

Chapitre I : Erosion hydrique

I-1- Introduction

Le terme érosion vient du latin “Erodere” qui signifie “Ronger”(Roose, 1994). L'érosion est le détachement des particules du sol de leur milieu, pour les transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et les déposées en un autre milieu.

Ce processus se résume :

PROCESSUS = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SÉDIMENTATION

L'érosion apparaît sous plusieurs formes :

- *L'érosion hydrique.
- *L'érosion aratoire ou mécanique sèche
- *L'érosion thermique
- *L'érosion chimique
- *L'érosion causée par les êtres vivants

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt (Touré, 2004).

I-2- Origine et mécanisme de l'érosion hydrique

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt du sol enlevé. Le détachement est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et au ruissellement qui assure le transport(Touré, 2004).

I-2-1-Impacte de la goutte de pluie

Les sols subissent un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Les premières gouttes s'infiltrent dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement des particules et d'un tassement du sol. Lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément (Touré, 2004) :

- *La dégradation de la structure.
- *La formation d'une pellicule de battance.
- *L'érosion par rejaillissement ou érosion par splash.

L'énergie cinétique des gouttes (Figure I-1) est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique (E_c) peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides.

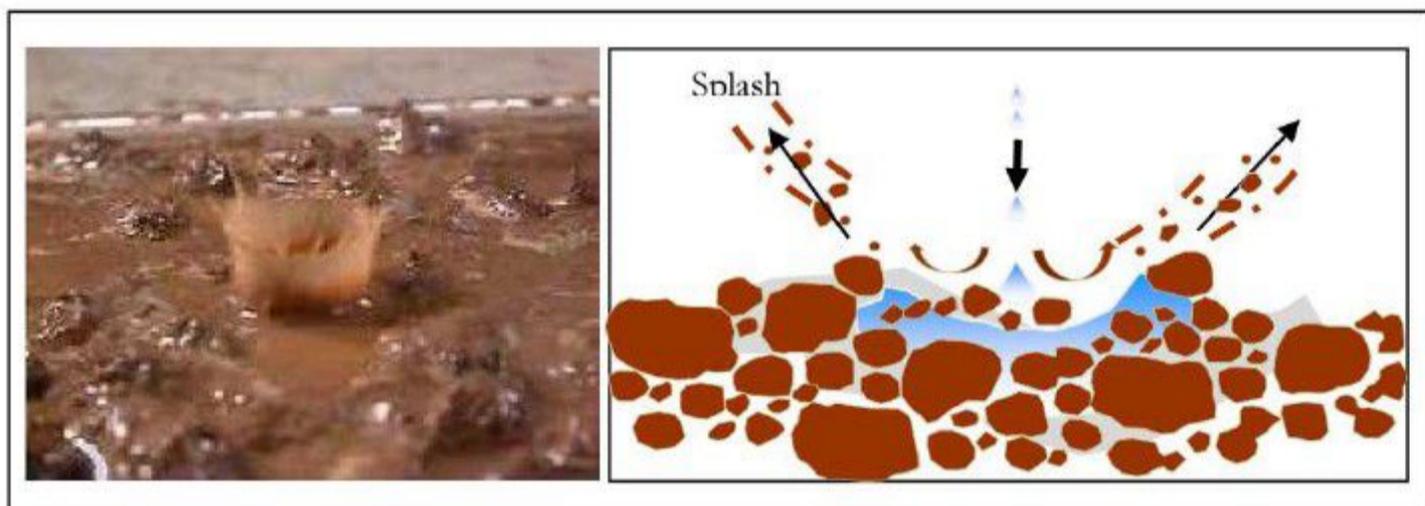


Figure I-1 : Effet Splash (Gourfi,2014)

L'énergie cinétique des gouttes E_c s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2} m.v^2 \quad (I-1)$$

Où :

E_c : l'énergie cinétique (J)

m : la masse de la goutte(kg)

v : la vitesse (m/s)

Elle peut s'écrire également par la relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique (Remy, 1998).

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p \quad (I-2)$$

Avec :

E_c : l'énergie cinétique (J/m²/mm)

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 (Poessen, 1984).

$$D_p = a . E_c . b \quad (I-3)$$

Avec :

D_p : la masse détachée(kg)

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

I-2-2-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.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ruissellent sur la parcelle en détachant les particules de terre (Type Hortonien).

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

*L'infiltration.

*Détention superficielle et rugosité du sol

*Le relief.

*Le couvert végétal.

D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

Meyer (1965) a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse :

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

Où

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

I-2-3- Etat hydrique initial

L'état hydrique du sol au moment d'une pluie a une très forte influence sur la dégradation, la formation des croûtes et la réduction de l'infiltrabilité résultante (Lebissonais, 1996). Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé (Le Bissonais, 1996)

en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement.

L'état hydrique initial influence aussi la succion exercée à la surface du sol par les couches sous-jacentes et donc l'infiltration au travers de cette surface. Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies (Chibbani, et al. 1997). En effet, l'humectation des sols argileux entraîne un gonflement qui est une forme analogue de désagrégation. Cette argile mobilisée migre dans l'eau de l'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former une croûte. La formation des croûtes ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

I-3- Facteurs influençant l'érosion

I-3-a- Le climat

Le climat est un facteur important qui influe sur l'érosion hydrique par la nature des précipitations et des températures. Un climat agressif comme celui des régions aride et semi-arides est caractérisé par des pluies de grandes intensités pendant un temps court et des longues périodes de sécheresse. Les deux éléments accentuent l'érosion, les températures élevées permettent d'assécher et de fissurer le sol ce qui augmente sa vulnérabilité à l'érosion et les fortes pluies viennent avec des énergies cinétiques élevées pour détacher et emporter un maximum de sol (Université de Nice 2008).

I-3-b- La nature du sol

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement

par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium. Ainsi, les sols de texture limoneuse sont généralement plus sensibles que les sols argileux à cause de leur faible stabilité structurale. Au niveau de la stabilité des agrégats, la matière organique est l'un des facteurs les plus importants.

En saison sèche l'humidité du sol est presque nulle, dans cet état le sol perd toute sa cohésion, il présente à cet effet une texture détachée des grains. Ce qui favorisera l'érosion hydrique lors des premières pluies. Il influe de même sur le ruissellement par ses capacités d'infiltration et de rétention ([Université de Nice 2008](#)).

I-3-c- La végétation

Il s'agit du facteur primordial dans la lutte contre l'érosion, la présence du couvert végétal sur le sol augmente sa résistance contre l'érosion.

Sur un sol nu, ce sont les particules de sol qui absorbent directement l'énergie des gouttes de pluie. Par contre, un couvert végétal peut absorber une partie importante de l'énergie de la pluie.

La partie racinaire maintient le sol stable et permet aux plantes d'augmenter le facteur de friction de Manning et de freiner le ruissellement, ce qui limite l'arrachage et le transport des sédiments ([Université de Nice 2008](#)).

L'apport en matière organique permet d'améliorer la structure du sol et sa cohésion (Figure I-2).

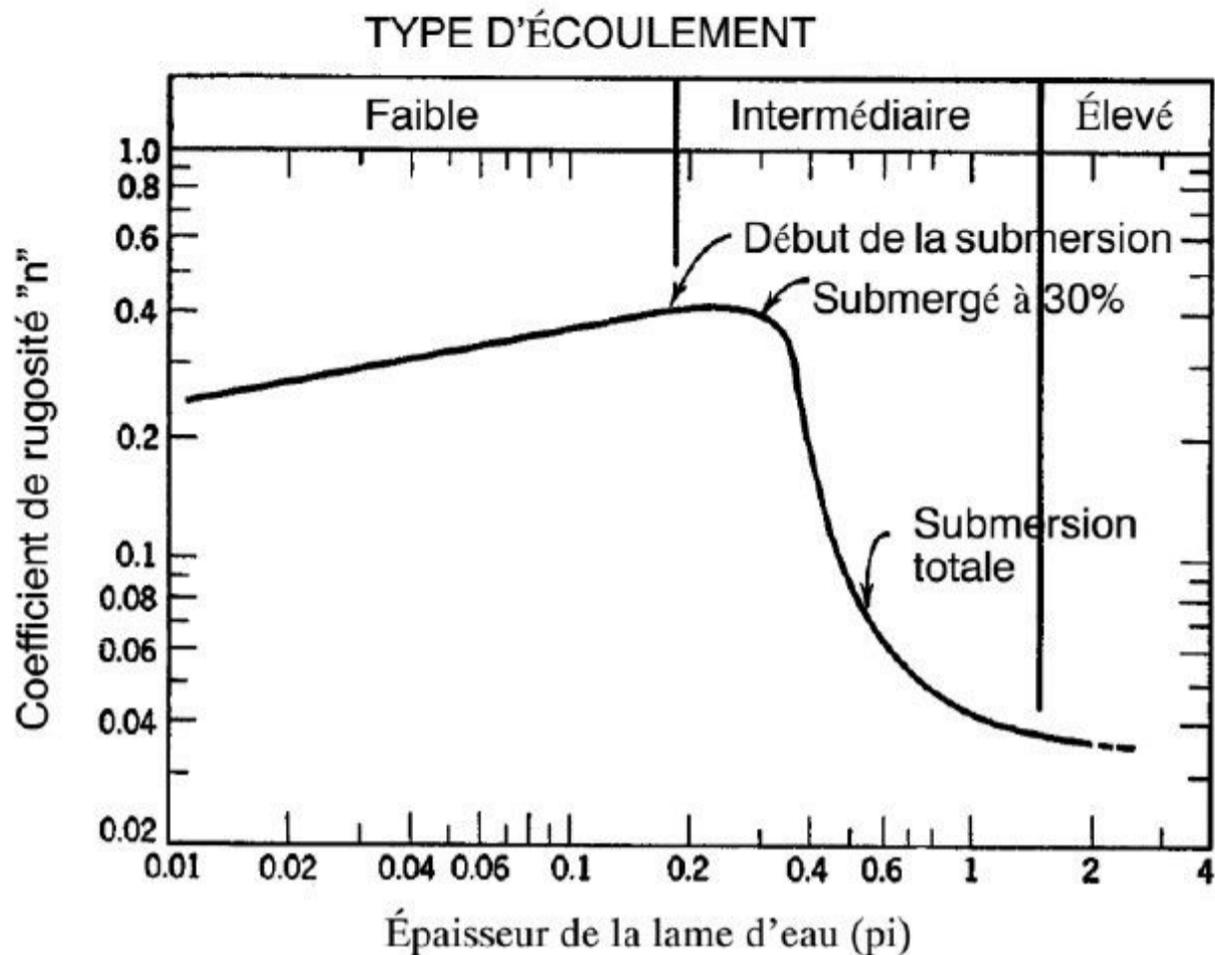


Figure I-2 Rugosité d'un canal enherbé ("bermuda grass" de longueur moyenne) possédant une pente de 5% (adapté de Ree, 1949).

I-3-d- La topographie

La pente du terrain est le facteur topographique le plus important. L'influence première de la pente est l'augmentation des vitesses d'écoulement (Chezy 1769 et Manning 1889). Sur des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion (Université de Nice 2008).

Les micros dépressions du terrain provoquent une concentration de l'écoulement qui augmente le potentiel érosif par rapport à un même volume de ruissellement coulant selon une lame uniforme. Par contre, les dépressions fermées limitent les effets de l'érosion en permettant aux sédiments en suspension de se déposer au lieu de poursuivre leur chemin (les vitesses d'écoulement deviennent faibles).

I-4- Les formes de l'érosion hydrique

I-4-1-L'érosion en nappe ou "sheet érosion"

L'érosion en nappe « sheeterosion » est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique. Elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de l'horizon superficiel, autrement dit il s'agit d'une forme d'érosion diffuse. L'érosion en nappe se manifeste sur le terrain par la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et les plus agressés des champs (sommets de collines et rupture de pentes). Elle se manifeste également par la remontée des cailloux en surface suite aux travaux successifs du sol(Zaher, 2010). Les paysans parlent des « cailloux qui poussent ». L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois de :

- *L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement.
- *L'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer.
- *La durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

Pendant l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait avant tout par effet « splash » à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. Le martèlement du sol par les gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions(Zaher, 2010). En réalité, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naquit le ruissellement en nappe(Zaher, 2010). Ce dernier, en s'étalant à la surface du sol (Figure I-3), maintiendra une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 %, à cause de la rugosité de la surface (présence de mottes, de cailloux, d'herbes, etc.) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.



Figure I-3 : L'érosion en nappe (Zaher, 2010)

I-4-2-L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, des flaques se forment ; ensuite celles-ci communiquent par des filets d'eau et lorsque ces derniers prennent une certaine vitesse, 25 cm/s 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 dissipée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente (Roose, 1994).

L'érosion linéaire (Figure I-4) est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'éroder le sol à un rythme plus rapide que l'érosion en nappe (Blanco & al., 2008).

L'érosion linéaire est révélée par tous les creusements linéaires qui incisent 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 pour creuser 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 encore effaçables par les techniques culturales (Zaher, 2010).

Types de l'érosion linéaire :

*L'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas, mais forment des ruisselets parallèles.

*On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm, mais que leur largeur ait atteint plusieurs mètres (Zaher, 2010).

*On parle de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'elles ne sont plus effaçables par les techniques culturales (Zaher, 2010).

*On parle de ravinement généralisé ou badlands lorsque l'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands". Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants (Zaher, 2010).



Figure I-4 : L'érosion linéaire (Gourfi, 2014)

I-4-3-L'érosion en masse

Tandis que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse (Figure I-5) 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 boueuses et les glissements de terrain. Les phénomènes de mouvement de masse sont nombreux. Dans ce qui suit on peut évoquer :

*Les glissements.

*Les coulées boueuses et les laves torrentielle.

*Les formes locales.

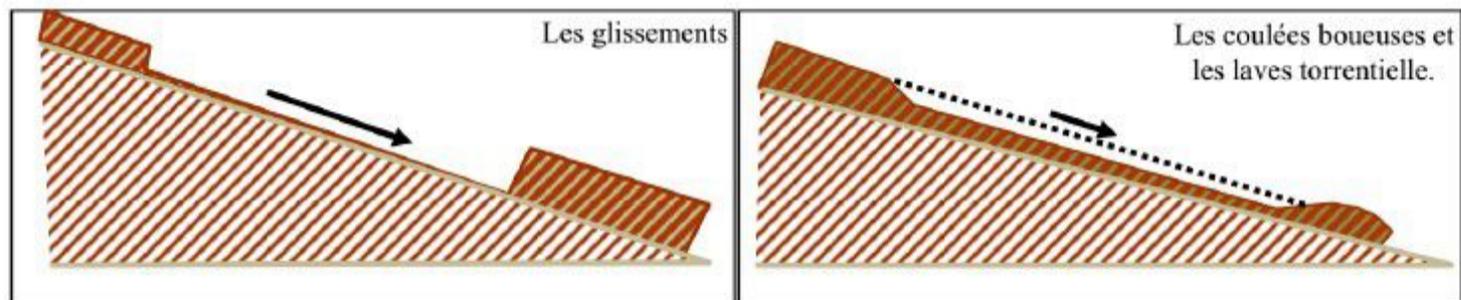


Figure I-5 : Schéma de l'érosion en masse (Zaher, 2010)

I-4-4- L'érosion dans les cours d'eau

Dans les cours d'eau, l'érosion est de deux types. Le premier est causé par les grandes vitesses d'écoulement qui arrachent le matériel de faible résistance sur le lit du cours d'eau (linéaire). Le deuxième est dû à l'instabilité mécanique des talus qui s'effondrent dans le lit (en masse) et dont le matériel est emporté (Zaher, 2010).

I-4-5- Une classification pratique

L'érosion en nappe ne se produit presque que localement par l'impact des gouttes de pluie qui est beaucoup plus importante que celle provoquée par la vitesse de la lame d'eau ruisselée. À la surface du sol, les vitesses de chute des gouttes d'eau (6 à 10 m/s) sont généralement beaucoup plus grandes que celles de l'écoulement de la lame d'eau (0,3 à 0,5 m/s) (Schwab et al, 1966).

À cause des micros dépressions, l'écoulement cherche à se concentrer si bien que l'érosion par de type linéaire en rigoles apparaît rapidement. Au niveau de la parcelle, ces trois formes d'érosion sont très liées et très difficiles à séparer. Pour cette raison, la classification suivante est proposée (Degoutte, 2012) :

- * L'érosion de surface (ou au champ) qui inclut l'érosion par les gouttes de pluie.
- * Par rigoles et ravinement ;
- * L'érosion dans les cours d'eau.

L'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heush, 1970 ; Arabi, M. et al. 1991).

I-5- Quantification de l'érosion hydrique

Plusieurs formules et méthodes qui impliquent tous les paramètres physiques sont utilisées pour la quantification de l'érosion hydrique.

Les formules les plus utilisées sont les suivantes :

a-Equation universelle des pertes en sols (USLE)

a-1- Historique :

Meyer (1984) a résumé l'évolution de l'USLE (Universal SoilLoss Equation) en distinguant plusieurs périodes. La première période (1890-1940) est caractérisée par la compréhension et la description, de manière qualitative, de la plupart des facteurs qui affectent l'érosion. On retrouve les études sur la pluie de Laws (1940) et les analyses de l'impact des gouttes de pluie rapportées par Ellison (1944, 1947). Pendant la période 1940-1954, le travail dans la « cornbelt » des Etats-Unis a abouti à une procédure d'estimation des pertes en terre qui incorporait l'influence de la longueur et de l'intensité de la pente (Zingg, 1940), des pratiques de conservation (Smith, 1941 ; Smith et Whitt, 1947) et des pratiques culturales (Browning, 1947). En 1946, un Comité national américain a réévalué les valeurs des facteurs en ajoutant un paramètre pour la pluie, produisant ainsi l'équation de Musgrave (Musgrave, 1947). A partir de 1954, l'USLE a été développée par le département américain de l'agriculture (USDA).

Des études sur de petites parcelles sous pluies naturelles et simulées ont formé la base des données de l'USLE. Jusqu'en 1978, des résultats expérimentaux ont fourni des données supplémentaires pour finalement, donner la forme définitive de l'USLE ([Wischmeier et Smith, 1978](#))

L'équation Universelle de Pertes en sols est un modèle empirique basé sur l'analyse statistique de 10.000 parcelles expérimentales. Elle permet de prédéterminer les pertes en terre annuelles moyennes pour une parcelle donnée, dans des conditions bien définies.

Cette équation se présente sous la forme d'un produit de 5 facteurs indépendants, chacun représente une équation paramétrique à plusieurs variables sous sa forme simplifiée, ce modèle s'écrit :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (I-5)$$

Où

A = perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJmm/ha/an)

K = indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique (tonne. heure / Newton. hectare)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant le couvert végétal (occupation du sol) ;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

Ce modèle présente un certain nombre de points faibles :

Inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé).

Il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe des nombreuses interactions entre ceux-ci.

a-2- Description des différents termes de l'équation-de WISCHMEIER (1975)

- **Le facteur d'agressivité climatique (R)**

Il est défini comme le produit de l'énergie cinétique (E_c) et l'intensité maximale en 30 minutes (I_{30}).

$$R = E_c \times I_{30} \quad (I-6)$$

Avec

$$E_c = 11,9 + 8,73 \log(I) \quad (I-7)$$

E_c : L'énergie cinétique en $J/m^2/mm$ de pluie

I : l'intensité moyenne de la pluie (mm/h).

R : peut-être déterminé pour des périodes variables (1 averse à 1 année).

Lorsqu'il est utilisé comme paramètre du modèle de Wischmeier, l'indice R est généralement calculé comme la moyenne de plusieurs années.

- **Le facteur sol (K)**

Le facteur sol caractérise l'érodabilité du sol, c'est-à-dire sa sensibilité à l'érosion.

Ce facteur sans dimension mesure la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion.

WISCHMEIER propose un mode de calcul de K , à partir des paramètres suivants :

Pour une première approximation :

La somme des pourcentages de limon et sable fins

Le pourcentage de sable

□ La teneur en M.O

Et pour une approche plus précise

□ La structure

□ La perméabilité.

Le nomogramme en figure ci-dessous donne ainsi la méthode de détermination de K.

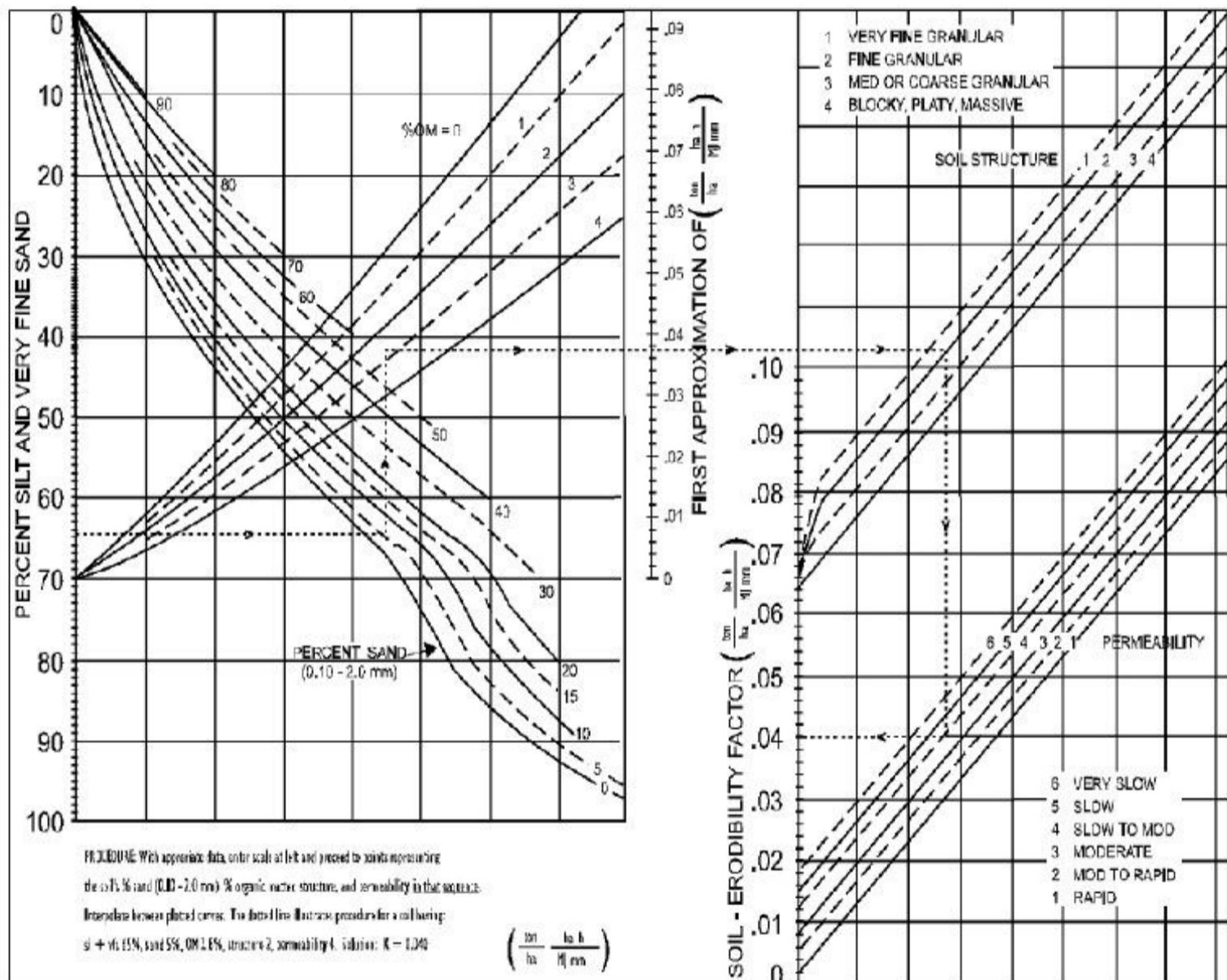


Figure (I-6) :Nomogramme de détermination de l'indice d'érodabilité du sol K(Foster, 1981)

On peut également déterminer K par la formule suivante :

$$100K = 2,1.M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3) \quad (I-8)$$

Où

M est déterminé à partir de :

$M : (\% \text{ sable fin} + \text{ limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile}),$

a : est le pourcentage de matière organique,

b : est le code de la perméabilité,

c : est le code de la structure

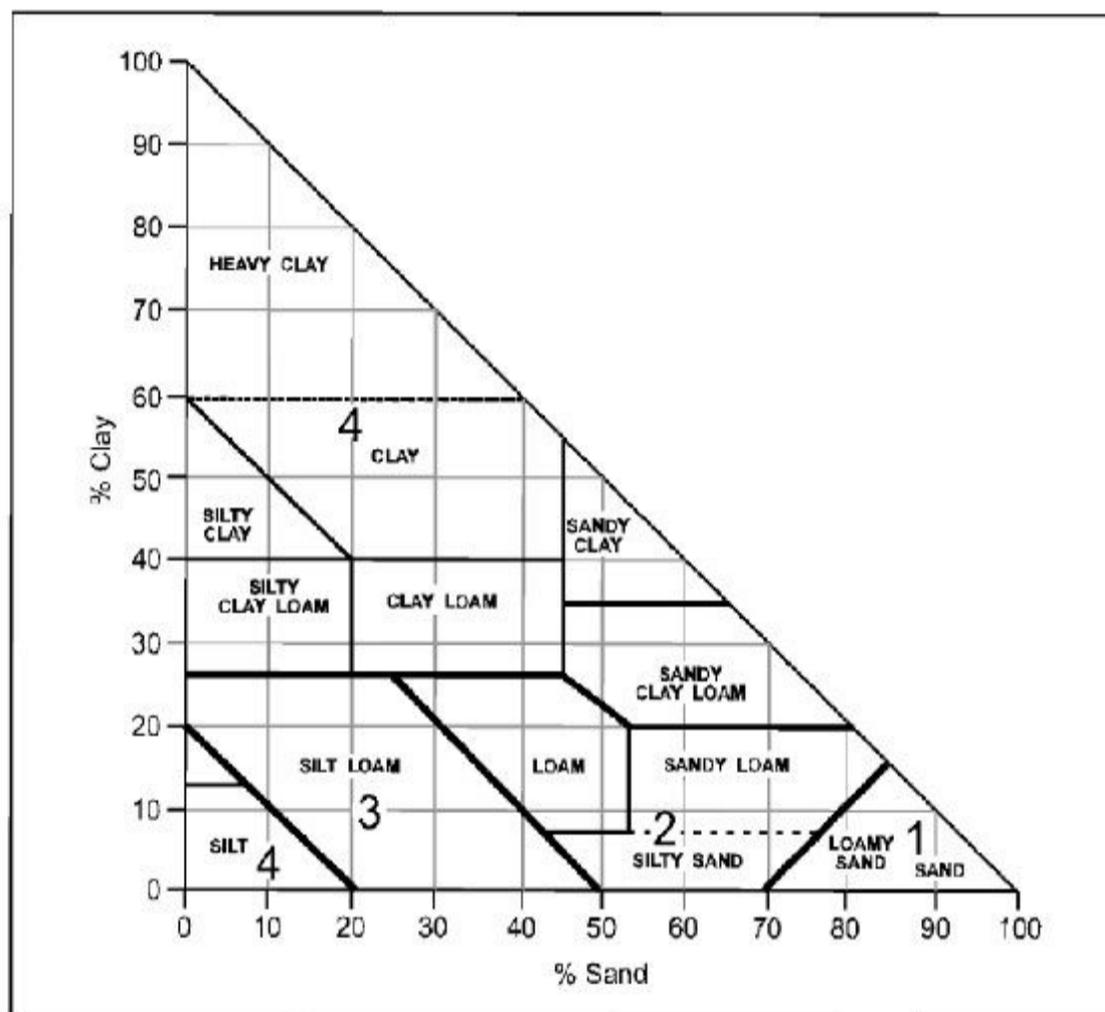


Figure (I-7) : Code Structure basée sur la texture ([Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993](#))

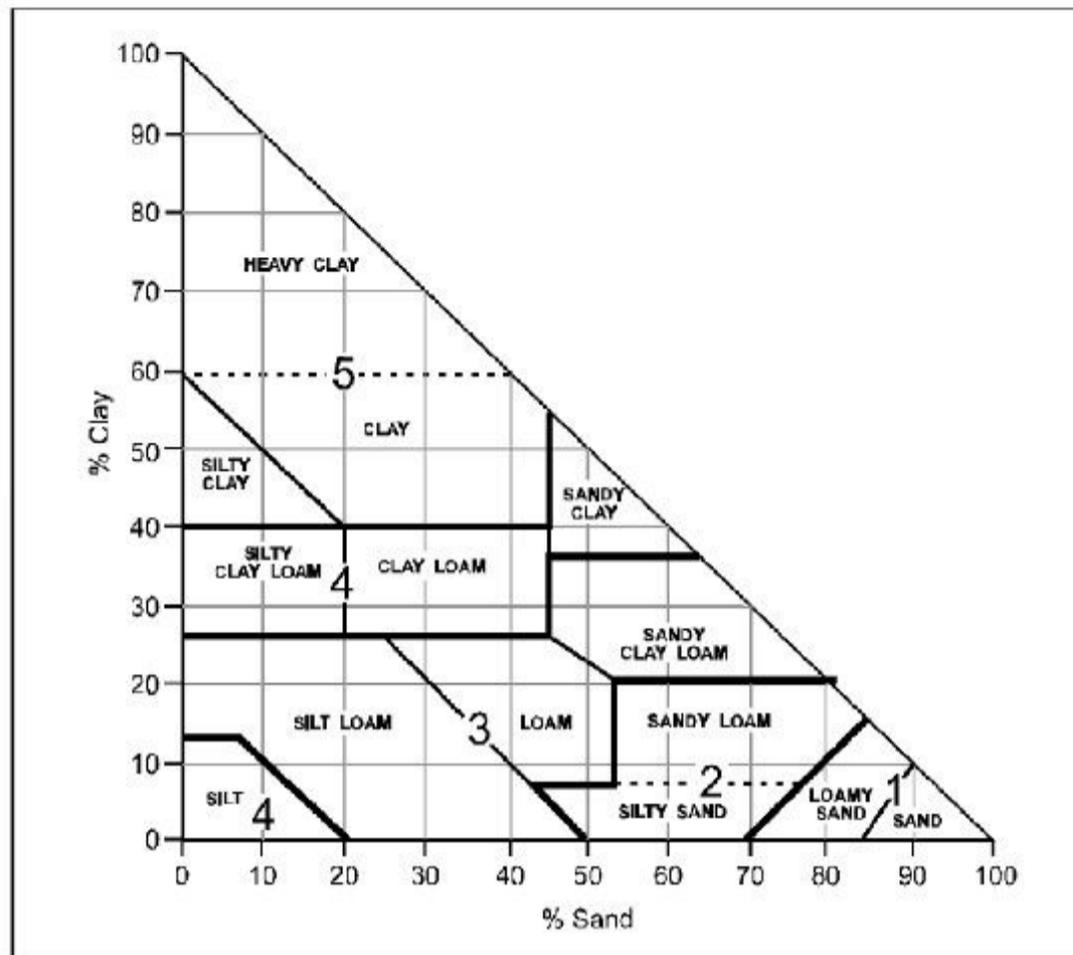


Figure (I-8) : Code de la perméabilité basé sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

Tableau I-1 : quelques valeurs du paramètre K(El Garouani, et al., 2008)

Type du sol	K métrique t/ha
Sol peu évolue lithique	0,32
Sol peu évolue régosolique	0,44
Sol peu évolue d'apport alluvial	0,39
Sol peu évolue d'apport colluvial	0,27
Sol vert	0,36
Sol calcimagnésique rendzine	0,27
Sol fersialitique	0,46

- **Le facteur topographique (LS)**

Il tient compte à la fois de la longueur de la parcelle L et de l'inclinaison de la pente S. Les deux facteurs L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaquas (figure I-7) permettent de quantifier les valeurs du

facteur topographique ; les relations établies par WISCHMEIER permettent également de déterminer L et S :

$$LS = (1/22.13)^m \cdot (0.06543 + 0.045 s + 0.065 s^2) \quad (I-9)$$

L : facteur de longueur de pente (-)

l : la longueur de la pente (m)

22,13 : longueur de la parcelle standard (m)

m : exposant dépendant de plusieurs paramètres dont la pente

m : 0,5 lorsque la pente < 10 %

m : 0,6 lorsque la pente > 10 %

S : le facteur de pente (-)

s : la pente (%)

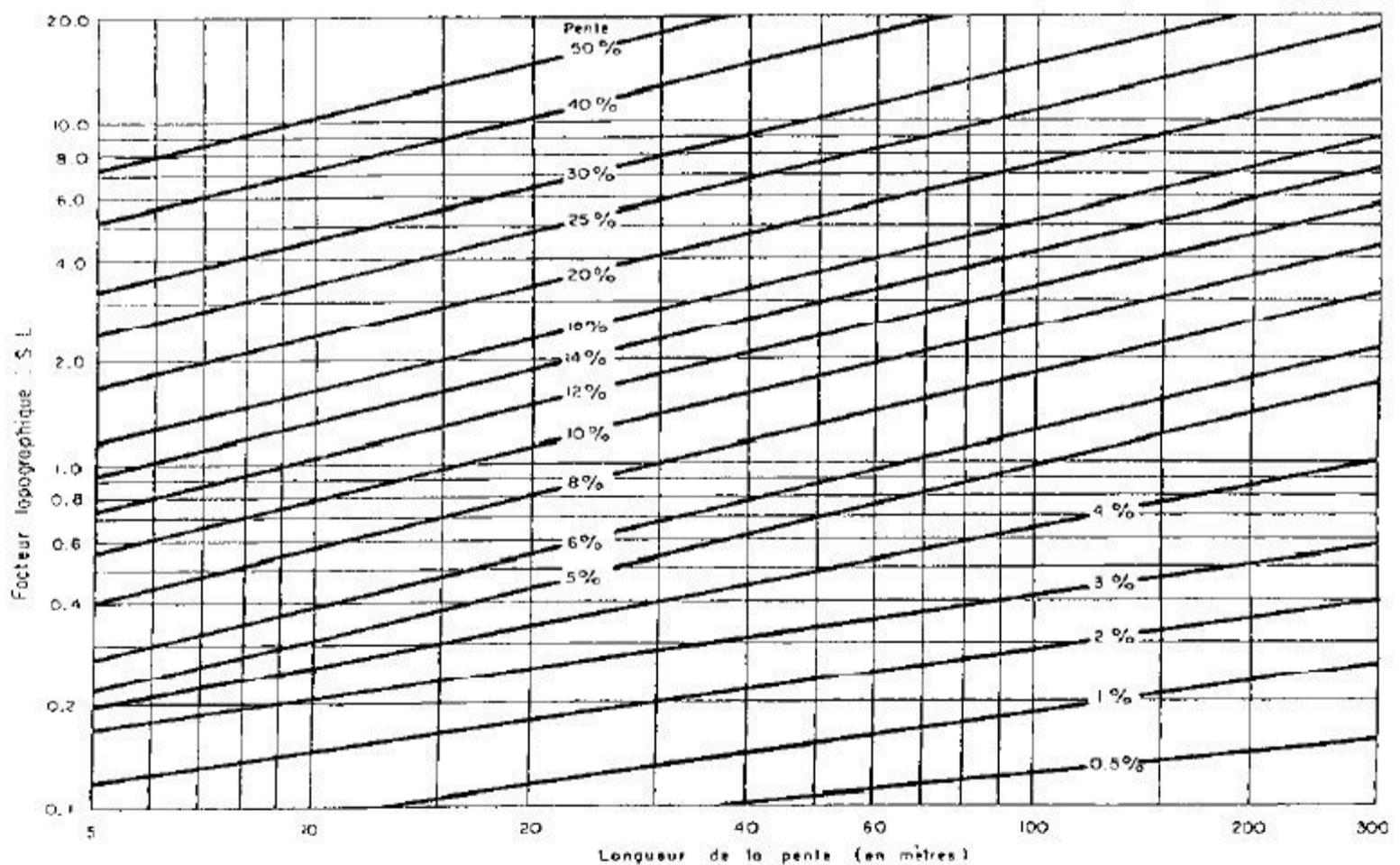


Figure I-9 : Facteur topographique d'après Wischmeier et Smith, 1978

- **Le facteur C ou indice de culture**

Il est défini dans l'équation de l'USLE comme le rapport entre l'érosion mesurée sur une parcelle de référence (jachère nue) et une parcelle test sous une culture bien précise. Il existe des tableaux pour déterminer C en fonction de la couverture végétale, des effets du Much (couche de protection sur le sol) et des techniques culturales.

La valeur du facteur C dépend de plusieurs variables :

La couverture des feuilles et des branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive ;

La couverture végétale au sol composée de résidus de culture et de végétation vivante à la surface du sol ;

La biomasse du sol qui améliore l'écoulement de l'eau dans le sol ainsi que la capacité de rétention et le type et la fréquence de travail du sol qui influent la porosité ;

La rugosité de surface et la compaction du sol.

Chacune de ces variables est traitée comme un sous facteur et C'est le produit de ceux-ci.

Tableau I-2 : Quelques valeurs du paramètre C(El Garouani, et al., 2008)

Type d'occupation de sol	Le facteur C
Badlands/ terrains incultes	0,75
Cultures annuelles	0,26
Cultures extensives	0,28
Agricultures	0,25
Oliviers	0,28

Reboisement	0,15
Foret claire	0,10
Foret normale	0,08

- **Le Facteur P ou indice des aménagements antiérosifs**

Il permet d'évaluer l'action des pratiques visant à modifier la vitesse, le profil, la pente ou la direction de l'écoulement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Par exemple, la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses, la présence de bandes enherbées ou encore l'enherbement des rangs dans le sens de la pente sont des types d'actions antiérosives (Zaher, 2010).

Le facteur P est le rapport de la perte de sol observée sur le terrain étudié travaillé mécaniquement d'une certaine façon et protégé contre l'érosion d'une certaine façon avec celle qui a lieu sur la parcelle de référence où le terrain est labouré fréquemment dans le sens de la plus grande pente.

b- L'équation Universelle des pertes en sol modifiée : MUSLE

L'équation universelle des pertes en sol USLE ne s'applique que pour des données pluviométriques moyennes à l'échelle annuelle. Elle n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse. Le modèle MUSLE a été mis au point pour estimer le transport solide de chaque averse. Il ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais du volume ruisselé (Williams, 1975). L'équation MUSLE (Williams, 1975), se présente sous la forme suivante pour un événement pluvieux donné sur un bassin versant :

$$SY = 11,8. (Q \cdot q_p)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot L_v \cdot LS \quad (I-10)$$

SY: production en sédiments d'un événement particulier (tonnes)

Q : volume de ruissellement consécutif à l'averse (m³) au niveau du bassin versant

q_p : débit de pointe (m^3/s)

L_v : longueur du versant

Les autres termes, K, C, P et LS sont les mêmes que ceux de l'USLE. L'utilisation du MUSLE nécessite des données métrologiques pour connaître les débits et volumes ruisselés.

c- L'équation Universelle des pertes en sol révisée (Renard, 1991)

En 1991, Renard propose la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Cette équation est utilisée aux Etats-Unis depuis cette date en agriculture.

Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin ayant une longueur de 22 m et une pente de 9 % sur jachère nue, c'est-à-dire labourée périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse s'y développer et tel que le sol ne puisse former une croûte superficielle.

Ce modèle empirique a été établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans. Il exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs. E est exprimé en t/ha/an est la perte de sol due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une année :

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (I-11)$$

E : est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an

Les paramètres sont les mêmes que l'USLE et leur détermination se font de la même manière, sauf le paramètre LS qui sera déterminé à partir de l'équation suivante :

$$LS = \lambda \cdot 0,5(0,0076 + 0,0053 \cdot \alpha + 0,00076 \cdot \alpha^2) \quad (I-12)$$

Ou α est la pente en % et $\lambda = (1/22.15)^m$ (I-13)

d-Formule de Henin "1950"

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion pluviale et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule (I-14)

$$E_s = \frac{I_p I}{K V_e} \quad (\text{I-14})$$

Avec : I_p : Intensité des précipitations.

I : Pente du bassin versant.

S : Susceptibilité des sols.

K : Perméabilité du sol.

V_e : Végétation.

Les facteurs S , K et V_e limitent l'érosion et en plus, les facteurs S et V_e semblent les plus difficiles à quantifier.

e- Formule de Gavrilovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, la pluie et un coefficient de l'érosion, l'équation est donnée par l'expression (I-15) :

$$E_s = 3,14 \cdot T \cdot P_o \sqrt{Z^3} \quad (\text{I-15})$$

Où E_s : érosion spécifique dans le bassin versant (T/km².an)

T : coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (\text{I-16})$$

Avec : t_0 : température moyenne annuelle en °C.

P_o : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient de l'érosion.

Avec :

$$Z = y.[x.a].\left(\delta + \sqrt{I_{\text{moy}}}\right) \quad (\text{I-17})$$

Où y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat varie entre 0,05 et 1,0.

[x.a] : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.

δ : Coefficient qui exprime le type et degré des processus visibles d'érosion dans le bassin versant.

I_{moy} : indice de pente moyenne du bassin versant.

f-Formule de L'A.N.R.H (1970)

$$T_{\text{ss}} = 26.62 I_e + 5.071 I_p + 9.77 C_t - 593,59 \quad (\text{I-18})$$

T_{ss} : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km².an)

I_e : indice lithologique (%).

I_p : indice des précipitations (%).

C_t : Coefficient de torrentialité :

$$C_t = D_d \cdot F_1 \quad (\text{I-19})$$

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A} \quad (\text{I-20})$$

D_d : densité de drainage

L_1 : longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (K m).

F_1 = nombre de talweg/ surface fréquence des talwegs élémentaires

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\% \quad \text{et} \quad I_p > 300$$

g- Formule de Tixeront (1960)

$$Es = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \quad (I-21)$$

Avec : Es : Erosion spécifique (t/Km².an).

Ta_1, Ta_2, \dots, Ta_n : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins (T/Km²).

S : superficie totale du bassin (Km²).

S_1, S_2, S_n : Superficie des sous bassins (Km²).

En supposant que la totalité du bassin possède une même perméabilité

La formule (I-21) devient :

$$Es = K \cdot Le \quad (I-22)$$

Le : lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle en (mm).

K : un coefficient qui est déterminé en fonction de la perméabilité des terrains.

K : 8,5 pour les terrains d'une perméabilité élevée.

K : 75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

K : 350 pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

K : 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible.

K : 3200 pour les terrains perméables.

h- Formule de Fournier (1960)

$$Q_s = \frac{1}{36} \cdot \left[\frac{P}{P_a} \right]^{2,65} \cdot \left[\frac{H_{\text{moy}}}{S} \right]^{0,46} \quad (\text{I-23})$$

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (en T/Km².an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (en mm).

H_{moy} : l'altitude moyenne (en mm).

P_a : la pluviométrie moyenne interannuelle (en mm).

S : superficie du bassin versant (en Km²).

i-Formule de Poliakov

$$Es = A \cdot K \cdot Q \cdot I^{1/2} \quad (\text{I-24})$$

Q : Débit de ruissellement de surface.

K : proportionnalité.

I : la pente moyenne du bassin versant.

$A = 0,5-10$: Coefficient d'érosion variant en fonction des types de sol.

j- Formule de Meddi(2015)

$$Ds = 16115,58 \cdot Q_l^{0,67} \cdot S^{-0,52} \cdot IMF^{0,10} \quad (\text{I-25})$$

Ds : Dégradation spécifique (tonne/km²/an).

Q_l : Débit liquide annuel (m³/s).

S : Surface du bassin versant (km²).

IMF : Indice de Fournier modifié donné par la formule suivante

$$IMF = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (I-26)$$

P : la pluviométrie annuelle (en mm).

P_i: la pluviométrie mensuelle (en mm).

I-6- L'impact et conséquence de l'érosion

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'une région à une autre. [Kanwar\(1982\)](#) a montré que sur 13.500 millions d'hectares des surfaces exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'au taux de 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, dans trois siècles toutes les terres cultivables seront disparues([Roose, 1994](#)).

L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale, mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme le cas de la région du Nord Afrique et plus particulièrement en Algérie (données d'envasement des barrages de l'ANBT).

Les conséquences économiques se font sentir à deux niveaux :

- D'une part, on constate une réduction de la production nationale agricole en dépit de l'extension des surfaces agricoles suite à la dissection des surfaces cultivées et à la dégradation de leur fertilité. D'après [Sari \(2002\)](#), dans l'Ouarsenis, en 90ans, les paysans ont perdu le tiers de la superficie cultivable.

- D'autre part l'érosion réduit par envasement la capacité des réserves en eau des barrages au rythme de 20 millions de m³/an. En outre 120 millions de tonnes de terre est le préjudice annuel dû à l'envasement estimé à 1% des investissements consentis à leur réalisation. La durée de vie moyenne de ces barrages en Algérie est d'environ 30 années selon ([Kadik, 1987](#)).