

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

Modélisation du Transport solide par le modèle S.W.A.T (Application sur le Bassin versant des Issers)

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2017

Par Mr **RADJAH Soufyane**

Sous la direction du **Pr.BERMAD Abdelmalek**

Mr BENGHERIFA Samir

Composition du Jury :

Président	Mr. BENYOUSSEF EL Hadi	Professeur	ENP
Promoteurs	Mr. BERMAD Abdelmalek	Professeur	ENP
	Mr BENGHERIFA Samir	Doctorant	
Examineur	Mr. LEFKIR Abdelouaheb	MCA	ENSTP

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

Modélisation du Transport solide par le modèle S.W.A.T (Application sur le Bassin versant des Issers)

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2017

Par Mr **RADJAH Soufyane**

Sous la direction du **Pr.BERMAD Abdelmalek**

Mr BENGHERIFA Samir

Composition du Jury :

Président	Mr. BENYOUSSEF EL Hadi	Professeur	ENP
Promoteurs	Mr. BERMAD Abdelmalek	Professeur	ENP
	Mr BENGHERIFA Samir	Doctorant	
Examineur	Mr. LEFKIR Abdelouaheb	MCA	ENSTP

ENP 2017

ملخص

في المناطق الجافة وشبه الجافة ، المياه نادرة جدا مما يستلزم توفير المياه السطحية عن طريق إقامة المشاريع المائية، ولكن هذه المشاريع تخضع للعائق الرئيسي الذي هو نقل المواد الصلبة التي تستقر في مصبات الأودية وبالتحديد في مواقع السدود .

هذا العائق مترتب عن الامطار الفجائية العاصفة إضافة الى ندرة وعدم وجود محطات قياس المواد الصلبة العالقة. لحل مشكلة اطماء سد بني عمران في حوض الصرف "إيسر" المهددة بظاهرة نقل المواد الصلبة، أجري بحث عن نموذج لتقدير حمولة الرواسب العالقة. باستغلال معطيات القياس المتوفرة في نموذج تقييم التربة والمياه و يستند اختيار النموذج في المقام الأول على قيم معامل التحديد Nash، PBIAS ونسبة الخطأ

الكلمات المفتاحية: انجراف التربة، نقل الرواسب، ايسر، سد بني عمران؛ نموذج تقييم التربة والمياه

Abstract

In arid and semi-arid areas, water is very rare which requires the mobilization of surface water by building hydraulic structures, but these are subject to a major constraint which is the transport of materials that settles in outfall of wadis and more precisely where the dams are located. This constraint is imposed by a brutal storm events and a lack of monitoring stations. In order to overcome the problem of siltation of the dam at Beni Amrane in Isser catchment which is threatened by this phenomenon, a search for a model to estimate the suspended sediment load is conducted. The provided data led us to the application of the soil and water assessment tool. The choice of the model is based primarily on the values of the coefficient of determination R², the Nash, the PBIAS and error.

Key words: erosion, suspended sediment, Isser, Beni Amrane dam, soil , water, assesement, tool.

Résumé

Dans les zones arides et semi-arides, les eaux se font très rares ce qui conduit à la mobilisation des eaux de surface par les ouvrages hydrauliques, mais ces derniers sont soumis à une contrainte majeure qui est le transport de matières qui se sédimentent à l'exutoire des Oueds et plus précisément là où les barrages sont implantés. Cette contrainte est imposée par une brutalité des événements orageux et un manque de stations de mesure. En vue de pallier au problème d'envasement du barrage de Beni Amrane au niveau du sous bassin versant Isser qui est menacé par ce phénomène, une recherche d'un modèle d'estimation du transport solide en suspension est menée. L'exploitation des données de mesures nous a conduit à l'application de SWAT (Outil d'évaluation des sols et de l'eau). Le choix du modèle se base en premier lieu sur les valeurs du coefficient de détermination R², du Nash, du PBIAS et du RSR.

Mots clés : érosion, transport solide, Isser, barrage Beni Amrane, SWAT.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mon père.

À ma très chère mère qui a si souffert pour me soutenir.

*À mon très chère frère Noureddine qui a été toujours comme
un second père.*

*A ma chère Sœur et mes frères qui n'ont jamais réservé leurs
efforts pour mon bien être.*

*À B.Imane qui m'a beaucoup encouragé et quelle a été
toujour la pour me soutenir .*

À toute ma famille du petit au grand.

À tous ceux qui m'ont connu de près ou de loin

Remerciements

Je remercie ALLAH de m'avoir prêté vie et volonté pour achever ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur BERMAD, qui a encadré ce mémoire de fin d'étude, pour ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.

Je veux témoigner mon immense gratitude à Monsieur LEFKIR Abdelwehab et je tiens à le remercier pour sa grande disponibilité ainsi que pour ses nombreux

conseils, à lui exprimer tout ma reconnaissance pour sa bon humeur, sa gentillesse et patience.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à Mr. Ouardi kamel (DHW) dont le soutien sans faille a été d'une immense contribution à la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour avoir pris la peine d'évaluer ce modeste travail.

Mes plus sincères remerciements vont également à Mr Khemissi Houari, et Hamzaoui Mohammed, pour leurs encouragements, et conseils.

Je ne saurais oublier tous mes amis, en particulier: ATREUCH.A, walid, yassin, ... qui ont su m'encourager et me soutenir et à qui je dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection.

Table des matières

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Introduction général	10
Chapitre 01 : Généralités sur l'érosion Hydrique et le Transport Solide.....	12
1.1 L'érosion Hydrique :	12
1.1.1 Définition :	12
1.1.2 Formes de l'Érosion Hydrique :	12
1.1.3 Facteurs de l'érosion hydrique :	17
1.1.4 Conséquences de l'érosion hydrique :	20
1.1.5 Quantification de l'érosion hydrique :	21
1.1.6 Lutte contre l'érosion hydrique :	23
1.2 Transport solide :	25
1.2.1 Débit solide :	26
1.2.2 Mesure de transport solide :	27
1.3 Envasement des Barrages :	35
1.3.1 Introduction :	35
1.3.2 Apports solides aux retenues :	36
1.3.3 Etat d'envasement du barrage de Beni Amrane :	37
1.4 Conclusion :	37
Chapitre 02 : La Modélisation Hydrologique , Présentation du Modele SWAT	39
2.1 Modèles hydrologiques :	39
2.1.1 Variables d'entrée :	39
2.1.2 Variables de sortie :	39
2.1.3 Variables d'état :	39
2.1.4 Paramètres :	39
2.2 Modèles d'évaluation de l'érosion :	40
2.2.1 Typologie des modèles hydrologiques :	40
2.2.2 Modèles empiriques	40
2.2.3 Modèles conceptuels :	40

2.3	Modèles distribués à base physique :.....	41
2.4	METHODOLOGIE :.....	41
2.4.1	Présentation de SWAT et ArcSWAT.....	42
Chapitre 03 : Présentation de la Zone d'étude.....		52
3.1	Présentation de la Zone d'étude :.....	52
3.1.1	Géographie :.....	52
3.1.2	Bassin hydrographique :.....	53
3.1.3	Climat :.....	54
3.1.4	Géologie :.....	55
3.1.5	Végétations :.....	56
3.1.6	Base de données :.....	57
Chapitre 04 : Résultats et discussion :.....		60
4.1	Critères de performance :.....	60
4.1.1	Coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) :.....	60
4.1.2	Pourcentage de biais :.....	60
4.2	Grille de performance.....	62
4.3	Données :.....	62
4.3.1	MNT (Le Modèle Numérique de terrain) :.....	62
4.3.2	Carte d'occupation des sols :.....	62
4.3.3	Carte des sols :.....	62
4.3.4	Données pluviométriques :.....	63
4.4	Périodes de simulation et conditions climatiques :.....	63
4.5	Processus internes du modèle.....	63
4.6	Un Récapitulatif des statistiques :.....	64
4.7	Résultats et discussion :.....	64
4.8	Calage et Validation :.....	67
4.8.1	Calage Uni-Objectif :.....	67
4.9	Justifications des Résultats :.....	69
➤	Evolution de l'Occupation des Sols :.....	69
➤	Périodes de simulation et conditions climatiques :.....	69
➤	Pas de temps :.....	69
➤	Incertitude des données :.....	69
Conclusion et Recomandations :.....		71

Bibliographie :73
Annexes : Définition des paramètres dans SWAT76

Liste des tableaux :

Tableau 1: la variation des coefficients α et β selon D^*	30
Tableau 2: L'importance du transport en suspension.....	31
Tableau 3 : tableau comparatif du volume à l'ancienne cote (RN=63m) (ANBT, 2004)	37
Tableau 4 : Critères d'évaluation de la performance mensuelle de SWAT (Moriasi et al,2007)	62

Liste des figures

Figure 1 : Manifestation de l'érosion hydrique en plein paysage	13
Figure 2 : Diagramme de Hjulström.....	14
Figure 3 : Formes de L'érosion Linéaire	15
Figure 4 : Erosion par ravinement	16
Figure 5 : Erosion en masse, les Eboulements.....	16
Figure 6 : Erosion hydrographique dans le lit d'une rivière	17
Figure 7 : Mesures de l'érosion hydrique par rugosimètre	21
Figure 8 : Schéma des modes de transport, d'après (Graf et Altinakar dans Ildefonse et al. (1997)).....	26
Figure 9 : Organisation du modele.....	43
Figure 10 : Phases du cycle hydrologiquemodélisé par SWAT.....	44
Figure 11 : Modélisation du bilan hydrologique par le modèle SWAT	46
Figure 12 : transport des elements (eau, sediments, pesticides,nutriments,...) au sein du réseau hydrographique (Biesbrouck et al ,2000).	47
Figure 13 : Situation du bassin des ISSERS	52
Figure 14 : Plan de situation du Bassin Versant des Issers.....	53
Figure 15 : Réseau Hydrographique du Bassin Versant des Issers.....	54
Figure 16 : Carte lithologique du bassin versant des Issers	56
Figure 17 : Carte schématique de végétation du bassin versant des Issers (I.N.S.I.D).	57
Figure 18 : Situation des barrages dans le Bassin Versant des Issers.	58
Figure 19 :Carte de Sensibilité de l'érosion du bassin versant des Issers	65
Figure 20 : Cummule des sediments dans le cours d'eau.....	66

Introduction général

La dégradation des terres est une grave menace dans le bassin hydrographique. L'érosion est un problème majeur qui entraîne une perte importante de fertilité du sol de la productivité et l'augmentation des charges sédimentaires qui raccourcissent la durée de vie utile du réservoir, la vie d'autres structures liées à l'eau, et l'augmentation du coût de l'entretien est l'impact extérieur de l'érosion.

Pour développer des plans efficaces de contrôle de l'érosion et réduire la sédimentation, il est important de quantifier le rendement des sédiments et identifier les zones vulnérables à l'érosion. Au cours des dernières décennies, plusieurs modèles de simulation ont été développés pour estimer, quantifier, améliorer la compréhension de l'espace et la variabilité temporelle de l'érosion et identifier les zones qui contribuent fortement aux sédiments au niveau des bassins hydrographiques et sur de vastes zones. Nous avons utilisé SWAT (Soil And Water Assessment Tool) pour prédire le rendement des sédiments, le ruissellement, identifier la répartition spatiale des sédiments et tester Le potentiel des interventions de gestion des bassins versants dans la réduction de la charge des sédiments.

L'Algérie, caractérisée par un climat semi-aride et par des précipitations rares mais agressives et très irrégulières, est menacée par l'érosion des terres agricoles qui occasionnent l'intensification du transport solide, l'envasement des barrages n'est qu'une des circonstances de pertes de sols des versants en amont de ces infrastructures. De plus La dégradation du milieu a des conséquences très néfastes sur la productivité des terres et sur la qualité des eaux.

L'objectif principal de notre travail est de quantifier le transport solide et l'érosion spécifique du bassin versant du barrage de beni Amerane afin de proposer les aménagements nécessaires pour sa protection.

Généralités sur l'érosion Hydrique et le Transport Solide

1

1 Généralités sur l'érosion Hydrique et le Transport Solide

1.1 L'érosion Hydrique :

1.1.1 Définition :

On parle d'érosion hydrique des sols si de la terre est arrachée lors du ruissellement, L'érosion hydrique provoque un déplacement de sol de l'amont vers l'aval.

C'est l'une des principales dégradations des sols, on calcule la gravité de l'érosion des sols en tonnes de terre érodée par hectare et par an (**tan/ha/an**)

L'érosion hydrique des sols est un phénomène naturel dû principalement aux précipitations. Toutefois, de nombreuses pratiques humaines, principalement agricoles, peuvent déclencher et/ou renforcer l'érosion hydrique des sols. [01]

L'érosion hydrique est un processus qui emporte et redistribue le sol. Bien qu'une certaine érosion se produise graduellement, le phénomène est surtout imputable à des événements météorologiques extrêmes (une forte pluie). L'érosion hydrique emporte la couche arable du sol, la plus propice au soutien de la vie microbienne et végétale. La disparition de la totalité ou d'une partie de cette couche superficielle diminue le potentiel de production d'un sol en réduisant sa fertilité, sa capacité d'accepter et d'emmagasiner l'eau et l'air. Les matériaux enlevés peuvent se redéposer un peu plus loin sans grandes conséquences apparentes pour l'environnement. Cependant, dans certains endroits, l'érosion transporte les matériaux jusqu'aux cours d'eau et aux lacs et même jusqu'aux océans, dont les eaux se dégradent considérablement. [02]

1.1.2 Formes de l'Érosion Hydrique :

1.1.2.1 L'érosion en Nappe Ou Aréolaire ou Laminaire « sheet Erosion » :

C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Cette érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface, autrement dit c'est une forme d'érosion diffuse. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre. [03]

Chapitre 01 Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés. Egalement, il y a un autre symptôme de l'érosion en nappe est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que "les cailloux poussent". Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol.

L'importance de L'érosion en Nappe dépend à la fois :

- de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement,

- de l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- de la durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

Lorsqu'il y a l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait d'abord par effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. La battance des gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions. En fait, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.

En illustration de cette forme d'érosion, voici un ensemble de photos qui montrent clairement comment l'érosion en nappe se manifeste en plein paysage



Figure 1 : Manifestation de l'érosion hydrique en plein paysage

Au cours de la battance des pluies, des particules ou même des agrégats (en particulier quand des grosses gouttes d'orage tombent sur des mottes sèches) vont quitter les mottes pour sédimenter dans les creux et y former des croûtes de sédimentation à très faible capacité d'infiltration comme illustré sur le diagramme suivant :

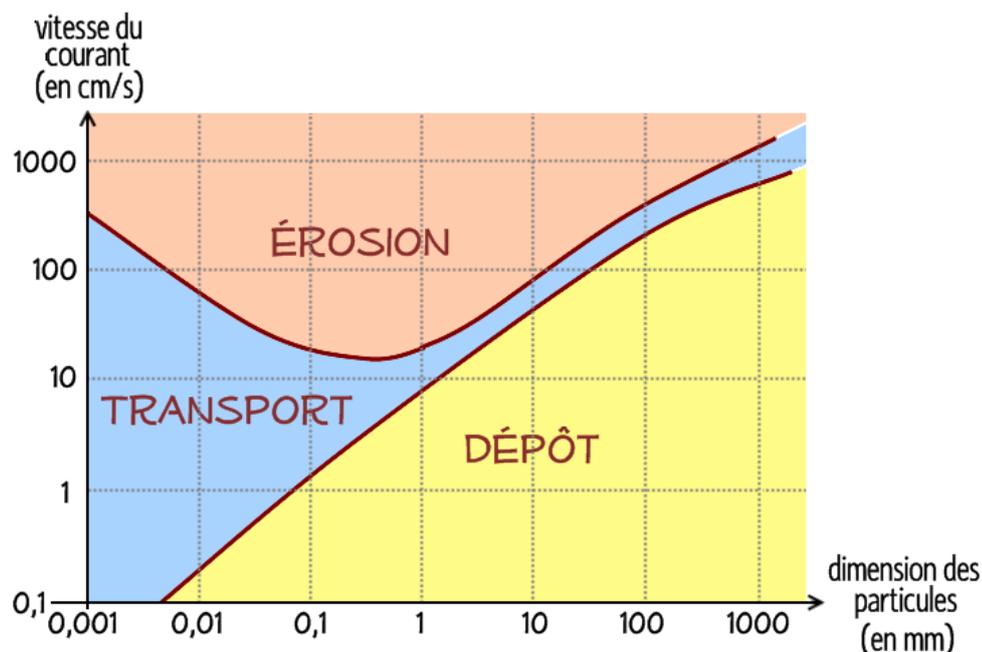


Figure 2 : Diagramme de Hjulström

Ce diagramme de Hjulström montre qu'il existe trois secteurs en fonction de la vitesse des eaux et du diamètre des particules des matériaux terreux. En fait, il renseigne sur des informations très importantes :

1. Les matériaux les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins de 100 microns. Les matériaux plus argileux sont plus cohérents. Les matériaux plus grossiers ont des particules lourdes qui exigent une vitesse supérieure du fluide. Il est intéressant de noter que pour Wischmeier et al. (1971), les sols les plus érodibles sont ceux qui sont riches en limons et sables fins.
2. Tant que les écoulements s'effectuent à une vitesse faible (25 cm/seconde), ils ne peuvent éroder les matériaux. Pour éviter l'érosion linéaire, il faut donc s'appliquer à étaler et ralentir les écoulements. D'où l'origine de la théorie de la dissipation de l'énergie du ruissellement.
3. Le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses. Mais, pour les matériaux plus grossiers que les sables fins, on passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. On comprend donc pourquoi les fossés d'évacuation des eaux de ruissellement sont soit érodés s'ils sont trop étroits ou trop pentus, soit ensablés par les matériaux grossiers qui n'arrivent pas à circuler. C'est une des raisons pour lesquelles les fossés de diversion ne donnent pas satisfaction dans les pays en développement,

Car il faut dessabler et entretenir régulièrement les fossés et terrasses de diversion. sédiments fins, mais aussi attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées où la vitesse augmente

rapidement. On passe alors de l'érosion diffuse à l'érosion concentrée soit l'érosion linéaire (griffes, rigoles et ravines). [04]

1.1.2.2 L'érosion Linéaire (micro-Channel Ou Rill Erosion) :

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques ; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses : non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et même des blocs.

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales.



Griffes

Rigoles

Figure 3: Formes de L'érosion Linéaire

On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et enfin, de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales. A l'intérieur des ravines on peut encore distinguer des petites ravines dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques. Par contre, dans des grandes ravines qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important et d'une certaine torrencialité. [05]



Figure 4: *Erosion par ravinement*

1.1.2.3 L'érosion en Masse :

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain. Dans ce cas, seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.



Figure 5: *Erosion en masse, les Eboulements*

- ✚ **Les causes et les processus des mouvements de masse :** La cause des mouvements de masse provient d'une part, du déséquilibre entre la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur la roche altérée en pente sur lequel ils reposent.
- ✚ **Les facteurs des mouvements de masse :** qui favorisent ce déséquilibre sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux

(présence de limons issus de l'altération des micas), des roches présentant des plans de clivage ou de fracture préférentiels (argillites, marnes, schistes, roches micassées, gneiss). L'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements de masse en modifiant la géométrie externe du versant (par terrassement, creusement d'un talus pour installer une route ou des habitations, surcharge d'un versant par des remblais, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est modifié, etc.). La végétation intervient également. [06]

1.1.2.4 L'érosion Hydrographique :

C'est une forme d'érosion due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières est capable, de manière régulière ou accidentelle (lors des inondations) d'emporter une partie des berges. On appelle ce processus le sapement des berges. Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissellement attaque les assises du ravin. Ce type d'érosion est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, qui dépend de la pente et du débit



Figure 6 : *Erosion hydrographique dans le lit d'une rivière*

1.1.3 Facteurs de l'érosion hydrique :

Les facteurs de l'érosion qui influencent les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992).

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Ainsi, pour caractériser l'influence du climat, l'énergie cinétique cumulée des pluies serait

probablement le paramètre le plus pertinent, mais il n'est pas disponible, et on retiendra donc les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations. Bref, l'érosion résulte de l'interaction des facteurs suivants :

1.1.3.1 La Topographie :

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'effet de la topographie sur l'érosion. Nombreux sont ceux qui ont montré que la topographie agit sur le ruissellement et les pertes en sol par deux composantes (Borst et Woodbrun, 1940 ; Wischmeier et Smith, 1978) :

- La longueur de la pente car plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer graduellement dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments.
- Le degré de la pente car plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et la détachabilité des particules du sol sont importantes.

Dans les milieux semi-arides et arides, le recouvrement de la surface du sol par des fragments de roches diminue le ruissellement et la perte des sols, même si la pente est forte (Abrahams et Parsons, 1991 ; Simanton et Toy, 1994). Par ailleurs, l'érosion est moins intense sur les pentes concaves que sur les pentes convexes (FAO, 1976). La perte en terre est plus grande les pentes rectilignes (Roose, 1999) La pente peut agir également sur le ruissellement par son action sur les paramètres de l'infiltration. Avec l'accroissement de l'angle de la pente, Posen (1984) a observé une diminution du taux de ruissellement attribué à la destruction de la croûte de battance sous l'action de l'énergie cinétique du ruissellement qui augmente en fonction de la pente.

1.1.3.2 Facteur climatique (le climat) :

La pluie est essentiellement à l'origine de l'érosion par son impact sur les particules des sols qu'elle détache ainsi des matériaux de surface. Quand les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement de sédiments des interfluves vers le réseau de drainage. L'action causée par l'impact de la pluie commence quand la première goutte percute le sol, au travers de sa capacité à détacher des particules de la surface. Ce processus représente le premier stade de l'érosion hydrique des sols (Salles et al. 2000). L'érosivité des pluies se définit comme étant la capacité potentielle de la pluie à causer l'érosion (Hudson, 1973). Cette érosivité dépend des caractéristiques de la pluie (la taille et la vitesse des gouttes, à l'intensité de la pluie) et à l'état de surface de sol. Les caractéristiques de la pluie, peuvent être modifiées par l'action du vent par l'augmentation de la vitesse d'impact, du couvert végétal, et des conditions hydriques du sol. Les autres facteurs climatiques exerçant une influence sur l'érosion des sols sont, la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime de vents. L'influence du climat sur l'érosion est difficile à évaluer à cause des variations de paramètres climatiques, aussi bien que celle des autres caractéristiques du bassin versant (White, 1986).

1.1.3.3 Facteurs lithologiques :

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion. Elle est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, pierrosité, teneur en matière

organique...) et de la cohésion qui existe entre ces particules. Une faible cohésion va entraîner une forte érodibilité (Govers, 1987 ; Poesen & Govers, 1990).

Notons que l'érodibilité des sols diminue avec l'augmentation de la teneur en matière organique qui réduit la mouillabilité des agrégats et diminue les risques d'éclatement lors de l'humectation (Casenaves et al, 1989).

Il existe trois propriétés essentielles des sols pour déterminer leur érodibilité et pour évaluer leur résistance à l'érosion :

- La teneur en limon et surtout en argile
- La matière organique qui assure la cohésion du sol
- Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

1.1.3.4 Le couvert végétal :

Le couvert végétal agit dans le sens de retarder l'érosion du sol (Mansouri, 1991). Ce rôle peut être direct, la végétation faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols (Snelder et Bryan, 1995 ; Morgan *et al.*, 1997 ; Bochet *et al.*, 1998 ; Cerdá, 1999 ; MartinezMena *et al.*, 1999 ; Richard et Mathys, 1999 ; Descroix et Gautier, 2002). Il peut également être indirect, le couvert végétal assurant une amélioration du bilan hydrique et des propriétés physiques du sol (Dunne *et al.*, 1991 ; Bergkamp *et al.*, 1996 ; SoléBenet *et al.*, 1997 ; Cerdá, 1998). Il dépend aussi du stade de développement de la végétation (Rovéra *et al.*, 1999). Il protège le sol contre l'érosion par l'interception et le retard de la chute des gouttes des pluies sur la surface du sol permettant ainsi la dissipation de son énergie cinétique, ce qui diminue l'effet "splash". Elle favorise également l'infiltration de l'eau et le maintien du sol grâce à son système racinaire, et son développement en surface freine le ruissellement par rapport au sol nu.

La présence ou l'absence du couvert végétal à la surface du sol détermine son comportement hydrologique. En effet, la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissellement et le transport solide sont corrélés positivement avec le taux de recouvrement de la végétation (Giffort et Hawkins, 1978 et 1979).

Les forêts et surtout les couvertures herbacées sont plus efficaces pour fournir une protection du sol qu'une couverture de plantes cultivées ou une jachère. C'est le manque de végétation qui crée la condition permettant l'érosion. L'existence d'une litière protège également les sols de l'érosion. La dynamique de la croissance du couvert végétal est très variable en fonction du type de plante mais aussi des techniques culturales (densité et date de plantation, fertilisation) et du climat (précipitations et éclaircissement). La combinaison entre cette dynamique de croissance et la dynamique des pluies va donc déterminer l'importance des risques d'érosion. (Ben Slimane 2013).

1.1.3.5 Facteurs anthropiques :

Certaines activités humaines provoquent l'accélération de rythme naturel de l'érosion hydrique par l'action de surpâturage et la déforestation qui provoque le tassement des sols,

diminue sa perméabilité et favorise le ruissellement de l'eau, L'intensification de l'agriculture et La croissance démographique et l'urbanisation.

1.1.4 Conséquences de l'érosion hydrique :

Parmi les signes et effets physiques visibles de la dégradation du sol causés par l'érosion peuvent être cités les éléments ci-dessous et ce, dépendamment des lieux à savoir les dégâts engendrés en amont et en aval :

Sur site :

- Pertes en terre et en éléments nutritifs : les griffes, fines rigoles formées par l'eau, particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs sillonnés par les labours, elles deviennent des ravines par élargissement dû à la concentration de ruissellement excessif.
- Pertes d'engrais et de matière organique ;
- Destruction de la structure du sol ;
- Réduction de la profondeur du sol ;
- L'érosion des rives entraîne non seulement le recul des rives des cours d'eau, menaçant ainsi la disparition d'habitats fauniques, mais également une augmentation de la charge particulaire des eaux du fleuve. Une fois arrachées, les matières particulières sont transportées dans les cours d'eau, parfois sur de longues distances et se déposent sur le lit pour former des sédiments jusque dans l'estuaire. De plus, si elles sont contaminées, elles contribuent à la contamination du milieu récepteur en aval.
- Baisse de rendement ... abandon des terres

Hors site :

À côté des dégâts bien visibles concernant les terres cultivées, il existe des dégâts en aval beaucoup plus insidieux provoqué par l'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol. Par ailleurs, pour les zones typiquement montagnardes notamment en milieu forestier, d'autres phénomènes tels que les glissements ou les éboulements de terrains de grande ampleur ou les laves torrentielles ainsi l'introduction massive de sédiments dans les cours d'eau peut être induit par l'érosion hydrique. Nous pouvons donc, illustrer certains de ces dégâts en aval à savoir :

- Charger les rivières en M.E.S (matières en suspension). L'augmentation de la turbidité des eaux modifie l'équilibre trophique. L'entraînement des particules de sols dans les eaux superficielles s'accompagne également de celui des intrants agricoles (engrais, pesticides) et des polluants d'origine industrielle, urbaine et routière.
- Inondations boueuses
- Eutrophisation des eaux de surface : L'apport important de sédiments dans les eaux de ruissellement a pour effets biologiques et physiques néfastes sur la qualité de l'eau. Ces apports peuvent inclure des éléments azotés et phosphatés et même des métaux lourds peuvent être également transportés.

- La qualité de l'eau est détériorée par eutrophisation à cause du réchauffement de la température de l'eau et l'intensification du développement d'algues et de bactéries causant le vieillissement prématuré des eaux des exutoires et, par le fait même, une perte de la biodiversité.
- Ensablement des lits de rivière.
- Envasement des retenues d'eau.

1.1.5 Quantification de l'érosion hydrique :

Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion (actuelle et/ou risque) varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail.

La quantification peut se faire par :

- Mesures directes
- Des évaluations indirectes

1.1.5.1 Les mesures directes :

Mesures topographiques : dont le principe se base sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol, notamment :

- **Mesures par rugosimètre :** on estime la variation de la hauteur du sol par rapport à un plan de référence.

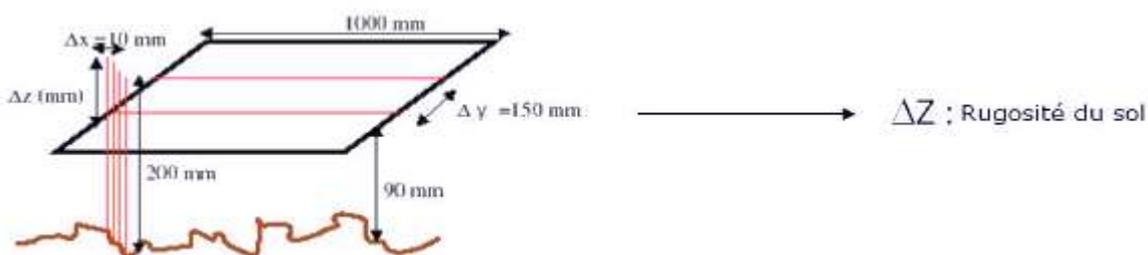


Figure 7: Mesures de l'érosion hydrique par rugosimètre

- **Simulation de pluie :** dont l'objectif est de déterminer certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols et ce, à petite échelle et sous diverses conditions de pluie et de sols.

L'utilisation des simulateurs de pluie présente plusieurs d'avantages puisqu'ils :

- Sont des dispositifs mobiles
- Sont capables de produire à volonté des pluies d'intensité, de hauteur et d'énergie semblables à celles des pluies naturelles
- permettent de simuler des averses de fréquence rare qui causent le plus de dégâts
- permettent de raccourcir les temps d'observation sur le terrain.

Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de passer par l'étape de préparer les parcelles de mesure dont voici une illustration.

Il y a plusieurs types de simulateurs des plus simples ou plus complexes

1.1.5.1.1 Mesures par l'étude du transport solide :

- **Transport en solution** : sa mesure est relativement facile puisque les concentrations en matières dissoutes sont en général homogènes dans une section. Ces concentrations sont liées à la conductivité qui est facilement mesurable in situ. Une formule établie par Richard et N'Guyen montre cette relation comme suit :

$$C(\text{mg/l}) = K/R \text{ (ohms/cm.cm}^2\text{)} \quad [01]$$

- **Transport en suspension** : son évaluation peut être faite in-situ ou au laboratoire.

En générale, le nombre de mesures est petit. En fait, on peut faire :

1. soit une seule mesure verticale au milieu ou au point le plus profond de la section ;
2. soit quelques mesures (2 à 5) réparties sur la section. Ainsi, Colby a établi un abaque pour la détermination du nombre de verticales à réaliser en tenant compte de la granulométrie des sédiments et d'un coefficient hydraulique :

$$K = \frac{\left[\frac{V^2}{D}\right]_{max}}{\left[\frac{V^2}{D}\right]_{moy}} \quad [02]$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} V : \text{ est la vitesse moyenne sur une verticale} \\ D : \text{ est la profondeur de cette verticale} \end{array} \right.$

Généralement, on estime que 80 à 90 % du transport des solides se font au cours des périodes de crue durant lesquelles les conditions du travail sont les plus défavorables (manque de données).

- **Transport de fond** : peut être estimé selon plusieurs méthodes à savoir des pièges à sédiments installés au fond de la zone active du lit, des fosses creusées au fond du lit ou aussi par marquage isotopique des sédiments. Cependant, sa mesure est imprécise.

1.1.5.1.2 Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues :

L'estimation de la quantité des sédiments déposés dans une retenue dépend de deux paramètres : la densité et le volume des sédiments.

La densité des sédiments est variable en fonction du temps et en fonction de la position dans la retenue. Elle varie en fonction de la granulométrie, la composition minéralogique, l'épaisseur des dépôts, le niveau de l'eau dans la retenue et l'âge des dépôts.

Quant au volume des sédiments, il est déterminé sur la base d'une comparaison de la topographie de la cuvette avant et après mise en eau du barrage. La détermination de la profondeur des sédiments par rapport à la surface d'eau est appelée bathymétrie.

1.1.5.2 Les mesures indirectes :

- i. La modélisation :(voir chapitre 02)
 - a. Les modèles empiriques .
 - b. Les modèles déterministes (physiques) .
- ii. La télédétection et le système d'information géographique
- iii. Utilisation des radioisotopes : le césium-137

– Les inondations dues aux eaux de ruissellement par suite de la réduction de la capacité d'infiltration des sols dégradés, et la baisse de niveau ou assèchement des nappes et points d'eau à cause des pertes d'eau par ruissellement.

1.1.6 Lutte contre l'érosion hydrique :

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation reposent sur l'étude de leur nature et de leur évolution (CHEBBANI, 1999).

1.1.6.1 Les interfluves :

Les moyens de lutte contre l'érosion dans les interfluves peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- Procédés agro-techniques
- Restauration des forêts ;
- Procédés hydrotechnique ;

1.1.6.1.1 Procédés agro-techniques :

L'un des procédés agro-techniques les plus efficaces est le choix des cultures adaptées, en tenant compte de leur capacité à protéger le sol. Les herbes pérennes protègent de l'érosion et forment une couche fixant le sol, restaurent sa structure, et améliorant la capacité d'absorption et réduisant l'érodabilité.

Une autre méthode de protection consiste à cultiver selon les directions perpendiculaires à l'écoulement, parallèlement aux courbes de niveau (Ouamer Benhadj, M, Bouchelka, H. 1994).

1.1.6.1.2 Restauration des forêts :

Lorsque la reforestation est possible, c'est un moyen efficace de conservation des sols. Les différents types de plantations ci-après sont importants :

Ceinture forestière sur les terres agricoles pour régulariser le ruissellement, améliorer l'infiltration et protéger l'érosion éolienne.

Bandes de forêts et bouquets d'arbres à l'intérieur du réseau hydrographique (dessin des chenaux d'écoulements) le long des ravines pennies et des vallées soumises à une forte érosion.

Les ceintures forestières protègent les sols par différentes façons. Elles réduisent la vitesse du vent et améliorent le microclimat. Les ceintures forestières sont très efficaces lorsqu'elles sont plantés en lignes perpendiculaires au ruissellement (le long des courbes de niveau), l'écoulement peut alors disposer et l'infiltration favorisée. Cependant une mauvaise disposition des ceintures forestières peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation de nouvelles récoles (Ouamer Benhadj, M, Bouchelka, H.1994).

1.1.6.1.3 Procédés hydrotechniques :

Les procédés hydrotechniques de protection comportent certains types de structures et ne sont utilisés que si cela se justifie économiquement, ou si d'autres procédés sont révélés non efficaces. Ces procédés comportent les fosses d'infiltration, les barrages de rétention avec des grandes surfaces de retenues, des terrasses le long des courbes de niveau, etc....

1.1.6.1.4 Les cours d'eau :

L'érosion du réseau hydrographique est souvent la cause des difficultés et des pertes financières. Aussi est-il nécessaire de rechercher les moyens de protection contre l'érosion.

Il n'y a pas des méthodes universelles et l'on doit tenir compte des nombreux facteurs, Notamment du prix et de la disponibilité sur place des matériaux de construction ainsi que des risques encourus.

1.1.6.1.5 Revêtement des berges :

Le mode de protection des berges le plus courant est la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion, comme les enrochements, le béton, végétation naturelle, etc...., est disposé directement sur le talus de la berge (Ouamer Benhadj, M, Bouchelka, H.1994).

1.1.6.1.6 Freinage de l'écoulement :

On peut obtenir un freinage de l'écoulement, en mettant en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution locale de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables le dépôt des sédiments et la croissance de végétation le long des berges (Ouamer Benhadj, M, Bouchelka, H, 1994).

1.1.6.1.7 Aménagement hydraulique :

Les barrages et autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant la maîtrise des débits très élevés sous une forte charge (Ouamer Benhadj, M, Bouchelka, H.1994).

On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour dissiper l'énergie des écoulements à grande vitesse et pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage.

On utilise couramment les dispositifs suivant :

- Bassin de dissipation.

- Sauts de ski.

D'une manière générale, pour limiter l'érosion sur les terres durablement, il faut engager une réflexion de l'amont vers l'aval. Cette réflexion peut alors s'envisager à différentes échelles spatiales.

Au niveau de la parcelle. Le but est alors de limiter les dommages au sein de la parcelle victime d'érosion. Dans ce cadre, une des premières démarches à envisager est l'amélioration du sol (divers types d'amendement, dans le respect de la réglementation du PGDA).

Différentes mesures permettent aussi de stabiliser sa structure et d'augmenter sa perméabilité (Techniques de Conservation du Sol (photo 4b), voir les coordonnées de l'asbl Greenotec en fin de document). D'autres visent à créer des obstacles au ruissellement (bandes enherbées).

Au niveau du bassin versant. D'autres mesures peuvent également être prises en amont et en aval de la parcelle. Le but est ici de lutter contre le problème dès son apparition, c'est-à-dire sur une zone bien plus large que celle où se présentent les signes d'érosion. On parle alors d'actions sur le micro-bassin versant. Comme précédemment, il est donc conseillé d'agir grâce aux mêmes mesures agronomiques en amont afin de réduire l'importance du flux, mais aussi par une réflexion d'ensemble concernant l'aménagement du bassin versant. Ces mesures peuvent éventuellement être complétées par des ouvrages hydrauliques en aval .

Aux deux échelles. Quelques bonnes pratiques « de base » peuvent être facilement envisagées. Eviter par exemple d'implanter des cultures peu couvrantes (sarclées) sur les pentes fortes, sur les hauteurs ou en amont direct de la parcelle victime d'érosion. Aménager une bande enherbée en bas de parcelle. En aval, préférer des prairies ou des terrains inondables pouvant servir de réceptacle aux eaux de ruissellement.

1.2 Transport solide :

Les sédiments qui atteignent le cours d'eau par l'intermédiaire du ruissellement vont être transportés par ce dernier s'il en est capable.

On appelle capacité de transport d'un cours d'eau sa possibilité optimum de transport de sédiments ; cette possibilité est liée au débit liquide et à la vitesse du courant et la pente.

Si la capacité de transport est trop faible pour évacuer les produits de l'abrasion, une partie des matériaux va se déposer.

Si la capacité de transport est suffisante, tous les sédiments fournis par l'abrasion seront transportés ; l'eau conservera un reliquat d'énergie qu'elle pourra employer au creusement du lit et à l'érosion des berges.

La capacité de transport est variable dans le temps et dans l'espace.

- Dans le temps, puisqu'elle est liée au débit liquide. Si une crue survient, la capacité de transport du cours d'eau augmente, les alluvions déposées en période d'étiage vont être reprises par la crue.

- Dans l'espace, puisqu'elle est liée aux vitesses de courant. Si, le long du parcours d'un cours d'eau, les vitesses se trouvent réduites, par un changement de pente par exemple, la capacité de transport va diminuer et les matériaux vont se déposer.

1.2.1 Débit solide :

On appelle débit solide dans une section donnée le poids de matériaux en phase solide qui traverse la section pendant un intervalle de temps déterminé. En général, et suivant son importance, on l'exprime en kg ou en tonnes par seconde

Le débit solide d'un cours d'eau est constitué par deux modes de transport :

- **Le transport en suspension** : concerne les particules fines qui sont maintenues en suspension sous l'effet de la turbulence des eaux (argiles, limons, sables fins).
- **Le transport par charriage** : ou transport de fond : il affecte uniquement les matériaux grossiers typiquement de diamètre supérieur à 0,5 mm (sables moyens ou grossiers, graviers, gros blocs).

Le charriage s'effectue :

- Par saltation : sables moyens et grossiers, plus rarement graviers et galets. Les matériaux se déplacent par petits bonds successifs au-dessus du fond.
- Par roulement sur le fond du lit : sables et cailloux.
- Par glissements en vrac au fond : galets et gros blocs

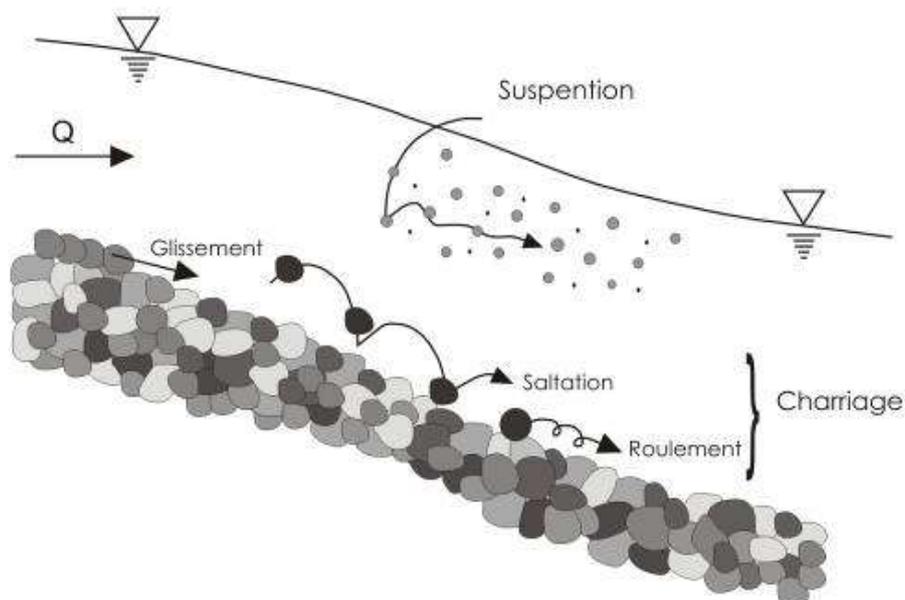


Figure 8: Schéma des modes de transport, d'après (Graf et Altinakar dans Ildefonse et al. (1997))

1.2.2 Mesure de transport solide :

1.2.2.1 Formules empiriques :

1.2.2.1.1 Le charriage :

Principes de la modélisation et paramètres adimensionnels :

Pour modéliser le transport solide on ne dispose en général que d'un nombre limité d'informations. Trois paramètres doivent au minimum être connus, le débit Q , la pente du lit S et le diamètre caractéristique D du mélange sédimentaire. A partir de la connaissance de ces paramètres la plupart des approches proposent au préalable un calcul de la contrainte grâce à une loi de frottement (force exercée par le fluide sur les grains), puis un calcul du flux généré par cette contrainte à partir d'une loi de transport adaptée (soit deux équations nécessaires).

Une seconde approche consiste à calculer directement le débit solide à partir de Q , S et D (une seule équation nécessaire).

Il existe plusieurs des formules utilisent des grandeurs adimensionnelles, afin de permettre leur utilisation dans des configurations autres que celles qui ont prévalu lors de leur établissement (par exemple la géométrie du canal d'écoulement). Les deux principales grandeurs utilisées sont le nombre de Shields et le paramètre d'Einstein.

Shields, 1936 a proposé d'adimensionnaliser les forces motrices (contrainte hydraulique τ exercée sur la surface du lit) par les forces stabilisatrices (poids de la particule). Le nombre obtenu est appelé «nombre de Shields», noté θ :

$$\theta = \frac{\tau}{g * (\rho_s - \rho) * D} \quad [03]$$

Shields a également déduit de ses expériences que les grains posés au fond du lit étaient mis en mouvement lorsque ce nombre adimensionnel dépassait une valeur critique θ_c égale à 0.06.

Einstein Brown [1950] :

Cette formule a été proposée par Brown (1950) à partir d'un lissage de l'abaque d'Einstein (1950) :

$$0,3 < D < 29 \text{ mm}$$

$$q_v [m^3/s/m] = \sqrt{g(s-1)D^3} * \left[\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(s-1)D^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g(s-1)D^3}} \right] f(\theta) \quad [04]$$

$$\begin{cases} f(\theta) = 2.15e^{-0.391/\theta} & \text{Si } \theta < 0.18 \\ f(\theta) = 40\theta^3 & \text{Si } \theta > 0.18 \end{cases}$$

Où :

q_v : Débit volumique unitaire;

s : Densité relative ($s=\rho_s/\rho$);

ρ_w : Masse volumique de l'eau ;

ρ_s : Masse volumique du sédiment ;

θ : Paramètre de Shields.

ν : est la viscosité cinématique du fluide (10^{-6} m²/s à 20°C).

Meyer-Peter et Mueller [1948]:

La formule de Meyer-Peter et Mueller est vérifiée si : $0,4 < S < 2,4\%$, $0,4 < D < 29\text{mm}$.

$$q_v [m^3/s/m] = \sqrt{g(s-1)D^3} \left(\left(\frac{K}{K'} \right)^{\frac{3}{2}} \theta - 0.047 \right)^{\frac{3}{2}} \quad [05]$$

Le ratio K/K' est le ratio entre le coefficient de Strickler de l'écoulement K et le Strickler du grain K' , et permet de corriger la contrainte totale pour ne tenir compte que de la contrainte appliquée au grain. Le terme K est donné par $K=U / S^{1/2} R^{2/3}$ et le terme K' est calculé avec l'équation de Strickler 1923 :

$$k' = 26 / D_{90}^{1/6} \quad [06]$$

Où :

q_v : Débit volumique unitaire ; R : Rayon hydraulique du lit ; g : gravité ; D_{50} , D_{90} : diamètre équivalent à 50%, et à 90% des grains solides ; U : vitesse moyenne de l'écoulement ; θ : Paramètre de Shields ; s : Densité relative ($s=\rho_s/\rho$) ; S : La pente.

Parker [1979] :

$$q_v [m^3/s/m] = 11.2 \sqrt{g(s-1)D^3} \frac{(\theta-0.03)^{4.5}}{\theta^3} \quad [07]$$

Où ; q_v : Débit volumique unitaire ; θ : Paramètre de Shields ; s : Densité relative ($s=\rho_s/\rho$);

D_{50} : diamètre équivalent à 50% des grains solides .

Rickenmann [1990] :

La formule de Rickenmann est vérifiée si :

$$0.0004 < S < 0.2, \quad 0.4 < D < 10 \text{ mm}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_v [m^3/s/m] = 1.5(q - q_c) S^{1.5} \quad \text{pour } 0.0004 < S < 0.2; \quad [08] \\ q_v [m^3/s/m] = \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0.2} (q - q_c) S^2 \quad \text{pour } 0.03 < S < 0.2 ; \quad [09] \end{array} \right.$$

Avec,

$$q_c = 0.065(s - 1)^{1.67} g^{0.5} D_{50}^{1.5} S^{-1.12} \quad [10]$$

L'auteur propose $(D_{90}/D_{30})^{0.2}$ égale 1,05 si inconnu.

Où ;

q_v : Débit volumique unitaire ; s : Densité relative ($s = \rho_s / \rho$); **D50, D90, D30**: diamètre équivalent à 50%, 90% , et à 30% des grains solides ; **S** : La pente.

Schoklitsch [1962] :

La formule de Rickenmann est :

$$q_v [m^3/s/m] = \frac{2.5}{\rho_s / \rho} S^{3/2} (q - q_c) \quad [11]$$

$$q_c = 0.26 (s - 1)^{5/2} \frac{D_{40}^{3/2}}{S^{7/6}} \quad [12]$$

Où ;

s : Densité relative ($s = \rho_s / \rho$); **S** : La pente.

Van Rijn [1984]:

Développement semi-empirique, pour le charriage de matériaux vérifiant $D < 2\text{mm}$.

$$q_v [m^3/s/m] = 0.053 \sqrt{g(s - 1) D^3} \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \quad [13]$$

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad ; \quad T = \frac{u_*^2 - u_c^2}{u_c^2} \quad ;$$

$$u_* = \sqrt{g} \frac{U}{18 \log\left(\frac{4R}{D_{90}}\right)} \quad [14]$$

$$u_c^2 = g(s - 1) D_{50} [\alpha D_*^\beta] \quad [15]$$

Où

D_* : Diamètre sédimentologique ; U : Vitesse moyenne ; u_* : Vitesse de frottement.

Tableau 1: la variation des coefficients α et β selon D^*

D_*	A	β
$D_* < 4$	0.24	-1
$4 < D_* < 10$	0.14	-0.64
$10 < D_* < 20$	0.04	-0.10
$20 < D_* < 150$	0.013	0.29
$150 < D_*$	0.055	0

1.2.2.1.2 La suspension :

Considérons des particules en suspension, comme sur la figure ci-dessous, de diamètre d et de vitesse de chute w_s ;

Les concentrations instantanées des niveaux 1 et 2 sont, respectivement : $c + c'$ et $c - c'$, avec c : concentration moyenne et c' : fluctuations moyennes de la concentration autour de c . De même, les vitesses instantanées vers le haut (niveau 1) et vers le bas (niveau 2) sont, respectivement : $w' - w_s$ et $w' + w_s$, avec w' : fluctuations moyennes de la vitesse autour de w_s .

Le transport moyen vers le haut peut alors s'exprimer par :

$$q_u = \overline{(w' - w_s) (c + c')} = -\overline{c w_s} + \overline{c' w'} \quad [16]$$

Le transport moyen vers le bas peut alors s'exprimer par :

$$q_d = \overline{(w' + w_s) (c - c')} = \overline{c w_s} - \overline{c' w'} \quad [17]$$

Pour un écoulement uniforme régulier, ces transports sont équivalents, donc :

$$\overline{c w_s} - \overline{c' w'} = 0 \quad [18]$$

Le terme $\overline{c w_s}$ représente le transport vers le bas, par gravité, tandis que l'autre terme décrit le transport vers le haut, par les fluctuations turbulentes. Ce terme est d'ailleurs proportionnel au gradient de concentration vertical (dc/dz).

Ainsi,

$$c' w' = -\epsilon_s \frac{dc}{dz} \quad [19]$$

Donc, en combinant ces deux dernières équations, on obtient :

$$c w_s + \epsilon_s \frac{dc}{dz} = 0 \quad [20]$$

Avec :

c : concentration moyenne du sédiment à la hauteur z par rapport au fond.

ε_s : Coefficient de diffusion à la même hauteur z ;

En supposant que la vitesse de l'écoulement suit la loi logarithmique et que la répartition des pressions est hydrostatique,

$$\frac{du}{dz} = \frac{u^*}{kz} \quad [21]$$

Avec k : cste de karman = 0,4 pour l'eau claire

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{d}\right) \quad [22]$$

Donc, comme

$$\tau = \rho \cdot \varepsilon_s \frac{du}{dz} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_s = \rho \cdot k \cdot u^* \cdot z \left(1 - \frac{z}{d}\right) \quad [23]$$

Il résulte :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\bar{c}}{c_a} = \left(\frac{d-z}{z} \cdot \frac{a}{d-z}\right)^z \\ z = \frac{w_s}{\beta k u^*} \end{array} \right. \quad [24]$$

Où ;

C_a : Concentration connue en a ; ;

C : Concentration moyenne à la hauteur z ; d : Profondeur de l'écoulement ;

Z : Hauteur pour laquelle la concentration C est cherchée ; a : Limite inférieure de la bande (en hauteur) où la suspension se produit ; z : Nombre de Rouse qui lui-même fonction de w_s et u^* ; w_s : Vitesse de sédimentation ; k : Constante de Van Karman ; u^* : Vitesse de frottement

NB : ne pas confondre z avec Z .

D'où le profil de concentration sur la figure. (Où $d=h$) On peut ainsi déterminer l'importance du transport en suspension. (Voir tableau ci-dessous avec $\beta=1$)

Tableau 2: L'importance du transport en suspension

Z	u^*/w_s	Distribution verticale de la suspension
5	0.5	Suspension dans la couche du fond ($z < 0.1h$)
2	1.25	Suspension jusqu'à mi profondeur ($z < 0.5h$)
1	2.5	Suspension sur toute la profondeur
0.1	25	Suspension répartie uniformément sur toute la profondeur

Donc, on constate que :

- Pour u^* et β donnés :
 - plus w_s est petit, c'est-à-dire, plus les sédiments sont fins, plus la distribution des sédiments est uniforme.
 - Au contraire, p
 - plus les particules sont grosses, plus la concentration décroît rapidement à partir du fond.
- Pour β et w_s donnés :
 - plus u^* est grand, plus la distribution des sédiments n'est uniforme.

En réalité, la constante de Karman décroît quand la concentration augmente.

1.2.2.1.3 Transport total :

Ackers et White [1973] :

La formule de Ackers et White est vérifiée si :

$$Fr < 0,8 \text{ (rivières de plaine)} ; \quad 0,4 < D < 14 ;$$

$$q_v [m^3/s/m] = 0.025 \frac{qD_{35}}{H} \left[\frac{F_{gr}}{0.17} - 1 \right]^{1.5} \quad [25]$$

Avec :

$$F_r = U/(gH)^{1/2}$$

$$F_{gr} = \frac{1}{\sqrt{g(s-1)D_{35}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32} \log\left(\frac{10H}{D_{35}}\right)} \right] ;$$

Où ;

Fr : Nombre de Froude ; q : Débit liquide unitaire ; H : Profondeur de l'écoulement ; U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; D_{35} : diamètre équivalent à 35% des grains solides ; Cette s'applique pour des nombre de Froude $Fr < 0,8$, c'est à dire plutôt pour des rivières de plaine [Bathurst, et al., 1987].

Engelund et Hansen [1967] :

- $0,15 < D < 1,6 \text{ mm}$, Pentes faibles
Equation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold [1966] et du principe de similarité :

$$q_v [m^3/s/m] = \frac{0.1}{f} \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \theta^{5/2} \quad [26]$$

Où ;

f : Le facteur de rugosité f étant défini par $f = 2gR(S/U^2)$; R : Rayon hydraulique du lit ;

g : gravité ; D_{50} : diamètre équivalent à 50%, des grains solides ; U : vitesse moyenne de l'écoulement ; θ : Paramètre de Shields ; s : Densité relative ($s=\rho_s/\rho$) ; S : La pente.

1.2.2.2 Mesure de la concentration des sédiments :

Yang [1984] :

Equation adimensionnel pour les graviers. La concentration C (en g/m³) est donnée par :

$$\begin{aligned} \text{Log } C = & 6.681 - 0.633 \log \left(\frac{w D_{50}}{v} \right) - 4.816 \log \left(\frac{u_*}{w} \right) \\ & + [2.784 - 0.305 \log \left(\frac{u_*}{w} \right) - 0.282 \log \left(\frac{u_*}{w} \right)] \log \left(\frac{US}{w} - \frac{U_{cr} S}{w} \right) \end{aligned} \quad [27]$$

Avec,

$$w = \sqrt{g(s-1)D_{50}}$$

$$u_* = \tau/\rho = \sqrt{gRS}$$

$$\begin{cases} \frac{U_{cr}}{w} = \frac{2.5}{\log \left(\frac{u_* D_{50}}{v} \right) - 0.06} + 0.06 & \text{Pour } 1.2 < \frac{u_* D_{50}}{v} < 70 \\ \frac{U_{cr}}{w} = 2.5 & \text{Pour } 70 \leq \frac{u_* D_{50}}{v} \end{cases}$$

Où ;

C : la concentration des sédiments (g/m³) ; w : Vitesse de chute ; u^* : Vitesse de frottement ;
 U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; U_{cr} : Vitesse critique d'arrachement des sédiments ;
 S : La pente.

Engelund-Hansen :

La formule de Engelund-Hansen pour la concentration est :

$$C = \frac{0.05U^2}{(s-1)^2 \sqrt{g} D C h^3 q} \quad [28]$$

Où ; C : la concentration des sédiments (g/m³) ; q : Débit liquide unitaire ; U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; s : Densité relative ($s=\rho_s/\rho$) ; D : Diamètre des sédiments ; Ch : Coefficient de Chézy.

Bagnold :

La concentration C (en g/m³) est donnée par la formule :

$$C = C_{ch} + C_{sus} \quad [29]$$

$$C_{ch} = \beta_1 \cdot \frac{\tau_0}{gh} \quad ; \quad C_{sus} = \beta_2 \cdot \frac{\tau_0}{gh} \frac{U}{W}$$

Où ; C : la concentration des sédiments(g/m³) ; C_{ch} : Concentration obtenue par charriage seul ; C_{sus} : Concentration des sédiments en suspension ; W : Vitesse de chute ; u* : Vitesse de frottement ; U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; τ₀ : la contrainte de cisaillement par la paroi ;

pour DE [30μm, 1000μm], Les Valeurs β₁=0,17 et β₂=0,01 fournissent des résultats corrects dans la plupart des cas.

Van Rijn :

La formule de la concentration est obtenue par charriage est :

$$C_{sus} = 0.005 \cdot \rho_s \left[\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{gd(s-1)}} \right]^{2.4} \left(\frac{D}{h} \right) \quad [30]$$

$$C_{ch} = 0.012 \rho_s \cdot \left[\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{gd(s-1)}} \right]^{2.4} \left(\frac{D}{h} \right)^{1.2} D^{*-0.6} \quad ; \quad D^* = D \left(\frac{g(s-1)}{\nu} \right)^{1/3} \quad [31]$$

Où ;

C_{ch} : Concentration obtenue par charriage seul ; C_{sus} : Concentration des sédiments en suspension ; U : Vitesse moyenne de l'écoulement ; U_{cr} : Vitesse critique d'arrachement des sédiments ; h : Hauteur d'eau ; D : Diamètre des sédiments ; D* : Diamètre sédimentologique .

Meyer-Peter :

La formule de Meyer-Peter pour la concentration est :

$$C = \frac{8(\rho g h J - 0.047(\rho_s - \rho) g D)^{3/2}}{g(\rho_s - \rho) q \sqrt{\rho}} \quad [32]$$

Où ; J : Perte de charge linéaire.

1.2.2.3 Par des mesures in situ :

Les mesures in situ (prélèvement) s'avèrent comme le critère le plus utilisé et le plus représentatif pour caractériser la teneur en matière solide dans un échantillon de mélange. L'échantillonnage des matériaux en suspension dans les cours d'eau naturels, semble avoir été pratiqué depuis fort longtemps à l'aide de simples bouteilles. Les techniques dans ce domaine ont progressivement évolué, des méthodes très simples, à des procédés plus complexes mais plus précis. Le charriage est difficilement accessible par des mesures directes in situ.

1.2.2.3.1 Mesures du charriage :

Généralement, le charriage est donné par poids par unité de temps et par unité de largeur. Nous mesurons le poids des matériaux du fond passant à une section transversale dans un temps donné par l'une des méthodes citées ci-dessous, bien qu'il soit difficile de satisfaire les conditions hydrauliques du jaugeage.

Les méthodes les plus usuelles sont :

- détecteur hydrophonique.
- nasses de prise en rivière.
- traceurs radioactifs.
- procédé topographique (bathymétrie).
- fosse à sédiments.
- modèles réduits.

En réalité, le charriage est discontinu dans le temps et dans l'espace de l'amont vers l'aval. Sa variation dans le temps se traduit par des valeurs très élevées lors des crues qui restent mal connues, faute de mesure ou absence totale de celle-ci. La discontinuité spatiale provoque un dépôt avant tout obstacle et un affouillement derrière lui (**Bouhaniche, 2005**).

1.2.2.3.2 Mesures de la suspension :

Le débit solide par suspension q_{ss} est donné comme un volume par unité de temps et par unité de largeur.

Pour obtenir q_{ss} , il faut déterminer la concentration des sédiments C par échantillonnage du mélange Eau-Sédiment correspondant à des débits liquides ($q_{ss} = C \cdot q$).

Une supposition est nécessaire pour entamer ce genre des mesures, celle-ci s'appuie sur le fait que les particules solides et liquides se meuvent à la même vitesse. Ces mesures se font sur toute la largeur de la section considérée. Ces méthodes consistent à explorer le champ des vitesses et des concentrations. - Elles se réalisent comme un jaugeage liquide. Les prélèvements d'échantillons doivent se faire avec des appareils à action très rapide. A nos jours, il existe plusieurs appareils de prélèvement, lesquels sont :

- ❖ Turbidisonde NEYPRIC ;
- ❖ Turbidisonde DELFT ;
- ❖ Prélèvement au moyen d'une pompe ;
- ❖ Prélèvement au moyen des bouteilles.

La fiabilité de la mesure du transport solide en suspension dépend de plusieurs conditions malheureusement, la mesure de la concentration en Algérie se fait en bordure du cours d'eau (Bouhaniche, 2005).

1.3 Envasement des Barrages :**1.3.1 Introduction :**

Laissées à leurs cours naturels, les rivières transportent progressivement jusqu' à la mer des quantités importantes de sédiments arrachés aux versants par ruissellement des eaux

de pluie. En aménageant ces cours d'eau par la construction des barrages on modifie le transit naturel de ces sédiments qu'on piège dans les eaux calmes des retenues qu'elles comblent progressivement avec le temps. À long terme, cela pose de graves problèmes pour le maintien et la préservation du potentiel hydraulique mobilisé à un prix de revient élevé (REMINI, 2003).

1.3.2 Apports solides aux retenues :

Les sédiments des cours d'eau sont transportés sous forme de charriage et en suspension. À l'entrée d'une retenue, le transport de ces derniers diminue par suite de la chute brutale de la vitesse du cours d'eau ; les plus grossiers s'y déposent immédiatement, quant aux éléments fins, plus légers, ils continuent leur trajet en suspension jusqu'à se déposer en eaux mortes où ils se décantent lentement. Cette décantation s'effectue là où en général les vitesses deviennent nulles, soit dans les sections mouillées les plus larges au pied amont du barrage (REMINI, 2003).

Le problème d'envasement causé essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eaux, elles se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de Demmak, Heusch (1982) donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes/km²/an avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l [cité par Mahi Tabet -Aoul 2000].

Ce phénomène entraîne l'envasement rapide de nombreuses retenues d'eau. Les barrages réservoirs s'envasent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementales

A cet effet l'envasement pose d'énormes problèmes à savoir :

- La réduction de la capacité : chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.
- La sécurité de l'ouvrage : l'indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir. L'envasement pose un problème sur la stabilité de l'ouvrage, on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur. [OUMRANI.N 2009]
- Obturation des organes de vidange : un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond.
- Envasement des canaux d'irrigation : l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées ceci pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage.
- Dégradation de la qualité de l'eau : les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau. [REMINI et al 1997].

1.3.3 Etat d'envasement du barrage de Beni Amrane :

Le barrage de Beni Amrane a été mis en service en 1988. Il a été surélevé en Juillet 2003, la côte de retenue normale initiale était de 63m.

Lors d'une campagne de levés bathymétriques des barrages en exploitation, initiée par l'ANBT en 2004, le volume d'eau, pour la retenue normale était de 11,85Hm³, tandis que la surface de la retenue était estimée à 202,5ha. Pour la cote des plus hautes eaux exceptionnelle le volume était estimé à 35,17Hm³ tandis que la surface était de 303,3ha. Le tableau suivant met à l'évidence la diminution de la capacité de stockage du barrage dans le temps, la capacité à atteint 0,18 Hm³/an avec un taux d'envasement de 63,65%.

Tableau 3 : tableau comparatif du volume à l'ancienne cote (RN=63m) (ANBT, 2004)

Année du levé	1988	1996	2004
Capacité (Hm ³)	15.6	7.08	5.67
Perte de capacité (Hm ³)	0	8.52	1.41
Nombre d'année	0	8	8
Perte de capacité annuelle (Hm ³)	0	1.06	0.18

1.4 Conclusion :

Le transport solide est la conséquence partielle de la perte en terre des sols au niveau du bassin versant; il est la cause directe de la sédimentation dans les ouvrages hydrauliques.

L'évaluation des quantités de sédiments transportées par un cours d'eau présentera donc un grand intérêt à la fois pour la conservation des sols et pour la conception des ouvrages hydrauliques.

Or, le phénomène de transport solide dépend d'un si grand nombre de paramètres que sa complexité et sa variabilité sont énormes. Une évaluation par le calcul à partir de l'observation des différents paramètres qui le conditionnent s'avère le plus souvent insuffisante dans l'état actuel de nos connaissances.



**Modélisation Hydrologique,
Présentation du Modèle SWAT**

2 La Modélisation Hydrologique , Présentation du Modele SWAT

2.1 Modèles hydrologiques :

La modélisation consiste à mettre au point un **ensemble d'équations** ou de **règles** pour décrire un phénomène de façon reproductible et simulable.

D'après le Dictionnaire de l'Environnement, le modèle est "une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir". La modélisation hydrologique est donc une représentation, partielle ou totale, du cycle de l'eau.

Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Bien que connues depuis un certain temps, ce n'est qu'au début des années 1960 que l'on a regroupé les équations décrivant les écoulements de l'eau sur un bassin versant dans un modèle mathématique. En effet, c'est seulement avec l'arrivée des ordinateurs que les premiers modèles hydrologiques capables de simuler un ensemble de processus hydrologiques ont été développés. Depuis lors, un nombre impressionnant de modèles plus ou moins complexes ont été proposés.

Les modèles constituent toujours une représentation simplifiée de la réalité. Ils permettent d'analyser des systèmes complexes, servent de complément aux mesures, permettent une extrapolation dans le temps et dans l'espace et sont susceptibles de combiner différents facteurs

2.1.1 Variables d'entrée :

Ce sont les données d'entrées du modèle. Ces données sont fluctuantes dans le temps. Il s'agit essentiellement des mesures de la pluie, de l'ETP et des caractéristiques physiques et hydrodynamiques du milieu.

2.1.2 Variables de sortie :

Ce sont les données de sortie du modèle. Elles peuvent représenter des débits, des flux ou des concentrations en polluants et matériaux érodés simulés à l'exutoire du bassin versant.

2.1.3 Variables d'état :

Ce sont les variables permettant de caractériser l'état du système modélisé. Elles peuvent évoluer en fonction du temps dans un modèle dynamique. Il s'agit par exemple, du niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du bassin versant, du taux de saturation des sols, mais aussi de la profondeur des sols, des paramètres relatifs aux plantes...

2.1.4 Paramètres :

D'après Gaume, ce sont des variables dont la valeur doit être déterminée par calage. La notion de paramètre est intimement liée à celle de modèles conceptuels ou empiriques. Dans de nombreux cas, il n'est pas possible de représenter dans un modèle le processus physique parce que l'échelle de ce processus est trop petite et que les variables d'état contrôlant le processus ne sont pas accessibles à la mesure. Un modèle plus global est alors utilisé pour décrire le

processus, mais certaines de ses variables d'état n'ont pas de sens physique et ne peuvent plus être reliées à des variables mesurables. Par exemple, la conductivité hydraulique d'un sol n'est accessible directement à la mesure et doit être évaluée à partir de tests d'infiltration, c'est donc une variable qualifiée de paramètre.

2.2 Modèles d'évaluation de l'érosion :

Il existe plusieurs modèles d'évaluation de l'érosion, entre autres le modèle de Wischmeier et le modèle SWAT. Les modèles constituent toujours une représentation simplifiée de la réalité. Ils permettent d'analyser des systèmes complexes, servent de complément aux mesures, permettent une extrapolation dans le temps et dans l'espace et sont susceptibles de combiner différents facteurs. La qualité des résultats obtenus par un modèle dépend de la qualité des données utilisées, dont les différentes étapes ont été décrites par Beven (1994).

2.2.1 Typologie des modèles hydrologiques :

Refsgaard et Storm (1995) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. D'après Refsgaard, les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués. En raison de l'ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou physique) une certaine confusion règne encore sur l'appartenance de tel ou tel modèle à une famille donnée.

2.2.2 Modèles empiriques

Il y a tout d'abord les modèles empiriques classiques de l'hydrologie opérationnelle, visant à caractériser globalement la relation pluie-débit par des traitements de séries chronologiques à partir d'approches soit déterministes, soit stochastiques. C'est par exemple le cas des modèles régressifs pluies-débits, ou des méthodes basées sur les fonctions de transfert, comme celles de l'hydrogramme unitaire (Michel et Mailhol, 1989).

Ces modèles ont en commun de ne faire appel qu'aux variables d'entrée et de sortie du système hydrologique qu'est un bassin versant, sans faire intervenir des données sur sa nature physique. Considéré comme une "boîte noire", le bassin versant est caractérisé par des paramètres et des fonctions sans grande signification physique, donnant une description purement mathématique de son fonctionnement.

Les modèles empiriques descriptifs globaux sont très utiles et utilisés en ingénierie hydrologique, et suffisent pour bien des applications liées aux ressources en eau (reconstitution de données, prévision en temps réel, gestion des ressources, etc.). Parmi les modèles empiriques on trouve SLEMSA et USLE.

2.2.3 Modèles conceptuels :

Les recherches menées sur de nombreux bassins ont conduit à considérer tout bassin comme un système complexe, dans lequel les précipitations se répartissent entre plusieurs niveaux de stockage temporaire en interaction (végétation, surface, sol, nappe, réseau hydrographique), avant de retourner dans l'atmosphère (par évaporation) ou d'être évacuées hors des limites du bassin (par écoulement dans les cours d'eau et les nappes).

Cette représentation d'un bassin comme un assemblage de réservoirs interconnectés a permis l'émergence d'une classe de modèles dits "conceptuels". Ces modèles sont fondés sur des équations de bilan assurant la conservation de l'eau non seulement dans le bassin mais aussi pour chaque réservoir. Ils utilisent pour leurs vidanges et leurs interactions des relations déterministes de type empirique (Roche, 1971). C'est par exemple le cas du modèle SWM, du modèle ANSWERS (Beasley, 1977), du modèle CREAMS (Knisl, 1980), du modèle CREC ou encore de la « famille des GR » dont par exemple le modèle GR3 (Edijatno et Michel, 1989) et le modèle GR2M (Mouelhi, 2003).

Permettant de simuler toutes les composantes du cycle de l'eau (évapotranspiration, recharge et contribution des nappes, stockage hydrique) et non plus seulement les débits, ce type de modèle s'est avéré très utile pour synthétiser l'information climato-hydrologique disponible sur un bassin et simuler l'évolution conjointe des ressources dans chaque compartiment.

Pour le détachement et le transport solide, c'est le modèle de Meyer et Wischmeier(1969) qui sont utilisés ; en effet, l'exportation des sédiments est déterminée par l'apport solide auquel s'ajoute le détachement des particules du sol par le ruissellement et la pluie

2.3 Modèles distribués à base physique :

Ce sont les modèles qui tiennent compte de la variabilité spatiale de l'érosion et du dépôt dans un bassin versant. Ces modèles physiques représentent les processus d'érosion en intégrant des données issues des modèles numériques d'altitudes et distinguent l'érosion en zone de ruissellement concentré correspondant à la capacité de détachement ainsi que le transport et l'érosion en zone de ruissellement diffus. Les modèles à base physique permettent de représenter les principaux mécanismes de l'érosion. Ils tiennent compte des paramètres physiques tels que la croissance de la végétation et le climat. Ces modèles permettent aussi de prédire la répartition du transport solide et liquide pendant un événement pluvieux. En effet, les modèles à base physique sont fondés sur les lois de conservation de la masse et de l'énergie. La majorité de ces modèles utilise une équation différentielle particulière connue sous le nom de l'équation de continuité. L'équation peut être appliquée à l'érosion du sol sur un petit segment d'un bassin versant (Morgan, 2005).

2.4 METHODOLOGIE :

Selon les modèles USLE, MUSLE et RUSLE, l'érosion (perte en sol A) est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (le facteur R) que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend K (l'érodibilité du sol), LS (le facteur topographique), C (le couvert végétal et les pratiques culturales) et P (les pratiques antiérosives)

Ces modèles sont actuellement utilisés à grande échelle dans de nombreux pays. En outre, ils sont largement appliqués et testés à l'échelle du bassin versant [Williams et Berndt, 1972; Griffin et al, 1988; Dickinson et Collins, 1998; Jain *et al.*, 2001; Lee, 2004, El Garouani *et al.*, 2005], à l'échelle du pays [Gay *et al.*, 2002, Strauss *et al.*, 1994 ; Dautrebande *et al.*, 1994] et à l'échelle du continent [Van der Knijff *et al.*, 2000]. Actuellement ce type d'approche est assez généralisé dans le monde sous de nombreuses variantes, et reconnu comme simple et robuste [Desmet et Govers, 1996].

De nombreux modèles hydrologiques intègrent actuellement à l'échelle du bassin versant les formulations USLE/RUSLE et MUSLE moyennant, selon le modèle, des variantes ou ajouts tels que le calcul au pas de temps journalier, la notion de capacité maximale de transport, une description plus explicite du détachement et du transport, la prise en compte détaillée de la croissance des cultures et des pratiques agricoles, etc

2.4.1 Présentation de SWAT et ArcSWAT

ArcSWAT est issu de la combinaison du modèle SWAT avec l'interface graphique ArcGIS. SWAT est un modèle continu dans le temps, fonctionnant à l'échelle d'un bassin versant et pour un pas de temps d'une journée. Il a été développé par le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) dans le but de déterminer l'impact des techniques de gestion sur le bilan en eau, sédiments, pesticides, nutriments, ... d'un bassin versant pour différents types de sols et utilisations des terres.

Ce modèle se base sur les processus physiques en jeu dans le bassin versant. Sa grande robustesse et son efficacité en font un modèle largement utilisé dans le domaine de la modélisation de bassins versants, notamment par différentes agences fédérales américaines ou de la Commission Européenne (Gassman et al., 2007).

Les composantes de base du modèle sont (Gassman et al., 2007) :

- La composante hydrologique : établissement du bilan hydrologique sur le bassin versant ;
- La composante météorologique (SWAT peut également être utilisé afin de déterminer l'impact des changements climatiques passés sur le bilan hydrologique ainsi que pour des projections) ;
- Les propriétés du sol ;
- La gestion des terres.

Ce sont ces composantes que nous allons décrire dans ce qui suit (. Préparation des données) et utiliser afin de modéliser le bilan hydrologique du bassin versant.

D'autres aspects peuvent également être intégrés au modèle :

- La croissance des plantes : détermination des rendements de cultures associés à différentes techniques de gestion des terres, en fonction des paramètres météorologiques, de l'irrigation, ...
- Les nutriments et pesticides : détermination de leur date d'application aux cultures et de leur impact sur les rendements ainsi que de leur transport dans le réseau hydrographique, leur transformation, ...
- Une composante ayant trait aux bactéries et éléments pathogènes, ...
- Le transport de sédiments,

2.4.1.1 Organisation du modèle

Dans le modèle SWAT, le bassin versant considéré est divisé en différents niveaux d'organisation représentés à la Figure 9 :

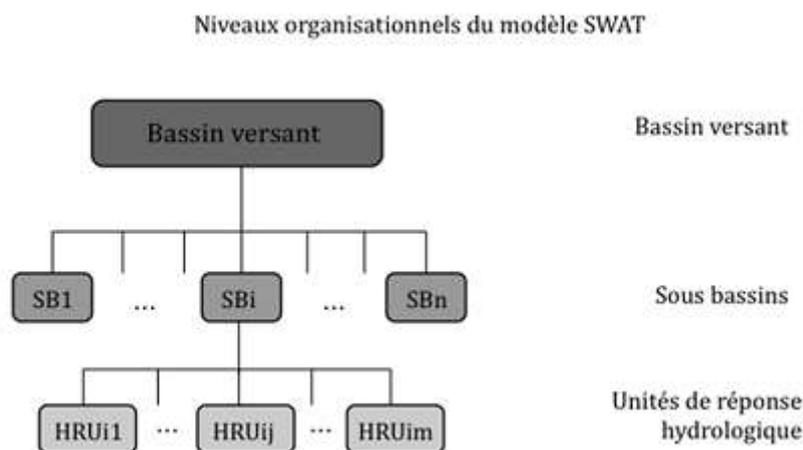


Figure 9: Organisation du modèle.

Les limites du bassin versant sont déterminées à partir de la topographie du terrain. Celui-ci est divisé en différents sous-bassins (SB1, ..., SBn) également délimités par la topographie. Ces sous-bassins sont reliés spatialement de sorte que le flux contenu dans un sous-bassin s'écoule entièrement vers le sous-bassin suivant. Chaque sous-bassin contient une branche du réseau hydrographique qui seront connectées par SWAT afin de former le réseau à l'échelle du bassin versant.

Les sous-bassins sont ensuite divisés en unités de réponse hydrologique (HRU, *Hydrological Response Unit*). Les unités de réponse hydrologique sont des unités homogènes en utilisation du sol, technique de gestion et caractéristiques du sol. Si les sous-bassins sont connectés les uns aux autres, il n'existe par contre pas d'interaction entre les unités de réponse hydrologique. Les sorties du modèle sont calculées séparément pour chaque unité et additionnées dans chaque sous-bassin. Une fois que les valeurs ont été déterminées au niveau des sous-bassins, SWAT détermine les relations spatiales entre les sous-bassins et incorpore les données calculées au réseau hydrographique global.

Le modèle permet également à l'utilisateur d'ajouter des sources ponctuelles ainsi que des réservoirs, naturels (lacs, dépressions, ...) ou non, qui constitueront des zones d'accumulation de l'eau (Gassman et al, 2007 ; Neitsch et al., 2005).

2.4.1.2 Etablissement du bilan hydrologique

Une fois que le bassin versant est organisé spatialement, le bilan hydrologique peut être calculé. Le cycle hydrologique est alors divisé en deux phases (Biesbrouck et al, 2000) représentées à la Figure 2:

- Une phase dite terrestre dans laquelle les quantités d'eau, de sédiments, pesticides, ... qui seront apportées au réseau au niveau de chaque sous bassin sont déterminées.
- Une phase dite "de routage" dans laquelle le mouvement de l'eau et des différents éléments sera modélisé à travers le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire.

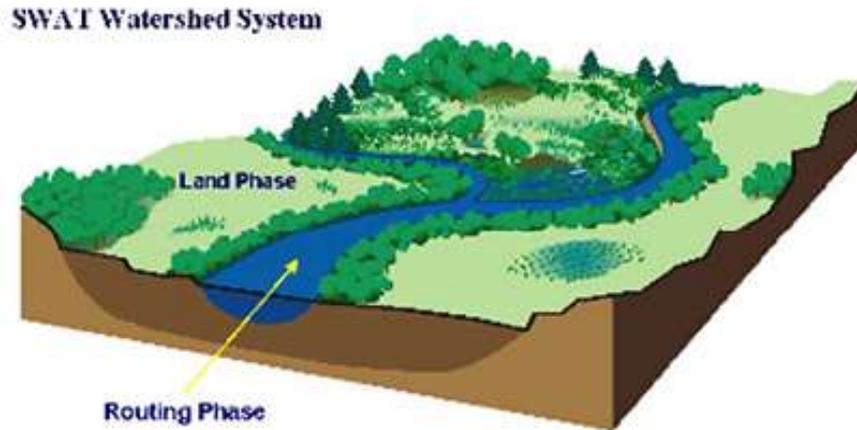


Figure 10 : Phases du cycle hydrologique modélisé par SWAT

2.4.1.3 Phase terrestre du cycle hydrologique

C'est dans cette phase que les différents termes nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique à proprement parlé seront calculés. Ses différents composants sont illustrés à la Figure 3. Il est exprimé comme suit :

Avec :

SW_t : le contenu final en eau du sol (à la fin du jour i) (mm)

SW_0 : le contenu initial en eau du sol (au début du jour i) (mm)

R_{day} : les précipitation au jour i (mm)

Q_{surf} : le ruissellement de surface au jour i (mm)

E_a : l'évapotranspiration au jour i (mm)

W_{seep} : un flux latéral représentant la quantité d'eau entrant dans la zone de vadose (mm)

Q_{gw} : le flux de retour issue de la zone saturée en eau au jour i (mm)

2.4.1.4 Précipitation (R_{day}) :

Sont dénommées précipitations, toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Un versant donné peut être affecté soit par des précipitations convectives, soit par des précipitations orographiques ou soit par des précipitations frontales. Située dans une région tropicale, la zone d'études et Haïti de façon générale ne connaissent pas de précipitation sous forme solide et fait face à des précipitations orographique en amont des versants.

Dans le modèle SWAT, la précipitation utilisée a été collectée à partir de site internet (globalweather.tamu.edu) utilisant la station synoptique de Port-au-Prince mais l'idéale étant de disposer, les données mesurées directement sur le terrain, Il est à remarquer que la possibilité d'avoir des données mesurées erronées n'est souvent pas négligeable.

2.4.1.5 Ruissellement (Qsurf) :

Le ruissellement consiste à un refus d'infiltration d'eau à travers les couches du sol. Ce refus se manifeste soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (AGRO-transfert, 2008). Il est remarqué que le ruissellement est fonction des différentes variations d'occupation des sols ainsi que les types de sols. Selon (Arnold et al. 2005), le ruissellement de surface est estimé par SWAT par la valorisation de la méthode SCS (SCS, 1992) et celle de l'infiltration de Green et Ampt (1911).

2.4.1.6 Contenu en eau du sol (SWt) :

Celui-ci représente la quantité d'eau retenue dans le sol. Ce contenu varie en fonction des caractéristiques des sols (texture, structure). L'eau du sol peut soit contribuer à l'alimentation de la nappe phréatique par percolation, soit se perdre dans l'atmosphère par évapotranspiration (sol et plantes) ou encore être utilisée pour l'alimentation de la plante par les absorptions racinaires. Lorsque la couche superficielle dépasse la capacité aux champs, l'eau percole vers les couches sous-jacentes.

2.4.1.7 Débit d'étiage (Qgw) :

Le débit d'étiage correspond au niveau le plus bas atteint par un cours d'eau, lorsque tout écoulement de surface a cessé et qu'il n'est plus alimenté que par le débit de base en provenance des eaux souterraines. Il est susceptible d'être induit par plusieurs causes, entre autres, les températures trop élevées couplées à des saisons sèches prolongées, une baisse du niveau des nappes dans les périodes précédentes, ou des prélèvements excessif d'eau surtout en périodes de sécheresse.

2.4.1.8 Evapotranspiration (Ea) :

L'évapotranspiration constitue une composante importante du cycle de l'eau. Elle dépend de paramètres météorologiques (rayonnement, vent, température, ...), de caractéristiques du sol (humidité, albédo, ...) et de la végétation. Elle est mesurée en hauteur d'eau rapportée à une durée, par exemple en mm/jour.

De nombreuses méthodes sont développées pour estimer l'évapotranspiration potentielle (PET) parmi lesquelles les trois méthodes suivantes : la méthode Penman-Monteith (Monteith, 1965 ; Allen 1986 ; Allen, 1989), la méthode de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972) Hargreaves

(Hargreaves, et al. 1985). Ces trois méthodes de PET sont susceptibles d'être intégrées dans SWAT mais se différencient par leurs quantités d'inputs utilisées (Arnold et al. 2005).

Ce bilan hydrologique est effectué sur l'épaisseur entière du bassin (y compris la nappe phréatique) au niveau de chaque unité de réponse hydrologique puisque une partie des paramètres dépend de l'occupation ou du type de sol. Leurs contributions au bilan du sous bassin sont ensuite sommées.

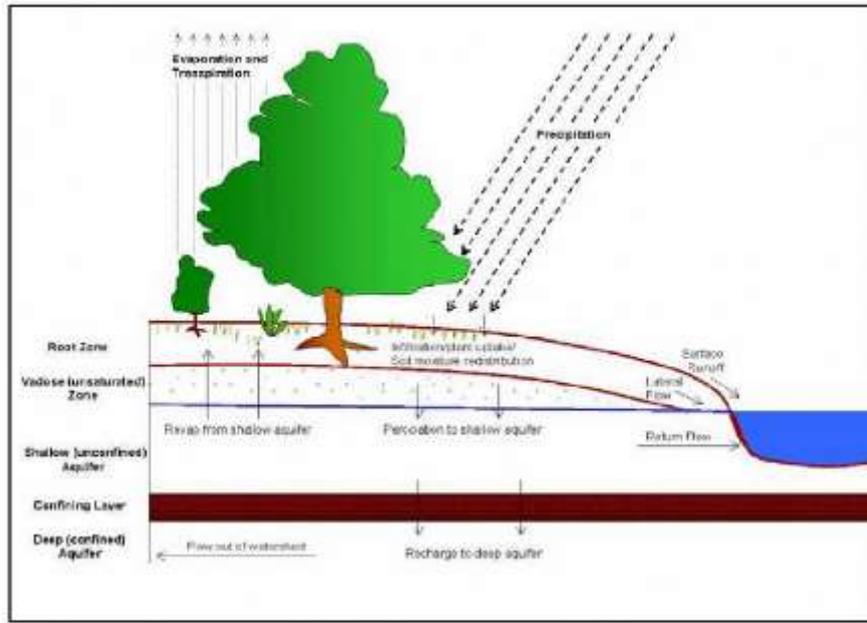


Figure 11 : Modélisation du bilan hydrologique par le modèle SWAT

Lors de la phase de routage, le transport par le réseau hydrographique des différents éléments présents est déterminé. Ce processus est illustré et tient compte (Gassman et al., 2007) :

- du transport des particules par advection et diffusion ;
- de la sédimentation ;
- de la dégradation et transformation selon différents cycles (carbone, azote, phosphore, ...)
- de la dégradation biologique (par les bactéries, ...)
- de leur volatilisation dans l'atmosphère, ...

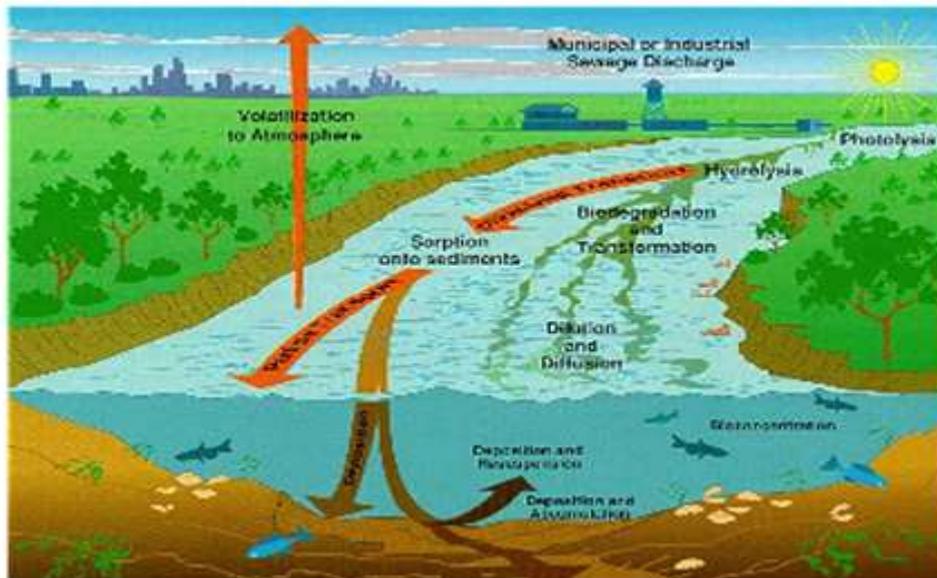


Figure 12 : transport des éléments (eau, sédiments, pesticides, nutriments, ...) au sein du réseau hydrographique (Biesbrouck et al, 2000).

Dans la pratique, l'établissement du bilan hydrologique par ArcSWAT s'effectue en trois principales étapes:

- la délimitation du bassin versant et du réseau hydrographique à partir d'un modèle numérique de terrain ;
- la détermination des unités de réponse hydrologique à partir des données d'occupation du sol, des caractéristiques des sols ainsi que de la pente ;
- l'ajout de la composante météorologique qui permettra de calculer les différents éléments du bilan hydrologique (ruissellement, évapotranspiration, ...) en fonction des types de sols et occupations ;

2.4.1.9 Equation de Ruissellement de surface :

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{R_{\text{day}} - I_a + S} \quad [33]$$

où Q_{surf} est le volume d'eau ruisselée accumulé ou excès de pluie (mmH₂O), R_{day} est la hauteur de précipitation de la journée (mmH₂O), I_a constituent les abstractions initiales regroupant le stockage à la surface, l'interception et l'infiltration avant le ruissellement et S est le paramètre de rétention variant dans l'espace à cause des changements de sols, d'occupation de territoire, de gestion du sol, de pente, et dans le temps à cause des changements de teneur en eau du sol. Le ruissellement se produit uniquement si $R_{\text{day}} > I_a$. Avec I_a approximé à $0.2S$, l'équation du SCS devient :

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0.2S)^2}{R_{\text{day}} + 0.8S} \quad [34]$$

avec :

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)} \right) \quad [35]$$

où **S** est le paramètre de rétention pour un jour donné (mmH2O), **S_{max}** est la valeur maximale pouvant être atteinte par le paramètre de rétention lors d'un jour donné (mmH2O), **SW** est la teneur en eau du sol le long du profil en excluant la quantité d'eau retenue dans le profil au point de flétrissement (mmH2O), **w₁** et **w₂** sont des coefficients de forme.

w₁ et w₂ sont déterminés comme suit :

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] + w_2 FC \quad [36]$$

$$w_2 = \frac{\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{SAT}{1 - 2,54 \cdot S_{\max}^{-1}} - SAT \right]}{SAT - FC} \quad [37]$$

avec **w₁**, le premier coefficient de forme, **w₂** le second coefficient de forme, **FC** la quantité d'eau correspondant à la capacité au champ (mmH2O), **S₃** le paramètre de rétention correspondant au numéro de courbe des conditions d'humidité III, **S_{max}** le paramètre de rétention correspondant au numéro de courbe des conditions d'humidité I et **SAT** est la quantité d'eau contenue dans le sol quand il est complètement saturé (mmH2O).

Quand le paramètre de rétention varie avec l'évapotranspiration de la plante, l'équation suivante est utilisée pour mettre à jour le paramètre de rétention à la fin de la journée :

$$S = S_{prec} + E_0 * \exp \left(\frac{-cncoef - S_{prec}}{S_{max}} \right) - R_{day} - Q_{surf} \quad [38]$$

avec **S** le paramètre de rétention pour un jour donné (mmH2O), **S_{prec}** le paramètre de rétention du jour précédent (mmH2O), **E₀** est l'évapotranspiration potentielle du jour donné (mmH2O.j⁻¹), **cncoef** le poids utilisé pour calculer le coefficient de rétention pour des numéros de courbes journaliers dépendants de l'évapotranspiration, **S_{max}** la valeur maximale pouvant être atteinte par le paramètre de rétention lors d'un jour donné (mmH2O), **Q_{surf}** le volume d'eau ruisselée accumulé ou excès de pluie (mmH2O) et **R_{day}** la hauteur de précipitation de la journée (mmH2O).

Dans les fichiers d'entrée et de sortie de SWAT, c'est le numéro de courbe **CN** qui est utilisé au lieu du paramètre de rétention **S**. Ces deux paramètres sont liés par l'équation suivante :

$$CN = \frac{25400}{S+254} \quad [39]$$

avec S le paramètre de rétention de la journée (mmH₂O) et CN le numéro de courbe de la journée (-).

Quant aux prévisions des pointes de ruissellement, SWAT utilise une version modifiée de la méthode rationnelle. Le taux de ruissellement de pointe est utilisé pour prédire les exportations de sédiments et est basée sur l'hypothèse suivante : si la précipitation d'intensité *i* commence instantanément et continue indéfiniment, le taux de ruissellement augmentera jusqu'au temps de concentration $t = t_{conc}$, quand la superficie du bassin tout entier contribue au débit à l'exutoire. La formule rationnelle s'écrit :

$$Q_{pointe} = \frac{Aire * i * f * C_{ruiss}}{3.6} \quad [40]$$

où q_{pointe} est le débit de ruissellement de pointe ($m^3.s^{-1}$), C_{ruiss} le coefficient de ruissellement (-), *i* l'intensité de précipitation (mm/h), *Aire* la superficie du sous-bassin (km²) et 3.6 un facteur de conversion. C_{ruiss} est calculé comme suit :

$$C_{ruiss} = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad [41]$$

Dans la formule rationnelle modifiée, le taux de pointe de ruissellement est fonction de la proportion de la précipitation journalière tombant durant le temps de concentration, du volume ruisselé journalier et du temps de concentration du sous-bassin. Le temps de concentration du sous-bassin est estimé à l'aide de la formule de Manning en considérant l'écoulement à la surface et dans le canal. Ainsi, la formule rationnelle modifiée devient :

$$Q_{pointe} = \frac{a_{tc} * Q_{surf} * Aire}{3.6 * t_{conc}} \quad [42]$$

avec t_c la fraction de précipitation journalière tombant durant le temps de concentration (-), t_{conc} le temps de concentration du sous-bassin (h).

2.4.1.10 Érosion

A l'échelle du bassin versant, les sédiments sont entraînés par érosion due aux précipitations et au ruissellement. Cette érosion est estimée pour chaque URH par l'Équation Universelle des Pertes en Terre Modifiée (Modified Universal Soil Loss Equation ou MUSLE) (Williams 1975) :

$$sed = 11.8(Q_{surf} \cdot q_p \cdot aire_{urh})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad [43]$$

où **sed** représente le flux de sédiments du jour considéré (tonne/jour), Q_{surf} le volume ruisselé en surface (mm H₂O/ha), q_p le débit de pointe de ruissellement (m³/s), **aire_{urh}** la surface de l'URH (ha), **K_{USLE}** le facteur d'érodabilité (0.013 tonne.m².h/m³.tonne.cm), **C_{USLE}** le facteur de culture (végétation) et de gestion (-), **P_{USLE}** le facteur de pratique de conservation (-), **LS_{USLE}** le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente (-) et **CFRG** le facteur brut de fragmentation (-).

Présentation de la Zone d'étude



3 Présentation de la Zone d'étude

3.1 Présentation de la Zone d'étude :

3.1.1 Géographie :

Le bassin des Issers est situé au Centre - Nord de l'Algérie à environ 70 Km au Sud Est d'Alger, il occupe une superficie totale de 4 149 Km², et est localisé entre les 35°90' et 36°85' Nord et les méridiens 2°88' et 3°95' Est. Il est limité à l'Est par le bassin de la Soummam, au Sud par le bassin du Hodna et à l'Ouest et au Nord par le bassin du Côtier-Algérois.

Il présente sensiblement la forme d'un quadrilatère d'orientation Sud –Ouest /Nord-Est.

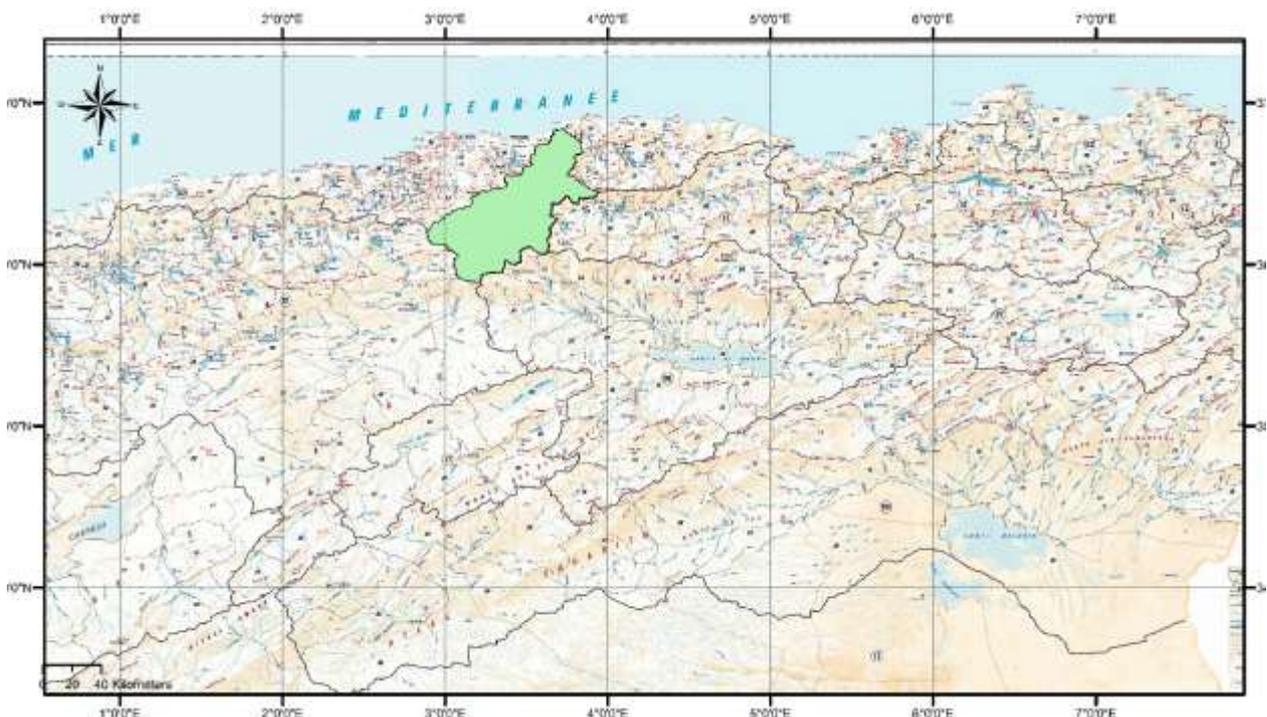


Figure 13: Situation du bassin des ISSERS

En relation avec le contexte géologique et structural, on distingue le Haut et Moyen Isser d'une part, et le Bas Isser d'autre part.

Le Bas Isser est situé à 60 Km à l'Est d'Alger et limité au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par le contrefort de la dorsale Kabyle et Djebel Ahmed, au Nord-Est par le Massif de Cap Djinet, à l'Est par les Massifs Raicha et Chender et à l'Ouest par les Massifs de Thénia.

La plaine du Haut et Moyen Isser est limitée au Nord par le Massif de Beni Amrane, à l'Est par l'oligocène de Drâa El Mizane et à l'Ouest par les formations oligocènes du Djebel Bou Zegza.

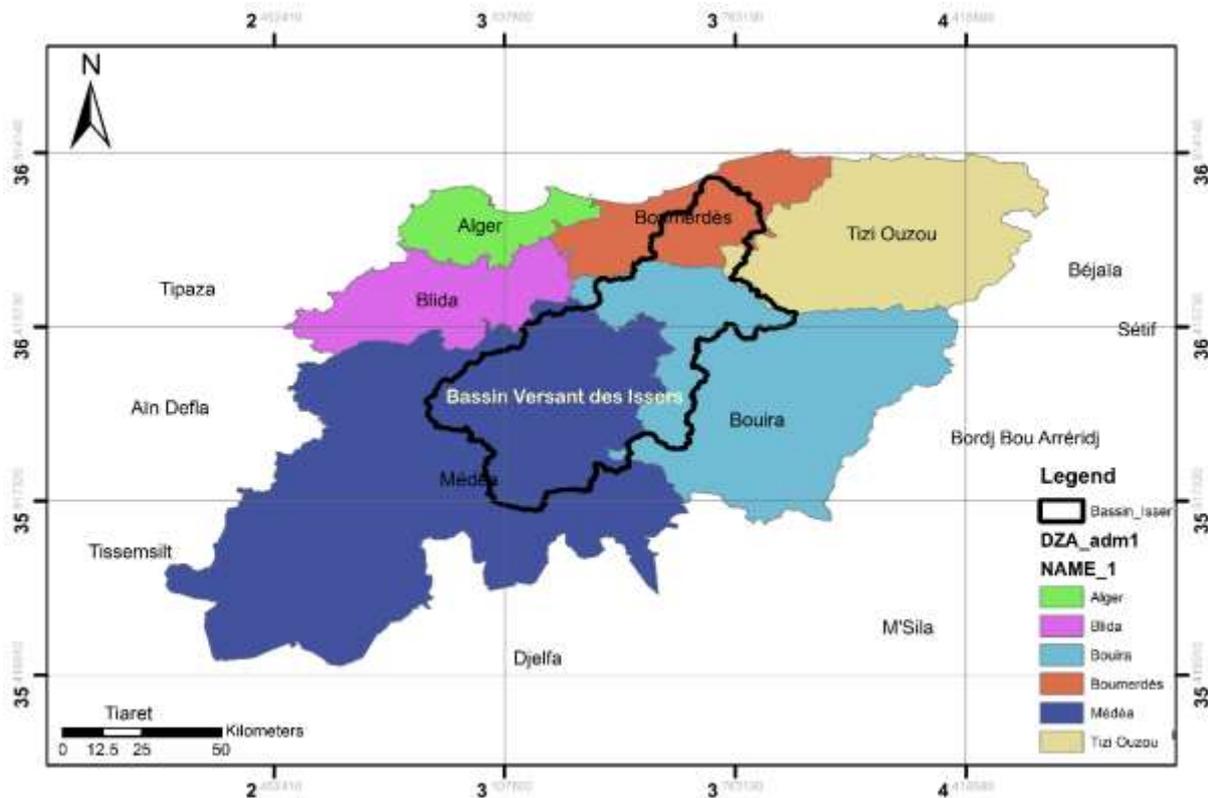


Figure 14: Plan de situation du Bassin Versant des Issers

3.1.2 Bassin hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est l'une des plus importantes caractéristiques d'un bassin versant.

Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux, que sont :

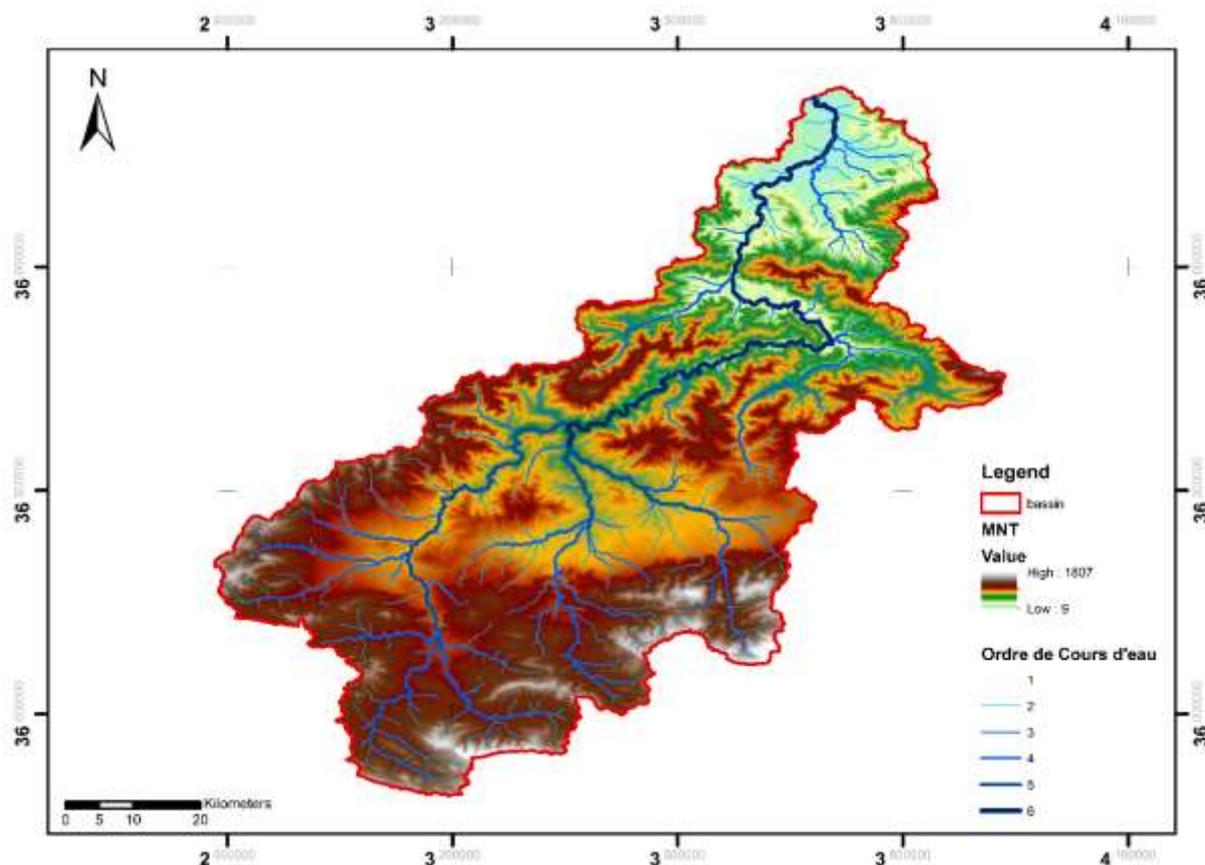
- **La géologie** : qui de par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. La structure de la roche, sa forme, ses failles, ses plissements, forcent le courant à changer de direction.
- **Le climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- **La pente du terrain** : elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

- **La présence humaine** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

On y trouve deux principaux cours, l'Oued MELLAH et l'Oued ISSER au niveau du Haut ISSER. L'Oued ISSER est formé par la réunion de l'Oued EL HAMMAM issu de calcaires marneux de crétacé inférieur de BERROUGHIA et de l'Oued MELLAH qui draine 1/3 de la superficie de ce bassin.

Le Moyen ISSER est drainé par les Oueds DJEMAA à l'Est, BOU-HAMMOUD à l'Ouest et ISSER au milieu. Le bas ISSER est traversé par l'Oued ISSER et quelques affluents à l'Est et à l'Ouest de celui-ci. Le réseau hydrographique est présenté sur la figure III.3. Il dispose d'un réseau hydrographique assez dense et couvrant une très grande partie du bassin. Cette caractéristique favorise le phénomène du transport solide.

La nature tendre des matériaux (marnes et argiles) et le régime hydrique irrégulier ont contribué à la formation d'un réseau hydrographique dense de type arborescent (BOUSSAID



2014).

Figure 15: Réseau Hydrographique du Bassin Versant des Issers

3.1.3 Climat :

Le bassin est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire. Entre le climat de l'Atlas Tellien de montagne pluvieux et des chutes de neige avec une amplitude thermique faible, et

le climat Tellien de plaine plus sec relativement chaud et présentant de forts écarts de température.

Le régime pluviométrique (entre 700 et 800 mm annuel) se caractérise par des pluies abondantes, concentrées surtout en hiver (140 mm en décembre), qui diminuent presque régulièrement au printemps et atteignent en été quelques millimètres par mois.

La température moyenne annuelle est de 17°C, pour les mois les plus froids, elle varie entre 5°C et 6°C, et entre 27°C et 31°C pour les mois chauds.

L'humidité est modérée pendant toute l'année, avec des valeurs d'environ 70% le matin et le soir en été et de 80% en hiver ; les valeurs à midi sont d'environ 57% en avril et octobre, 60% en été et 64% en hiver. L'humidité moyenne de l'air varie entre 72% en été et 80% en hiver.

Ce bassin est caractérisé par une irrégularité du régime pluviométrique et le climat y est considéré comme semi-aride.

3.1.4 Géologie :

Pour l'étude géologique, on se limitera à une description lithologique du bassin versant afin de connaître le degré d'érodabilité et de dégradation.

Le haut ISSER est constitué à 69 % de formation marneuse de la superficie totale. Ces marnes se fissurent et craquent par déshydratation pendant la saison sèche. Elles s'altèrent sur plusieurs centimètres en formant un tapis des gravillons mêlé de poussière argilo- calcaire qui partent en débâcle aux premières averses orageuses de la saison de pluie. Ces formations sont assez facilement érodables.

Les schistes argileux, les marnes grises et schisteuses avec des couches de grés occupent 70 % du moyen ISSER. Ce dernier présente en général des formations meubles, facilement érodables.

Le bas ISSER est constitué de 43.15% des formations marneuses des grés et des conglomérats, appartenant à l'oligocène marin. Le miocène inférieur marin dont les formations sont des grés et des marnes constituant 14,91% du bas ISSER. Les schistes cristallins et micacés sont respectivement des schistes à chlorite et à séricine et quartz à biotite, formant 19,84% de la superficie totale. Les alluvions de quaternaire continentales occupent 18.6 % du bas ISSER. On y trouve des granites formant 1.93 % de la superficie totale. Ces formations dures « conglomérats et granites » donnent au bas ISSER, la caractéristique du moins érodable en comparaison avec le haut ISSER. (BOUSSAID 2014), (Lefkir 2009).

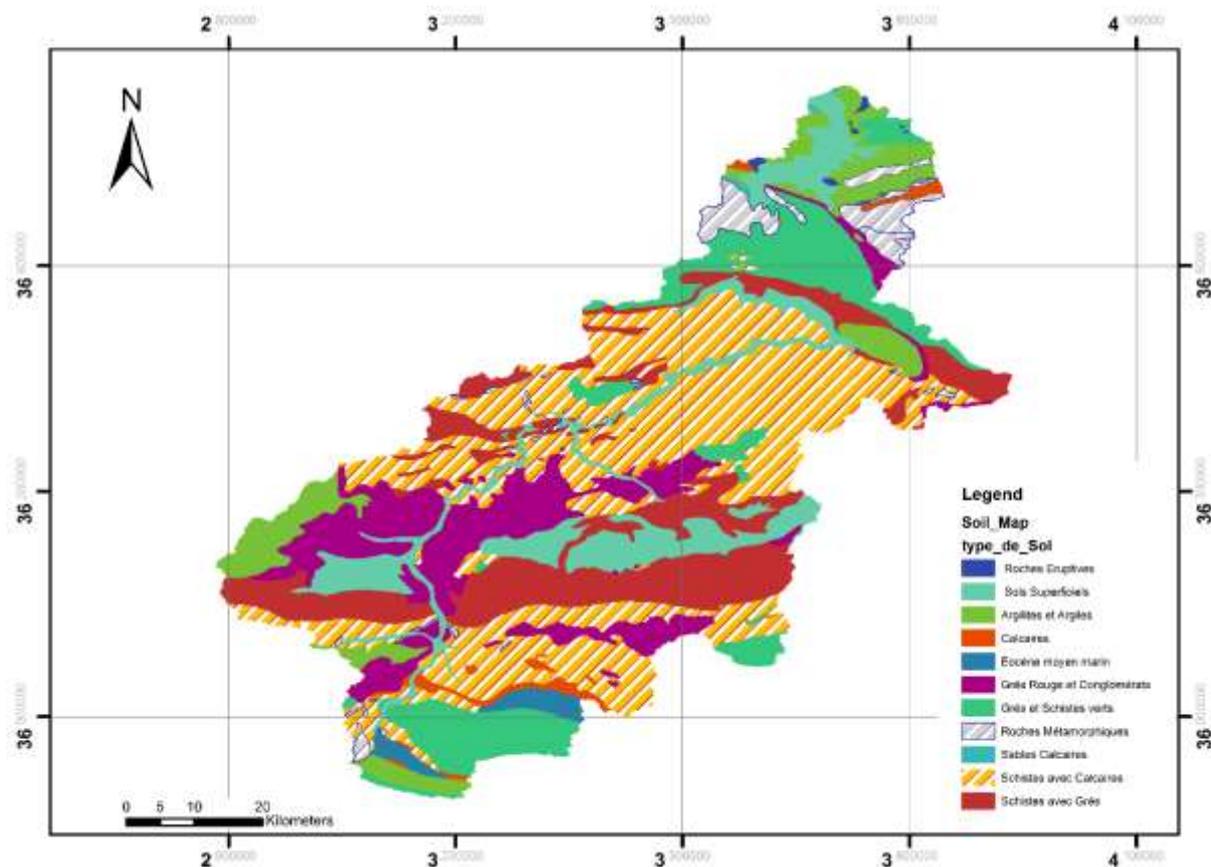


Figure 16: Carte lithologique du bassin versant des Issers

3.1.5 Végétations :

Le bassin se caractérise par un couvert végétal peu dense localisé au centre et représente 20% de la superficie totale, ce qui accélère le phénomène de l'érosion. Le reste de la surface, soit 80%, est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. Au bas Isser, on rencontre essentiellement les cultures annuelles, et sur des superficies réduites, les cultures et l'arboriculture (LARFI Juin 2006).

Le couvert végétal (bois et broussaille) étant peu répandu et souvent dégradé, l'érosion est particulièrement active en présence de matériaux lithologiques tendres et un régime hydrique défavorable (pluies irrégulières, ruissellement). Les formes et les intensités diffèrent selon la pente, la nature lithologique des sols et l'action anthropique (déboisement, pâturage excessif, agriculture dégradante), (Rais et Abid, 1989).

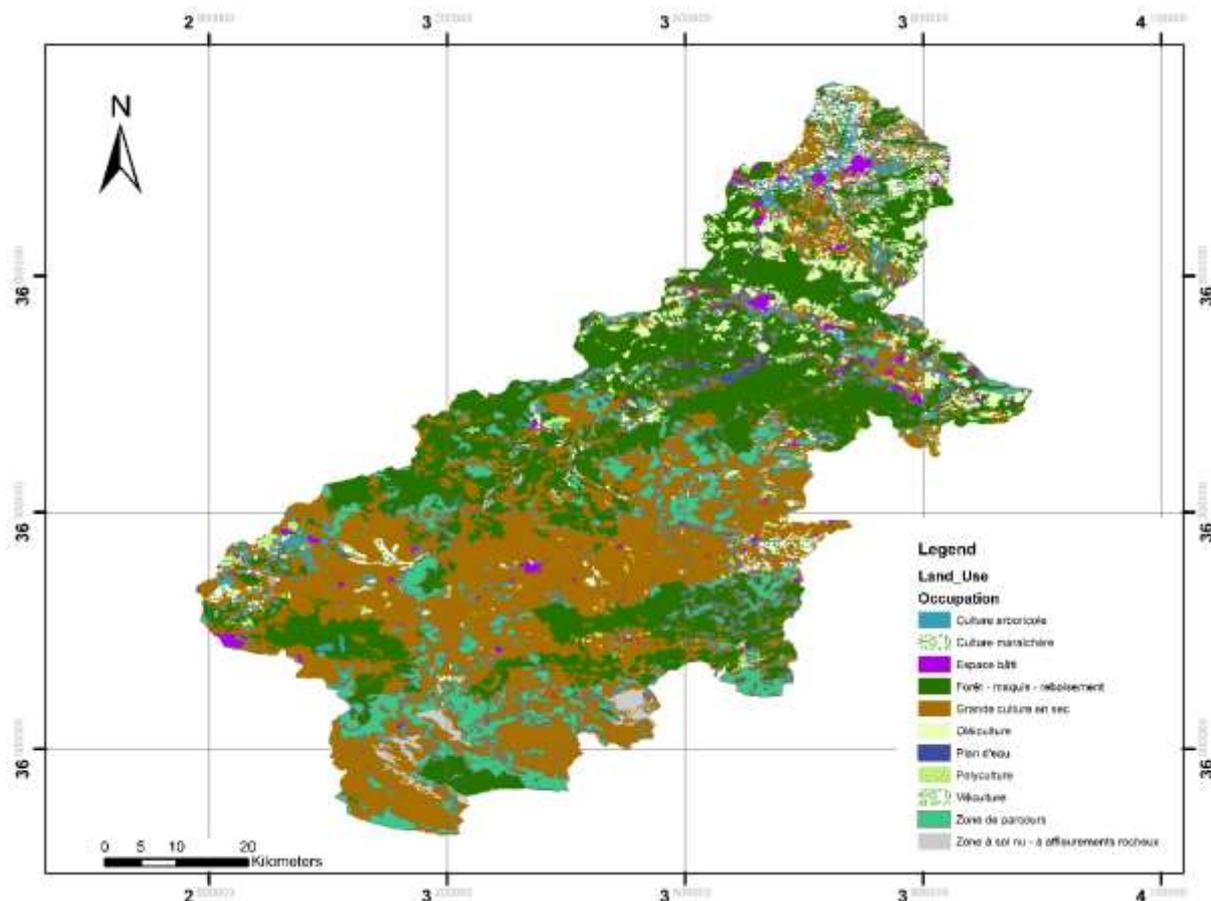


Figure 17: Carte schématique de végétation du bassin versant des Issers (B.N.E.D.E.R 2011).

3.1.6 Base de données :

Le bassin versant de l'Oued Isser contient un réseau hydrométrique implanté par l'ANRH équipé de 07 stations de jaugeage : El Omaria (091205); Dechmia (090309); Beni Slimane (090305); Mezahim (030191); Aomar Gare (090416); Pont de la traille (090408) ; Lakhdaria (090501).

Dans cette étude, nous avons utilisé les données de la station Hydrométrique de Lakhdaria (Code : 090501) qui parcourt la partie Nord-Ouest de la wilaya de Bouira et qui draine un bassin versant de 3620 km² et qui présente une qualité de mesure raisonnable.

Les données de cette station, fournies par l'ANRH, sont composées de deux séries de mesure, celle des débits moyens liquides instantanés et celle des concentrations solides instantanés s'étendant sur une période allant de 1971 à 2009, ce qui représente un bon échantillon pour la modélisation et par conséquent pour la prévision aussi, ainsi on a plus de chance pour normaliser les erreurs et valider nos modèles.

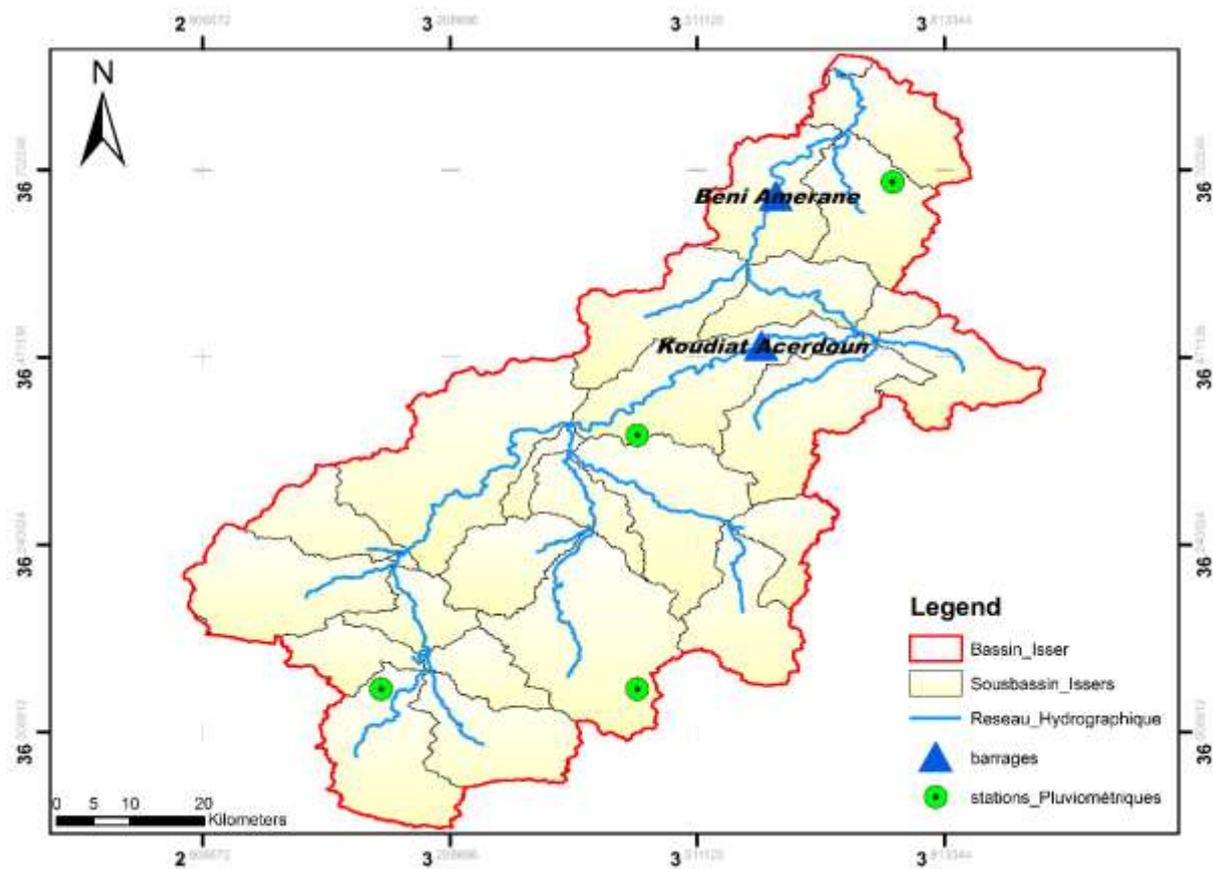


Figure 18: Situation des barrages dans le Bassin Versant des Issers.

Résultats et discussion

4

4 Résultats et discussion :

Dans ce chapitre on va essayer de présenter et interpréter les résultats obtenus en appliquant une nouvelle méthodologie pour le bassin versant des Issers (Algérie).

Les résultats de modélisation des débits, du transport solide seront récapitulés et discutés. Mais en premier lieu, SWAT étant un modèle fortement paramétré, les paramètres pris en compte lors des calages seront présentés par la suite.

Nous essayons également de voir deux méthodes de calage différentes pour notre cas on va voir le calage uni-objectif (on vas caler notre modèle par rapport au Débits puis on va le caler par rapport au sédiments) et le calage multi-objectif (caler les débits et les sédiments au même temps).

4.1 Critères de performance :

La performance du modèle en calage est évaluée par le biais de deux critères :

1. Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS)
2. Le pourcentage de biais (PBIAS)

4.1.1 Coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) :

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad [44]$$

Les valeurs de NS vont de - 1 à 1 étant la valeur optimale. Des valeurs négatives indiquent que la moyenne des valeurs observées constitue un meilleur modèle que les valeurs simulées

4.1.2 Pourcentage de biais :

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [45]$$

Où O_i représentent les valeurs observées et S_i les valeurs simulées.

Le PBIAS mesure la tendance moyenne des données simulées à être supérieures ou inférieures aux données observées. La valeur optimale du PBIAS est nulle, indiquant une parfaite simulation du modèle.

Un PBIAS positif indique une sous-estimation du modèle tandis qu'un PBIAS négatif démontre une surestimation du modèle.

4.2 Grille de performance

En se basant sur ces performances obtenues jusqu'en 2007, Moriasi et al. (2007) ont pu établir une grille d'évaluation de la performance mensuelle, récapitulée dans le tableau :

Tableau 4 : Critères d'évaluation de la performance mensuelle de SWAT (Moriasi et al,2007)

Evaluation de la performance	NS	PBIAS	
		Débit	Sédiments
Très bonne	$0.75 \leq NSE < 1.00$	$ \text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 15$
Bonne	$0.65 \leq NSE < 0.75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} \leq \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 30$
Satisfaisante	$0.50 \leq NSE < 0.65$	$\pm 15 < \text{PBIAS} \leq \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 55$
Non Satisfaisante	$NSE < 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 5$

On peut en déduire que la performance du modèle peut être considérée comme satisfaisante si :

$NS > 0.50$ et $\text{PBIAS} \pm 25\%$ pour les débits, $\text{PBIAS} \pm 55\%$ pour les sédiments

4.3 Données :

Comme dit précédemment le Modèle Swat nécessite Certaines données pour s'exécuter :

4.3.1 MNT (Le Modèle Numérique de terrain) :

Pour notre cas d'étude on a Utiliser un modèle numérique de terrain de 30 m de résolution qu'on a télécharger à partir du site ([Www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)).

Puisque notre bassin versant est relativement grand on était obligé de faire fusionner 4 MNT avec le Logiciel ArcGIS par la fonction « merge » pour avoir un MNT qui couvre notre bassin versant.

4.3.2 Carte d'occupation des sols :

La carte d'occupation du sol est fournie par le bureau d'étude B.N.E.D.E.R. sous format .TAB qu'on a transformer en format ESRI Shape file puis au format Raster.

4.3.3 Carte des sols :

Pour la carte des sols, après avoir digitaliser une ancienne carte provienne de l'ANRH en format JPEG on a confronté un problème de correspondance entre les types de sols de cette

carte qui est faite selon une ancienne classification Française et les types de sols dans la base de données SWAT qui utilise une classification Américaine, et c'était quasiment impossible de faire des correspondances même approchées.

Après des semaines et des semaines de recherche on a trouvé enfin une ouverture ; on a utilisé la carte mondiale des sols télécharger à partir du site de l'FAO (), on a extrait juste la carte de notre zone d'étude par le logiciel ArcGIS avec la fonction « EXTRACT by MASK ».

Dans les tables attribuées de cette carte il y'avait que des codes () qui ne paraissent pas dans la base de données SWAT avec 202 type de sols.

On a téléchargé le logiciel MapWindow GIS et on a installé MWSWAT qui une version de Swat interfacé sous MapWindow GIS, et on a mis à jour la base de données ArcSWAT.mdb par la base de données MWSWAT.mdb qui contient environ 5000 type de sols.

Enfin les codes des types de sols de notre carte existaient dans la base de données.

Pour les pentes SWAT extrait les données des pentes automatiquement à partir de L'MNT.

4.3.4 Données pluviométriques :

Pour les données pluviométrique (Précipitation ; Températures min et max ; Vitesses des vents et L'Insolation), une série de donnée de 35 ans (1979_2014) Pour quatre stations télécharger à partir du site de SWAT pour les données Climatiques.

4.4 Périodes de simulation et conditions climatiques :

La performance du modèle dépend de la longueur des périodes de simulation, des conditions climatiques et des saisons considérées.

La simulation est lancée pour la période 1993_2002 car c'est la période que présente le moindre de lacunes dans les données Hydrométrique (débits liquide, débits solides) ;

Dans cette période on est dans un cycle Humide.

4.5 Processus internes du modèle

L'obtention d'une bonne performance peut également être limitée par les processus modélisés par SWAT, étant donné qu'ils constituent encore une représentation simplifiée de la réalité ou du manque de compréhension scientifique du processus (Gassman et al. 2007).

Par exemple, SWAT évalue le ruissellement de surface grâce à la méthode des numéros de courbes du Soil Conservation Service (SCS-CN). Elle a été prouvée avec succès sur de nombreux cas. Néanmoins, les événements extrêmes sont sous-estimés à cause de sa faiblesse

à estimer le ruissellement de surface durant ces événements (Fohrer et al. 2002 ; Chanasyk et al. 2003 ; Bosch et al. 2004 ; Chu et al. 2004 ; Du et al. 2005). Cette méthode tend aussi à surestimer le ruissellement, particulièrement lorsqu'il y a présence de drainage agricole (Michaud et al. 2008a). Elle peut conduire également à des mauvais résultats selon les conditions du milieu (ex : Ponce et Hawkins 1996 ; Agnew et al. 2006 ; Bryant et al. 2006 ; Garen et Moore 2005). De meilleures prévisions hydrologiques peuvent être potentiellement obtenues par des modifications dans la méthodologie du numéro de courbe et/ou l'incorporation de routines plus complexes (Gassman et al. 2007).

Concernant le transport des sédiments dans le cours d'eau, la routine correspondante utilise des équations relativement simplistes, calculant la charge maximale de sédiments transportables en se basant sur la vitesse du cours d'eau. Ces équations ne considèrent pas les caractéristiques du transport des sédiments, comme le cisaillement au fond qui détermine l'érosion ou la déposition (Arnold et al. 1998).

4.6 Un Récapitulatif des statistiques :

Obtenues sur les valeurs de NS et PBIAS à partir de la revue de littérature (Moriassi et al. 2007) confirme le fait que les applications journalières de SWAT sur les sédiments sont rares et ne donnent pas de bons résultats, tandis que celles sur le phosphore n'existent pas.

4.7 Résultats et discussion :

On va présenter les résultats obtenus par la simulation avant le calage de notre modèle qui sera présenter juste après on essayons de justifier les critères de ce dernier.

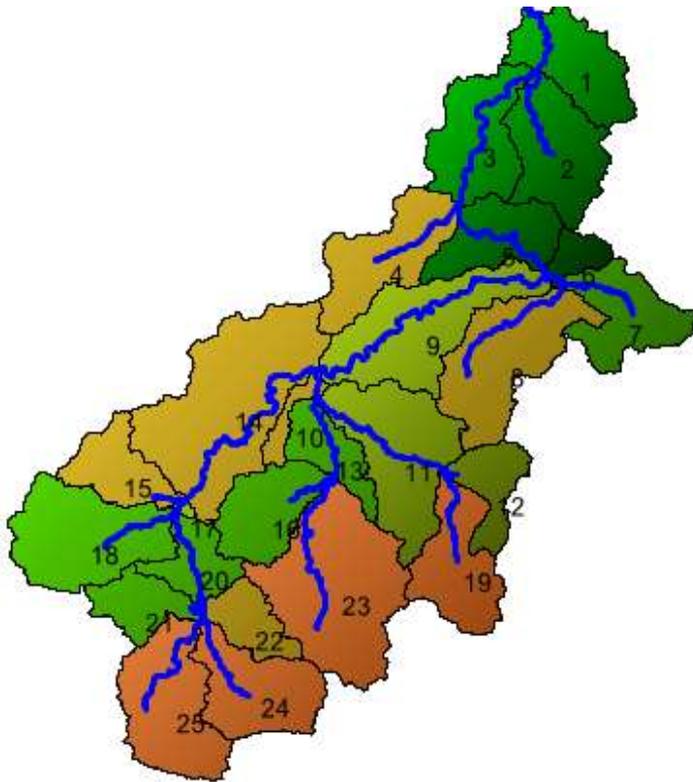
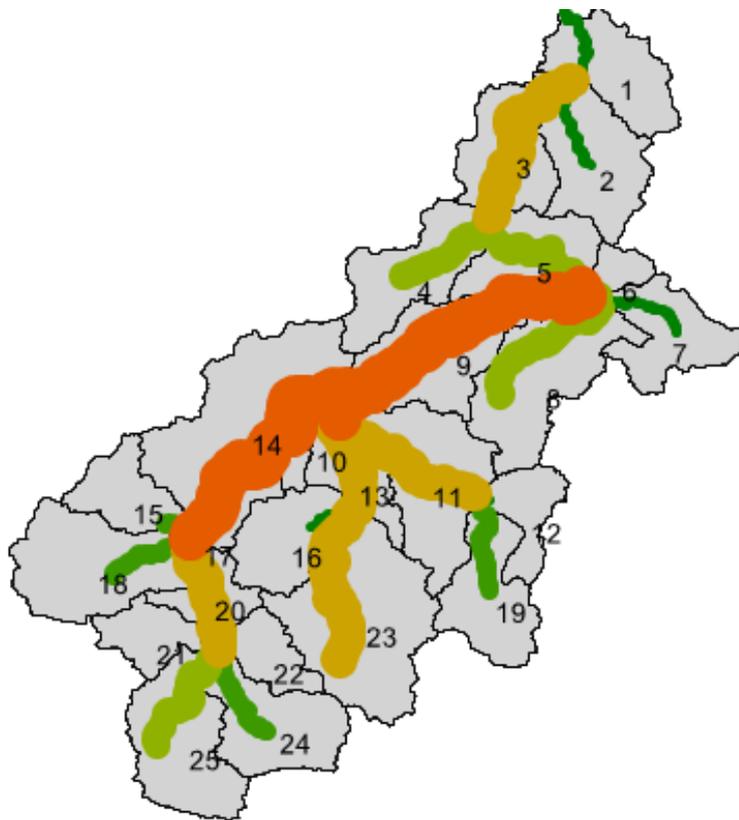


Figure 19 :Carte de Sensibilité de l'érosion du bassin versant des Issers

Remarques :

- Les sous bassins versant 4 ;10 ;14 ; 15 ;19 ; 22 ;23 ;24 ;25 ; sont les plus vulnérable à l'érosion avec des quantités $> 3 \text{ tan/ha./an}$
- Les Sous bassins versant 7 ;9 ;10 ;11 ;13 ;16 ;18 ;20 ;21 ont des quantités entre : $2 \text{ tan/ha /an} < \text{Quantité_SED} < 3 \text{ tan/ha/an}$
- Les sous bassins 1 ; 3 ;5 ont des quantités entre : $1 \text{ tan/ha /an} < \text{Quantité_SED} < 1.6 \text{ tan/ha/an}$

On voit bien que les sous bassins 4 ;10 ;14 ; 15 ;19 ; 22 ;23 ;24 ;25 sont les sous bassins critiques c-a-d les sous bassins les plus vulnérables à l'érosion.



rch	SED_OUTtons
1	302581.1445
2	175230.1484
3	1697814.8820
4	569373.0376
5	1027584.4223
6	938260.5200
7	228864.4927
8	655222.0902
9	5480147.7594
10	2084306.0801
11	1072540.5608
12	137524.9060
13	955585.1936
14	2803678.6840
15	207488.3771
16	145618.0744
17	1668456.7982
18	373005.7291
19	483707.8159
20	1387342.2854
21	110750.5585
22	1186066.7540
23	771589.3890
24	557035.7117
25	507698.2593

Figure 20 : Cummule des sediments dans le cours d'eau

4.8 Calage et Validation :

Les publications sur SWAT fournissent rarement des détails sur les procédures de calage.

En général, les utilisateurs de SWAT utilisent

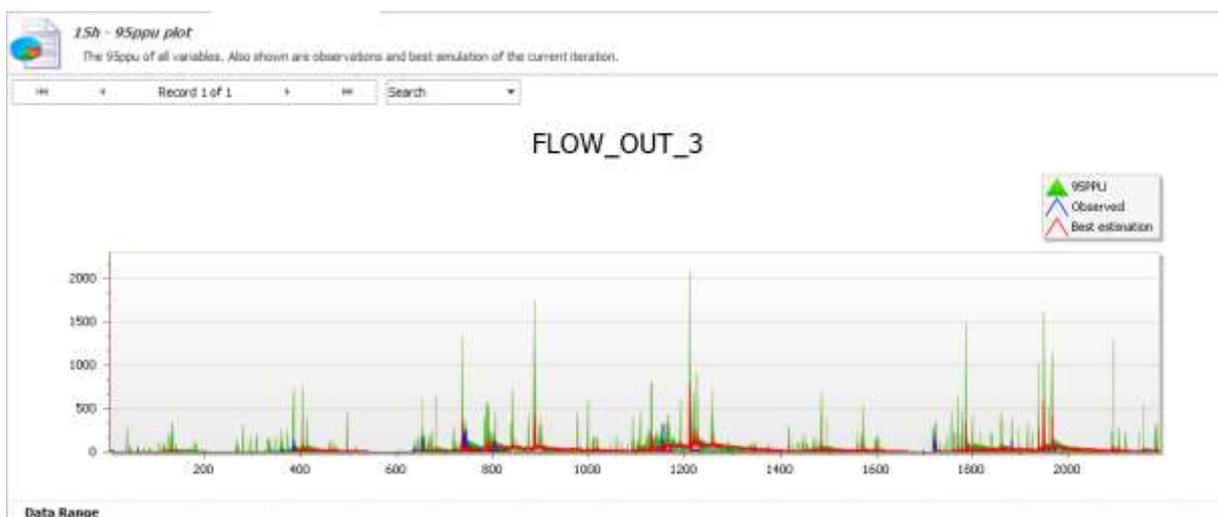
Le calage peut être manuel ou automatique, Uni-Objectif ou Multi-Objectif :

4.8.1 Calage Uni-Objectif :

4.8.1.1 Les Débits :

Avec Une fonction objectif a pour but d'optimiser le paramètre **RSR** ET avec 200 simulation on a obtenu les résultats suivants :

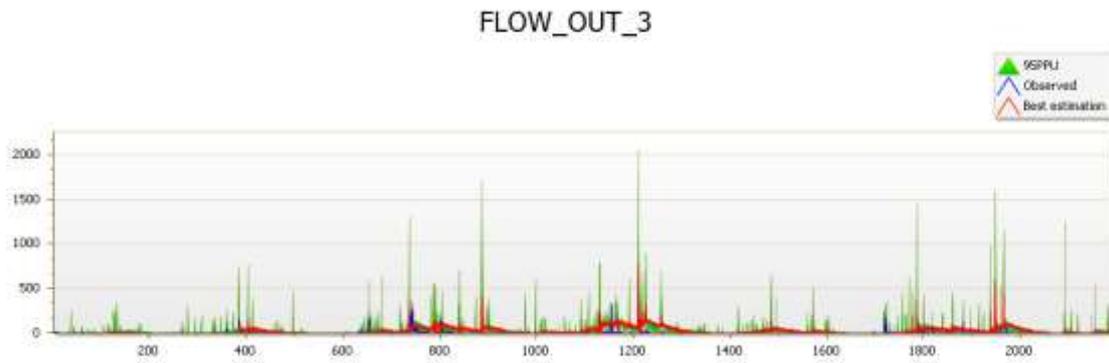
$R^2 = 0.07$; NS = -4.84 Et PBIAS = -512



Goal_type=	RSR	No_sims=	200	Best_sim_no=	64	Best_goal=	2.416527e+000				
Variable	p-factor	r-factor	R2	NS	bR2	MSE	SSQR	PBIAS	KGE	RSR	
FLOW_OUT_3	0.26	2.61	0.07	-4.84	0.0354	2.2e+003	1.2e+003	-512.0	-4.27	2.42	

Ce qui veut dire que le modèle SWAT est entrain de surestimer les valeurs de débit liquide et ce qu'on voit bien sur le graphique.

Avec Une fonction objectif a pour but d'optimiser le paramètre **NS** ET avec 50 simulations on a obtenu les résultats suivants :

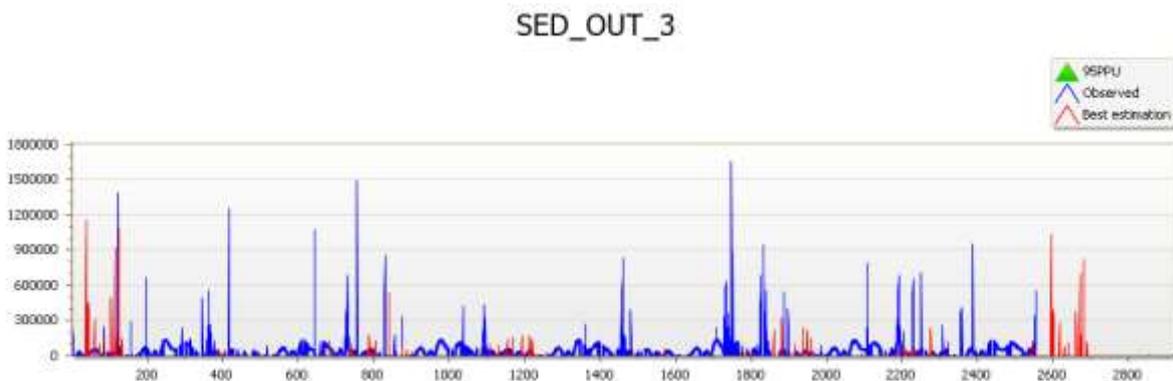
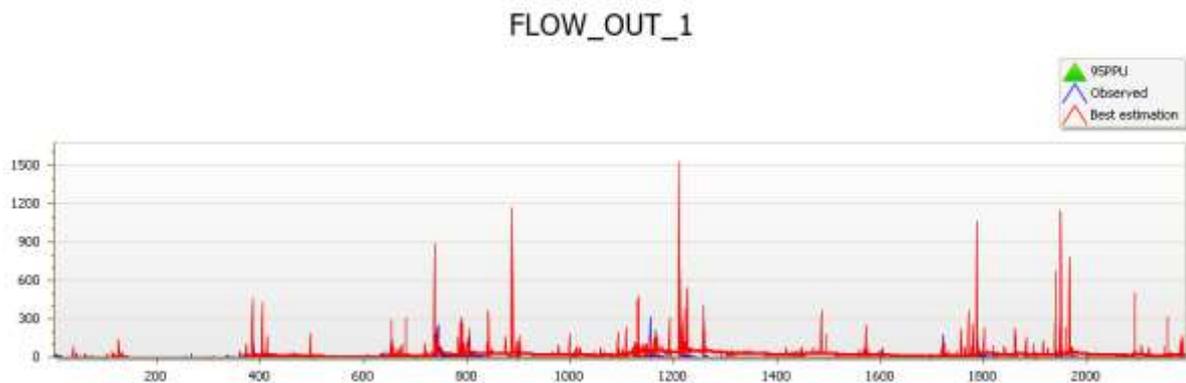


```

Goal_type= Nash_Sutcliff ··· No_sims= 50 ··· Best_sim_no= 19 ··· Best_goal= -5.751464e+00
Variable·········· p-factor···· r-factor···· R2···· NS···· bR2········ MSE······ SSQR······ PBIAS·
FLOW_OUT_3········ 0.24······ 2.53······ 0.10···· -5.75···· 0.0732···· 2.5e+003···· 1.6e+003···· -505.5
    
```

4.8.1.2 Calage multi-Objectif :

Avec Une fonction Multi-objectif a pour but d’optimiser le paramètre **NS** ET avec 50 simulations on a obtenu les résultats suivants :



Variable	p-factor	r-factor	R2	NS	bR2	MSE	SSQR	PBIAS
FLOW_OUT_1	0.01	0.00	0.09	-16.45	0.0750	6.5e+003	4.5e+003	-652.7
SED_OUT_3	0.01	0.00	0.00	-0.44	0.0000	1.6e+010	6.0e+009	88.2

On remarque qu'avec le calage multi-Objectif le modèle SWAT est entrain de surestimer les valeurs de débit liquide toujours et il sous-estime les valeurs de débit solide.

4.9 Justifications des Résultats :

Ces mauvais résultats Obtenu lors de notre étude c'est la conséquence de plusieurs raisons :

➤ Evolution de l'Occupation des Sols :

En fait nous on est en train de simuler dans la période 1993_2002 hors que la carte d'occupation des Sols qu'on dispose est faite en 2011 cert il y'a eu évolution et même une grande évolution dans l'occupation de sols (urbanisation ...etc.)

On a essayé de faire l'effort de prendre en considération cette évolution par superposition de la carte des sols dans google earth Pro et Voir l'évolution au cours des années mais malheureusement ça n'a pas abouti car les images satellitaires disponible sur l'Outil google earth pro commencent à partir de l'année 2003.

➤ Périodes de simulation et conditions climatiques :

De plus comme on a dit précédemment dans la période de simulation 1993_2002 c'est un cycle humide tandis que les résultats de Govender et Everson (2005) sur la simulation des débits ont meilleurs en année sèche qu'humide, et Chu et Shirmohammadi (2004) ont constaté que SWAT n'a pas été en mesure de simuler une année extrêmement humide

➤ Pas de temps :

Typiquement, la performance du modèle est moins bonne pour des pas de temps plus courts (ex : journalier versus mensuel ou annuel) (Engel et al. 2007).

➤ Incertitude des données :

L'obtention d'une bonne performance de simulation est premièrement conditionnée par une bonne qualité des données, permettant de diminuer les sources d'incertitude. En effet on dispose une série de donnés avec environ 4000 mesures et 10000 valeurs

manquante voir des années complètes il n'a pas eu de mesure certainement une série de données pareil n'est pas fiable et ne va conduire qu'au résultats Obtenus.

Plus de ca se rajoute la simplicité des équation pour le modules sédiments (SWAT sous-estime les débits Solides car il ne tient pas en compte l'érosion Hydrographique (l'érosion provenant du cours d'eau et qui représente 2/3 de la quantité de l'érosion total)).

Conclusion générale :

Ce travail vise à modéliser le rendement en sédiments du bassin hydrographique des Issers et de suggérer la meilleure mesure possible d'atténuation réduisant l'afflux des sédiments dans le barrage de Beni Amrane.

ArcSWAT (l'outil d'évaluation des sols et des eaux) interfacé sous ArcGIS a été utilisé pour modéliser l'entrée des sédiments dans le réservoir. Le modèle utilise le MNT, l'Occupation des sols / la carte de couverture du sol, la carte des sols et les données météorologiques comme données d'entrées. Celles-ci ont été recueillies à partir de différentes sources à savoir la base de données SWAT (swat Global Weather data pour les données météorologiques, la FAO pour la carte de sols, Usgs.gov pour le MNT et l'I.N.S.I.D. pour la carte d'occupation des sols).

La prédiction du ruissellement et de la perte de sol est importante pour évaluer les risques d'érosion des sols et déterminer les utilisations appropriées des terres et les mesures de conservation des sols pour un bassin versant, cela peut aider à tirer le meilleur parti de l'utilisation de la terre tout en minimisant les impacts négatifs de la dégradation des sols et d'autres problèmes environnementaux.

Le problème général dans cette modélisation et dans toute modélisation des bassins hydrographiques est la disponibilité limitée des données mesurées pour l'étalonnage et la validation des modèles. L'absence d'une longue série de données de sédiments avec un pas de temps journalier et une résolution spatiale élevée des cartes de sols et d'occupation de sol ont limité la capacité de cette étude à évaluer les simulations.

Les résultats obtenus des sédiments sont insatisfaisantes dû à la mauvaise simulation des débits liquides, la qualité et la quantité des données disponibles.

Recommandations :

Les sédiments réduisent la durée de vie du réservoir. Par conséquent, les pièges à sédiments devraient être exercés en amont du bassin hydrographique.

De plus, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour prévoir le rendement des sédiments de chaque sous-bassin pour le pas de temps journalier et le pas de temps mensuel

sous différents scénarios d'utilisation du sol / couverture du sol pour améliorer la prise de décision.

Le résultat du modèle augmentera si la qualité et la quantité des données augmentent. Cependant, il existe un manque de données dans le bassin versant des Issers, en particulier les données sur la concentration des sédiments. L'écart devrait être comblé en augmentant le nombre et la qualité des réseaux climatologiques et hydrométriques uniformément sur le cours d'eau du bassin.

Enfn ce travail n'est qu'une contribution à la modélisation du phénomène du transport solide au niveau du bassin versant des Issers qui nécessite d'être complétée en intervenant sur la qualité et la longueur de la série de données pour tirer des interprétations plus fondées afin d'aboutir à l'applicabilité du modèle SWAT qui représente au mieux les processus hydrologiques au niveau de ce bassin versant.

Bibliographie :

1. <http://www.supagro.fr/ress-pepites/Opale/ProcessusEcologiques/co/Erosion.html>
2. **Ghorbal, A.; Claude, J.** Mesure de l'Envasement Dans les Retenues de Sept Barrages en Tunisie: Estimation des Transports Solides; IAHS Publication: Wallingford, UK, 1977; Volume 122, pp. 219–232
3. <http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/Chap1-sommaire.html>
4. <http://www.supagro.fr/ress-pepites/Opale/ProcessusEcologiques/co/Erosion.html>
5. **MEGHDOUR I (2011)** : «L'étude hydrodynamique dans les retenues». Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger.
6. **BENAICHA A (2011)** : « Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages». Mémoire de Magister en Hydraulique, Université HADJ LAKHDAR BATNA
7. **REMINI B et HALLOUCHE W (2005)**: « L'alluvionnement des retenues », édité par le laboratoire ERP du CU de Khemis Miliana Algérie.
8. **RECKING Alain (2010)** : « Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle. »
9. **Allen, P. M. et Arnold, J. G. (2005)**. "SWAT-DEG and channel restoration of urban streams." *Proc. 3e conférence internationale sur SWAT*, Zurich, Suisse, 107-113.
10. **M., Frankenberger, J. R., Engel, B.A. et Arnold, J. G. (2008)**. "Representation of agricultural conservation practices with SWAT." *Hydrol. Process.*, 22, 3042-3055
11. **Arnold, J. G. et Fohrer, N. (2005)**. "SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrol. Process.*, 19, 563-572
12. **J. E. Nash and J. V. Sutcliffe**, "River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I—A Discussion of Principles," *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, 1970, pp. 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
13. **K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and**
14. **R. Srinivasan**, "Spatially-Distributed Modelling of Hydrology and Water Quality in the Prealpine Alpine Thur Watershed Using SWAT," *Journal of Hydrology*, Vol. 333, No. 2-4, 2007, pp. 413- 430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
15. **K. C. Abbaspour**, "SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs—A User Manual," Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2011.

16. **S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams**, “Soil and Water Assessment Tools Theoretical Documentation,” Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A and M University System, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Texas, 2011, Blackland Research Center, Texas, 2005.
17. **Bouanani, A.** Hydrologie, Transport Solide et Mod élisation étude de Quelques Sous Bassins de la Tafna (NW–Alg érie). Ph.D. Th èse, Universit é Tlemcen, Tlemcen, Alg érie, 2000; p. 250
18. **Bourouba, M.** Contribution a l’étude de l’érosion et des transports solides de l’Oued Medjerda superieur (Algerie orientale). Bull. Réseau Erosion 1998, 18, 76–97.
19. Surface Water Resources Mobilization; Document of Algerian Ministry of Water Resources. Available online: <http://www.mree.gov.dz> (accessed on 13 March 2017)
20. National Agency of Hydrologic Resources (ANRH). Map of Potential Evapotranspiration in the North of Algeria; ANRH: Alger, Algeria, 2003.
21. **Green, W. H. and G. A. Ampt, (1911)** Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences 4(11-24).
22. **Laurent, F., Ruelland, D. & Chapdelaine, M. (2007)** Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT. Revue des Sciences de l'Eau 20(4): 395–408.
23. **Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan and L. M. Hauck, (2001)** Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. JAWRA, 37(5): 1169-1189.
24. **Faramarzi, M., et al., (2013)** Modelling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. J. Hydrol., [http:// dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.016) (article in press)
25. **Vaché, K., J. Eilers and M. Santelmann, (2002)** Water Quality Modeling of Alternative Agricultural Scenarios in the US Corn Belt. JAWRA, 38(3): 773-787.
26. **Williams, J. R., (1975)** Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull. 11(5): 965 - 974.
27. **Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, (1978)** Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, USDA - ARS.
28. **Abbaspour, K. C. (2007)** User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland.
29. **Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R. & Allen, P. M. (2000)** Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River basin. J. Hydrol. 227(1), 21–40.
30. **Tolson, B. A. & Shoemaker, C. A. (2004)** Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Technical Report, School of Civil and environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, USA.

- 31. Monteith, J. L. (1965)** Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms* (ed. By G. F. Fogg), 205–234. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 32. Van Griensven, A. & Meixner, T. (2006)** Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Sci. Technol.* 53(1), 51–59.
- 33.** Manuel d'utilisation de SWAT , Swat IO 2012
- 34.** Manuel d'utilisation de SWAT-Cup
- 35.** Manuel d'utilisation de SWAT Output viewer

Annexes : Définition des paramètres dans SWAT

Paramètre	Min	Max	Valeurs par défaut	Définition	Echelle (fichier)
1.DEBIT					
Ruissellement					
<i>SURLAG</i>	0	4000	4	Temps de réponse dû au ruissellement de surface	bassin (.bsn)
<i>CN2</i>	30	98	SCS Engineering division, 1986	Numéro de courbe de ruissellement	URH(.mgt)
Evaporation					
<i>ESCO</i>	0	1	1	Facteur de compensation d'évaporation de la plante	bassin(.bsn), URH(hru)
<i>ESCO</i>	0	1	0.95	Facteur de compensation d'évaporation du sol	bassin(.bsn), URH(hru)
Infiltration, drain, écoulements souterrains et latéraux					
<i>ALPHA_BF</i>	0.001	1	Lent : 0.1-0.3 ; rapide : 0.9-1	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	URH(.gw)
<i>LAT_TTIME</i>	0	180	0	Temps de parcours des écoulements latéraux	URH(.hru)
<i>GWQMN</i>	0.001	5000		Hauteur d'eau minimale pour qu'il y ait un transfert d'eau de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau	URH(.gw)
<i>RCHRG_DP</i>	0.001	1	0 à 1	Fraction de l'eau qui percole de la zone racinaire et qui atteint l'aquifère profond	URH(.gw)
<i>SOL_AWC</i>	0.001	1	Variable	capacité en eau disponible de la couche de sol considérée (mm H ₂ O/mm sol)	URH(.sol)
<i>GW_DELAY</i>	0.001	365	Variable	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par l'aquifère peu profond atteigne le cours d'eau (jours)	URH(.gw)
<i>GW_REVAP</i>	0.02	0.2	Variable	Coefficient permettant le transfert d'eau de l'aquifère vers les horizons sus-jacents et non saturés du sol	URH(.gw)
<i>REVAPMN</i>	0.001	500	Variable	Hauteur d'eau minimale dans l'aquifère peu profond pour qu'il y ait un mouvement d'eau vers le sol ("revap") ou l'aquifère profond	URH(.gw)
<i>CANMX</i>	0.001	10	Variable	Quantité d'eau maximale pouvant être retenue par le couvert végétal quand il est complètement développé (mm H ₂ O)	URH(.hru)
<i>DDRAIN</i>	0	2000	0	Profondeur du drainage souterrain (mm)	URH(.hru)
<i>TDRAIN</i>	0	72	0	Temps requis pour drainer le sol à la capacité au champ (h)	URH(.hru)
<i>GDRAIN</i>	0	100	0	Temps de réponse du drain souterrain (h)	URH(.hru)
<i>SHALLST</i>	0	1000		Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond (mm)	URH(.gw)
<i>DEPIMP_BSN</i>	1000	7000	6000	Profondeur de la couche imperméable (mm)	bassin (.bsn)
Paramètres de neige					
<i>SMFMN</i>	0	10	4.5	Facteur de fonte de neige le 21 décembre (mm H ₂ O /°C.j)	bassin (.bsn)
<i>TIMP</i>	0.01	1	1	Facteur de temps de réponse dû à la température du pack de neige	bassin (.bsn)
<i>SMFMX</i>	0	10	4.5	Facteur de fonte de neige le 21 juin (mm H ₂ O /°C.j)	bassin (.bsn)
<i>SFTMP</i>	0	5	1	Température de la chute de neige ou la température moyenne de l'air où la précipitation est à la frontière pluie et neige/pluie verglacante (°C)	bassin (.bsn)
<i>SMTMP</i>	0	5	0.5	Température de base de fonte de neige (°C)	bassin (.bsn)
<i>SNOCOV</i>	0	1	0.5	Fraction du volume de neige représenté par SNOCOVMX correspondant à 50% de couvert de neige	bassin (.bsn)
<i>SNOCOVX</i>	0	500	1	Contenu en eau minimum de la neige correspondant à 100% de couvert de neige (mm H ₂ O)	bassin (.bsn)

Paramètre	Min	Max	Valeurs par défaut	Définition	Echelle (fichier)
-----------	-----	-----	--------------------	------------	-------------------

2.SEDIMENTS

Erosion des sédiments au niveau du bassin /sous-bassin /URH					
ROCK	0	100	0	Pourcentage de fragments rocheux dans le sol	URH(.sol)
USLE_K	0	0.65	Variable selon l'URH	Facteur d'érodabilité du sol (0,013 t.m ² .h/m ³ .t.cm)	URH(.sol)
ADJ_PKR	0.5	2	1	Facteur d'ajustement de pointe pour le transport des sédiments dans les sous-bassins	bassin (.bsn)
HRU_SLP	0.00001	0.6	Pente moyenne (SLOPE) du sous-bassin (m/m)	Pente de l'Unité de Réponse Hydrologique	URH(.hru)
SLSUBBSN	10	150	90	Longueur de pente moyenne du sous-bassin (m)	URH(.hru)
BIOMIX	0	1	0.2	Efficacité du mixage biologique	URH(.mgt)
USLE_P	0.1	1	1	Facteur de pratique de conservation	URH(.mgt)
USLE_C	0.001	0.05	Variable selon l'occupation du territoire	Facteur de culture (végétation) et de gestion	Cultures(crop.dat)
LAT_SED	0	5000	0	Concentration de sédiments dans les écoulements souterrains et latéraux	URH(.hru)
SOL_Z	1	5000	Variable	Profondeur de la couche à partir de la surface du sol (mm)	URH(.sol)
SOL_K	0.001	500	Variable	Conductivité hydraulique à saturation (mm/h)	URH(.sol)
RSDCO	0.01	0.099	0.05	Coefficient de décomposition des résidus	bassin (.bsn)
Erosion et transport des sédiments dans la rivière					
PRF	0	2	1	Facteur d'ajustement de pointe pour le transport des sédiments dans le canal principal	bassin(.bsn)
SPCON	0	0.01	0.0001	Paramètre linéaire pour calculer la quantité maximale de sédiments pouvant être entraînés durant le transport dans le canal	bassin(.bsn)
SPEXP	1	2	1	Exposant défini pour déterminer les sédiments entraînés durant le transport dans le canal	bassin(.bsn)
CH_S2	0	1	Variable selon le sous-bassin	Pente moyenne du canal principal le long de la longueur du canal	sous-bassin (.rte)
CH_EROD	-0.05	1	0	Facteur d'érodabilité du canal	sous-bassin (.rte)
CH_COV	-0.001	1	0	Facteur de couverture végétale du canal	sous-bassin (.rte)
CH_N2	0.001	0.5	variable	Coefficient de Manning "n" du canal principal	sous-bassin (.rte)
CH_K1	0	150	variable	Conductivité hydraulique effective dans l'alluvion du canal tributaire (mm/h)	sous-bassin (.sub)
CH_K2	-0.01	150	variable	Conductivité hydraulique effective dans l'alluvion du canal principal (mm/h)	sous-bassin (.rte)
CH_S1	0.0001	10	variable	Pente moyenne du canal tributaire le long de la longueur du canal	sous-bassin (.sub)
CH_N1	0.01	30	variable	Coefficient de Manning "n" des canaux tributaires	sous-bassin (.sub)