
**Bilan Hydrologique du Bassin Versant du Nahr el Jaouz (1965-1971) –
Liban Nord
Etude comparative**

Souheil Awad *

Résumé

Le travail de recherche actuel a pour but d'évaluer la quantité d'eau entrant et sortant du bassin versant du Nahr el Jaouz (Caza de Batroun, Liban Nord). Cette rivière constitue un organisme important du réseau hydrographique au Liban (38 km).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour traduire une idée précise sur le bilan hydrologique. Ces méthodes concernent le calcul de la pluviométrie selon les méthodes d'extrapolation de Thiessen et des isohyètes et la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) selon les formules de Turc et Thornthwaite. Une comparaison entre ces méthodes est établie afin de déceler la fiabilité de chacune dans la détermination précise du bilan. Le calcul est interprété sur 6 années (1965-1971) et basé sur 5 stations pluviométriques (Batroun, Kaftoun, Kfar Hilda, Qartaba et Laqlouq) distribuées dans le bassin allant de la côte jusqu'à la haute montagne dans la région de Tannourine.

L'adoption de la méthode de Thiessen contribue à la dominance exagérée de la station de Kfar Hilda sur 44 % de la superficie totale ce qui rend plus cohérent les résultats obtenus par la méthode des isohyètes qui montre des tranches d'altitudes moins divergées en superficie. L'application des formules d'ETR a révélé les résultats suivants : pour une valeur de précipitation de l'ordre de 1566 mm (obtenus selon la méthode des isohyètes), le pourcentage de l'ETR a été 52 % selon la formule de Turc et 19 % d'après la méthode de Thornthwaite. Quant aux pourcentages de l'infiltration, les valeurs se concentrent vers 24% selon Turc et 40% d'après la formule de Thornthwaite.

*Université Libanaise, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. souheil.awad@ul.edu.lb

Enfin, l'analyse du bilan a montré que la part de l'eau stockée chaque année comporte une réserve importante d'eau douce et renouvelable (102 Mm³ selon la formule de Thornthwaite), offrant un potentiel d'exploitation de centaines de forages dans le domaine domestique et agricole.

Mots-clés : Bassin versant, bilan hydrologique, extrapolation, Isohyètes , Thiessen évapotranspiration, Turc, Thornthwaite.

Introduction

Au plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupant : face à une croissance énorme de la population, une urbanisation et un développement économique rapides, la pression mondiale sur cette ressource s'aggrave.

Au Liban en particulier, La non-application du plan stratégique décennal qui induit un apport de stockage important, conduit le pays à une situation alarmante en termes de besoins en eau potable. L'écart enregistré à partir de 2010 entre besoins et ressources renouvelables en période d'étiage dépasse 600 Mm³/an (Comair, 2008). Cette situation, couplée d'une gestion non durable de l'eau, serait catastrophique. Les conditions prises en compte dans l'hypothèse de calcul doivent être appliquées surtout au niveau de la consommation d'eau pour l'irrigation (Comair, 2010). Dans ce contexte, et surtout dans le Caza de Batroun (Liban Nord), zone à vocation agricole et industrielle, l'augmentation de la demande en eau et des volumes consommés a induit de grands problèmes d'approvisionnement en eau dans les trois secteurs (services, industriel et agricole).

La rivière du Nahr el Jaouz représente le vaisseau principal du Caza de Batroun : elle y alimente trois grands périmètres irrigués (Tannoûrîne, Kfar Helda et la plaine littorale) et déclenche une activité industrielle (eau minérale à Tannourine, hydroélectricité à Kaftoun, carrières, industrie chimique à Koubba, etc.). Menée d'une longueur de 39.9 km (6^{ème} rang en tant que longueur parmi les rivières libanaises), cette rivière coule avec un volume moyen annuel de 55.5 millions m³ de la haute montagne (Jord Tannoûrîne et Aïn er Râha) jusqu'à la côte où le débit moyen durant 6 années atteint les 10 m³/s à l'embouchure (Figure 1).

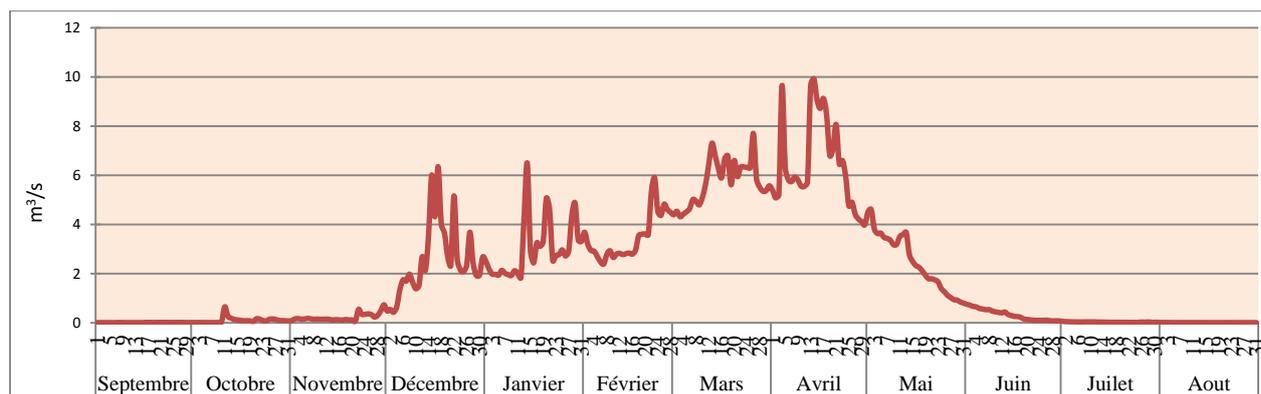


Figure 1 Débits moyens mensuels à l'embouchure du Nahr El Jaouz (1965-1971)

C'est ainsi que l'accroissement des besoins en eau dans cette région, met en relief la nécessité d'optimiser l'utilisation des ressources hydriques, à travers une étude globale du comportement de cet hydrosystème (le bassin versant du Nahr El Jaouz) et de son évolution sous la pression de l'homme et de ses activités.

Cette étude s'inscrit dans ce contexte de gestion des ressources hydriques, et vise principalement la réalisation du bilan hydrologique du bassin versant du Nahr el Jaouz, qui présente un intérêt biogéographique assez important vu l'utilisation croissante de ses eaux pour la production de l'électricité, pour l'eau potable et pour l'irrigation (Nakhlé, 2003).

1. Cadre d'étude

Le bassin versant du Nahr el Jaouz représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base sur l'analyse du cycle hydrologique et ses effets (Figure 2). Ce bassin couvre 198.6 Km² réunissant une cinquantaine de villages sur la façade occidentale de la montagne libanaise, et réunit des caractéristiques variées sur le plan climatologique, morphologique, géologique, hydrologique et structural. Le bassin englobe de nombreuses résurgences naturelles (Dallé-Kfar Helda, Rahoué-Tannourine, Ez Zahlé-Tannourine, etc.) et forages qui alimentent en eau potable environ 65 villages dans le Caza de Batroun (Hakim, 1987).

Nahr el Jaouz coule sans problèmes pendant la période humide ; par contre, il se dessèche durant les mois secs (juillet, aout et septembre), induisant un décalage important de la provision en eau pour la région durant ces deux périodes.

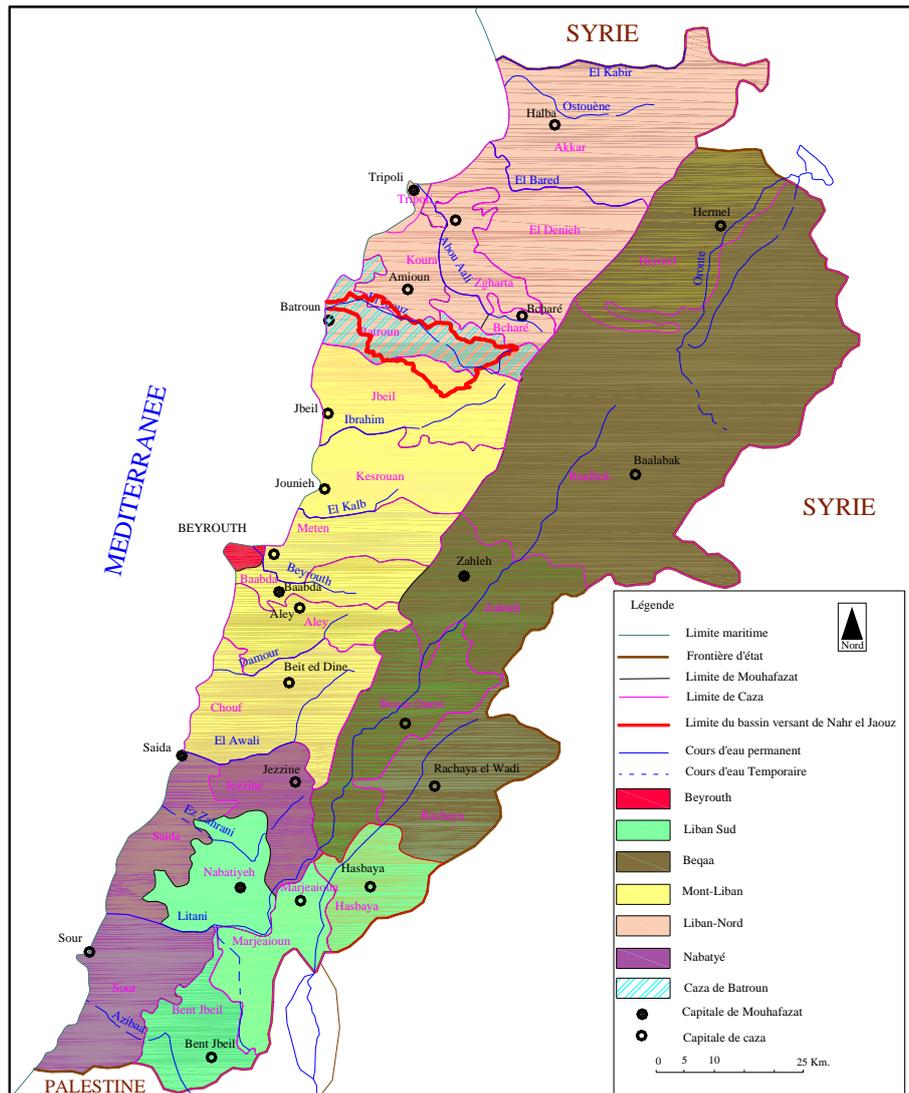


Figure 2 Les principaux fleuves libanais et limite du bassin versant du Nahr el Jaouz.

Cependant, les données hydrologiques précises sur l'ensemble du bassin versant et sur le débit du Nahr el Jaouz sont déficitaires, ce qui empêche la mise en œuvre de mesures mieux adaptées, pour pallier d'une part aux besoins croissants en eau dans la région de Batroun, et d'autre part pour lutter contre les crues durant la période humide.

Il était ainsi intéressant de mener une étude hydrologique en vue de la détermination de la capacité hydrique du bassin et des composantes du bilan hydrologique (précipitations, évapotranspiration, écoulement et infiltration).

La période choisie pour la détermination du bilan hydrologique s'étend de 1965 à 1971 car cette période rassemble à la fois des données spécifiques de pluviométries et de débits. Le choix de cette période est motivé par le souhait d'utiliser au maximum l'extension temporelle des chroniques météorologiques mesurées dans les stations adoptées dans le bassin.

Un relevé des données pluviométriques dans le bassin-versant et ses environs, ainsi qu'une collecte des données de mesures de débit constituaient le point de départ de notre analyse. L'évapotranspiration a été déterminée d'après les données climatiques surtout la température.

2. Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique consiste à comparer la quantité d'eau totale arrivant dans un bassin versant avec la quantité d'eau totale sortant pendant une année moyenne. On peut l'exprimer à l'aide la formule suivante :

$$P = E + Q + dR$$

P : précipitation ; *E* : évapotranspiration ; *Q* : écoulement ; *dR* : stockage + utilisation humaine

Les données nécessaires pour effectuer ce calcul sont représentées par les précipitations brutes et les températures de l'atmosphère. Cependant, l'absence de quelques paramètres météorologiques (rayonnement solaire, humidité relative et spécifique, etc.) ramène à utiliser deux méthodes Turc et Thornthwaite basées sur les données disponibles. La méthode de Thornthwaite semble la plus utilisée et donne les résultats les plus cohérents dans les zones méditerranéennes (Rkiouak., 1996 et Stitou el Messari, 2007).

2.1 Extrapolation des précipitations (1965-1971) : méthode des isohyètes (modifiée) et méthode de Thiessen

a- Méthode des isohyètes : Pour effectuer une estimation rigoureuse de la pluie globale sur le bassin, il est nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de cette variable à cette échelle. Or, le nombre limité de stations situées sur le site d'une part, et l'influence du relief d'autre part font l'aspect particulièrement difficile à assembler. Pour permettre cette estimation, on propose donc l'emploi d'une méthode déterministe simple basée sur la méthode des isohyètes qui suit les courbes de niveaux. Elle consiste à estimer une extrapolation afin de calculer la pluie tombée sur différentes zones du bassin.

En fonction de l'aire du bassin, ces différentes contributions seront étudiées pour déterminer la pluie globale correspondante. La quantité de pluie, donc, tombée sur le bassin versant est divisée selon la superficie attribuée à chaque zone d'altitude (Tableau 1, Figure 3).

Plus que 42 % du bassin (haute montagne 1200-2350 m) reçoit des précipitations supérieures à 1800 mm. On note que 27.5 % du bassin formant la plaine et la basse montagne ne dépasse pas 1237 mm qui correspondent à 22 % des précipitations reçues. Les zones les plus hautes

de la montagne (1700-2350 m) représentent 23.5 % des précipitations pour 19.7 % de la superficie du bassin. L'influence du paramètre altitude est bien marquée d'après Traboulsi (2010) en parlant de l'effet de l'altitude sur la pluviométrie sous le climat méditerranéen.

Tableau 1 Pluviosité dans les différentes zones adoptées pendant 6 années (1965-1971) dans le bassin versant du Nahr el Jaouz (Méthode des isohyètes).

Zone	Superficie rattachée à chaque zone		Pluviosité : méthode des isohyètes (Mm ³)	Moye. ann. de la pluv. (Mm ³)	Pluviosité moy. annuelle (mm)	Pluviosité annuelle rapportée à la superficie de chaque zone	
	(km ²)	%				(mm)	%
0-200	7.624	3.8	50.17	8.36	1096	42	2.7
200-600	47.26	23.8	349.94	58.32	1234	294	18.8
600-1200	57.60	29.0	516.75	86.12	1495	434	27.7
1200-1700	47.05	23.7	510.79	85.13	1809	428	27.4
1700-2375	39.06	19.7	438.61	73.10	1872	368	23.5
<i>Total (Bassin versant)</i>	198.6	100	1866.26	311.03	1501	1566	100

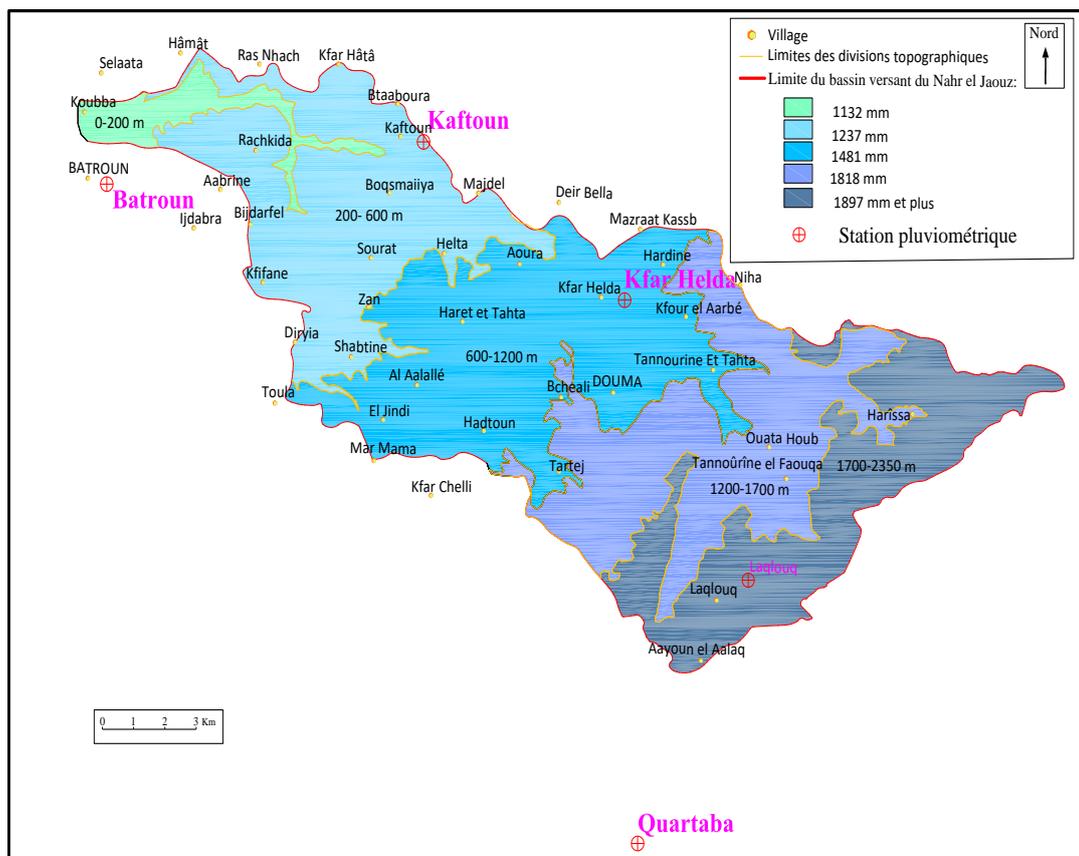


Figure 3 Pluviométrie par tranches d'altitudes dans le bassin versant du Nahr el Jaouz .

b. Méthode de Thiessen La méthode du polygone de Thiessen est couramment utilisée, parce que son application est aisée et donne en général de bons résultats. Elle s'applique notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas spatialement homogène.

Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique. Dans notre cas, la station de Kfar Helda (Figure 5. Stations pluviométriques adoptées et leurs superficies selon la méthode de Thiessen, localisée au centre du bassin, montre une zone d'influence très grande car à elle seule revient plus que 44% (87 Km²) de la surface étudiée laissant aux quatre autres zones 66 %. La zone d'influence de cette station est considérée comme exagérée.

L'extrapolation selon Thiessen montre une pluviométrie annuelle moyenne de 1422 mm (**Error! Reference source not found.**). Cette valeur est plus faible que celle obtenue avec la méthode des isohyètes (1566 mm). L'analyse statistique montre d'après la méthode de T-Test (Student's Test) qu'il y a une différence significative entre les 2 méthodes. Les stations pluviométriques considérées prennent proportions comme le montre la (Figure 4. Superficie réservée pour chaque pluviomètre selon la méthode de Thiessen:

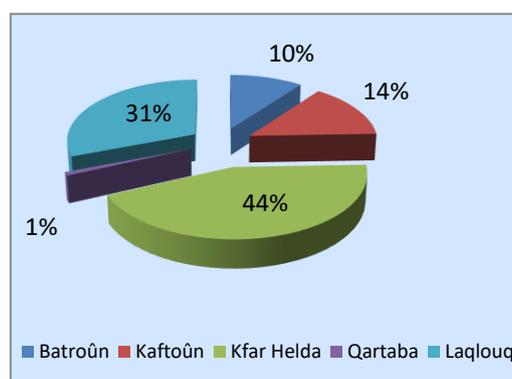


Figure 4. Superficie réservée pour chaque pluviomètre selon la méthode de Thiessen.

Tableau 2 - Caractéristiques des stations utilisées comme sources de données pluviométriques (méthode de Thiessen).

Station	Superficie reliée à la station (km ²)	% de la superficie de la station par rapport à tout le bassin	Moyenne Pluviométrie (mm)	La part de chaque station (mm)	La part de chaque station (Mm ³)
Batroûn	20.2	10.16	968	103	20.4
Kaftoûn	28.4	14.28	1225	181	36.0
Kfar Helda	87.01	43.77	1243	544	108.1

Qartaba	1,85	0.93	1747	16	3.2
Laqlouq	61.35	30.86	1872	578	114.7
Total	198.6	100	1411	1422	282

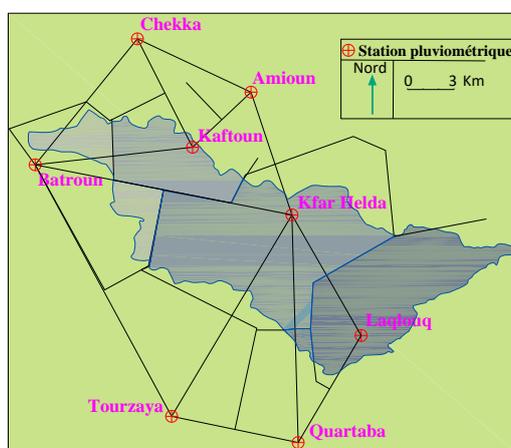


Figure 5. Stations pluviométriques adoptées et leurs superficies selon la méthode de Thiessen.

3.2 Débit et pluviométrie

À partir des valeurs journalières des débits fournis par l'Office National du Litani (ONL) pour les deux stations Embouchure et Beït Chlela (Tableau 3) et des données disponibles de la pluviométrie (Atlas climatologique), nous avons mené l'étude comparative des variations saisonnières et annuelles de pluviométrie-débit. Les données parallèles de pluviométrie et du débit ne sont disponibles que pendant 6 années (1965-1971).

Tableau 3 Renseignements sur les stations de mesure de débits du Nahr el Jaouz.

Station	Données	Localité	Altitude (m)
Embouchure	Mesures de débit (limnigraphe)	Kouba	7
Beït Chlâla	Mesures de débit (limnigraphe)	Beït Chlela,	598

En comparant la pluviométrie du bassin et le débit mensuel du Nahr el Jaouz, on aperçoit un délai dans le temps entre les pics pluviométriques et les crues. Les averses se tiennent aux mois de janvier-février et les crues se produisent pendant les mois de fonte de neige en mars et avril, comme c'est le cas de la majorité des fleuves du flanc Ouest du Mont-Liban.

Les précipitations et les débits durant les mois pluvieux excèdent d'une manière flagrante ceux durant les mois secs (Figure 4). Pendant les mois pluvieux, la pluviosité représente 83.74 % des précipitations cependant le débit dépasse cette part pour atteindre 97.76 % du débit total. Ces chiffres se conforment car le cours d'eau tarisse presque totalement pendant l'été.

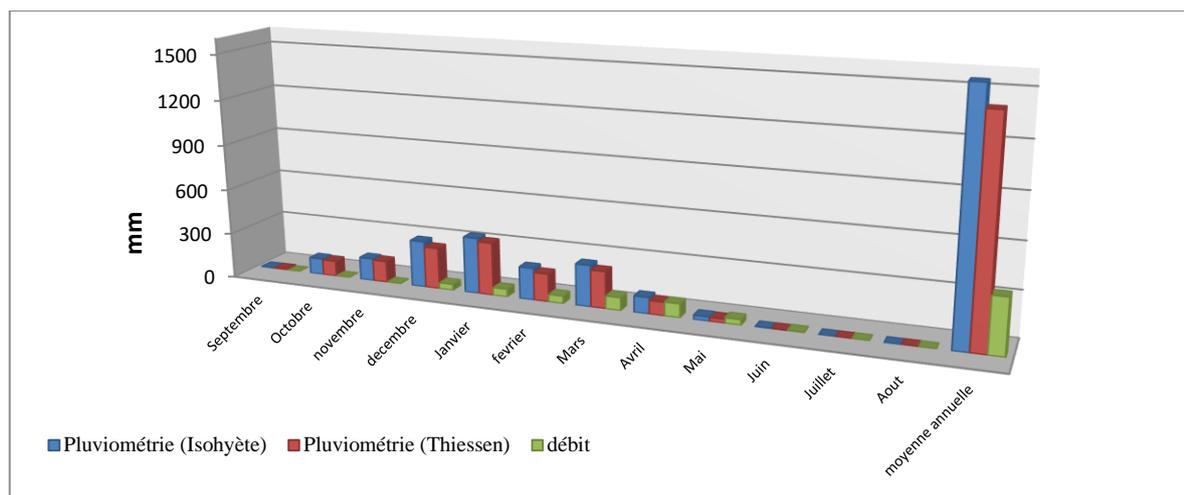


Figure 4 - Pluviométrie et débit mensuels moyens durant 6 années (1965-1971).

Cela s'explique par l'utilisation presque totale de la plupart des sources qui alimentent la rivière dans le domaine agricole et pour l'eau potable. Si cette quantité d'eau n'avait pas due être prélevée, le débit aurait pris une allure différente.

Vu ces conditions, le bilan est affecté par le manque de données précises sur la quantité extraite. Comme résultats sur les deux paramètres pluviométrie et débit, on retient que l'écoulement n'a pas dépassé pas le 1/4 des précipitations reçues pendant les 6 années. Le pic pluviométrique se voit au début du mois de Janvier (Figure 5) et s'effectue avant 3 mois de celui du débit (Tableau 4).

Tableau 4 - Pluviométrie et écoulement dans le bassin du Nahr el Jaouz durant 6 années (1965-1971).

	Pluviosité (Mm ³)	Débit (Mm ³)	Débit %	Pluviosité (mm)	Débit (mm)
Moy. annuelle Isohyètes	311	72	23.14	1566	363
Moy. annuelle Thiessen	282.3	72	25.5	1422	363

Dans ce domaine, une relation prudente existe entre la pluviométrie et le débit ; la corrélation dépasse la valeur 0.55, cela traduit le retard de la réponse du bassin envers les pluies et donne une importance aux précipitations neigeuses et à l'infiltration-résurgence des eaux précipitées.

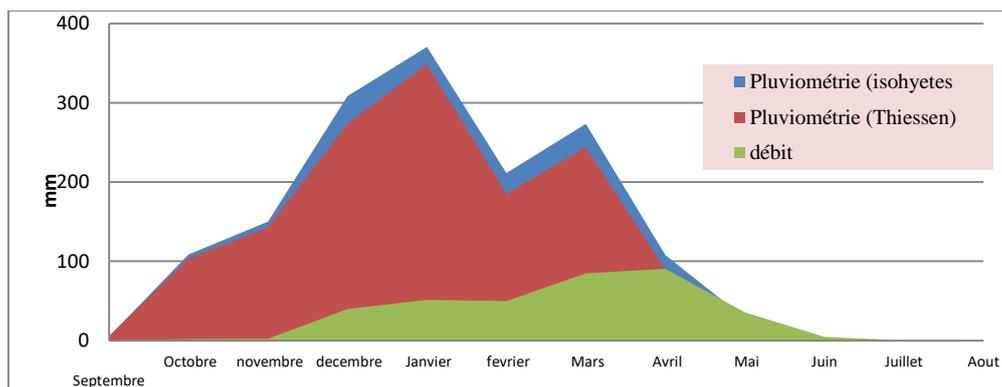


Figure 5 Comparaison entre pluviométrie et débit mensuel moyen durant 6 années (1965-1971).

La corrélation pluviométrie-débit est de l'ordre de 0.96 ce qui explique la grande influence des précipitations sur le débit du Nahr el Jaouz pour une même année. On note aussi que la chute du débit est plus vite que celle des précipitations. Lorsque les précipitations diminuent jusqu'à la moitié, le débit est réduit au-delà de 2.5 fois (Figure 6).

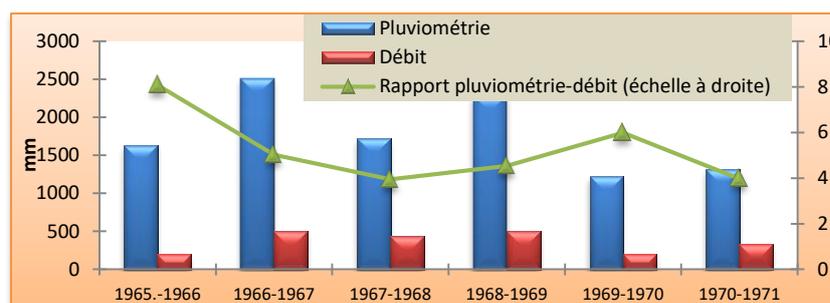


Figure 6 Rapport Pluviométrie-débit durant 6 années (1965-1971).

Ce résultat évoque l'influence du nombre de jours de pluie sur la recharge de la nappe et sur le ruissellement. Avec une pluviométrie forte, la nappe n'arrive pas à entreprendre toute la quantité et le déficit de l'infiltration se traduit par l'évacuation à travers le ruissellement et les sources de trop pleins. Dans ce contexte, les années à faible pluviosité montrent un débit proportionnellement plus faible. On s'aperçoit que l'infiltration entreprend une grande majorité des précipitations. On dispose des données concernant les jours de pluies durant quatre années successives. Une corrélation importante mais négative (-0.86) est traduite entre les jours de pluie et le rapport pluie-débit : plus les jours de pluie diminuent, plus le rapport s'élève (Tableau 5).

Tableau 5 - Rapport pluviométrie-débit et jours de pluie à la station de Kfar Helda (1969-1973).

Année	Pluviométrie mm	Débit (mm)	Rapport Pluviométrie - Débit	Jours de pluie
69-70	960	204	4.71	67
70-71	1124	330	3.40	80
71-72	802	154	5.20	59
72-73	767	104	7.38	58

3.3 Calcul du bilan hydrologique selon l'Évapotranspiration réelle mensuelle (Turc)

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres du bassin versant du Nahr el Jaouz. A partir d'observations faites sur 254 bassins versants situés sous tous les climats du globe, Turc (1961) a proposé une formule permettant d'évaluer directement l'ETR annuelle moyenne d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle :

$$E_{tr} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{avec } L = 200 + 25t + 0,05t^3$$

P la hauteur annuelle de pluie (en mm) ; *ETR* 'évapotranspiration réelle (en mm/an).

t la température annuelle (en °C)

La température annuelle moyenne est calculée d'après les données enregistrées pour la même période dans les stations adoptées. Un gradient de température lié à l'altitude est déterminé : 9°C aux hautes altitudes et 18°C sur le littoral pendant la saison hivernale. En retenant la part de chaque région, on obtient les résultats de l'ETR dans les 5 régions comme le montre le Tableau 6:

Tableau 6 Résultats du bilan hydrologique durant 6 années selon la formule de Turc et d'après la méthode des isohyètes (1965-1971).

Année	Pluviométrie	ETR		Débit		Consommation		Stockage		
	(mm)	(mm)	%	(mm)	%	mm	%	(mm)	%	Mm ³
1965-1966	1375	797	58	201	15	108	7.9	269	19.6	53.4
1966-1967	1687	833	49	501	30	108	6.4	245	14.5	48.6
1967-1968	1794	858	48	436	24	108	6.0	392	21.9	77.8
1968-1969	1794	873	49	503	28	108	6.0	310	17.3	61.5
1969-1970	1499	798	53	204	14	108	7.2	389	26	77.2

1970-1971	1246	765	61	330	26	108	8.7	43	3.45	8.5
Moyenne	1566	821	52	362	23	108	7	274.6	17.1	54.5

Le résultat de l'estimation de la consommation en eau dans les différents secteurs du bassin versant est présenté dans le Tableau 7: la somme de cette consommation atteint les 108 mm. En se servant de cette quantité dans un calcul plus détaillé, nous obtenant un stockage annuel net de :

$$383-108 = 275\text{mm.}$$

Tableau 7 Consommation en eau dans le bassin versant du Nahr el Jaouz 2005 (chiffres arrondis).

<i>Agriculture</i>	<i>Industrie</i>	<i>Eau potable et ménagère,</i>
16.5 Mm³ (22 000 dounoms x 750 m³)	0.4 M m ³ (282 petites industries et stations d'essence x 1500 m ³)	4.5 Mm ³ (110000 habitants)
83 mm	2.5mm	22.7mm

En répétant le même calcul mais en utilisant les portées de pluviométrie remportées selon la méthode de Thiessen (Tableau 8), on obtient des résultats de stockage beaucoup plus faibles (presque la moitié) que ceux obtenus selon la méthode des isohyètes. La méthode de Thiessen surestime la part de la station de Kfar Helda (1243 mm) en dépit des parts des stations plus pluvieuses.

Tableau 8 - Résultats du bilan hydrologique durant 6 années selon la formule de Turc et d'après la méthode de Thiessen (1965-1971).

Année	Pluviometrie (MM)	ETR		Débit		Consommation		Stockage		
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	Million Mm ³
1965-1966	1238	788	64	201	16	108	9	141	11	28.0
1966-1967	1548	850	55	501	32	108	7	88	6	17.5
1967-1968	1640	868	53	436	27	108	7	227	14	45.1
1968-1969	1574	872	55	503	32	108	7	91	6	18.0
1969-1970	1443	807	56	204	14	108	7	324	22	64.3
1970-1971	1091	756	69	330	30	108	10	/	/	/
Somme	8533	4942	59	2175	25	649	47	767	8	172
Moyenne	1422	824	59	363	25	108	8	128	8	29

Le réchauffement climatique tient des impacts sur les précipitations. Les incidences se réfléchiront dans les changements en matière de la disponibilité en eau douce, de l'écoulement des eaux de surface et de recharge des eaux. La plupart des études relatives à cette question concluent qu'il est trop tôt pour reconnaître un changement dans les précipitations au cours du siècle dernier (MOE-UNDP 2011).

Les recherches menées sur la région Est de la Méditerranée ont montré qu'il n'y avait aucune action décelable sur les changements observés dans les tendances des précipitations et aucun changement majeur n'est à noter dans la saison des pluies dans la région. Par contre Shaban indique que le Liban montre des tendances claires à la baisse des précipitations entre 1966 et 2005.

La Seconde Communication Nationale à la CCNUCC (La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques) a mis en relief l'estimation des pertes dues à l'évapotranspiration en raison du réchauffement climatique au Liban. Si la température s'élève de 1°C, les ressources en eau diminueront de 250 Mm³ par an. Si la température s'élève de 2°C, les ressources diminueront de 450 Mm³ par an (MOE-UNDP, 2011). Dans ce concept, on rapporte les résultats obtenus sur le bilan à la diminution des ressources selon la CCNUCC. Le Tableau 9 exprime la baisse proportionnelle des ressources hydriques dans le bassin du Nahr el Jaouz liée au réchauffement climatique globale au Liban. La baisse de l'emmagasinement souterrain est déterminée proportionnellement à la superficie de notre bassin, elle est de 4.5 Mm³ pour le réchauffement de 1°C et de 8.55 Mm³ pour celui de 2 °C.

Tableau 9 Diminution du stockage souterrain dans le bassin versant du Nahr el Jaouz.

Méthodes	Stockage souterrain	Stockage si le réchauffement est de 1 °C (4.75 Mm ³)	Stockage si le réchauffement est de 2 °C (8.55 Mm ³)
Turc, Isohyètes (Mm³)	54.4	49.9	45.85
Turc, Thiessen (Mm³)	29	24.2	20.45
Thornthwaite Isohyètes (Mm³)	102.3	97.8	93.75
Thornthwaite Thiessen (Mm³)	95.3	90.8	86.75

Le stockage diminue beaucoup dans le cas où le réchauffement atteint les 2 °C surtout en utilisant la formule de Turc pour la détermination de l'ETR et la méthode de Thiessen pour la pluviométrie. L'influence du réchauffement est grave dans le cas du stockage faible.

Le stockage et le débit montrent les valeurs les plus faibles. Le stockage s'étale entre 0 durant les années à faible pluviosité et 22 % des précipitations durant les années pluvieuses. L'importance des années humides pour les aquifères se voit essentiel pour le renouvellement de l'eau épuisée à travers les forages. Ce qu'on peut tirer dans cette analyse c'est que les

années pluvieuses montrent un pourcentage d'évapotranspiration moins prononcé. Lorsque la pluviométrie diminue, le pourcentage de l'ETR augmente. Bien que la corrélation est très forte entre les deux puisque cette corrélation atteint presque le maximum 0.98 (l'ETR n'augmente pas proportionnellement avec l'augmentation de la pluviométrie).

3.4 Capacité de la nappe profonde selon la formule de Turc

Les réserves en eau souterraine à un instant donné sont définies de manière objective mais leur évaluation quantitative pose un problème de précision. En se ramenant sur toute la superficie du bassin, la quantité annuelle du stockage se rapporte à une valeur moyenne de 54.01 Mm³ en appliquant la méthode des isohyètes pour la détermination des précipitations. La quantité des eaux de recharge venant de l'extérieur du bassin n'a pas été prise en considération dans notre étude vue la nécessité des études plus poussées dans le domaine géologique. La capacité d'exploiter la nappe ne doit pas donc excéder la moyenne annuelle surtout qu'une série d'années sèches rend la reprise du niveau piézométrique assez difficile. D'après un simple calcul, la quantité moyenne stockée équivaut à une capacité de 675 forages si on considère que 80000 m³ est le débit annuel de chaque forage. En retirant l'eau évaporée de l'eau précipitée, on détermine la quantité d'eau restituée à un mètre carré (Tableau 10).

L'analyse des résultats selon Thiessen présente une capacité réduite en tant que stockage souterrain (29 Mm³) par comparaison avec celle des isohyètes. L'adoption de la méthode des isohyètes semble fournir des résultats plus cohérents. Dans cette dernière, les tranches d'altitudes sont également réparties tandis que les superficies rapportées à chaque station pluviométrique selon la méthode de Thiessen montrent un écart important.

La plaine et la basse montagne restitue la quantité la plus faible en eau car la pluviométrie s'accroît avec l'altitude et en même temps, l'évapotranspiration n'augmente pas proportionnellement avec l'augmentation de la pluviométrie qui semble être le facteur déterminant. La haute montagne engendre 2 à 4 fois plus d'eau que les régions de basse et moyenne montagnes. Nous attribuons un rôle important des zones d'altitudes dans l'emménagement et le renouvellement des eaux souterraines ainsi que dans l'augmentation de l'écoulement.

Tableau 10- Quantité d'eau restituée (m³) dans un m² dans les différentes zones du bassin versant du Nahr el Jaouz

Zone	0-200 m			200-600 m			600-1200 m			1200-1700 m			1700-2350 m		
Variables	Pluv	ETR	Pluv. moins ETR	Pluv	ETR	Pluv moins ETR	Pluv	ETR	Pluv moins ETR	Pluv.	ETR	Pluv. moins ETR	Pluv.	ETR	Pluv. moins ETR
m³/m²	1.1	0.8	0.3	1.2	0.8	0.4	1.5	0.8	0.7	1.8	0.7	1.1	1.9	0.6	1.3

Ce bilan revient à un certain équilibre dans quelque part en tenant compte de toute la quantité qui ressort et celle qui rentre. Il est difficile d'estimer les quantités qui traversent la limite du bassin aussi bien que la quantité qui le rejoint. Vue cette situation, on expose les difficultés de boucler un tel bilan :

- Une sous-estimation de la lame d'eau écoulée liée au bassin hydrogéologique.
- Une surestimation de l'ETR liée à l'inadaptation de la méthode de calcul employée face au contexte climatique, à la végétation, ou aux processus hydrologiques du bassin.
- Une sous-estimation des précipitations surtout neigeuses.

Il est sûr du renouvellement de la nappe et donc de la présence d'une quantité maintenue chaque année (niveau piézométrique stable dans les forages).

3.5 Calcul du bilan selon l'ETR mensuelle selon la méthode de Thornthwaite

Les méthodes ici développées ne peuvent donner qu'un ordre de grandeur approximatif de l'ETR puisqu'elles sont basées, pour la plupart, sur l'emploi de relations empiriques qui ne tiennent pas compte spécifiquement du contexte climatique et du type de végétation rencontré sur le bassin étudié. C'est pour cela qu'on se traine dans l'application d'une autre méthode de calcul de l'ETR et donc un autre concept de calcul du bilan hydrologique d'après la méthode de Thornthwaite (1948).

A partir des valeurs mensuelles d'ETP, nous appliquons la formule de Thornthwaite aux valeurs de pluies mensuelles. Le calcul de l'ETR, d'après cette méthode est donc une démarche entièrement conceptuelle. Dans le cas présent, notre bassin est karstique en majorité, ce qui laisse supposer que la pluie a de grande chance de s'infiltrer rapidement vers le souterrain. En plus, une part de ces précipitations peut être localement retenue par l'effet de la rétention du sol. D'après nos observations, ce dernier ne semble avoir qu'une faible épaisseur sur les régions karstiques du bassin. Cet effet est d'autant plus accentué dans les

zones fortement pentues (les vallées profondes répandues partout) en hautes altitudes, où le calcaire affleure quasiment à nu et est peu couvert.

Les résultats obtenus considèrent un surplus bien prononcé touchant les 986 mm pour une ETR réduite de 298 mm (Tableau 11). De même, on retranche de ce surplus la quantité écoulée qui est de 363 mm.

Tableau 11 Bilan hydrologique se basant sur la formule de Thornthwaite (1965-1971).

	Méthode des Isohyètes		Méthode de Thiessen	
	Total (mm)	%	Total (mm)	%
P	1566	100	1422	100
ETP	746	53.03	757	53
ETR	298	21.16	315	22
Surplus	986	70.04	951	67

3.6 Capacité de la nappe selon la méthode de Thornwaite

On conclut donc par le fait que l'estimation de la pluie et de l'ETR reste le problème majeur rencontré dans ce travail. Quoiqu'il en soit, il semble que la difficulté d'estimation attribuable au fait que l'hétérogénéité spatiale de la pluie sur un grand bassin (198.6 km²) ne puisse être correctement traduite pour l'établissement d'un bilan hydrologique suivant seulement 5 stations météorologiques.

Nous présentons dans le Tableau 12 la capacité de la nappe traduite par les différents paramètres du surplus.

Il en reste presque 515 mm attribuée au stockage souterrain. Cette quantité élevée nous éclaire sur le grand potentiel hydrologique de la nappe.

Tableau 12 Valeurs des paramètres du bilan en considérant le surplus obtenu par la méthode de Thornthwaite.

Surplus	Ecoulement		Consommation mm		Stockage mm	
	mm	Mm ³	mm	Mm ³	mm	Mm ³
986 mm (Isohyètes)	363	72.1	108	21.4	515	102.3
951 mm (Thiessen)	363	72.1	108	21.4	480	95.3

La détermination du bilan hydrologique permet ainsi de mettre en avant le caractère de la région par l'existence d'un surplus pluviométrique même s'il est couplé à des données climatiques sévères (ETP élevé). Sur l'ensemble du bassin, l'apport d'eau annuel lié aux précipitations est d'environ 311 millions de m³ et l'alimentation de l'eau souterraine est de

102.3 millions de m³ soit 33% des précipitations totales. Ce rapport est probablement variable d'une année à l'autre et varie aussi selon la méthode et la formule appliquées. L'application de la méthode de Thiessen pour la détermination des précipitations donne des résultats différents de ceux obtenus selon la méthode des Isohyètes ce qui pose par suite des questions sur la certitude de la quantité d'eau infiltrée.

4. Analyses des résultats obtenus selon les deux formules

La baisse de la pluviométrie d'une année se répercute sur l'emménagement de l'eau. Les années de récession pluviométrique entraînent la baisse des débits des eaux de surface et des eaux souterraines (Madiodio Niassé, 2004). Cette diminution a atteint dans notre bassin des valeurs extrêmes (plus que 50 Mm³). Les années pluvieuses viennent combler le déficit et relève la quantité stockée qui atteint presque les 102 Mm³ selon Thornwaite et 54 Mm³ d'après la formule de Turc. Toutefois, le volume considérable du plan d'eau durant les années pluvieuses permet pour un temps une certaine compensation lors des années particulièrement sèches. C'est cet équilibre très sensible entre les apports et les déficits en eau qui permet aujourd'hui la pérennité du surplus. Dans notre cas une baisse de la quantité précipitée se répercute sur tous les paramètres et en particulier la part liée à l'emménagement souterrain (Tableau 12).

L'évapotranspiration, largement tributaire de la température, est probablement peu variable d'une année à l'autre. La formule de Turc donne toujours des chiffres plus restreints en tant que capacité des eaux infiltrées (Figure 7). Cette différence revient à l'élévation de l'évapotranspiration réelle selon Turc. On note aussi que l'addition des quantités absorbées par le sol durant les mois les plus humides selon la méthode de Thornthwaite, diminue la part de l'évapotranspiration diminue en faveur de l'infiltration. L'évapotranspiration élevée selon Turc diminue le renouvellement des eaux souterraines. Par conséquent, les eaux souterraines renouvelées selon les résultats obtenus par la méthode de Thornthwaite, représentent deux fois la quantité d'eau renouvelée selon Turc.

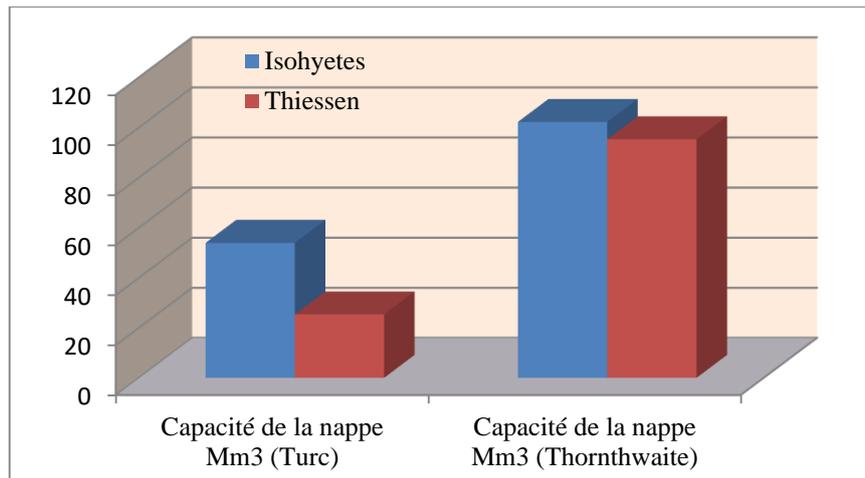


Figure 7 - Capacité d'emmagasinement de la nappe dans le bassin versant du Nahr el Jaouz selon les formules de Turc et de Thornthwaite (1965-1971).

Conclusion

L'analyse des données climatiques et celles du débit du Nahr el Jaouz durant une série d'années (1965-1971) a contribué au calcul du bilan hydrologique selon deux méthodes : la première qui utilise la formule de Turc pour le calcul de l'évapotranspiration réelle et celle de Thornthwaite qui prend en considération la rétention de l'eau par le sol. Cette dernière a fourni des résultats beaucoup plus faibles en tant qu'évapotranspiration donc des résultats plus élevés en tant qu'infiltration (102 Mm^3) que ceux obtenus avec la formule de Turc (54 Mm^3). La quantité infiltrée fournit un domaine prospérant pour l'investissement dans des forages pour l'extraction de l'eau souterraine. Tous les secteurs peuvent en profiter surtout le domaine agricole et celui de l'eau potable. L'utilisation de la méthode de Thiessen pour le calcul de la quantité d'eau précipitée sur le bassin sous-estime les précipitations et par suite diminue proportionnellement la quantité infiltrée.

Cette étude visait à réaliser le bilan hydrologique qui se montre au final particulièrement délicat. Les formules empiriques utilisées et l'incertitude sur la quantité des eaux sorties ou rentrées laissent une marge d'incertitude concernant l'exactitude du bilan.

L'analyse spatiale des précipitations dans le bassin-versant de l'année 1939 à 1974 montre que la répartition pluviométrique est fonction des coordonnées géographiques et de l'altitude et confirme que les régions montagneuses sont les plus arrosées (Traboulsi, 2010 et Awad, 2011). La variabilité interannuelle de la pluviométrie influence directement le débit des sources d'eau et par suite le débit du Nahr el Jaouz. Les années pluvieuses engendrent des débits élevés et remboursent le déficit des aquifères. Par contre, les années sèches engendrent

un débit beaucoup plus faible, raccourcissent la période des crues ainsi que leurs intensités et posent des problèmes d'approvisionnement en eau à la fin de l'été.

Des efforts devront donc par la suite être déployés pour comprendre l'hétérogénéité spatiale de la pluviométrie sur le bassin ayant une superficie de 198.6 km². Il serait dans ce but particulièrement utile de disposer des stations météorologiques sur les versants situés aux plus hautes altitudes du bassin. La délimitation du bassin hydrogéologique du Nahr el Jaouz fixera largement les résultats du bilan. Dans ce contexte, l'interaction avec les bassins riverains du Nahr el Aasfour, Nahr Ibrahim et Nahr el Fidar nécessite une étude approfondie. On peut penser aussi au prélèvement anthropique des eaux de surface qui se fait essentiellement sur le drain principal et les grandes sources. L'irrigation intensive peut considérablement modifier le bilan par une consommation d'eau non évaluée.

Références

- Awad, S. (2011). *Nahr El Jaouz, Etude de Géographie Physique : Hydrologie et Pollution*. (Thèse de doctorat, Université Libanaise, sous la direction du Dr Bahzad Hakim), Liban, 313 p. 53 Fig, 92 graphes, 19 coupes, 130 Tab, 27 photos, 10 c.h.t.
- Comair, F. (2008). *Gestion et Hydrodiplomatie de l'Eau au Proche-Orient*. Edition L'Orient Le Jour. 317 p.
- Comair, F. (2010). *Les besoins en eaux du Liban. Atelier Technique ouvert. Les Eaux dans le pays : Défis et solutions*. Centre de Conventions International, Barcelone.
- Hakim, B. (1987). *Étude hydrologique sommaire de la zone d'altitude du Caza de Batroun: Analyses physico-chimiques et bactériologiques*. C.D.R., Beyrouth, 51 p., 8 fig., 10 tabl.
- Ministry of Environment, (2011). *Lebanon's Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Service of Environmental Technology - Department of Air Quality, Beirut, Lebanon.
- Madiodio, N., Afouda, A., & Amani, A (2004). *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : élément de stratégie régionale de préparation et d'adaptatio.n*. UICN, Glan, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. XVIII. 71p.
- Nakhlé, K., (2003). *Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises : apports et suivi au moyen de bio indicateurs quantitatifs (éponges, bivalves et gastéropodes)*. (Thèse doctorale, Université Paris 7, Denis Diderot), 213p.
- Rkiouak, S., (1996). *Etude hydrogéologique et simulation mathématique de l'aquifère de l'Oued Laou*. (Thèse de 3ème cycle, Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Sciences, Tétouan).
- Shaban, A., (2009). *Indicators and aspects of hydrological drought in Lebanon*. *Water Resources Management*. 23 (10), 1875-1891.
- Stitou el Messari J. et Salhi A., 2007. *Projet wadi de l'union européenne Rapport des activités de 2007*. Approche Hydrogéologique. 40 p 9 tabl.

- Thornthwaite, C.W., (1948). Approach toward a rational classification of climate. *Geographical. Review*. Vol 38.
- Traboulsi, M., (2010). La pluviométrie moyenne annuelle au Liban. Interpolation et cartographie automatique. *Lebanese Science Journal*, Vol. 11, No. 2, 2010- 11. pp 11-25
- Turc, L., (1961). *Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour*. Ann agron 12, pp. 13-49.
- El Hassan, Z., (2010). *3 ressources en eau. Etat de l'environnement et ses tendances au Liban*. ECODIT.