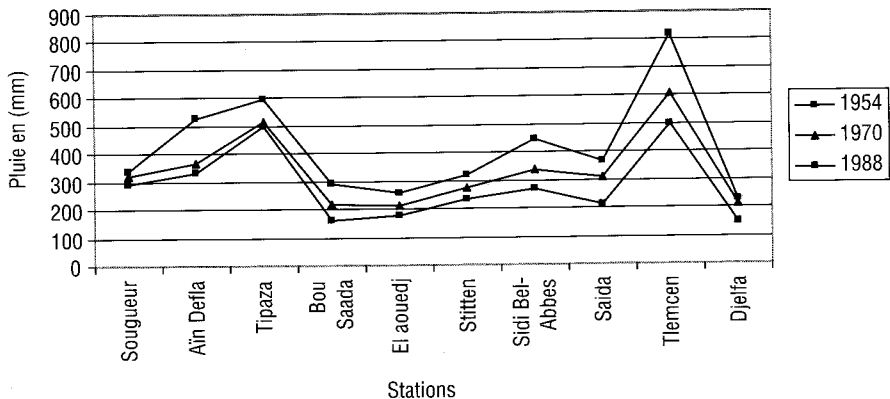


Figure 2 Variations interannuelles des précipitations des années 1954, 1970 et 1988.

Inter-annual variations of precipitations of the years 1954, 1970 and 1988.

La mise en œuvre de la fonction de production du SCS nécessite au préalable la connaissance de la pluie de chaque année où on dispose des débits. À cet effet, nous avons procédé à la cartographie des pluies à l'échelle annuelle en utilisant une méthode intitulée « cartographie de la pluie centrée réduite » (TOUAZI et LABORDE, 2000). On se contentera juste de présenter les grands axes de la méthode qui se résument comme suit :

- on constate sur l'ensemble de la zone que les cumuls annuels de pluie sont distribués selon la loi « racine normale » (la racine carrée de la pluie suit une loi de Gauss).

- la première étape consiste au calcul du champ des variables réduite (u) à partir des grilles de (\sqrt{P}), de ($\sigma_{\sqrt{P}}$) et du champ des pluies (P_i) de l'année (i).

$$u_i = \frac{\sqrt{P_i} - \sqrt{P}}{\sigma_{\sqrt{P}}} \quad (1)$$

En procédant ainsi, on crée un champ de valeurs de (u) qui sont par construction des réalisations de variables aléatoires gaussiennes de moyenne nulle et de variance l'unité.

- la deuxième étape consiste à interpoler le champ des variables réduites de l'année (i) en utilisant la méthode de krigeage. Le variogramme est déduit de l'analyse du corrélogramme dont la portée est de 164 km (TOUAZI et LABORDE, 2000) et puisque l'on sait que partout la variance est de 1, on peut montrer que :

$$\gamma(h) = 1 - e^{-h/164} \quad (2)$$

h : (km)

- la troisième étape permet le passage des variables réduites (interpolées en tout point de la grille) à celles des pluies pour l'année i en utilisant la formule suivante :

$$P_i = \left(\sqrt{P} + u_i \times \sigma_{\sqrt{P}} \right)^2 \quad (3)$$

- la dernière étape consiste à tracer la carte finale des pluies pour l'année (i) à partir de la grille des (P_i) élaborée à l'étape précédente. Pour plus de détails sur la méthodologie voir (TOUAZI et LABORDE, 2000).

4.1 Application de la méthode du SCS (Soil Conservation Service)

La mise en œuvre de la fonction de production du SCS a été réalisée sous sa formulation simplifiée ($S_0 = 0$) qui s'écrit comme suit :

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (4)$$

- Q : débit annuel (m^3/s) ;
- P : pluie moyenne d'une année donnée (mm) ;
- S : capacité maximale d'infiltration (mm).

Dans notre cas nous avons décidé d'intégrer la surface du bassin versant élevée à la puissance (α) et (a) un paramètre du modèle.

L'équation devient ainsi :

$$Q = a \frac{P^2}{P + S} S_{bv}^\alpha \quad (5)$$

- Q : Débit annuel (m^3/s) ;
- a : paramètre du modèle ;
- P : Pluie annuelle (mm) ;
- S_{bv} : surface du bassin versant (km^2) ;
- α : coefficient régional.

La mise en œuvre de cette équation se résume comme suit :

On donne des valeurs de (S) quelconques. Soit (n) la première valeur, la seconde valeur (n + 1) est obtenue en majorant de 10 % la précédente, on évalue ainsi les différentes valeurs de (S) de la même manière jusqu'à la dernière valeur (i). On calcule pour ces différentes valeurs de (S) le carré des écarts entre le débit mesuré et celui estimé par la formule 5 pour chaque année de mesure des débits des différentes stations. Pour chaque station, on calcule la somme des carrés des écarts de toutes les années et on retiendra la valeur de (S) qui donnera la valeur minimale. On procède de la même manière pour toutes les stations. Les valeurs de (α) et (a) serviront pour caler le modèle.

4.2 Calage du modèle

Les résultats du modèle après calage ont donné lieu à un coefficient d'explication de 0,75. L'inconvénient est que les valeurs de (S) retenues sont très élevées, elles ne présentent aucune signification physique.

En effet, si (S) tend vers (∞), (P + S) tend vers (S).

Comme le paramètre (S) est très proche pour les différentes stations, on va le considérer comme étant une constante. L'équation devient ainsi :

$$Q = a \times P^2 \times S_{bv}^{\alpha} \quad (6)$$

Afin d'améliorer le modèle, on va procéder de la même manière que précédemment, mais à la place de (S) on utilisera le paramètre (a). On se donne donc une valeur de (a) qui sera majorée de 10 % pour obtenir la suivante et ainsi de suite jusqu'à la dernière valeur (i). La valeur de (a) qui sera prise en compte dans le modèle correspondra à celle qui donnera le minimum de la somme des carrés des écarts entre le débit mesuré et celui estimé de chaque station. On obtient ainsi une valeur de (a) pour les différentes stations utilisées. Les coefficients de puissance de la pluie et de la surface seront considérés comme étant des paramètres de calage du modèle. L'équation devient ainsi :

$$Q = a \times P^{\beta} \times S_{bv}^{\alpha} \quad (7)$$

a : paramètre du modèle ;

β : coefficient de la pluie ;

α : coefficient régional.

On refait la même procédure que précédemment, c'est-à-dire que l'on calcule la somme des carrés des écarts pour les différentes stations et que l'on retient la valeur de (a) qui donnera la valeur minimale de cette somme. Les valeurs de (a) obtenues pour chaque station après calage du modèle sont toutes élevées à la puissance (10^8). Le détail est représenté dans le tableau 1.

Après le calage du modèle, les valeurs des paramètres (β) et (α) obtenues sont respectivement de 2 et 0,8. L'équation 7 s'écrit comme suit :

$$Q = a \times P^2 \times S_{bv}^{0,8} \quad (8)$$

Le coefficient de corrélation entre les débits mesurés et ceux estimés est de 0,87, ce qui implique que 75 % de la variance des débits à l'échelle annuelle est expliquée par la pluie, la surface du bassin et le paramètre (a). Pour être plus honnête, il est préférable de représenter (figure 3) les résultats dans des échelles logarithmiques. En effet, une erreur de 1 m³/s n'a pas la même signifi-

cation sur un petit bassin versant que sur un grand. La régression linéaire sur les débits montre que l'on explique 75 % de la variance. Le même travail sur les logarithmes des débits donne un coefficient de corrélation de 0,89 ce qui s'interprète alors en disant qu'il y a moins de 70 % de chance de se tromper d'un rapport compris entre 0,5 et 2.

Tableau 1 Valeurs moyennes du paramètre (a) des différents bassins versants.

Table 1 Average values of parameter (a) of different drainage basins.

Stations	a*10 ⁸	Stations	a*10 ⁸	Stations	a*10 ⁸
Grib Amont	1,55	Rocher des Pigeons	7,10	Sid Ali Ben Youb	1,41
Aribs	1,87	Baraki	5,87	Ouenza	2,74
El Ababsa	1,41	Baghlia	7,10	Moulin Rochefort	1,87
Aribs Ebda	4,85	Khemakhem	3,01	Medjez Amar II	3,31
Ouled Ben A.E.K	5,34	Ain Cherchar	3,64	Boucheouf	4,85
Ammi Moussa	4,41	Ain El Assel	6,46	Mirbec	4,85
Kef Mahboula	0,87	Turgo Nord	1,87	Ain Berda	2,49
Ain Hammara	1,55	CED Fagues	1,06	El Esnam	1,87
Sidi A.E.K	1,28	Medjez	2,49	Fermatou	3,31
Oued El Abtal	2,06	Réboa	3,64	Magraoua	0,60
Sidi Bel Attar	4,41	Chemorah	2,74	Sidi Yahia	4,01
Bordj Ghobrini	3,64	Foum El Gueïss	2,49	Sebdu	4,01
Boumedfaa	2,74	Beni Slimane	3,31	Chouly RN 7	2,06
El Afroun	2,49	Lakhdaria	7,10	Bensekrane	2,26
Attaba	2,74	Douar Tassadane	3,31	Remchi	3,01
Amont gorges	5,87	Ain Smara	1,87	Pierre du chat	3,64
Fer à cheval	4,85	El Ancer	6,46		

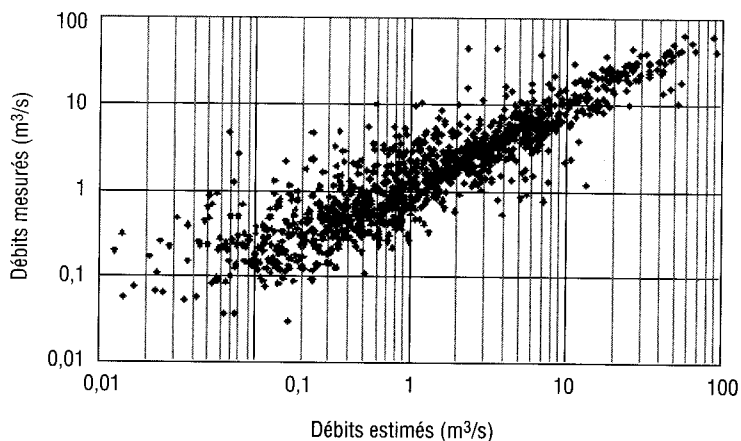


Figure 3 Corrélation entre les débits mesurés et estimés.

Correlation between measured and estimated discharge.

La question qui se pose est de savoir à quoi correspond physiquement le paramètre (a). À cet effet, on a procédé à une corrélation entre les valeurs de (a) et la capacité de stockage moyenne de chaque bassin versant calculée comme étant le produit matriciel entre les surfaces des différents terrains et les capacités de stockages moyennes correspondantes (TOUAZI, 2001). Cette capacité de stockage moyenne est donnée par la formule suivante :

$$CS_{\text{moyenne}} = \frac{[CS_1, CS_2, CS_3, CS_4] \begin{bmatrix} SP_1 \\ SP_2 \\ SP_3 \\ SP_4 \end{bmatrix}}{S_{\text{totale}}} \quad (9)$$

SP₁ : surface des terrains très perméables (km²) ;

SP₂ : surface des terrains perméables (km²) ;

SP₃ : surface des terrains semi-perméables (km²) ;

SP₄ : surface des terrains imperméables (km²) ;

CS₁ : capacité de stockage correspondant aux terrains très perméables (mm) ;

CS₂ : capacité de stockage correspondant aux terrains perméables (mm) ;

CS₃ : capacité de stockage correspondant aux terrains semi-perméables (mm) ;

CS₄ : capacité de stockage correspondant aux terrains imperméables (mm) ;

S_{totale} : surface totale du bassin versant (km²).

Les capacités de stockage moyennes de chaque bassin et sous-bassin versant ont été calculées avec la formule 9. La tentative de les corrélérer avec les valeurs du paramètre (a) correspondantes n'a pas donné de résultats probants. En effet, le coefficient d'explication est de l'ordre de 0,1, l'hypothèse de faire une analogie entre le paramètre (a) et la géologie est inappropriée. La corrélation du paramètre (a) avec le relief et la pluie ne semble pas nécessaire, en raison de la prise en compte de ces derniers dans le modèle. Afin de donner une interprétation au paramètre (a), il est nécessaire de procéder à sa cartographie dans le but d'analyser sa structure spatiale. À cet effet, la méthode de krigeage a été utilisée pour interpoler ces valeurs de (a), la grille ainsi obtenue est représentée par la figure 4.

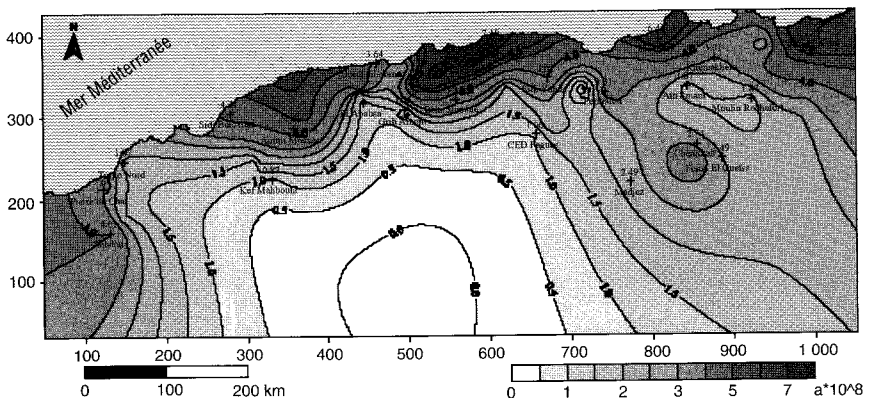


Figure 4 Variabilité spatiale du paramètre de calage du modèle (a).
Spatial variability of the calibration parameter (a).

On remarque que cette structure spatiale est caractérisée par un gradient Nord-Sud bien évident. En effet, les valeurs de (a) diminuent du Nord vers le Sud, au contraire le gradient Est-Ouest est constant. Il reste à savoir quel est le paramètre qui présente les mêmes similitudes au niveau des variations spatiales. Étant donné, qu'on dispose du Modèle Numérique de Terrain, on peut déduire des fichiers dérivés notamment les pentes à l'aide d'un Système d'Information Géographique (Idrisi).

La pente moyenne de chaque bassin et sous-bassin versant a été évaluée en faisant la moyenne des valeurs des pentes de tous les pixels qui constituent ces bassins (tableau 2).

Tableau 2 Pentes moyennes des différents bassins versants.

Table 2 Average slopes of different drainage basins.

Stations	Pente moyenne en (degré)	Stations	Pente moyenne en (degré)	Stations	Pente moyenne en (degré)
Grib Amont	1,38	Rocher des Pigeons	9,10	Sid Ali Ben Youb	2,18
Aribs	1,77	Baraki	6,21	Ouenza	2,53
El Ababsa	3,71	Baghliia	7,61	Moulin Rochefort	1,75
Aribs Ebda	7,37	Khemakhem	5,96	Medjez Amar II	3,92
Ouled Ben A.E.K	5,30	Aïn Cherchar	3,05	Bouchevouf	5,73
Ammi Moussa	4,03	Aïn El Assel	5,28	Mirbec	3,54
Kef Mahboula	3,17	Turgo Nord	2,62	Aïn Berda	3,19
Aïn Hammara	2,27	CED Fagues	6,33	El Esmam	3,28
Sidi A.E.K	2,53	Medjez	5,24	Fermatou	4,15
Oued El Abtal	2,63	Réboa	5,90	Magraoua	2,59
Sidi Bel Attar	2,54	Chemorah	4,19	Sidi Yahia	4,27
Bordj Ghobrini	8,03	Foum El Gueïss	6,32	Sebdou	4,52
Boumedfaa	5,47	Beni Slimane	3,90	Chouly RN 7	4,76
El Afroun	5,72	Lakhdaria	4,81	Bensekrane	4,21
Attaba	5,09	Douar Tassadane	5,94	Remchi	4,15
Amont gorges	9,44	Aïn Smara	1,79	Pierre du chat	4,07
Fer à cheval	5,43	El Ancer	4,57		

La corrélation entre les pentes moyennes de tous les bassins et sous-bassins versants pris en compte dans le cadre de la modélisation avec les valeurs du paramètre (a) correspondantes montre un coefficient de corrélation de 0,6. La figure 5 montre clairement qu'il existe une relation entre le paramètre (a) et la pente moyenne du bassin.

Dans la nature, le rôle des pentes est important dans la vitesse d'écoulement de la pluie ruisselée. À cet effet, elles conditionnent en partie la quantité d'eau qui va ruisseler et celle qui va s'infiltrer. Les versants caractérisés par des fortes pentes favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration, ce qui augmente les débits mesurés à l'exutoire des bassins versants.

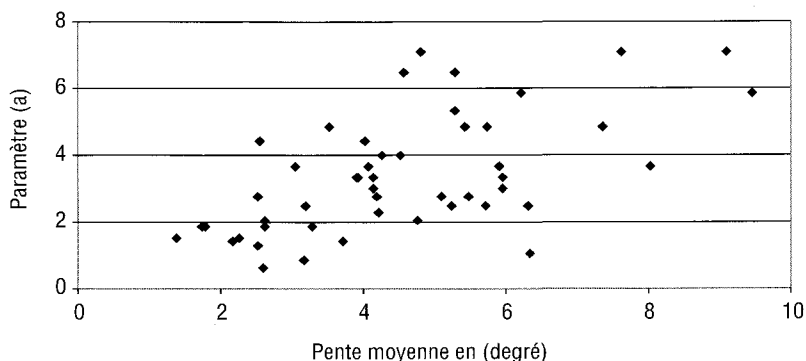


Figure 5 Corrélation entre le paramètre de calage du modèle (a) et les pentes moyennes.

Correlation between the model calibration parameter (a) and the average slopes.

5 – DISCUSSION ET CONCLUSION

Le réchauffement climatique actuel est concomitant en Algérie entre autres, avec une baisse de la pluviométrie qui engendre un déficit hydrique notable et par la forte évaporation qui caractérise la région et accentue ce déficit d'eau. En effet, la tendance à la sécheresse mise en évidence par les études de l'ANRH (1993) a été confirmée par TOUAZI et LABORDE (2000) en procédant à la cartographie des précipitations à l'échelle annuelle. Par ailleurs, cette période est parsemée par une courte période allant de 1 à 3 ans de fortes pluies. De plus, il existe des bassins versants de haute altitude (dépassant 1 500 m) qui reçoivent d'importantes précipitations. Ainsi, l'Algérie dispose en fin de compte d'importantes ressources en eaux, malheureusement mal exploitées. Ceci est dû d'une part au manque d'infrastructures (barrages) pour retenir cette eau et d'autre part à l'insuffisance de dispositif de mesure qui permettra une meilleure connaissance de cette ressource eau. En plus de ces facteurs, le manque de moyens mis à la disposition de la recherche et la gestion inappropriée des ressources en eaux ont accru le problème du manque d'eau. À cet effet, le plan Orsec a été décrété et la rationalisation de la distribution d'eau potable a été de rigueur. En raison de la demande qui ne cesse de croître dans différents domaines (agriculture, industrie), il existe un très grand déséquilibre entre l'offre et la demande. Afin de répondre à un besoin réel, ce travail s'inscrit dans la continuité des recherches déjà entamées dans le cadre de la mise au point de moyens d'évaluation des ressources en eaux en Algérie. Puisque jusqu'à présent il n'existait pas de modèles à l'échelle annuelle, des tentatives de transposer des modèles déjà existants à l'échelle moyenne interannuelle réalisés dans les études antérieures n'ont pas donné de résultats probants. Ceci peut

s'expliquer par le fait que la notion « de pluie moyenne interannuelle » laisse supposer qu'on procède à une compensation entre les années humides et sèches, de plus cette variabilité temporelle est très marquée en Algérie du Nord. La mise au point de notre modèle a été réalisée en s'inspirant de la fonction de production du SCS (Soil Conservation Service). L'application de cette méthode sous sa formulation de base n'a pas été d'un grand apport, d'où la nécessité d'introduire certains paramètres tels que la surface du bassin et un paramètre de calage du modèle. Après calage, les résultats ont permis de mettre en évidence l'influence de la pluie annuelle, la surface et la pente moyenne du bassin versant. Ces trois paramètres expliquent 75 % de variance. Toute la base de données nécessaire pour l'application de ce modèle est disponible. L'avantage de notre modèle réside dans la facilité de sa mise en œuvre. En effet, il est basé sur une équation à trois paramètres (pluie moyenne annuelle, la surface et la pente moyenne du bassin versant). Il permet aussi d'estimer le débit des bassins versants jaugés et non jaugés, ce qui est d'une grande utilité pour l'établissement des plans d'aménagement du territoire et la mise en place des différentes infrastructures nécessaires. Ce travail est également une étape vers une meilleure gestion des ressources en eau. Nos résultats permettent de quantifier les apports en eau de surface sur l'ensemble du nord de l'Algérie et d'en fixer la variabilité interannuelle. Par ailleurs, nous avons montré que la qualité des données permettait une telle étude, l'ANRH procède actuellement à un approfondissement de cette démarche en travaillant sur les apports mensuels en utilisant le modèle GR2. Dans l'étude de l'envasement des barrages, la connaissance du débit à l'échelle annuelle contribuera à quantifier la quantité de sédiments qui vient se déposer chaque année et diminuer ainsi la capacité de stockage des barrages. Ceci permet d'estimer de la durée de vie d'un tel barrage.

Les données étant relativement réduites, nous avons travaillé sur leur totalité (pas de différenciation d'une période de calage et d'une de validation) et avons obtenu des coefficients de corrélation statistiquement significatifs. Néanmoins, il sera nécessaire de mettre en application ce modèle dans les conditions différentes de celles de son calage afin de pouvoir analyser les résultats et de déduire ainsi les limites de son application.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Madame Najat Bhiry Professeur à l'université Laval au Québec (Canada) pour avoir lu et corrigé cet article. Ces commentaires et ses suggestions ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 1993. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord - Ministère de l'Équipement - Alger. Une carte au 1/500 000^e et sa notice de 49 p.
- BELDJOUDI L., LARBI T., 1995. Étude générale des apports : 2^e rapport ANRH, 81 p.
- BELDJOUDI L., OULD-YAHIA S., 1997. Étude générale des apports : 3^e rapport ANRH, 23 p.
- CHAUMONT, M., PAQUIN, C., 1971. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle 1/500 000^e, 4 feuilles + notice. *Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord*, Alger, 25 p.
- COUTAGNE A., 1949. Étude générale des débits en fonction des facteurs qui les conditionnent. *Rev. la houille blanche*, mars - avril. pp. 134-146, 11 fig.
- DERY J., 1977. Évaluation des ressources en eau en Algérie, note manuscrite + annexes ANRH, Alger.
- KABOUYA M., 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuels et annuels en Algérie septentrionale. Th. Doc. Univ. Paris XI, France, 327 p.
- LABORDE J.-P., 1997. Éléments d'hydrologie de surface tome 3, à l'intention des cadres de la DEAR Univ. Nice. *UPRESA 6046 du CNRS*, 202 p.
- MEDINGER G., 1948. Tableau général de l'hydrologie algérienne dans *Hydrologie algérienne*, recueil des observations de 1924 à 1946.
- PADOUN J., 1974. Le module interannuel et le bilan hydrologique des oueds de l'Algérie septentrionale. Résumé de thèse de troisième cycle traduction du Russe : ANRH, Alger, 26 p.
- TAÏBI R., 1990. Contribution à l'étude de l'écoulement des cours d'eau de l'Algérie septentrionale, essai de régionalisation. Mémoire de DEA à l'IRD de Montpellier, France, 114 p.
- TOUAZI M., 1997. Géologie de l'Algérie du Nord, vue à travers un SIG et un MNT Mém. DEA Milieux Physiques Méditerranéen. Univ. Nice, France, 100 p.
- TOUAZI M., LABORDE J.-P., 2000. Cartographie des pluies annuelles en Algérie du nord. *Association Internationale de Climatologie*, 13, 192-198.
- TOUAZI M., 2001. Évaluation des ressources en eau et acquisition de bases de données à références spatiales et temporelles en Algérie du Nord. Th. Doct. Univ. Nice, France, 310 p.
- WILLIAMS J.R., LASEUR W.V., 1976: "Water yield model using SCS curve numbers", *Journal of Hydraulics division, ASCE* 102 (HY9), 1241-1253.