

# ESSAI D'ESTIMATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).

ISKOUNEN Saadi, BOUGHERARA Ahmed

Laboratoire LASTERNE, Faculté des Sciences de la terre, géographie et aménagement du territoire, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie.

Reçu le 12/12/2018 – Accepté le 17/06/2019

## Résumé

Les apports solides annuels moyens de la Soummam à la station de Sidi Aiche (série 1954/1992) est de 4,3.106 tonnes. Cette valeur globale obtenue à l'embouchure ne permet aucune localisation de zone d'apport. Afin d'estimer l'impact des aménagements (4 barrage) réalisés dans le bassin et prévoir l'impact des futurs aménagements, la spatialisation de l'érosion hydrique s'impose. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé l'équation universelle. Les pertes en terre dues à l'érosion en nappe n'atteignent que 48% de l'apport solide mesuré à la station de Sidi Aiche. De ce fait, nous avons ajouté l'apport du ravinement et des mouvements de masse en se basant sur une cartographie des facteurs à l'origine de ces formes d'érosion. L'addition des pertes en terre relatives à chaque forme d'érosion en l'occurrence 2,01.106 tonnes pour l'érosion en nappe, 1,67.106 tonne pour le ravinement et 1,19.106 tonne pour les mouvements de masse atteint le tonnage de l'apport solide naturel enregistré à la station de Sidi Aiche (4,88.106t/an). Ainsi, cette démarche généralise les pertes en terre à toutes les formes d'érosion hydrique et compense par là-même la faiblesse de l'USLE. Néanmoins, pour obtenir une validation définitive, ces résultats encourageants nécessitent l'application de cette démarche sur d'autres sous bassins jaugeés.

**Mots clés:** transport solide, formes d'érosion, SIG, modèle USLE, Soummam, Nord-est algérien.

## Abstract

The average annual contributions of Soummam at the Sidi Aiche station (series 1954/1992) are 4.3.106 tons. This overall value obtained at the mouth hinders the localization of the filling area. In order to estimate the impact of facilities (4 Dam) conducted in the basin and predict the impact of future developments, In order to estimate and anticipate the impact of the developments (4 barrages) made in the basin, the spatialization of water erosion is essential. To achieve this goal, we have used the universal equation. Soil loss due to the sheet erosion does not cover 48% of the solid contribution measured at the Sidi Aiche station. As a result, we added the contribution of the ravine and mass movements based on factors mapping which caused these erosion forms. The addition of soil losses for each form of erosion in this case 2.01.106 tonnes for sheet erosion, 1.67.106 tonnes for the gully erosion and 1.19.106 tonnes for mass movements reaches the tonnage of the natural solid contribution recorded at the SidiAiche station (4, 88.106 t / year). Thus, this approach generalizes land losses to all forms of water erosion and hence compensates for the weakness of the USLE. Nevertheless, to obtain definitive validation, these results encourage the application of this approach to other sub-basins.

**Keywords:** solid transport, erosion forms, GIS, USLE model, Soummam, North-eastern of Algeria.

## المخلص.

قدرت الحمولة الصلبة المتوسطة السنوية لحوض الصومام عند محطة سيدي عيش (لفترة 1992/1954) ب 4,3.106 طن، هذه القيمة متحصل عليها عند المصب، لا تسمح لنا بتحديد (مكان) منطقة الحمولة. من أجل تقدير أثر المنشآت الهيدروليكية (4 سدود) وتوقع الأثر المستقبلي لهذه المنشآت، التوزيع المجالي للتعرية المائية أمر ضروري داخل الحوض. لوصول إلى هذا الهدف، استعملنا المعادلة العالمية لفقدان التربة USLE، فكانت النتائج كالتالي: لم تتعدى الحمولة الصلبة عن طريق التعرية الصفائحية إلا 48% من الحمولة المقاسة عند محطة سيدي عيش. ولهذا قمنا بإضافة الحمولة الناتجة عن التعرية الخطية و الحركات الكتلية وهذا بالاعتماد على رسم خرائط للعناصر ذات صلة بهاذين النوعين من التعرية، حيث أعطى جمع فقدان التربة النسبي لكل شكل من أشكال التعرية القيم التالية: 2,01.106 طن بالنسبة للتعرية الصفائحية، 1,67.106 طن بالنسبة للتعرية الخطية و 1,19.106 طن بالنسبة للحركات الكتلية، تصل الحمولة الصلبة الطبيعية المسجلة عند محطة سيدي عيش ( 4,88.106 طن / سنة). وبالتالي، فإن هذا النهج يعمم فقدان التربة بكل أشكال التعرية المائية وتعوض نقص طريقة USLE. ومع ذلك، للحصول على التحقق النهائي، تتطلب هذه النتائج المشجعة تطبيق هذا النهج على الأحواض الفرعية المقاسة.

**الكلمات المفتاحية:** الحمولة الصلبة، أشكال التعرية، نظم المعلومات الجغرافية، طريقة USLE، الصومام، شمال شرق الجزائر.

## INTRODUCTION

L'érosion hydrique en Algérie a été de tout temps un souci majeur pour les services concernés. Les travaux récents s'accordent pour estimer l'érosion à l'Ouest, centre et Est algérien respectivement à 47%, 27% et 26 % de l'ensemble des terres [14]. Aussi, la perte annuelle de la capacité de l'ensemble des barrages est de  $20.10^6 \text{ m}^3$  [17].

De par sa situation, dans le Nord-est algérien (rive Sud de la méditerranée), le bassin versant de la Soummam subit une érosion hydrique intense à très intense par endroit. En effet, l'agressivité des pluies affecte la quasi-totalité du bassin versant et notamment sa partie Nord-est. Les formations géologiques qui se caractérisent par une grande hétérogénéité, montrent, dans leur majorité, une sensibilité (vulnérabilité) importante à l'érosion hydrique. Aussi, l'action anthropique est loin d'être négligeable. En effet, le développement du bassin a nécessité jusqu'à présent la construction de quatre barrages d'une capacité globale d'environ  $400 \text{ Mm}^3$  [17]. L'estimation globale de transport solide en suspension à la station de Sidi Aiche (92% du bassin versant de la Soummam), est de  $4,3.10^6$  tonnes. Avec cette perte en terre, la Soummam se classe parmi les bassins subissant une dégradation moyenne dans le Nord algérien [08]. L'objectif de ce travail est de quantifier et de spatialiser l'érosion hydrique au niveau du bassin versant de la Soummam en se basant sur l'équation universelle dans sa version originale (USLE).

Cependant, cette équation élaborée à partir de mesures à l'échelle de la parcelle, ne prend en compte que l'érosion en nappe [16]. De ce fait, les résultats obtenus ne représentent que 50% du transport solide en suspension mesuré dans le bassin.

Par ailleurs, l'érosion hydrique qui affecte le bassin versant de la Soummam se caractérise par la présence des trois formes de l'érosion hydrique, en l'occurrence l'érosion en nappe, l'érosion par ravinement et l'érosion par mouvement de masse. En effet, la participation de ces trois formes d'érosion au transport solide a fait que ce dernier est le double des pertes en terre estimées par l'équation universelle.

De ce fait, nous avons adopté la démarche de l'équation universelle pour calculer l'apport des deux autres formes d'érosion (ravinement et mouvement de masse) en déterminant les facteurs propres à chaque forme.

L'addition de l'apport de chaque forme d'érosion va permettre une estimation globale de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam.

## 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de la Soummam est situé au Nord-Est de l'Algérie entre les méridiens

$3^{\circ}60'$  et  $5^{\circ}57'$  et les parallèles  $35^{\circ}75'$  et  $36^{\circ}77'$ . Son thalweg principal est d'orientation Sud-ouest/Nord-est. Il est limité au Nord par la Méditerranée, à l'Ouest et au Nord-ouest par le Djurdjura et les massifs côtiers de Bejaia, à l'Est les hautes plaines sétifiennes, au Sud, le plateau de Bouira et le domaine des Biban. Sa superficie est de  $9125 \text{ km}^2$  (fig. 01). C'est un bassin de vie englobant plusieurs villes importantes (Bejaia, Akbou, Bouira, Setif...) et une population d'environ 1,3 million d'habitants [01]. La vallée de la Soummam a connu, ces dernières années une activité économique importante représentée essentiellement par l'industrie agro-alimentaire.

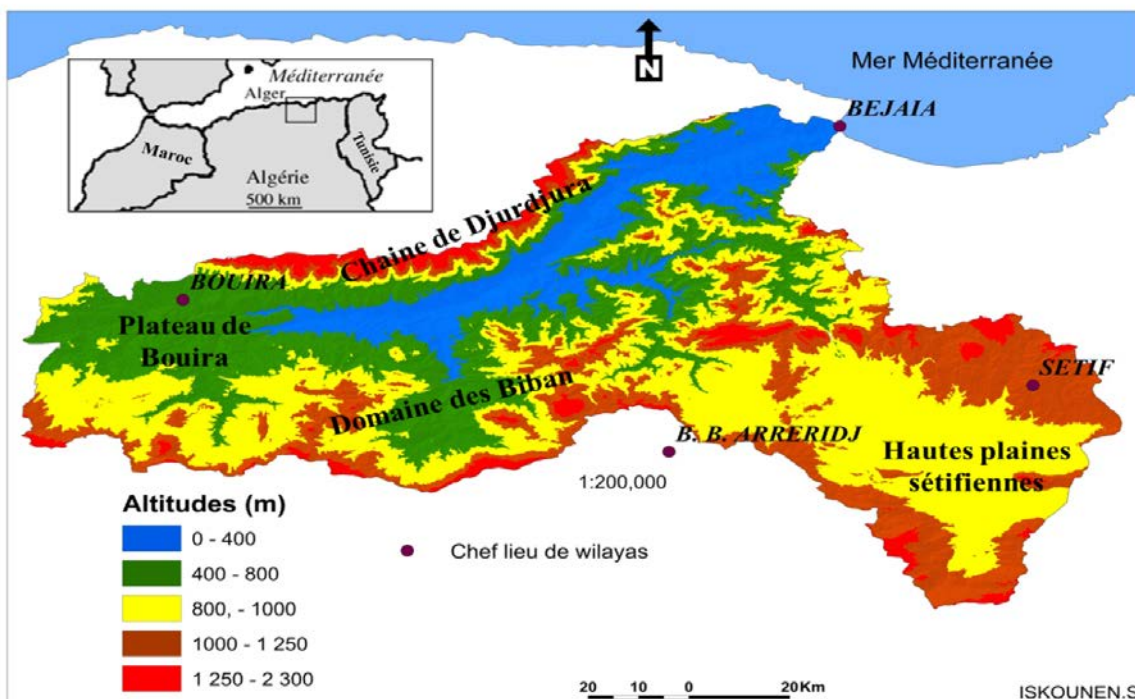


Fig. 01 : Localisation de la zone d'étude.

**3. OUTILS ET METHODE**

**3.1. La méthode :**

Les données disponibles à la station de Sidi Aiche peuvent être réparties en deux catégories :  
 La première catégorie relative à la période (1954/1985) correspond aux flux hydro-sédimentaire ( $4,3.10^6$  tonnes) de la période avant tout aménagement (débits naturel). La deuxième (1985/1992) correspond au début des aménagements hydrauliques, (mis en eau de deux premiers barrages du bassin) avec un apport solide de  $2,1.10^6$ /an [12]. La diminution de l'apport solide de la deuxième période est visiblement très importante par rapport au volume des sédiments retenus dans les deux barrages. Néanmoins, la quantification des sédiments retenus est réalisée par bathymétrie donc incluant le charriage (charriage estimé à 30% de l'apport solide). La campagne bathymétrique réalisée en 2014 estime un volume global de vase pour les quatre barrages, réalisé dans le bassin de la Soummam à  $2,56.10^6$  m<sup>3</sup>/an (soit  $3,84.10^6$  t/an) [19]. Cette moyenne cache une différence

importante de la dégradation spécifique d'un barrage à l'autre.  
 Pour saisir cette différence et localiser les plus importantes zones d'apport de sédiment, nous avons opté pour l'application de l'équation universelle des pertes de terre afin de confirmer les apports mesurés de sédiments et de prévoir l'apport des sous bassins non jaugés qui recevront probablement d'autres barrages. Cependant, ce model n'a pas donné les résultats escomptés (41% de l'apport solide mesuré). Finalement, cet apport ne représente que la forme de l'érosion en nappe. En raison de la présence d'autres formes d'érosion hydrique dans le bassin versant, en l'occurrence l'érosion par ravinement et l'érosion par mouvement de masse, nous avons utilisé un model afin d'additionner les effets des trois formes d'érosion en tenant compte des facteurs relatifs à chaque forme (fig.02).

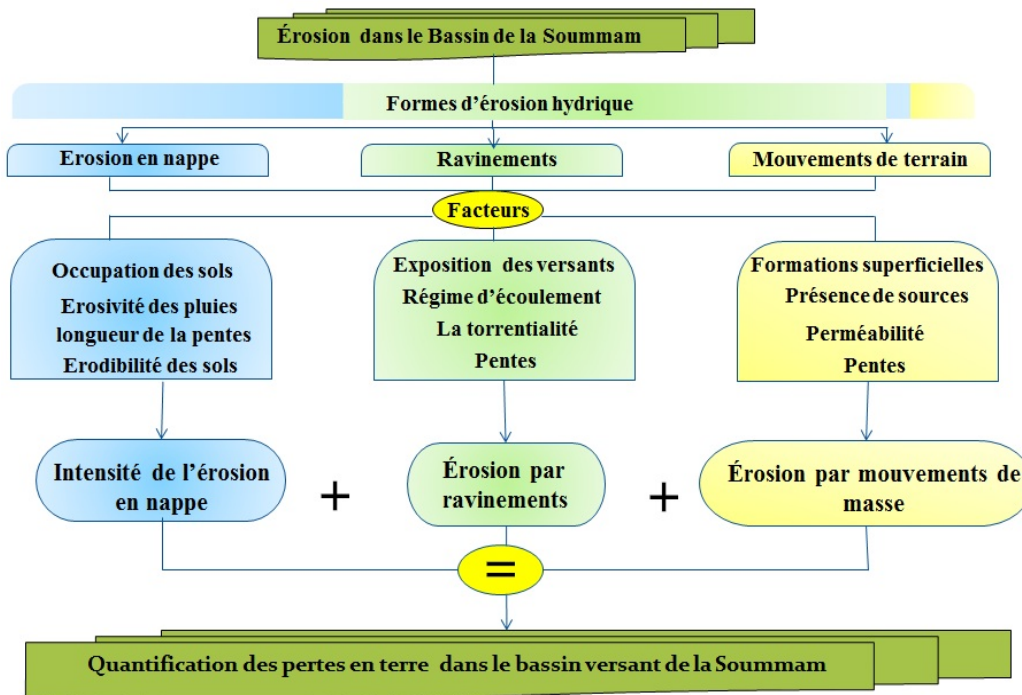


Fig. 02 : organigramme du model adopté

**3.2 Outils :**

La caractérisation des différents facteurs qui conditionnent les flux hydro-sédimentaires dans le bassin de la Soummam a nécessité l'exploitation de différentes cartes, d'images satellitales et de logiciels de traitement numérique de l'image (ENVI 4.8, Global Mapper 15.0) et SIG (ArcGis 10).

**4. QUANTIFICATION ET SPATIALISATION DE L'EROSION HYDRIQUE :**

**4.1. Quantification de l'érosion en nappe : application du model USLE :**

En se basant sur le model USLE (Universel Soil Loss Equation) élaboré par Wischmeier et Smith (1978) [26] sous la forme suivante :  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$   
 Les pertes en terre (A) exprimée en t/ha/an est le produit de 6 facteur : érosivité de la pluie (R), l'érobabilité des sols (K), la longueur de la pente (LS), l'occupation du sol (C) et les pratiques antiérosifs (P) [22].  
 Pour ce travail, nous avons adopté la démarche de l'équation universelle des pertes en terre, avec des modifications en raison du manque de données relatives

**ESSAI D'ESTIMATION DE L'EROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).**

à l'intensité des pluies et à la texture des sols [09], [27]. Ainsi, les facteurs se présentent comme suit :

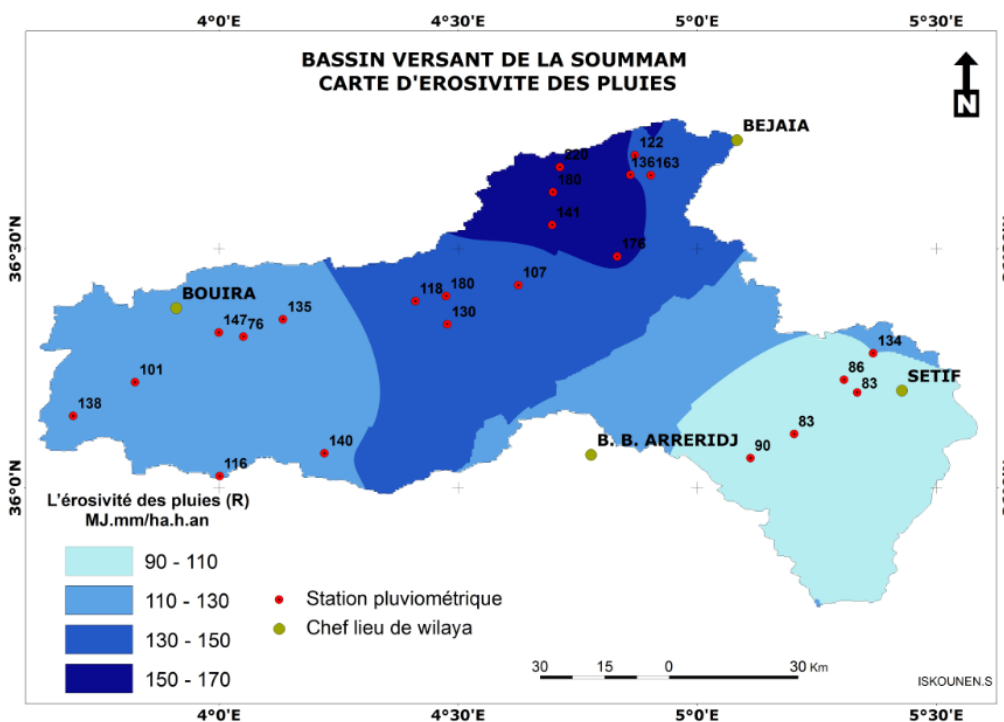
**- L'érosivité des pluies (R) :**

L'intensité et la fréquence des pluies tombant sur des sols nus ont une influence déterminante sur les différents mécanismes qui conditionnent l'érosion hydrique [13].

Le facteur d'érosivité des pluies de Wischmeier (R) est calculé de la manière suivante :  $R = I30 \cdot Ec \cdot K$  où **R** est l'indice d'érosivité de la pluie ou (agressivité de la pluie), exprimé en MJ.mm/ha.H.an, **Ec** l'énergie cinétique de l'averse, exprimé en joules/m<sup>2</sup>/mm, **I30** l'intensité maximale pendant 30 mn de l'averse, exprimée en mm/heure, **K** le coefficient qui dépend de système d'unités.

En raison de l'absence de mesures d'intensité des pluies de 30 minutes dans la zone d'étude, nous avons utilisé le modèle de Kalman ( $R_{kal} = 143 \cdot \log(P \cdot P_{24} \cdot 10^{-6}) + 89,7$ ) proposé pour la zone Nord-africaine [20]. En effet, les termes du facteur R ont été remplacés par les précipitations moyennes annuelles (P) et les précipitations maximales en 24 heures pour une période de retour de 20 ans (P<sub>24</sub>).

Ainsi, nous avons calculé le facteur R pour 23 stations pluviométriques avec une période de mesure qui dépasse les 20 ans. Pour la spatialisation des valeurs du facteur R, nous avons utilisé la méthode de Krigeage (fig.03).



*Fig.03 : Carte d'érosivité des pluies du bassin versant de la Soummam*

L'agressivité des pluies est conditionnée par l'altitude, l'éloignement de la mer et l'exposition aux vents Nord et Nord-ouest. De ce fait, les hautes plaines sétifiennes sont les moins exposées à l'agressivité des pluies. Par contre, les hauteurs du Djurdjura subissent l'agressivité la plus intense (fig. 03).

**- Le facteur topographique (LS)**

Ce facteur représente l'effet combiné de la longueur et l'inclinaison de la pente. Le facteur topographique (LS) est calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur par la formule de Wischmeier et Smith:  $LS = (L/22,13)^m \cdot (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,065 \cdot S^2)$

Où :

- L : la longueur de pente en m,
- S : l'inclinaison de la pente en %,

- M : paramètre tel que m = 0,5 si la pente est > 5%, m = 0,4 si la pente est de 3,5 à 4,5 %, m = 0,3 si la pente est de 1 à 3 % et m = 0,2 si la pente est < 1%.

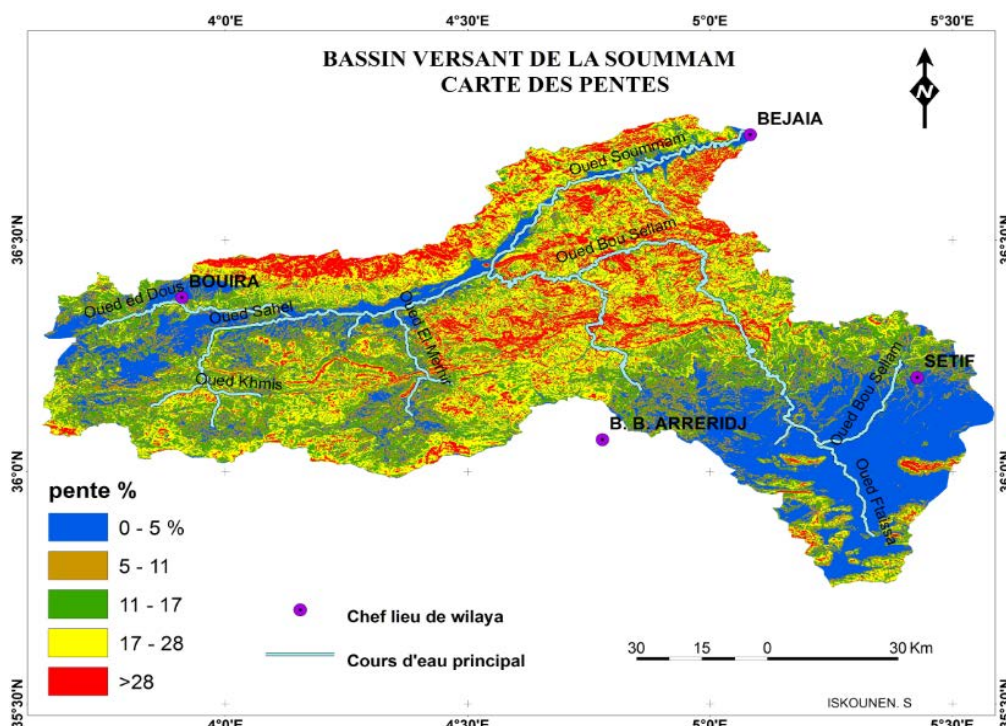
Le facteur topographique se limite uniquement à l'utilisation de la pente. Car, dans un bassin accidenté le facteur longueur de pente n'a pas la même efficacité que dans les milieux moins tourmentés. Aussi la combinaison longueur et inclinaison de la pente est difficile à réussir sous ArcGIS ; comme elle n'apporte pas de résultats fondamentalement différents.

La pente est divisée en 5 classes afin de laisser les paysages facilement lisibles. Aussi, les seuils sont fixés dans le but de lier les catégories de pentes avec les différentes formes d'érosion.

**ESSAI D'ESTIMATION DE L'EROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).**

La lecture de la carte des pentes (fig. 04) montre que la classe 0 – 5 % prédomine essentiellement dans la vallée de la Soummam jusqu'au plateau de Bouira et sur les hautes plaines sétifiennes. Par contre les fortes pentes

caractérisent le flanc Sud-est du Djurdjura et la partie Nord des Biban (>28%). Cependant, la partie Sud des Biban montre un relief chahuté (5 - 28%).



**Fig. 04 : Carte des pentes du bassin versant de la Soummam**

**- L'occupation du sol (C) :**

Dans le modèle de Wischmeier ce facteur incorpore les effets du couvert végétal et l'influence des méthodes culturales sur l'érosion des sols [15].

La carte d'occupation du sol est dressée à partir des cartes d'occupation du sol des wilayas composant le bassin versant de la Soummam (wilayas de Bejaia, Bouira, Tizi Ouzou et Bordj Bou Arreridj). Ces cartes sont établies par l'institut national des sols, de l'irrigation et de drainage (INSID) en collaboration avec le bureau national d'études pour le développement rural (BNEDER), au 1/25 000 [04]. Après la construction de la mosaïque, nous avons procédé à la classification des différentes occupations du sol en quatre classes par ordre de protection du sol (tab. 01).

**Tab. 01 : Classes d'occupation du sol selon leurs protections du sol**

Type d'occupation du sol	Classe selon la protection du sol	SurfaceKm <sup>2</sup>	Surface %
Forêt et maquis	Classe protectrice	2857	43
Oléiculture		1077	
Cultures maraichères	Classe moyennement protectrice	325	36
Cultures en sec		2981	
Parcours	Classe non protectrice	1508	17
Sol nu		67	
Plan d'eau	Apport (nul)	69	4
Espace bâti		241	

L'occupation du sol (fig.05) est déterminée par la lithologie et le relief d'un côté et du climat de l'autre côté. De ce fait, nous constatons la prédominance des céréalicultures dans les hautes plaines sétifiennes et le plateau de Bouira. Cependant, l'oléiculture occupe les versants dominant la partie Nord de la vallée de la Soummam. Par contre, les cultures maraichères, très discontinues, sont disséminées au sein des champs de l'oléiculture et des terrains forestiers.

**- L'érodabilité des sols (K) :**

Le facteur (K) exprime la vulnérabilité du sol à être érodé par la pluie. Ce facteur dépend des propriétés physiques et chimiques du sol (granulométrie, agrégation, stabilité structurale, porosité, teneur en matière organique, etc.) [22]. Une équation a été établie pour estimer la valeur de l'érodabilité des sols (K) (Wischmeier et Smith, 1978):  $K = 2,8 \cdot 10^{-7} M^{1,14} (12 - M.O.) + 0,0043 (b - 2) + 0,0033 (c - 3)$

Où :

- M = facteur granulométrique (% limon + % sable très fin) (100 - % argile)
- M.O = matière organique (%)
- b = code de la structure du sol (granulaire très fine : 1; granulaire fine : 2; granulaire moyenne et grossière : 3; en bloque ou massive : 4)
- c = code de la classe de perméabilité (rapide : 1; modéré à rapide : 2; modérée : 3; lente à modérée : 4; lente : 5; très lente : 6).

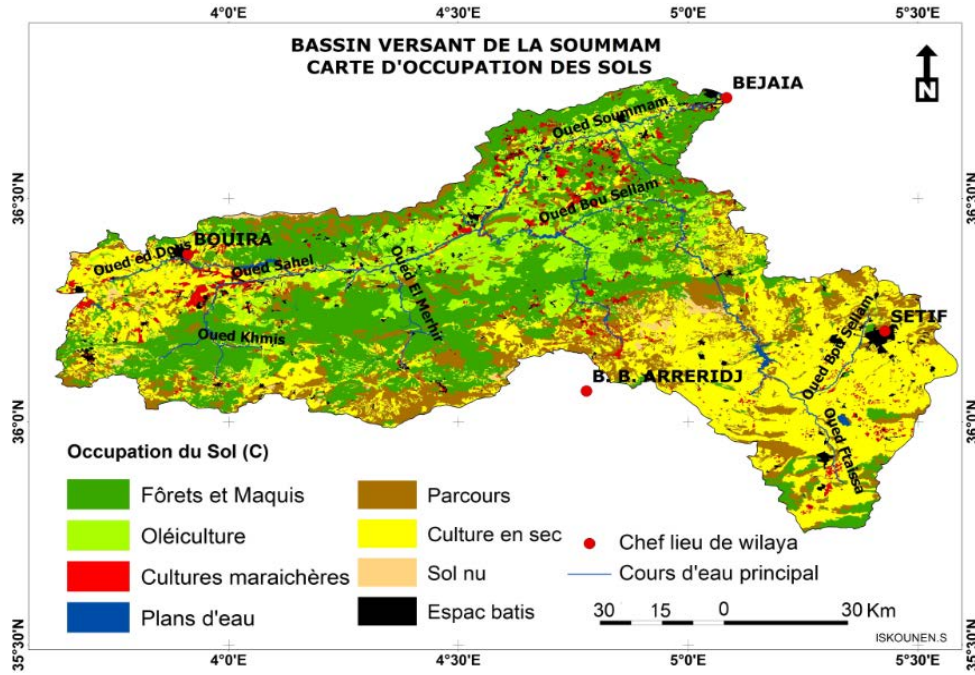


Fig. 05 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Soummam

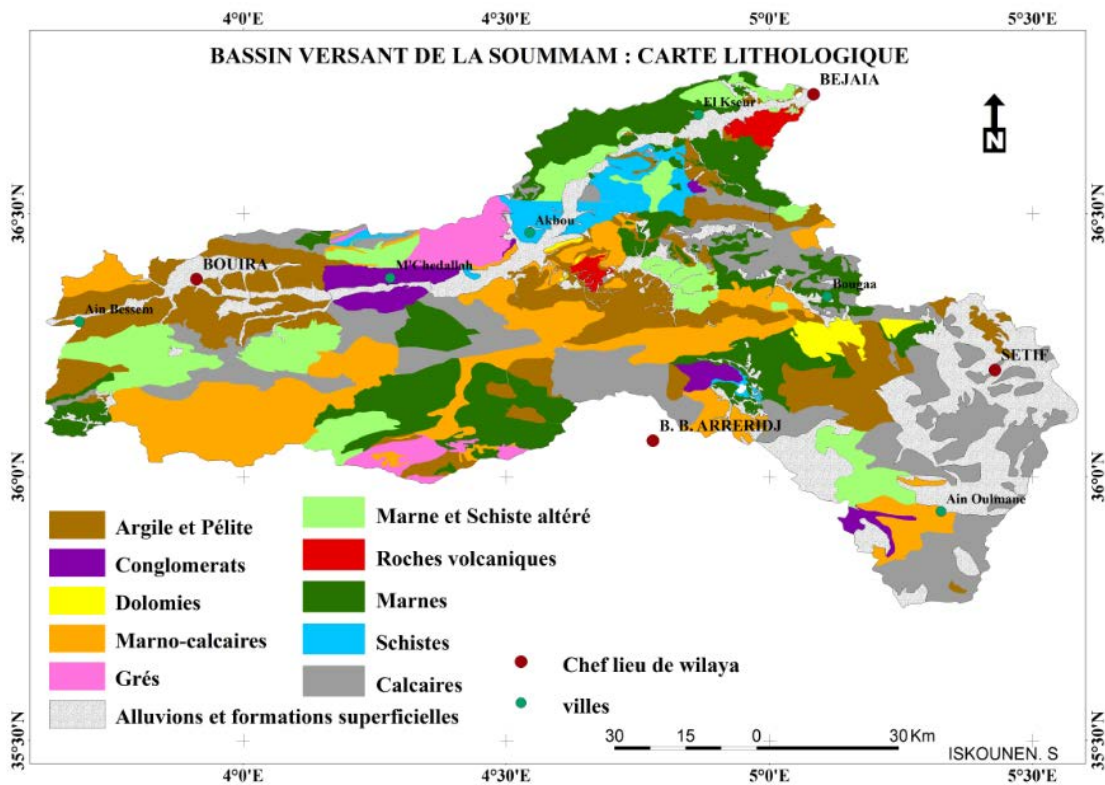


Fig. 06 : Carte lithologique du bassin versant de la Soummam

Malheureusement nous ne disposons pas de données suffisantes pour pouvoir calculer le facteur K à partir de cette équation.

Pour pallier à cet inconvénient, nous avons appliqué la démarche proposée par Sadiki.A, Toumi.S et Boukheir [20], [24], [03]. Elle consiste en la classification des affleurements géologiques par ordre de résistance à l'érosion hydrique. Pour atteindre cet objectif, nous avons exploité 26 cartes géologiques à l'échelle 1/50

000, complétées, par endroit, par des cartes aux 1/200 000 et 1/500 000. [05]. Ces cartes, en plus de leurs échelles différentes, elles ont été établies à différentes époques (entre 1922 et 1988), d'où la différence importante de l'information concernant la même formation géologique. Cette situation nous a imposé un travail d'homogénéisation des données extraites des différentes cartes (26 cartes géologiques 1/50 000, 02 cartes 1/200 000). Ainsi, la carte lithologique élaborée

**ESSAI D'ESTIMATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).**

est une synthèse d'une lecture et une interprétation de tous les documents cartographique disponibles.

Le but recherché est de faire ressortir les caractéristiques lithologiques de chaque formation et ses réactions vis-à-vis de l'agressivité du climat, ce qui nous a permis de les réunir en quatre classes selon leurs résistances à l'érosion (tab. 02).

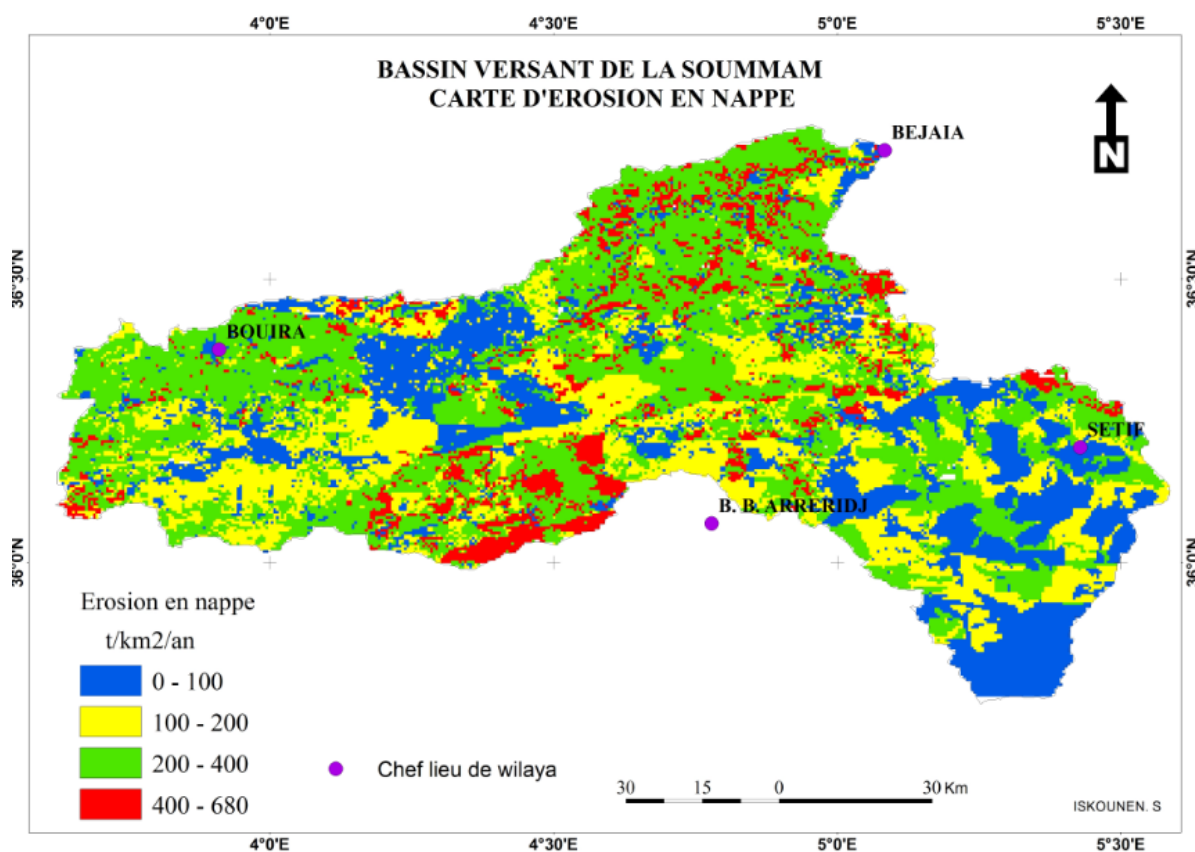
**Tab. 02 :** Classe des formations lithologiques selon leur résistance à l'érosion

Lithologie	Résistance à l'érosion	Surface km <sup>2</sup>	Surface %
Calcaire	Résistantes	1687	26
Grés		261	
Conglomérat		222	
Dolomie		90	
Roches volcaniques		69	
Schiste	Moyennement résistantes	250	18
Marno-calcaires		1345	
marne et schiste altéré	Faible résistance	846	24
Marne		1374	

Argile et Pélite	Très faible résistance	1539	32
Alluvions et formations superficielles		1435	

**Quantification et spatialisation de l'érosion en nappe dans le bassin versant de la Soummam**

La répartition des classes d'érosion spécifique, de la plus faible (0 – 100 t/km<sup>2</sup>/an) à la plus forte (400 - 700 t/km<sup>2</sup>/an) est le résultat de la multiplication de l'ensemble des facteurs retenus par l'USLE. En effet, la classe à très faible érosion apparaît essentiellement dans les hautes plaines sétifiennes et la terminaison Sud des Biban. La classe d'érosion faible (100 – 200 t/km<sup>2</sup>/an) partage les mêmes espaces avec la première classe comme elle apparaît d'une manière beaucoup plus discontinue dans le reste du bassin versant de la Soummam. Par contre la classe d'érosion moyenne (200 – 400 t/km<sup>2</sup>/an) occupe le Nord-ouest et l'extrême Sud du bassin versant. La classe (400 – 700 t/km<sup>2</sup>/an) d'érosion forte apparaît se forme de tâche très réduite éparpillées surtout au sein de la deuxième et la troisième classe (fig. 07).



**Fig.07 :** Carte des pertes en terre par érosion en nappe du bassin versant de la Soummam.

La quantification des pertes en terre par classe d'érosion en nappe permet de constater que les classes d'érosion très faible et faible occupent plus de 50% de la surface du bassin versant avec un apport moyen annuel égale à 447000 t/an. Quant à la classe d'érosion moyenne, elle

couvre, à elle seule, 35,6% de la surface du bassin avec un apport de 974100 t/an. Cependant, la classe d'érosion forte n'occupe que 12% de la surface du bassin et participe avec un apport de 588060 t/an. On remarque que la faiblesse de la surface des classes à moyenne et

forte érosion est compensée par l'intensité de l'érosion (tab. 03).

**Tab.03** : Répartition des classes de perte en terre par érosion en nappe

Classe	Perte en terre t/km <sup>2</sup> /an	Surface km <sup>2</sup>	Surface %	Apport moyen t/an
Très faible	0 - 100	2708	29,7	135400
faible	100 - 200	2081	22,8	312150
moyenne	200 - 400	3247	35,6	974100
forte	400 - 680	1089	12	588060
<b>total</b>		<b>9125</b>	<b>100</b>	<b>2009710</b>

Les pertes en terre estimées par l'équation universelle atteignent 2,01.10<sup>6</sup> t/an. Elles ne représentent que 48% de l'apport moyen annuel mesuré à la station de Sidi Aiche (4,30.10<sup>6</sup>t/an).

La faiblesse de l'érosion estimée par l'USLE est due essentiellement à la prise en compte de l'érosion en nappe uniquement. Les tentatives d'adaptation et d'amélioration du modèle dues au manque de données ou à la différence du milieu n'ont pas apporté les solutions attendues ; d'où notre démarche qui considère que l'USLE n'a pris en compte qu'une seule forme d'érosion hydrique. En effet l'érosion hydrique à l'origine des pertes en terre, dans le bassin versant de la Soummam est due notamment à d'autres formes d'érosion hydrique telle que le ravinement et les mouvements de masse. Ainsi nous avons adopté la

même démarche que l'USLE pour la spatialisation des facteurs relatifs aux deux nouvelles formes d'érosion proposées.

**4.2 Quantification de l'érosion par ravinement**

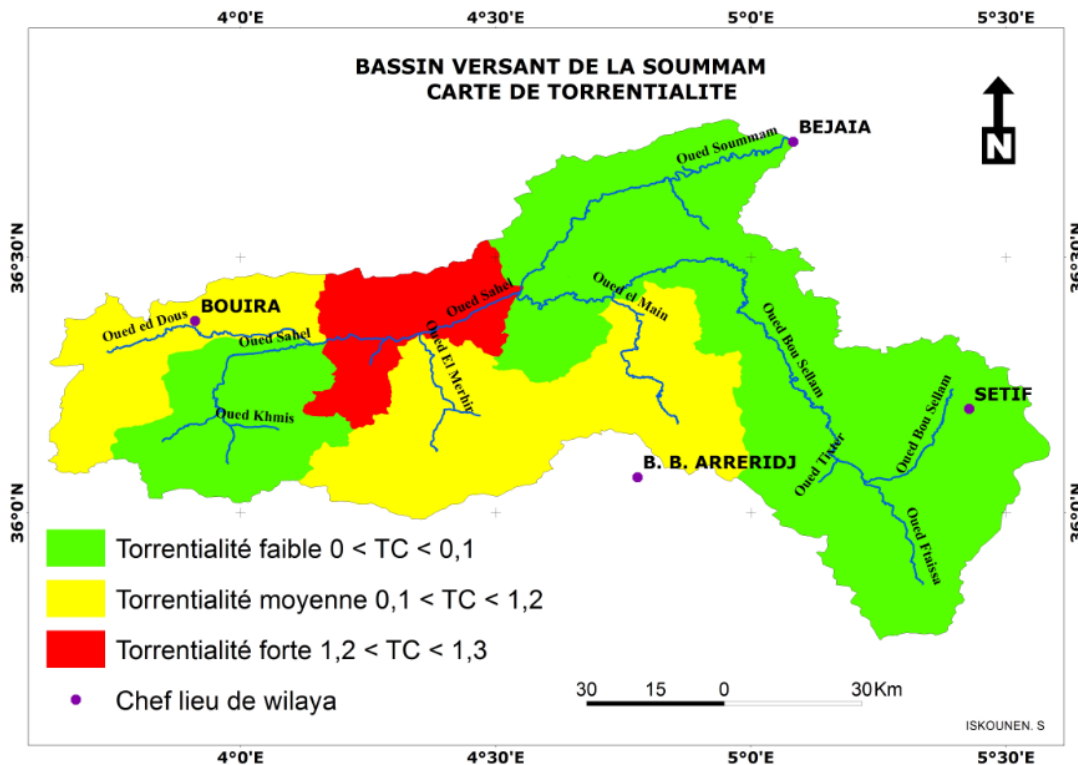
Cette forme d'érosion est omniprésente dans le bassin de la Soummam. Elle est reconnue par plusieurs travaux réalisés ces dernières années (Tihay. J. P. et HADDAD) [25], [11].

Les facteurs qui conditionnent cette forme d'érosion sont représentés essentiellement par les différents régimes d'écoulement notamment la torrencialité et les autres types de ruissellements (modeste, fort et très fort), la pente et l'exposition des versants.

Il est à noter que le facteur pente est utilisé dans la quantification d'érosion par ravinement de la même manière que dans la quantification de l'érosion en nappe. De ce fait, nous nous référons à la carte des pentes (fig. 04).

- **La torrencialité**

Le coefficient de torrencialité [23] est calculé pour chaque sous bassin, ce qui nous a permis de caractériser les bassins de point de vue ruissellement et les classer par ordre de torrencialité. Ces bassins sont ensuite répartis dans trois classes de torrencialité (faible, moyenne et forte). Cette classification nous a permis de spatialiser ce facteur sur l'ensemble du bassin de la Soummam (fig.08).



**Fig. 08** : Carte de torrencialité du bassin versant de la Soummam.



Le Nord du bassin et l'extrême Sud-est montrent une torrentialité faible. Par contre les Biban se caractérisent par une torrentialité moyenne. La torrentialité considérée comme forte affecte uniquement la partie aval de l'oued Sahel (fig. 08).

**- L'exposition des versants**

Ce facteur permet de classer les versants en 4 catégories réparties entre les classes les plus défavorisées jusqu'aux classes les plus exposées aux masses d'air humides.

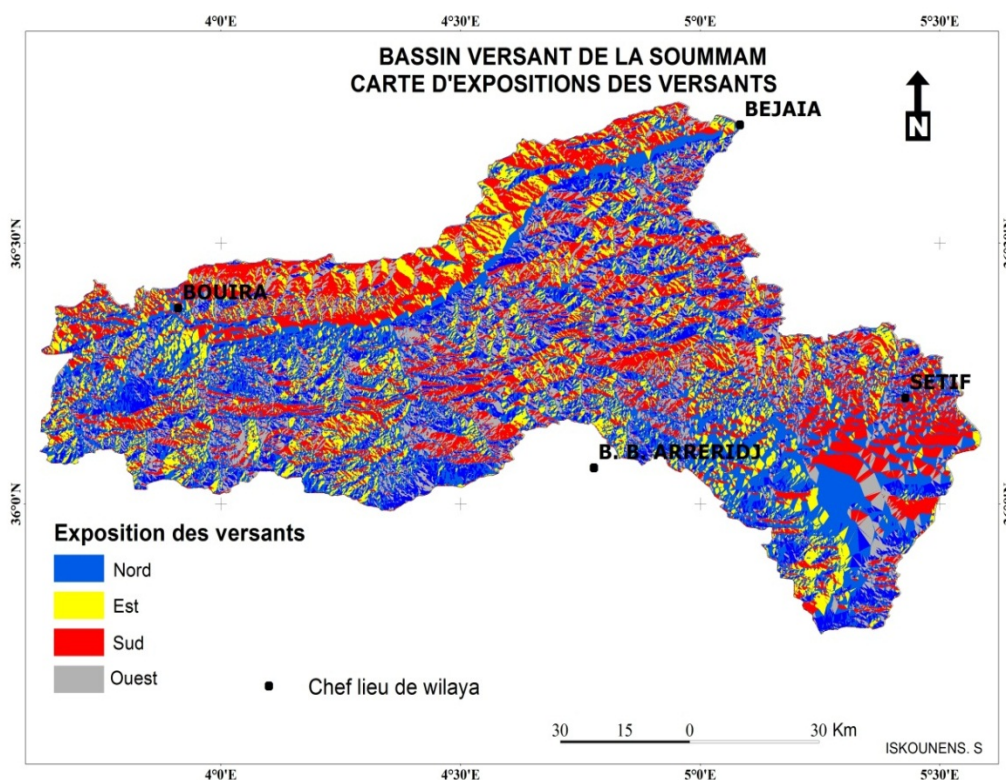
On utilisant un MNT de résolution 30 mètres et à l'aide du logiciel ArcGis10 nous avons déterminé les expositions des versants du bassin de la Soummam (fig.09).

Initialement, nous avons opté pour huit orientations. Seulement, la carte obtenue est pratiquement illisible De ce fait, nous n'avons retenu que les quatre orientations principales.

Ainsi, la carte montre la prédominance de deux grandes orientations, en l'occurrence l'exposition Nord qui occupe 29% de la surface totale du bassin et apparaît essentiellement sur les parties Sud du bassin et des hautes plaines sétifiennes. Par contre l'exposition Sud-est représentée par le flanc Sud et Sud-est de la chaîne de Djurdjura (tab. 04).

*Tab. 04 Récapitule la répartition des surfaces selon les expositions principales*

Classe d'exposition	Superficie km <sup>2</sup>	Superficie %
Nord	2681	29
Est	1986	22
Sud	2886	32
Ouest	1572	17

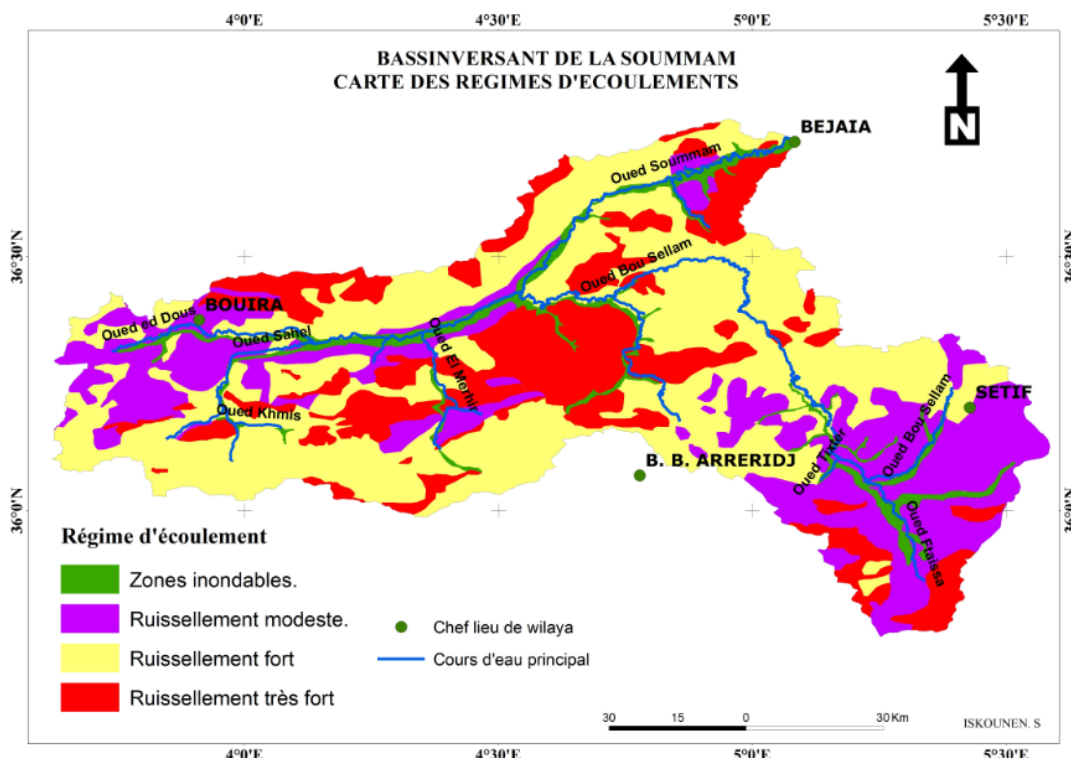


*Fig. 09 : Carte d'exposition des versants du bassin versant de la Soummam*

**- Les régimes d'écoulements**

Ce facteur est utilisé afin de classer les types d'écoulement superficiel reconnus dans le bassin versant de la Soummam. Ce travail se base sur les résultats d'une étude sur la régularisation de la Soummam [07]. Trois type d'écoulement sont identifiés (Ruissellement modeste, fort et très fort).

**ESSAI D'ESTIMATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).**



**Fig. 10 :** Carte des régimes d'écoulement du bassin versant de la Soummam

Le ruissellement est la résultante de la combinaison des facteurs liés à la pente, à la lithologie, à l'occupation du sol, et au régime des précipitations. Ainsi, la carte (fig.10) montre trois types de ruissellement, allant du ruissellement modeste qui apparaît sur le plateau de Bouira et les plaines sétifiennes. Le ruissellement fort affecte la majorité de la surface du bassin. Cependant, le ruissellement très fort se généralise essentiellement sur les Biban. Comme il affecte quelques zones isolées sur le flan du Djurdjura.

**Quantification et spatialisation de l'érosion par ravinement dans le bassin versant de la Soummam**

La carte de l'érosion par ravinement issue de la multiplication des facteurs (torrentialité, régime d'écoulement, exposition des versants et la pente) nous a permis d'avoir une estimation et une répartition des pertes en terre par ravinement du bassin versant de la Soummam (fig. 11).

La répartition de l'érosion par ravinement est représentée par quatre classes (ravinement faible, moyen, fort et très fort) avec une estimation des pertes en terre annuelles pour chaque classe.

Le ravinement considéré comme faible apparaît essentiellement dans les plaines sétifiennes. Le ravinement moyen affecte surtout l'extrême Nord du bassin et l'extrême Sud du bassin. Cependant, le ruissellement fort apparaît dans les Biban et certaines zones du flan du Djurdjura, comme il s'étale sur les hauteurs limitant les plaines sétifiennes. Le ruissellement très fort caractérise particulièrement la partie aval de l'oued Sahel (fig. 11).

L'érosion par ravinement affecte le bassin d'une manière inégale et très discontinue. En effet, 17% de la surface du bassin subit une érosion très faible et participe donc à l'apport moyen annuel avec 60200t/an. L'érosion considérée forte n'affecte que 11% de la surface totale mais participe avec 407160 t/an. Le reste de la surface du bassin (72%) subit une érosion faible à moyenne et ne participe qu'avec 1200000t/an. En effet, avec sept fois la surface de l'érosion forte, elle ne produit que trois fois son apport (tab.04).

**Tab. 05 :** Répartition des surfaces selon les classes de perte en terre par ravinement

Classe	Pertes en terre (t/km <sup>2</sup> /an)	Surface km <sup>2</sup>	Surface %	Apport moyen annuel : t/an
Très faible	0 - 80	1505	17	60200
Faible	80 - 180	3016	33	392080
Moyenne	180 - 280	3560	39	818800
Forte	280 - 500	1044	11	407160
Total		9125	100	1678240

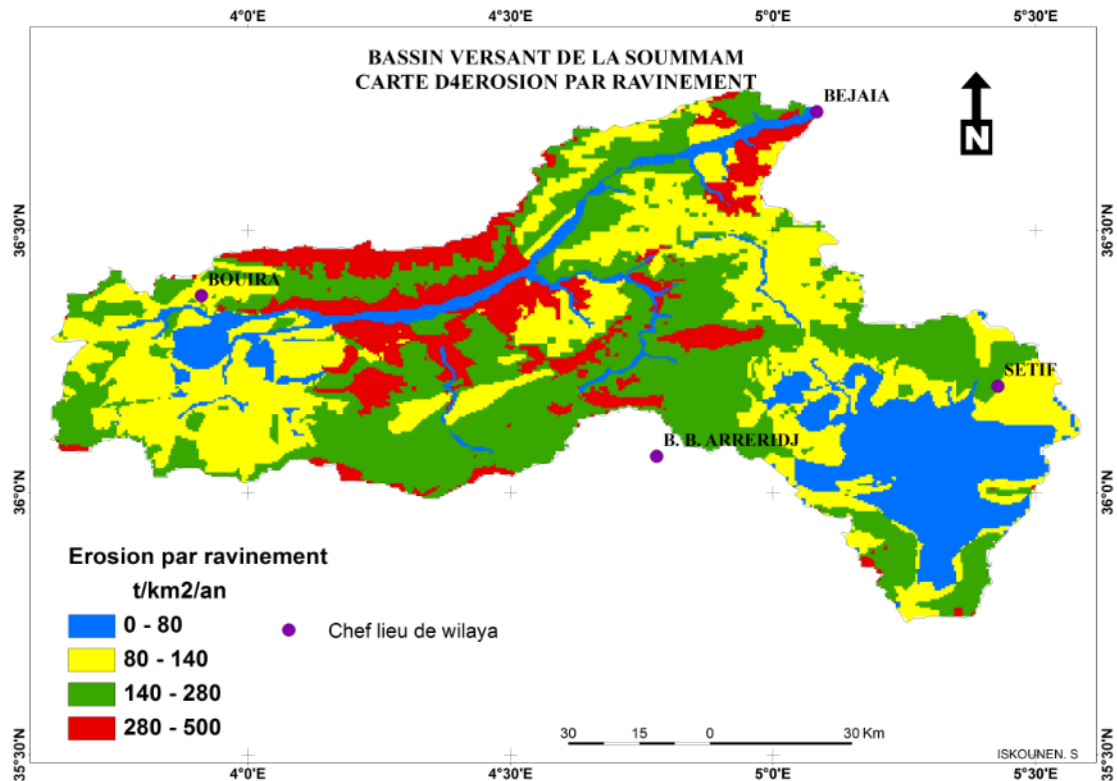


Fig. 11 : Carte d'érosion par ravinement du bassin de la Soummam

Le ravinement est une forme d'érosion qui participe au flux sédimentaire d'une manière efficace. Il est le produit du ruissellement fort à très fort et de la torrencialité élevée. Sa présence dans le bassin versant de la Soummam a nécessité sa prise en compte dans la quantification des pertes en terre. Par ailleurs, la localisation des surfaces affectées par cette forme d'érosion notamment le ravinement fort permet une lutte efficace contre la réduction du transport solide.

#### 4.3 Quantification d'érosion par mouvement de masse :

La dynamique par mouvement de masse est conditionnée par plusieurs facteurs notamment, les formations meubles et particulièrement les formations superficielles dépassant les 50cm d'épaisseur, une pente suffisante et une présence de l'eau (présence de source et/ou infiltration).

##### - Formation meubles et formations superficielles

Le facteur lithologique se base sur la présence des formations meubles et particulièrement les formations superficielles.

Ce facteur est obtenu en combinant les informations obtenues à partir des cartes géologiques et l'utilisation de la carte des formations superficielle et leurs sensibilités à l'érosion au 1/200 000 élaborée par Tricart .J dans le cadre de l'étude de la régularisation du bassin de la Soummam. [26].

Ainsi, la cartographie de ces formations est réalisée en tenant compte de leurs sensibilités à l'érosion hydrique en trois catégories principales (fig. 12) :

1. formations superficielles d'épaisseur inférieure à 50cm laissant apparaître uniquement la roche en place (érodibilité faible) et qui se localisent uniquement sur le plateau de Bouira et les hautes plaines sétifiennes.
2. formation superficielles (érodibilité moyenne) assez épaisses subissant une érosion linéaire très localisée et se localisent sur les bordures des hautes plaines sétifiennes et le long de la vallée de la Soummam. Comme elles apparaissent sous forme d'éboulis au pied de la paroi rocheuse de la chaîne de Djurdjura.
3. formation superficielles (érodibilité forte) épaisses et souvent perméables montrant des aspects d'instabilité essentiellement par mouvements de masse. Elles occupent une surface importante et continue dans le bassin versant et particulièrement les zones des Biban et le piedmont de la chaîne de Djurdjura.

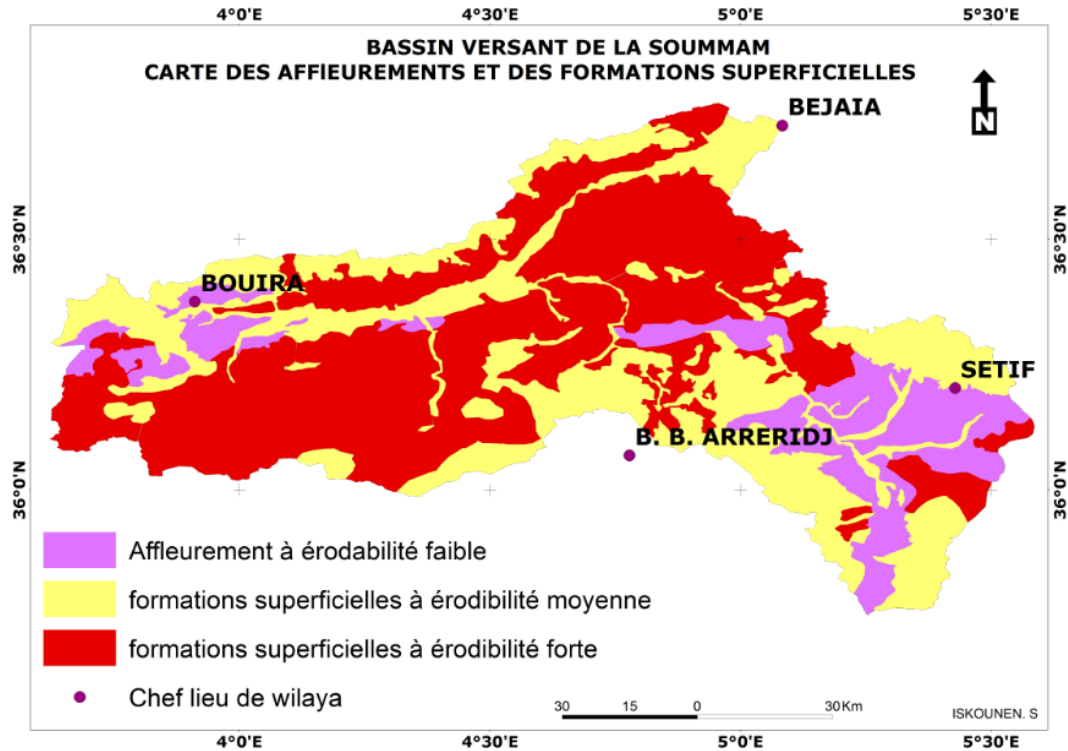


Fig. 12 : Carte des affleurements et des formations superficielles du bassin versant de la Soummam.

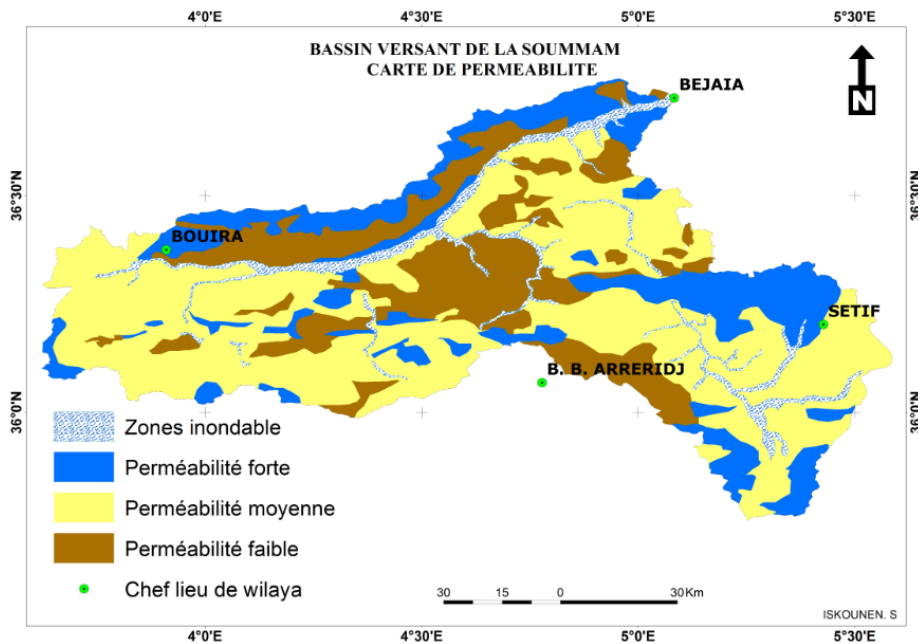


Fig.13 : Carte de perméabilité du bassin versant de la Soummam.

- **Perméabilité**

L'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des mouvements de masse. Lorsque l'eau s'infiltré suffisamment pour permettre au sol de franchir certains seuils (limite de plasticité des formations), des déformations et parfois des ruptures s'amorcent [02]. Ainsi, la prise en considération de la perméabilité des formations et la présence des sources est essentielle dans l'étude des mouvements de masse.

Afin de spatialiser le facteur de perméabilité nous avons repris la carte des régimes d'écoulement du bassin de la Soummam au 1/200 000, réalisée dans le cadre de l'étude de la régularisation du bassin de la Soummam (1972).

Il est établi que les milieux à régime d'écoulement de surface très fort coïncident avec les zones à perméabilité faible. Les milieux à régime d'écoulement hypodermique et à ruissellement moyen correspondent aux zones à perméabilité moyenne. Cependant, les

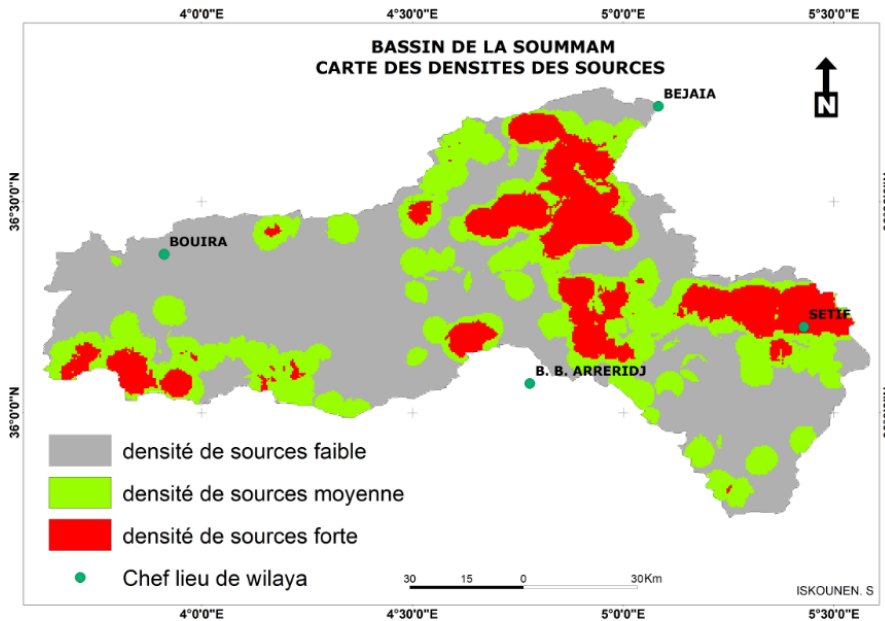
milieux à régime d'écoulement phréatique avec un ruissellement modeste se superposent aux zones à perméabilité forte (fig. 13).

**Répartition des sources :**

Les eaux souterraines (nappes, karst) quand elles rencontrent une formation imperméable apparaissent à la surface sous forme de sources (résurgence). Leurs apparitions sont souvent accompagnées de mouvements de masse avec niche d'arrachement. Comme elles imbibent continuellement la partie aval au point de

provoquer une instabilité chronique. De ce fait, nous avons considéré la présence des sources comme facteur déstabilisant des formations sensibles à l'eau.

Nous avons utilisé les cartes topographiques au 1/50 000 pour repérer les sources. À l'aide de la fonctionnalité densité de point du logiciel Arcgis10 nous avons réalisé la hiérarchisation de la densité des sources dans le bassin de la Soummam (fig. 14).



*Fig.14 : Carte de densité des sources dans le bassin versant de la Soummam.*

La lecture de la carte (fig. 14) permet de constater que la répartition des densités moyennes se localise essentiellement sur les limites du bassin versant de la Soummam. Les fortes densités se situent plutôt dans la partie Nord du bassin.

**Quantification et spatialisation de l'érosion par mouvements de masse dans le bassin versant de la Soummam**

Le croisement des cartes des différents facteurs qui conditionnent la dynamique par mouvements de masse, nous a permis d'avoir une spatialisation et une estimation des pertes en terre par mouvements de masse (fig. 15).

La carte obtenue fait ressortir un zonage (apport très faible à fort) d'érosion par mouvements de masse dans tout le bassin versant de la Soummam. En raison des conditions favorables dans la partie Nord du bassin nous constatons une extension assez importante des zones susceptibles d'être affectées par une forte activité de mouvement de masse. Certaines zones, montrant des densités élevées de sources sont classées comme zones vulnérables malgré l'absence de facteurs importants.

Le tableau récapitulant l'apport des différentes zones permet de constater que les zones les plus vulnérables (apport fort) n'occupent que 12% de la surface totale du bassin. Néanmoins, elles participent avec un apport quasi-égal à l'apport de la zone à vulnérabilité moyenne qui représente 37% de la surface totale du bassin versant (tab. 05).

*Tab. 06 : Répartition des classes de perte en terre par mouvement de masse*

classe	Perte en terre t/km <sup>2</sup> /an	surface km <sup>2</sup>	Surface %	apport moyen t/an
Très faible	0 - 60	1853	20	55590
faible	60 - 100	2859	31	228720
moyenne	100 - 200	3372	37	505800
forte	200 - 580	1041	12	405990
total		9125	100	1196100

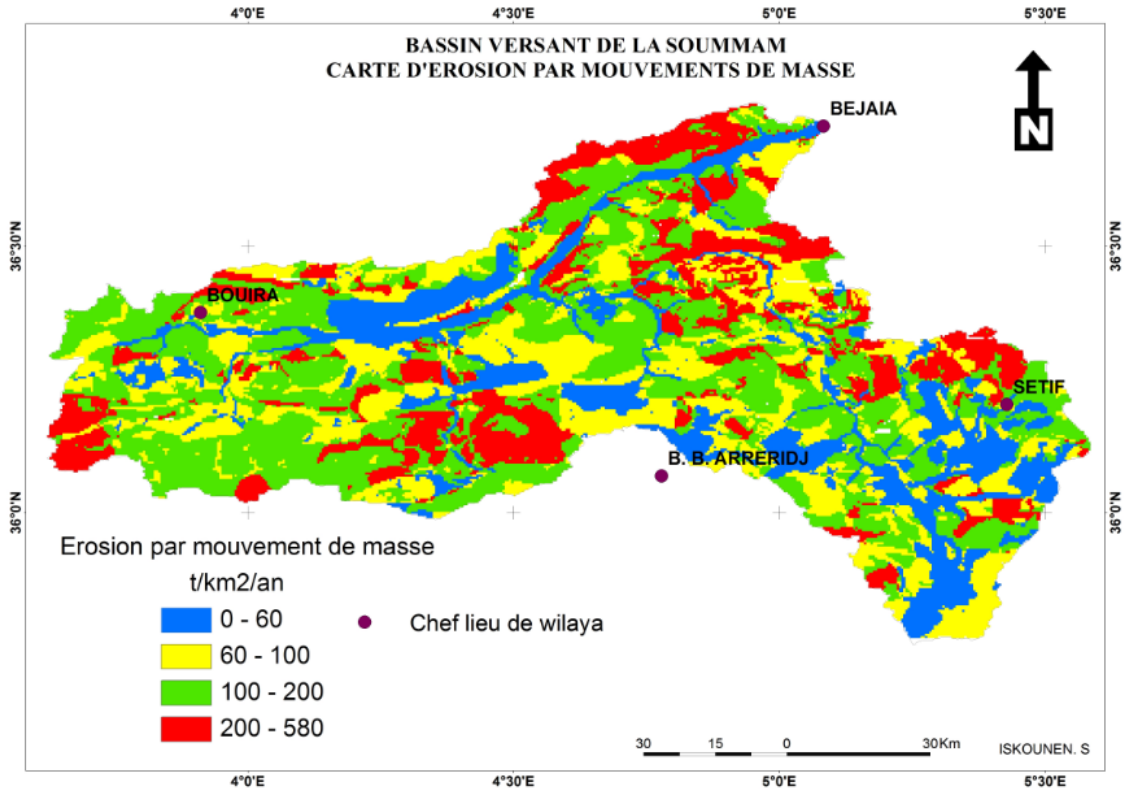


Fig. 15 : Carte des pertes en terre par mouvements de masse du bassin versant de la Soummam.

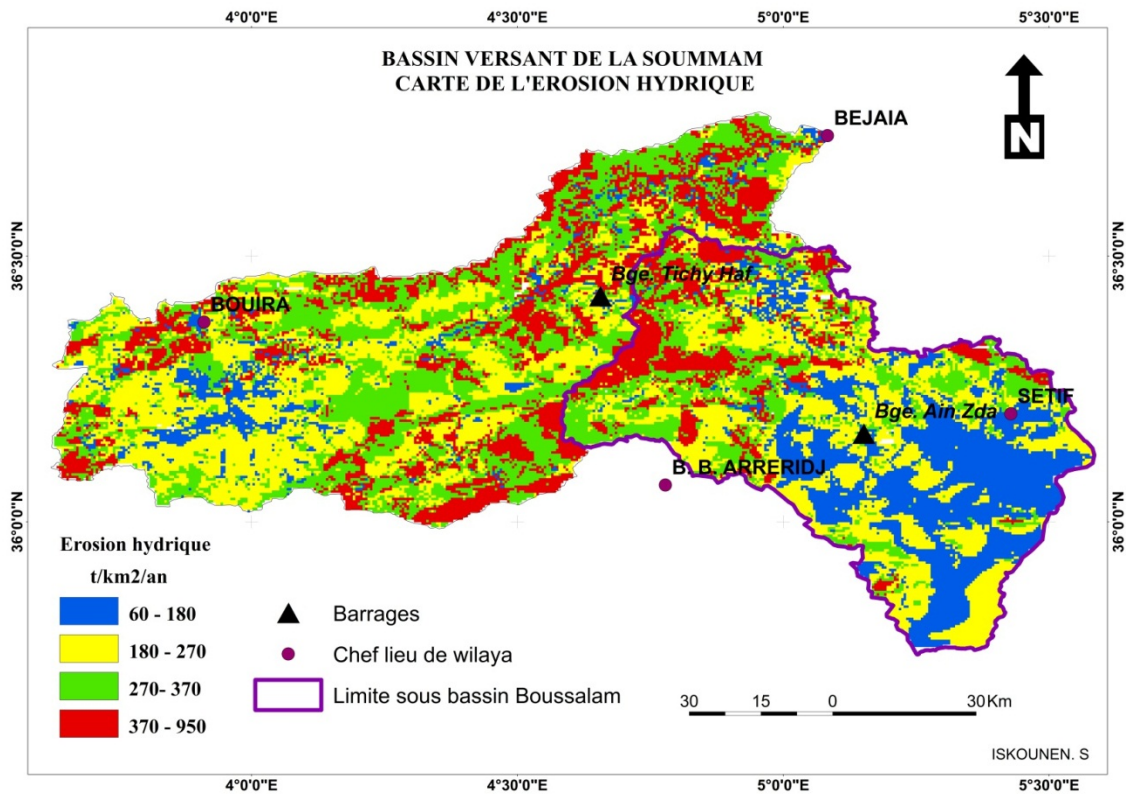


Fig. 16 : Carte d'érosion hydrique du bassin versant de la Soummam

Des trois formes d'érosion à l'origine des pertes en terre, l'apport des mouvements de masse vient en troisième position et participe avec 24% de l'apport global. Cette forme d'érosion qui est absente dans la formulation de l'USLE occupe dans le bassin versant de la Soummam une proportion non négligeable. Ainsi, son intégration dans la quantification des pertes en terre ne peut que renforcer l'applicabilité de l'équation universelle des pertes en terre.

## 5. RESULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 La quantification et la spatialisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam :

L'addition de la spatialisation des apports des trois formes d'érosion a permis d'obtenir une carte d'érosion hydrique spatialisée et quantifiée dans le bassin versant de la Soummam.

Les zones d'apport réparties en quatre classes sont le résultat de la superposition des différentes classes relatives aux trois formes d'érosion calculées (fig. 16).

La répartition spatiale des différentes classes permet de confirmer les résultats partiels obtenus pour chaque forme d'érosion. Seulement, en additionnant l'apport de chaque forme nous avons obtenu des dégradations spécifiques cumulées donc largement supérieures à la dégradation spécifique relative à chaque forme d'érosion. En effet, les hautes plaines et le plateau de Bouira montre toujours l'apport le plus faible du bassin versant. Par contre, la partie Nord du bassin est affectée beaucoup plus par une érosion forte. Le domaine des Biban subit une érosion faible à moyenne en générale et forte par endroit (fig. 16)

### 5.2. Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam :

L'apport total de l'érosion hydrique du bassin versant de la Soummam atteint 4883897 t/an. La part de l'érosion en nappe atteint 41% de l'apport annuel. De ce fait, elle est la première forme à l'origine des pertes en terre dans le bassin. Avec 33 % de l'apport annuel, l'érosion par ravinement vient en deuxième position. Cette situation s'explique par le fait que la surface affectée par le ravinement, et particulièrement le ravinement fort, est très limitée. Cependant, l'érosion par mouvements de masse, avec 26% de l'apport annuel occupe la troisième et dernière place. Ce classement se justifie par le fait que cette forme d'érosion occupe une surface assez réduite et ne participe au flux sédimentaire que durant une période limitée dans l'année (printemps) (tab. 06).

*Tab. 07: Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam*

forme d'érosion	Apport %	apport : t/an
Erosion en nappe	41	2009710
Erosion par ravinement	33	1678240
Erosion par mouvements de masse	26	1195947
total	100	4883897

### 5. Comparaison de l'érosion hydrique calculée et mesurée au niveau des stations et/ou des barrages dans le sous bassin de Boussellam

Le sous bassin de Boussellam qui représente 50% de la surface totale de la Soummam est contrôlé par deux stations hydrométriques qui correspondent à deux barrages : le barrage de Ain Zada recevant les eaux de la partie amont de l'oued Boussellam et le barrage de Tichy Haf contrôlant la partie aval, avant la confluence avec l'oued Soummam (Fig. 16). La partie amont fait partie des hautes plaines sétifiennes qui se caractérisent par un climat semi-aride, l'absence de reliefs importants et la prédominance de la céréaliculture. Par contre la partie aval qui fait partie des Biban est beaucoup plus accidentée, plus humide et subissant une énergie érosive plus importante.

La comparaison de l'érosion hydrique, calculée et mesurée aux stations et aux barrages, permet les observations suivantes :

Au niveau de l'ensemble du sous bassin de Boussellam (tab. 07), l'érosion en nappe calculée représente moins de 40% de l'érosion mesurée. Sans le charriage la dégradation spécifique calculée dépasserait la dégradation spécifique mesurée à la station de 10%. Par contre, Si on ajoute au transport en suspension les sédiments charriés (estimés à 25%), la dégradation spécifique calculée serait inférieure à la dégradation spécifique mesurée de 16%. Dans les deux cas de figure les résultats restent très encourageants.

*Tab.08 : Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de Boussellam*

Bassin versant Boussellam	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	965515	238
Ravinement	663560	163
Mouvement de masse	452575	108
Total (érosion calculé)	2081650	509
Station Sidi Yahya (+25% charriage)	2476149	611

**ESSAI D'ESTIMATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN NAPPE, PAR RAVINEMENT ET PAR MOUVEMENTS DE MASSE A L'AIDE DES SIG ET DU MODELE USLE. L'EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM (NORD-EST ALGERIEN).**

Au niveau de la partie aval (tab. 08), La dégradation spécifique due à l'érosion en nappe ne représente que 35% de la dégradation spécifique liée à la bathymétrie. Avec l'ajout du ravinement et des mouvements de masse, la dégradation spécifique calculée atteint 79% de la dégradation spécifique déduite de la bathymétrie. Comme on constate un léger recul de la dégradation spécifique de l'érosion en nappe et une légère augmentation de la dégradation liée au ravinement ; ces résultats sont conformes avec l'état de dégradation de cette partie du bassin.

*Tab.09 : Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage TICHY HAF*

Bassin du barrage Tichy Haf	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	379010	219
Ravinement	296225	171
Mouvement de masse	174744	102
Total (érosion calculé)	849979	492
Bathymètre 2014	1079375	625

Par contre, la partie amont (tab.09) qui se caractérise par des conditions morpho-climatiques spécifiques aux Hautes plaines sétifiennes, montre une dégradation spécifique due à l'érosion en nappe de 83%. A elle seule, elle atteint le pourcentage cumulé des trois formes d'érosion dans la partie aval comme dans l'ensemble du sous bassin de Boussellam. En effet, en ajoutant l'apport des deux autres formes d'érosion (ravinement et mouvements de masse), la dégradation spécifique calculée atteindrait les 227t/km<sup>2</sup>/an. C'est 40% de plus que la dégradation spécifique estimée à partir de la bathymétrie (135t/km<sup>2</sup>/an). Cette situation permet de dire que, dans cette partie amont, l'apport des deux formes d'érosion (ravinement et mouvement de masse) est légèrement exagéré.

*Tab.10 : Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage AIN ZADA*

Bassin du barrage Ain Zada	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	231451	112
Ravinement	186876	89
Mouvement de masse	55152	26
Total (érosion calculé)	473479	227
Station Maghraoua (2350 km <sup>2</sup> )	453279	192
Bathymètre 2014	280800	135

Ainsi, et en tenant du manque de données mentionné ci-dessus, nous considérons que les résultats restent encourageants et justifient largement l'introduction des deux formes d'érosion (ravinement et mouvements de masse). En effet, avec cette amélioration, les pertes en terre qui étaient liées uniquement à l'érosion en nappe, peuvent être considérées comme le produit d'une érosion hydrique. Aussi, cette démarche justifie et renforce l'applicabilité de l'USLE et atténue les contradictions dues au passage de la parcelle au bassin versant.

## 6. CONCLUSION

La quantification de l'érosion hydrique dans la majorité des bassins versants de l'Algérie du Nord est restée insuffisamment précise. En raison d'un réseau de stations qui est resté lâche, lacunaire et récent. Aussi, la construction de barrages a rendu certaines stations caduques. Cependant, l'anthropisation de plus en plus importante et la compensation, par l'implantation d'autres stations hydrométriques, est restée en retard. Afin de compenser le manque de mesures, nous avons opté pour une quantification de l'érosion hydrique en utilisant les SIG et les méthodes de spatialisation.

Les résultats obtenus par l'USLE se sont avérés décevants (41% de l'apport moyen annuel mesuré à la station de Sidi Aiche) et puisque cette quantification ne concerne que l'érosion en nappe, nous avons opté pour l'ajout des pertes en terre dues au ravinement et aux mouvements de masse. En effet, le cumul des pertes en terre des trois formes d'érosion atteint 4,88.10<sup>6</sup> t/an, ce qui traduit une érosion spécifique de l'ordre de 535 t/mk<sup>2</sup>/an. Il dépasse légèrement l'apport solide en suspension (4,3.10<sup>6</sup> t/an), avec le charriage, cet apport atteindrait 5,4.10<sup>6</sup> t/an. Ainsi l'érosion spécifique attient 592t/km<sup>2</sup>/an pour l'ensemble du bassin.

Néanmoins, les études bathymétriques réalisées au niveau des barrages (Tichy Haf et Lakhel) montrent une dégradation spécifique plus importante (600 à 1200 t/km<sup>2</sup>/an). Ainsi, il est intéressant de tester cette démarche sur des sous bassins jaugés et qui ont bénéficié d'étude pédologique afin d'améliorer les résultats qui restent tout de même très encourageants.

En effet, nous constatons qu'à partir de la spatialisation des formes d'érosion et les pertes en terre, nous pouvons estimer le rythme d'érosion au niveau de chaque sous bassin jaugé ou non jaugé, aménagé au non aménagé comme nous pouvons estimer la vitesse d'envasement des barrages déjà construits ou en projet. Aussi, la lutte contre l'érosion ciblera les zones d'apport déterminées par la spatialisation. De ce fait, le traitement des surfaces les plus dégradées réduira considérablement les pertes en terre dans le bassin versant et prolongera la durée de vie des barrages.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01]-Atlas de la Soummam 2017. *Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre du projet PHC MAGHREB*
- [02]-Avenard J. A. 1990. Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion). *Cahier ORSTOM, sér. pédol, vol. XXV, no 1-2, 1989-90: 119-129.*
- [03]-Boukheir et al. 2001. Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. *Etude et Gestion des sols*, Tome 8.
- [04]-Carte d'occupation du sol 1/25 000 des wilayas : Bejaia, Bouira, Tizi Ouzou et Bordj Bou Arreridj) *l'institut national des sols, de l'irrigation et de drainage (INSID).*
- [05]-Carte géologique 1/50 000, 1/200 000 du Nord Est Algérien. *Service des cartes géologiques de l'Algérie.*
- [06]-Carte du réseau hydro-climatologique et de la surveillance de la qualité des eaux 1/500 000 *Agence nationale des ressources hydraulique*
- [07]-Coyne et Bellier 1973. Étude de la régularisation de la Soummam
- [08]-Demmak A. 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et de transport solides en suspension en Algérie septentrionale. *Thèse de docteur-Ingénieur, Univ. Paris IV, France.*
- [09]-El Garouani. A et al 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du Sig Idrisi au Nord-est du MAROC. *Télétection, Editions scientifiques GB, 2008.*
- [10]-Etude d'actualisation du PNE Algérie 2011. *Mission 2 : Ressources et demandes. Volet 1 : les ressources en eau superficielle. Tome 2 : Etude des volumes régularisables.*
- [11]-Haddad. S et al 2015. Impact des aménagements hydrauliques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Boussellam. *Mémoire de Master en eau et aménagement durable.*
- [12]-Iskounen. S. et al. 2015. Impact des aménagements hydrauliques des sous bassin (Boussellam, Tilesdit, Lekhal) sur le fonctionnement hydrologique de l'Oued Soummam. *5ème colloque international « eau et climat : Regards croisés Nord-sud » Constantine*
- [13]-Meddi. M et al. 2016. Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences.*
- [14]-Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire. 2000 *Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement.*
- [15]-Pham. T.G. 2018. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*
- [16]-P.Kinnell 2010 Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models. *Journal of Hydrology*
- [17]-PNE. 2011. L'étude d'actualisation du plan national de l'eau.
- [18]-Remini B. 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages: quelques exemples algériens. *Revue Techniques sciences méthodes, n°4, avril, pp. 55-62.*
- [19]-Remini. B. 2017. Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31, Sept 2017, pp. 51-81
- [20]-Sadiki. A et al. 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre,*
- [21]-Sadiki. A et al. 2009, Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers géographiques - N° 06/2009.*
- [22]-Stone.R.P et D. Hilborn 2000. Fiche technique équation universelle des pertes en terre (USLE). [www.gov.on.ca/omafra](http://www.gov.on.ca/omafra).
- [23]-Strhaler. 1978. *Introducing Physical Geography, 6th Edition.*
- [24]-Toumi. S et al 2013. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal.*
- [25]-Tihay. J. 1976. Dynamique des versants et milieux naturels [dans la vallée de la Soummam (Grande Kabylie, Algérie)]. *Annales de Géographie.*
- [26]-Tricart .J 1978. Étude de la régularisation du bassin de la Soummam
- [27]-Wischmeier et Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion losses, *Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture. Washington DC. USA*
- [28]-Zouagui. A et al 2018. Modélisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental: Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc). *European Scientific Journal January.*