

Chapitre I : Etude Bibliographique

Introduction :

L'envasement et le transport solide constituent, par leurs importances, un problème majeur dans les pays du Maghreb. L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables. En Algérie, par exemple, les études d'aménagement hydromécaniques butent sur le problème de manque de données sur le transport solide afin d'évaluer son importance. Cela conduit l'Ingénieur à utiliser les méthodes empiriques disponibles pour évaluer les quantités solides transportées annuellement par le cours d'eau étudié.

I- L'érosion :

I-1- Généralités :

D'une manière générale, l'érosion des sols correspond au "détachement " et au "transport" des particules de sol, par différents agents (gravité, eau, vent, glace), de leur emplacement d'origine à un endroit de "dépôt" à l'aval. Dans tous les cas, ces mouvements de sol sont des processus discontinus à fortes variations spatio-temporelles, difficiles à décrire sous forme d'équations mathématiques.

I-1-1 - L'érosion hydrique :

L'érosion hydrique c'est l'ensemble des phénomènes complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol. Elle se définit comme la perte du sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt. Les sédiments ainsi arrachés à cause de l'effet des gouttes d'eau et des eaux de ruissellement se déposent généralement à l'aval dans les retenues et les estuaires. Ce phénomène devient encore plus grave si l'on sait que 85% des surfaces cultivables, sont situées dans les zones les plus sensibles à l'érosion. [1]

I-1-2 -Les principaux agents de l'érosion hydrique :**a - Intensité et agressivité des précipitations :**

La désagrégation de la structure et le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie résultent du "travail" exercé par les gouttes à la surface du sol. Il est donc lié à l'énergie cinétique des gouttes E_c .

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec :

E_c : l'énergie cinétique (J)

m : la masse de la goutte (kg)

v : la vitesse (m/s)

L'agressivité des pluies. Il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique. [1]

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p \dots\dots\dots (I.2)$$

Avec :

E_c : l'énergie cinétique (J)

I_p : intensité de pluie (mm/h)

L'impact direct des gouttes de pluie provoque non seulement le délitage et la fragmentation des agrégats du sol, mais également l'entraînement et la projection des particules dans toutes les directions. Ce rejaillissement peut être important. Plusieurs chercheurs ont essayé de quantifier cette masse de sol détachée (D_p) expérimentalement. Les relations obtenues sont en général de la forme. [1]

$$D_p = a \cdot E_c \cdot b \dots\dots\dots (I.3)$$

Avec :

D_p : la masse détachée

a , b : des coefficients dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

b - Le ruissellement :

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures.

D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel. En 1965, Meyer a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse. [1]

$$V_R = (I^{0.33} \cdot Q_R^{0.33}) / n^{0.66} \quad \text{.....(I.4)}$$

Avec :

V_R : vitesse de ruissellement

I : pente du terrain

Q_R : Débit du ruissellement

n : rugosité du sol.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

- L'infiltration;
- Détention superficielle et rugosité du sol;
- Pente et longueur de pente;
- Le couvert végétal.

c - Les processus érosifs des sols :

L'érosion a lieu quand les forces qui entraînent et transportent les matériaux sont plus importantes que celles qui résistent à leur mouvement. Ces forces sont exercées sur les surfaces par le vent, la pluie et le ruissellement.

L'épaisseur des sols, dans une première approche, est contrôlée par la relation entre les taux de production et de déplacement des matériaux. Les sols sont produits par les agents des Intempéries, qui provoquent l'altération de la roche-mère, tandis que leur désagrégation et leur Déplacement sont faits par les processus d'entraînement et de transport. Quand ces deux processus sont équivalents, l'épaisseur de sol reste constante. Les problèmes d'érosion des sols se font sentir Quand le taux de déplacement (d'érosion) est plus élevé que le taux de production des sols. Par contre, quand le taux de formation des sols est supérieur au taux de déplacement, les sols formés se déposent sur place et son épaisseur augmente.

L'équilibre entre la formation et le déplacement des sols est atteint quand la variation de son Épaisseur est nulle. Dans ce cas, le taux de déplacement (ou d'érosion) est limité par le taux de production, le premier étant limité par la capacité d'entraînement et de transport solide de l'écoulement. Donc, l'évaluation de l'érosion des sols agricoles ne dépend pas simplement de la détermination par lois empiriques de sa perte en sols, mais aussi de la disponibilité de sédiments sur les versants (fonction du bilan entre la production et le déplacement des sols) et de l'écoulement qui s'y développe.

Les sédiments transportés par l'écoulement sont générés par le "splash" des gouttes de pluie; par le détachement dû au ruissellement; par les éboulements de terrain; par solifluxion et par l'action des animaux. Ces processus agissent sur la roche-mère ou sur le sol. L'érodabilité des sols est dynamique : elle varie de saison à saison et d'averse à averse, étant une fonction des Caractéristiques du substratum, de la végétation et des conditions climatiques.

En général les processus d'érosion des sols par la pluie sont des processus stochastiques qui Imposent la corrélation avec différentes données, dont la description complète doit considérer :

- les données météorologiques pour analyser la distribution de la taille des gouttes de pluie associée à une certaine intensité;
- la vitesse finale d'une goutte de pluie avec une taille et une forme données;
- la connaissance de l'énergie des impacts des gouttes sur le terrain;
- les caractéristiques de l'écoulement développé sur les versants. [2]

d - Formes d'érosion :

Les différentes formes d'érosion des sols sont habituellement répartis en deux catégories: L'érosion en nappes et l'érosion linéaire. Pour la dernière, on distingue encore Entre érosion en rigoles et érosion en ravines, qui peuvent se combiner avec de l'érosion en nappes.

*** Erosion en nappes :**

L'érosion en nappes survient lorsque la surface du sol est battante ou tassée et que les eaux de pluies ne s'infiltrent pas mais s'écoulent en surface. Ainsi, des particules du sol sont arrachées et emportées pour se redéposer en partie. Les traces d'écoulement sont peu visibles. On parle aussi d'érosion en nappes lorsque la profondeur et la largeur des griffes d'érosion sont inférieures à 2 cm. L'érosion en nappes peut être locale (p. ex. sur les chaintres ou les traces de passage) ou s'étendre sur de larges surfaces. Elle se produit souvent en combinaison avec de l'érosion linéaire.

*** Erosion en rigoles :**

L'érosion en rigoles est un type d'érosion linéaire caractérisé par des traces d'écoulement dont la largeur et la profondeur sont de 2 cm au moins et la profondeur centrale inférieure à 10 cm. Les rigoles se forment lorsque les eaux de surface s'écoulent de manière concentrée. Ce phénomène a de multiples causes: dépressions du terrain rassemblant les eaux de pluie, écoulement dans des traces de passage ou des raies de labour, résurgence d'eaux de pente ou d'eaux étrangères à la parcelle. Une à plusieurs rigoles peuvent se former et leur largeur peut atteindre plusieurs mètres.

*** Erosion en ravines :**

Les ravines sont plus profondes que les rigoles (profondeur moyenne >10 cm) et causent Souvent des dommages plus importants. Elles se forment lors de précipitations abondantes (fortes et ponctuelles ou persistantes), lorsque l'eau de ruissellement s'écoule de manière concentrée sur de longues distances.

I-2- Cause de l'érosion :

Plusieurs agents influent directement ou indirectement sur le processus de l'érosion du bassin versant.

La pluie torrentielle est l'agent principal du phénomène, l'irrégularité des pluies en Algérie du nord est liée à des intensités très élevées parfois et qui peuvent engendrer des pertes de terrains considérables.

La multiplicité des facteurs qui causent l'érosion exigent une prise de connaissances de leurs effets directs sur le processus de l'érosion.

Les facteurs géologique et pédologique, les facteurs topographiques et autres ont leur influence. [1]

I-3 - Facteur influençant l'érosion :

Avant d'adopter l'une ou l'autre des méthodes de lutte antiérosive, il est souhaitable de revenir aux causes de l'érosion et aux facteurs qui en modifient l'expression.

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.[3]

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:

a- Facteur humaine :

L'homme qui, par des pratiques inadaptées sur les versants, est le facteur principal conditionnant l'intensité de l'érosion. Les défrichements qu'il opère sur les forêts et les parcours naturels, le surpâturage, la mise en culture sans précaution des terres susceptibles à l'érosion en pente, les labours mécanisés dans le sens des grandes pentes et la non restitution au sol de ses éléments nutritifs enlevés par les cultures facilitent le ruissellement et par conséquent l'érosion et ses effets indésirables pour l'environnement et pour l'économie.

L'érosion hydrique des sols résulte de l'interaction entre les facteurs statiques et les facteurs dynamiques. Les facteurs statiques sont reliés à la vulnérabilité des terrains. Celle-ci représente une caractéristique propre du milieu, dépendante de la nature du terrain et indépendante des facteurs dynamiques. Ces derniers sont les agents de pression qui peuvent être soit naturels (climat et couverture végétale), soit humains. On a donc la relation suivante [3] :

$$\text{Risque} = \text{vulnérabilité} \times \text{pression.}$$

Les précipitations déclenchent le processus de l'érosion hydrique tandis que la végétation limite ce processus, ce qui amène à attribuer au climat un effet destructif et à la végétation un effet protecteur. Selon la conduite de ses activités, l'homme intervient d'une manière positive ou négative sur le processus d'érosion hydrique.

b-Facteur du climat :

Le Climat constitue la cause et la source d'énergie érosive. Ce sont les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement sur les terrains en pente et les vents violents qui détachent et entraînent les particules terreuses.

L'efficacité de la pluie vis à vis des processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle a dans le détachement des particules des sols, mais surtout dans la formation du ruissellement. Cette érosivité dépend essentiellement de l'intensité et du volume des précipitations.

L'intensité d'une pluie est le rapport d'une hauteur d'eau à une durée (exprimée en mm/h ou mm/min). L'intensité réelle ou instantanée se réfère à un instant au cours de la pluie et n'est jamais constante au cours d'un même événement pluvieux. L'intensité moyenne au cours d'une pluie est le rapport du volume total de la pluie à la durée effective de la pluie.

c-Facteur du sol :

En plus des facteurs favorisant le ruissellement, l'entraînement des particules du sol est facilitée par les caractères du sol comme sa texture, sa minéralogie, sa stabilité structurale et la matière organique qu'il contient. Les sols limoneux et limono-sableux sont les plus sensibles à l'érosion et à la battance, alors que les sols argileux plus fins résistent mieux à l'action du cisaillement par l'eau de ruissellement. Le détachement des particules est important pour des tailles de grains compris entre 63 et 250 μm . La stabilité des agrégats maintient la structure du

sol et s'oppose à l'érosion. Les argiles gonflantes comme les smectites diminuent la résistance des agrégats. Par ailleurs, la matière organique favorise au contraire l'agrégation des particules et l'infiltration.

d-Facteur topographique :

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant le relief, la densité du drainage, l'importance des vallées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin

Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie des sols et la protection du couvert végétal.

f-Les facteurs géomorphologiques et hydrologiques :

La géomorphologie du terrain : conditionne la gravité de l'érosion. En effet, à petite échelle, on note que la rugosité de la parcelle explique les pertes du sol. Quant à grande échelle, c'est le relief du bassin versant qui conditionne l'importance des dégâts occasionnés par l'érosion hydrique.

L'infiltrabilité des sols : l'érodibilité d'un sol, définie comme étant la vulnérabilité du sol à l'érosion dans des circonstances précises, est fonction de la perméabilité de la surface des sols. En effet, les sols issus de roches tendres (marnes et schistes feuilletés) sont généralement imperméables et très sensibles à l'érosion.

g- La morphologie du terrain :

Les paramètres topographiques sont fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs.

La déclivité de la pente : la pente est un facteur important d'érosion. Le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2 %). Toutes choses égales par ailleurs, l'érosion augmente avec la pente. Egalement, la perméabilité des sols est un acteur déterminant. En effet, si les sols sont absolument imperméables, le ruissellement de la pluie sera total et ne dépendra pour une surface de pente donnée que de l'intensité de la pluie. Par contre, si les sols sont relativement perméables, la pente aura une influence

certaine sur l'infiltration et donc le ruissellement.

***La longueur de la pente :** en principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie.

Il semble que l'influence de la longueur de pente est d'autant plus importante que le ruissellement a la possibilité de se concentrer. Par contre, l'influence est probablement nulle en absence du ruissellement et que le splash est le seul processus actif.

***La forme de la pente :** une pente donnée a tendance à devenir de plus en plus concave parce que les produits arrachés au sommet s'accumulent en bas de la pente. Cette évolution est parfois sensible et se traduit parfois par une diminution de l'érosion au cours du temps. Ainsi, une rupture de pente concave favorise le dépôt, à moins qu'elle ne facilite la concentration alors qu'une rupture de pente convexe se traduit par un accroissement de la vitesse d'écoulement et de la contrainte de cisaillement exercée sur le sol si l'eau n'est pas dispersée.

h-Le couvert végétal :

L'absence du couvert végétal expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie. Or, ce ne sont pas les cimes qu'il faut regarder pour savoir si les arbres protègent efficacement les sols, c'est plutôt la végétation au sol et la litière.

Les arbres forestiers ou les plantes cultivées protègent le sol contre l'érosion hydrique. En effet, celles-ci protègent le sol de l'action des gouttes de pluie et les racines maintiennent en place les particules emprisonnées dans un réseau racinaire dense qui accroît ainsi la résistance du sol au cisaillement et limite l'incision.

I-3-1 -Résultats et conséquences de l'érosion hydrique :

Les résultats de l'érosion pluviale se traduisent par des paysages empierrés, des glissements de terrains, des mouvements de masse, un ravinement intense et des envasements des infrastructures de mobilisation d'eau.

Les conséquences sont d'autant, plus graves que l'érosion est active dans les régions exemptes d'aménagement, engendrant des pertes économiques très importantes (inondation et asphyxies des terres cultivées, envasement de barrage) en provoquant un régime

d'écoulement torrentiel.

Sur le bassin d'alimentation, le transport solide provoque un colmatage superficiel des sols (sols lourds) et augmente le ruissèlement aux dépends de l'infiltration.

L'érosion va contribuer au changement progressif du relief, en accentuant les pentes, en provoquant des ravinements intenses.

L'envasement des barrages, l'affouillement et le comblement des lits d'oueds sont spectaculaires en Algérie.

La vitesse de colmatage des ouvrages d'art est variable d'un barrage à un autre selon la force de l'érosion et de la lame ruisselée ; la durée de vie d'un barrage est estimée à une trentaine d'année

1-3-2- l'impact de l'érosion En Algérie :

L'érosion hydrique affecte de plein fouet les ouvrages hydrauliques, conséquence d'un envasement rapide, face à cet épineux problème l'Algérie tente bien que mal d'y remédier. Cependant des mesures ont été effectuées au niveau de ces ouvrages dans le but de mesurer l'ampleur de ce phénomène qui est l'envasement. Des chiffres alarmants de l'état d'envasement des barrages algériens sont présentés dans le tableau I.1. quel que

<i>Barrage</i>	<i>Mise en eau</i>	<i>Capacité Initiale ($10^6 m^3$)</i>	<i>Envasement moyen annuel ($10^6 m^3/an$)</i>
	<i>Année</i>	<i>Mm³</i>	<i>Mm³</i>
<i>OUED FODDA</i>	<i>1932</i>	<i>228</i>	<i>2.66</i>
<i>GHRIB</i>	<i>1939</i>	<i>280</i>	<i>3.2</i>
<i>DJORF EL TORBA</i>	<i>1934</i>	<i>350</i>	<i>1.3</i>
<i>LACHEFFIA</i>	<i>1965</i>	<i>175.68</i>	<i>0.17</i>
<i>EGHIL EMDA</i>	<i>1953</i>	<i>154.8</i>	<i>1.6</i>
<i>BOUHANIFIA</i>	<i>1944</i>	<i>73</i>	<i>0.78</i>
<i>BENI BAHDELS</i>	<i>1940</i>	<i>63</i>	<i>0.2</i>
<i>BAKHADA</i>	<i>1936</i>	<i>37.6</i>	<i>0.27</i>
<i>FOUM EL GHERZA</i>	<i>1950</i>	<i>47</i>	<i>0.8</i>
<i>ZERDEZAS</i>	<i>1936</i>	<i>14.9</i>	<i>0.25</i>
<i>HAMIZII</i>	<i>1935</i>	<i>21</i>	<i>0.35</i>
<i>MEFROUCH</i>	<i>1936</i>	<i>16</i>	<i>0.12</i>
<i>K'SOB</i>	<i>1940</i>	<i>11.6</i>	<i>0.3</i>
<i>FOUM EL GUEISS</i>	<i>1939</i>	<i>3</i>	<i>0.03</i>

Tableau I.1 : L'état d'envasement de quelques barrages algériens [1]

I-4- Le transport solide :

Le transport solide représente l'entraînement de granulats sous l'action d'un écoulement fluide. Il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels, et constitue un écoulement à surface libre ou en charge.

I -4-1- Les différentes modes de transports solides :

Le mode de transport dépend essentiellement d'un paramètre fondamental : la taille du sédiment transporté.

a- Le transport solide par charriage :

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace.

Pour quelques bassins versants le taux de charriage a été estimé à 12.5 % de la suspension. [4]

b- Le transport solide en suspension :

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval.

Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport.

Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement V sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules,

- $V/W > 0.10$ début de transport par charriage.

- $V/W > 0.40$ début de transport en suspension

c- Le transport solide en dissolution :

Il concerne les matières transportées en solution dans l'eau venant de l'érosion chimique des bassins versants, des pollutions anthropiques et des apports atmosphériques. Cette troisième partie ne représente qu'une infime partie de débit global solide. [5]

I -4-2 -Méthode de quantification de l'apport solide en Algérie :

En Algérie, le problème de transport solide a été l'objet de plusieurs recherches

Les études de quantification traitent en général les différentes relations existantes entre toutes les caractéristiques qui rentrent dans l'identification de la région étudiée. [6]

a) Formules T'ixeront (1960) :

Cette formule est Basée sur les données recueillies de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie (dont 4 alimentant des barrages réservoirs). Les superficies varient de 890 à 22.300 Km² et les observations portant sur durée variant de 2 à 22 ans.

Après avoir regroupée les bassins en trois classes suivant un critère régional, Tixeront propose trois relations :

- $A = 354 * R^{0.15}$ (bassins Tunisiens)
- $A = 92 * R^{0.21}$ (bassins de l'Est algériens)
- $A = 2.000$ (région centre Algérie)

Avec :

- A = apports solides spécifique moyens annuels (t/Km²/an)
- R = écoulement annuel total (mm)

b) Modèle de SOGREAH (1969) :

Cette étude est Basée sur les données recueillies dans 27 bassins d'Algérie (dont 16 alimentant des barrages réservoirs) totalisant 282 années-stations. Les superficies varient de 90 à 22.300 Km².

Les relations de Sogreah, inspirées des relations Tixeront, donnent les apports solides spécifiques A (t/Km²/an) en fonction du ruissellement annuel de crue (mm) et de la perméabilité des bassins, elles s'écrivent comme suit :

- Pour une Perméabilité élevée $A = 8.5 * R^{0.15}$

- Perméabilité moyenne a élevée $A = 75 * R^{0.15}$
- Perméabilité faible a moyenne $A = 350 * R^{0.15}$
- Perméabilité faible $A = 1.400 * R^{0.15}$
- imperméables $A = 3.200 * R^{0.15}$

c) Formule fournier :

Cette formule est basée sur les données recueillies dans 104 bassins de superficie supérieure à 2000 Km² appartenant à différentes régions du globe, la formule fait intervenir la notion de contraste et d'abondance pluviométrique ainsi que l'orographie des bassins.

$$E = \frac{1}{36} \left[\frac{P}{P_{an}} \frac{m^2}{an} \right]^{2.65} \left(\frac{h^2}{S} \right)^{0.46} \dots\dots\dots (I.5)$$

Où :

- **E** : Apports solides spécifiques moyens annuels(t/Km²/An)
- **Pm** : pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm)
- **Pan**: Pluie moyenne annuelle (mm)
- **h** : dénivelée moyenne = $\bar{H} - H_{min}$ (m)
- **S** : superficie du bassin (Km²)

d) Formule de l'ANRH :

Cette formule est Élaborée à partir des données recueillies dans 30 bassins versants d'Algérie, de superficie comprise entre 100 et 3000 Km², soumise à une pluviométrie comprise entre 300 et 1000 mm.

$$Tss (T/km^2/an) = 26.62 IL + 5.07 IP + 9.77 CT - 593.56 \dots\dots\dots (I.6)$$

Avec :

- **Tss** : transport solide spécifique moyenne annuel (t/Km²/an)
- **II** : indice lithologique = superficie des formations marneuses et argileuses du crétacé

supérieur et tertiaire exprimé en pourcentage de la superficie totale du bassin

- **IP** : indice des précipitations érosives (fait intervenir le pourcentage des précipitations annuelles tombées sous forme des pluies journalières supérieures à 20 mm et le nombre annuel de ce type de précipitations).
- **CT** : coefficient de torrentialité = $Dd * F1$
- **Dd** : densité de drainage (longueur du réseau fluvial par unité de surface)
- **F1** : fréquence des thalwegs élémentaires.

e) Formule de Gavrilovic :

Mise au point en Yougoslavie et utilisée en Algérie dans le cadre d'un projet régional.

La formule est basée sur 2 fonctions :

Une fonction donnant la production annuelle de sédiment.

$$P_e = TH_m \pi \sqrt{Z^3} \dots\dots\dots (1.7)$$

- **P_e** : production moyenne annuelle de sédiment, en suspension et de charriage (m³/Km²/an)
- **H_m** : Pluie moyenne annuelle (mm)
- **T** : coefficient de température = $\sqrt{\frac{t^0}{10}} + 0.1$
- **t⁰** : Température moyenne annuelle (C°)
- **Z** : coefficient empirique lié à l'érosion du bassin :

- Érosion excessive : **Z** de 1.00 à 1.50
- Erosion intense : **Z** de 0.70 à 1.00
- Erosion moyenne : **Z** de 0.40 à 0.70
- Erosion faible : **Z** de 0.20 à 0.40

- Erosion très faible : Z de 0.70 à 1.00

Une fonction déterminant le taux de rétention (R_m) des sédiments produits par le bassin en tenant compte des discontinuités spatio-temporelles dans le flux des matériaux arrachés.

$$R_m = \frac{\sqrt{PeH}}{0.2 (L + 10)} \dots\dots\dots (I.8)$$

- P_e : périmètre du bassin versant (Km)
- \bar{H} : Altitude moyenne (Km)
- L : longueur du thalweg principal (km).

La dégradation spécifique est donnée ($m^3/Km^2/an$)

$$D_s = P_e * R_m \dots\dots\dots (I.9)$$

L'intérêt de cette méthode est d'introduire la notion de transfert qui complète la notion de production prenant en charge ainsi le phénomène de discontinuité, généralement passé sous silence.

On ignore cependant les conditions d'établissement de cette formule qui donne les apports solides en volume ($m^3/Km^2/an$), ce qui rend difficile la comparaison avec les résultats des autres méthodes qui fournissent les apports solides en $t/Km^2/an$,

I-5- Autres formules du transport solide :

Plusieurs dizaines de formules ont été proposées pour prédire soit le charriage seul, soit le charriage et la suspension. La plupart d'entre elles ont été établies pour estimer le transport solide moyen, cependant, depuis quelques années, plusieurs auteurs ont cherché à établir des formules donnant le transport solide fractionné, c'est-à-dire les valeurs de transport associées à chaque diamètre en présence [5]. Ce type de formule est très compliqué à utiliser, et surtout, nécessite une analyse très fine de la granulométrie.

De ces formules on peut citer, Meyer-Peter et Müller (1948), Einstein-Brown (1950), Schoklitsch (1962), Engelund et Hansen (1967), Ackers et White (1973), Mizuyama (1977), Bagnold (1980), Parker et al. (1982), Smart et Jaeggi (1983), Yang (1984), Rickenmann (1991), Van Rijn (1984), Recking et al. (2006) [5] :

- **Ackers et White [1973] :**

Transport solide total q_{st} :

$$q_{st} [m^3 / s / m] = \frac{qD_{35}}{H} \left[\frac{F_{gr}}{0.17} - 1 \right]^{1.5} \dots\dots\dots (I.10)$$

Avec :

$$F_{gr} = \frac{1}{\sqrt{g(s-1)D_{35}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32} \log \left(\frac{10H}{D_s} \right)} \right] \dots\dots\dots (I.11)$$

Cette formule s'applique pour des nombre de Froude $Fr < 0.8$ (rivières de plaine).

- **Einstein-Brown (1950) :**

Proposée par Brown (1950) à partir d'un lissage de l'abaque d'Einstein (1950)

$$q_v [m^3 / s / m] = \sqrt{g(s-1)D^3} \left[\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(s-1)D^3}} - \sqrt{\frac{36V^2}{g(s-1)D^3}} \right] f(\theta) \dots\dots\dots (I.12)$$

$$f(\theta) = 2.15e^{-0.391/\theta} \quad \text{si} \quad \theta < 0.18$$

$$f(\theta) = 40\theta^3 \quad \text{si} \quad \theta < 0.18$$

v est la viscosité cinématique du fluide ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 20°C).

- **Engelund et Hansen [1967] :**

Equation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold (1966) et du principe de similarité :

$$q_s [m^3 / s / m] = \frac{0.1}{f} \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \theta^{5/2} \dots\dots\dots (I.13)$$

Le facteur de rugosité f étant définit par : $f = 2.g.R.S/U^2$

Cette formule peut s'écrire :

$$g_s = 0,05 \cdot \gamma_s \cdot v^2 [D / (g(\gamma_s / \gamma) - 1)]^{1/2} [\tau_0 / ((\gamma_s - \gamma) D)]^{3/2} \dots\dots\dots (I.14)$$

Où :

g_s : Transport solide en kg/s^3

γ : Poids volumique de l'eau en N/m^3

γ_s : Poids volumiques des sédiments en N/m^3

v : Vitesse moyenne de l'écoulement en m/s

τ : Contrainte de cisaillement au fond en N/m^2

D : Taille des particules en m

- **Meyer-Peter et Mueller (1948) :**

$$q_v [m^3 / s / m] = 8 \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \left[\left(\frac{k}{k'} \right)^{3/2} \theta - 0.047 \right]^{3/2} \dots\dots\dots (I.15)$$

Avec :

$\rho_s = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$, $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $s = 2.65$. 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:

$$k' = 26/D_{90}^{1/6}$$

- **Parker (1979) :**

$$q_v [m^3 / s / m] = 11.2 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^3 \frac{(\theta - 0.03)^{4.5}}{\theta^3} \quad (I.16)$$

Formule	Calculs intermédiaires	Données nécessaires	Conditions expérimentales et domaine de validité
[Meyer-Peter et Mueller, 1948]	θ, K, K_r	$U, R, D_{50}, D_{90}, S, L$	Données de laboratoire $0.4 < S < 2.4\%$, $0.4 < D < 29\text{mm}$
[Engelund et Hansen, 1967]	θ, f	R, U, D_{50}, S, L	Transport total (charriage + suspension) Laboratoire, lit à sable, transport important, lits plats et dunes, $0.15 < D < 1.6\text{mm}$, Pentes faibles
[Ackers et White, 1973]		Q, U, D_{35}, H, S, L	Transport solide total, Données de laboratoire, pour des $Fr < 0.8$ (rivières de plaine), $0.4 < D < 14$
[Parker, 1979]	θ	R, D_{50}, S, L	Données de labo et de terrain
[Mizuyama, 1977]	θ, θ_c	R, D_{50}, S, L	Laboratoire, fortes pentes
[Smart et Jaeggi, 1983]	θ, θ_c, f	$R, D_{30}, D_{50}, D_{90}, S, L$	Données de laboratoire $3 < S < 20\%$, $2 < D < 10.5\text{mm}$
[Recking, et al., 2008b]	θ, θ_c	Q, D_{50}, D_{84}, S, L	Données de laboratoire, $0.1\% < S < 20\%$, $0.4 < D < 44\text{mm}$
[Van Rijn, 1984]	u^*	$U, R, D_{50}, D_{90}, S, L$	Semi-empirique, Validé pour des sables.

Tableau I.2 : Principales caractéristiques des formules de transport solide [4]

Avec:

D_i : Diamètre de grain (l'indice indique « en % plus fin que »)

D_{50} : Diamètre médian

D_m : Diamètre moyen Pondéré = $\Sigma (diPi)/P$ (di diamètre, Pi poids)

f : Coefficient de frottement de Darcy Weisbach

Fr : Nombre de Froude $Fr = U/(gH)^{1/2}$

H : Profondeur de l'écoulement

K : Coefficient de résistance de Strickler de l'écoulement

K' : Coefficient de résistance de Strickler pour les grains défini par $K_s = 26 / D^{1/6}_{90}$

L : Largeur du lit ou du canal

Q : Débit

q : Débit unitaire (Q/L)

q_{sv} : Débit solide volumique unitaire ($= Q_s/[P_s W]$)

Q_s : Débit solide à l'équilibre

q_s : Débit solide unitaire ($q_s = Q_s/W$)

R : Rayon hydraulique

R_e : Nombre de Reynolds $R_e = UR/\nu$

Re^* : Nombre de Reynolds particulière $Re^* = u^*D/\nu$

S : Pente

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

$\tan \alpha$: Coefficient dynamique de frottement interne du sédiment

U : Vitesse moyenne

u^* : Vitesse de frottement: $u^* = (\tau / \rho)$

w : Vitesse de chute $w = [gD(\rho_s - \rho)/\rho]^{0.5}$

ϕ : Transport solide adimensionnel

k : Coefficient de Von Karman (0.4)

θ : Paramètre de Shields: $\theta = \tau_o/[(\rho_s - \rho)gD]$

θ_c : Paramètre critique de Shields pour le début de mouvement

θ_l : Paramètre de Shields pour la transition du régime 2 au régime 3

ρ : Masse volumique de l'eau

ρ_s : Masse volumique du sédiment

ν : Viscosité cinématique

τ Contrainte moyenne au fond : $\tau = \rho g R S$.

I-6 -Formules utilisées dans le logiciel HEC-RAS :[1]

Le logiciel **HEC-RAS** (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*) qui sera développé dans le chapitre III, permet de modéliser les écoulements et le transport sédimentaire en cours d'eau ou canaux. Concernant le transport solide, le logiciel HEC-RAS permet de modéliser à la fois le **charriage** et la **suspension**. Pour cela, le logiciel propose de définir trois formules :

- une fonction de transport,
- une fonction d'évolution du lit sédimentaire,
- une fonction de vitesse de sédimentation.

I-6-1- La fonction de transport :

La fonction de transport estime la capacité de transport solide d'après les paramètres hydrauliques et granulométriques. Le logiciel propose sept formules différentes dont le domaine de validité dépend du type de sédiment (en pratique la taille médiane des sédiments) et parfois du type de transport (charriage ou suspension) ou encore de caractéristiques plus particulières.

D'après le manuel utilisateur du logiciel HEC-RAS et l'article cité précédemment, nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les domaines de validité de chacune des formules.

Formule	Type de sédiment	Remarque
Ackers & White	Sable et fin graviers	-
Engelund & Hansen	Argile et sable	Suspension prédominante
Toffaletti	Sable	Grande rivière
Wilcock	Sable et graviers	-
Laursen	Sable et vase	-
Peter-Meyer	Gravier uniforme	Uniquement pour charriage
Yang	Sable et graviers	Très sensible à la vitesse du fluide

Tableau I.3 : Domaines de validité des formules du transport solide

I-6-2- La fonction d'évolution du lit sédimentaire :

Cette fonction détermine la hauteur du lit sédimentaire grâce à un bilan de masse s'appliquant sur les sédiments. Deux modèles sont proposés par le logiciel HEC-RAS : le modèle

d'*Exner* et le modèle dit "Active Layer". Tous deux reposent sur le principe simple que le niveau du lit augmente proportionnellement à la quantité de particules déposées ou baisse proportionnellement à la quantité de particules mobilisées. Cependant, les deux modèles diffèrent par le nombre de couches considérées dans le lit sédimentaire.

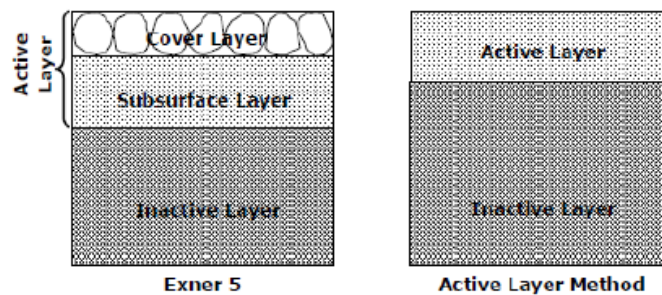


Figure II.2 : Modèles d'évolution du lit

Figure I.1 : Modèles d'évolution du lit

Comme présenté sur la figure (I.1.), le modèle d'*Exner* considère trois couches tandis que celui de l'Active Layer n'en considère que deux. La division du lit sédimentaire en différentes couches correspond à la prise en compte du degré de facilité de mise en mouvement des grains selon leur profondeur dans le lit. Plus la couche sera profonde, plus la proportion de mobilisation des grains sera faible, on parlera alors de couche inactive.

I-6-3 -La fonction de vitesse de sédimentation :

Cette fonction détermine la vitesse de sédimentation selon la taille des particules ce qui influence donc la quantité de grains qui sédimentent. Le logiciel propose trois équations différentes qui, bien que faisant intervenir la taille des particules, sont restreintes à un ou plusieurs types de sédiments. Nous avons regroupé dans le tableau suivant, d'après le manuel utilisateur du logiciel, leur domaine de validité.

Formule	Type de sédiment
Rubtey	Argile et sable
Van Rijn	Sable et graviers
Toffaleti	Argile et sable

Tableau I.4: Domaine de validité des formules de vitesse de sédimentation

I-7- Conclusion :

Dans un cours d'eau naturel, le débit solide en suspension est supérieur au débit solide par charriage, dans la littérature, ce dernier est estimé généralement à 30% du débit solide en suspension. Les conséquences désastreuses de ce phénomène exigent une prise en charge sérieuse de l'estimation des deux modes de transport, une analyse granulométrique des sédiments transportés ainsi qu'une quantification des éléments dissouts et du même ordre d'importance. ainsi qu'à suggérer des solutions.