

5.2 MODELISATION DE L'EROSION PAR CALCUL DE REGRESSION

Notre objectif dans cette analyse sera de trouver un modèle régressif pouvant expliquer la relation perte en terre – ruissellement pour le phénomène d'érosion en nappe rencontré dans le BV.

Pour ce faire, les séries de données mensuelles concernant la pluviométrie, le ruissellement et la perte en terre issus de l'expérimentation sur parcelle élémentaire d'érosion faite par la CTFT dans le bassin entre 1961 et 1966 constitueront notre base de donnée. (voir **ANNEXE 2**)

5.2.1 Présentation des données

Une étude en parcelle élémentaire a été orchestrée par la division de Lutte contre l'Erosion du CTFT, en collaboration avec le Service des Eaux et Forêts de Toliara et la section DRS d'Antananarivo.

Le but de l'expérimentation était de chiffrer l'influence des traitements de régénération des prairies sur sol sableux de versant à faible pente.

Nonobstant, pour notre étude, ces données nous serviront à analyser le comportement de l'érosion sur ces sols fragiles du BV.

Le dispositif est mis en place en 1961 et comporte 3 parcelles de 200 m². Ces parcelles sont chacune équipées de cuve réceptrice en métal et d'un pluviographe à augets :

Tableau 21: Description des parcelles élémentaires de ruissellement et d'érosion (CTFT, 1961)

PARCELLE	DESCRIPTION
A	Prairie dégradée traitée par 2 traits de labour + mis en défens
B	Prairie dégradée pâturée à refus
C	Prairie dégradée simplement mis en défens

5.2.2 Analyse et Interprétation des données

En ce qui concerne notre BV et sa complexité, il s'étale sur plus de 1900 ha, rive droite, et est constitué par les tributaires de la rivière Taheza. Ces ruisseaux ont des régimes d'oueds, sur lits de sable. Les terrains sont des sols se sable roux, phase humifère en général, dérivant de la série géologique des grès de l'Isalo. Le climat est celui du Sud-Ouest de Madagascar avec 517 mm d'eau par an¹⁶.

Le tableau suivant résume le bilan annuel des mesures prises sur ces parcelles.

Tableau 22: Bilan annuel des mesures sur parcelles

Campagnes ¹⁷		1962 (1/2 campagne)	1962-1963	1963-1964	1964-1965	1965-1966
Pluviométrie [mm]		427.2	645.5	531.5	812.3	915.4
A	Ruissellement [mm]	40.8	47.8	26.4	35.9	65.3
	Ruis. /Pluvio. [%]	9.6	7.4	5.0	4.4	7.1
	Max observé [%]	27.6	21.7	16.9	11.1	16.7
	Pertes en terre [T/ha]	5.5	2.6	1.0	1.4	3.1

¹⁶ Estimation de la pluviométrie moyenne annuelle en 1966

¹⁷ Remarque générale : quand nous parlerons de l'année 1963, 1964 etc..., il s'agit bien entendu des campagnes 1962-63, 1963-64, etc..., sauf pour 1962 où nous n'avons qu'une demi-campagne.

B	Ruissellement [mm]	67.3	87.9	37.0	58.3	100.6
	Ruis. /Pluvio. [%]	15.8	13.6	7.0	7.1	10.9
	Max observé [%]	37.4	35.1	22.7	19.9	27.5
	Pertes en terre [T/ha]	5.0	4.0	1.3	1.5	2.9
C	Ruissellement [mm]	47.2	54.6	30.9	62.2	125.0
	Ruis./Pluvio. [%]	11.0	8.5	5.8	7.6	13.6
	Max observé [%]	25.4	23.6	20.0	24.6	34.3
	Pertes en terre [T/ha]	3.7	1.7	1.1	3.0	4.8

A premier abord, on remarque la grande variabilité des conditions climatiques par la valeur des pluviométries annuelles. Ces dernières varient du simple au presque le double de la valeur moyenne. Et étant donné que les conditions pluviométriques sont des facteurs d'érosion, cette variabilité nous incite à être très prudents quant à l'interprétation des résultats, à ne comparer que des chiffres comparables et pour cela à définir les problèmes posés et les limites dans lesquels il est permis de tirer des conclusions plus ou moins généralisables.

En nous mettons en accord avec le point de vue du CTFT d'antan, il est évidemment intéressant de faire les deux comparaisons suivantes :

- *comparaison A/B* : pour voir si le travail du sol par trait de labour à un impact positif sur le ruissellement et la reconstitution du sol ;
- *comparaison C/B* : pour déterminer l'effet négatif du surpâturage.

5.2.2.1 Comparaison A/B

Ces 2 parcelles étant très semblables (parcelles attenantes et même type de couverture végétale), la comparaison direct sera donc possible et valable.

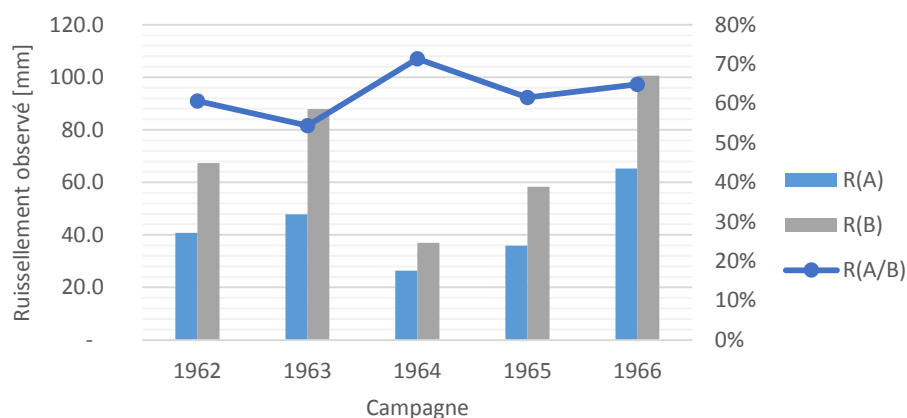
Pertes en terre : Pendant la première année, 1962, on note que les pertes en terre sur la parcelle A sont légèrement supérieur à ceux de B, probablement à cause de l'instabilité structural du sol dû au travail du sol. Mais ceci chute rapidement l'année suivant passant aux 2/3 de la parcelle mis en défens. La différence entre ces deux parcelles diminue à partir de la troisième année et vient à s'égaliser vers la quatrième et la cinquième année, sans doute dû à l'estompage progressif de l'effet des traits de labour.

On peut donc dire que, du point de vue des pertes en terres, le travail du sol accélère nettement la régénération du couvert faisant gagner 2 à 3 ans comparé à l'effet du mis en défens seul. Cependant, un entretien régulier annuel est à entreprendre pour faire perdurer les impacts positifs de ce type d'action antiérosive.

Ruissellement : Le bilan des 5 campagnes nous montre nettement que le traitement en A favorise l'atténuation des ruissellements par rapport à B. La valeur du ruissellement en A comparé à B garde un ratio moyen de 55 – 71% durant la période de mesure et se stabilise aux alentours de 65% vers la cinquième campagne malgré la régénération du couvert ($R_A/R_B=65\%$).

Du point de vue bilan de l'eau, il est donc certain que le travail du sol améliore considérablement la capacité d'infiltration dans un milieu, et ceci de manière plutôt durable.

Figure 21: Ruissellement en A en % de B

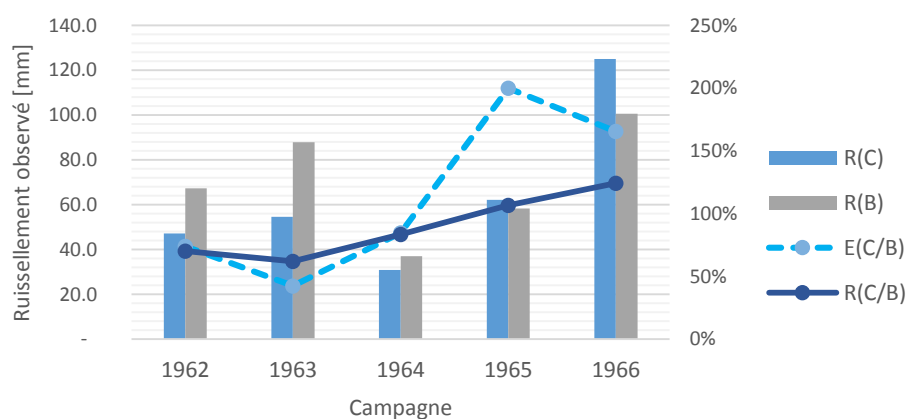


5.2.2.2 Comparaison C/B

La comparaison entre ces deux parcelles est plus ou moins délicate du faite que leur état initial est assez différent surtout concernant l'état du couvert végétal, celui en C est notamment plus meilleur. Aussi il n'est pas étonnant de constater que pendant les trois premières années les pertes en terre et le ruissellement sur la parcelle C sont inférieures à ceux de B, cas qui, à première vue, paraît illogique du faite que les deux parcelles ont subi le même traitement au départ.

Par contre, en analysant les résultats du rapport entre les valeurs de C et B ($R_{C/B}$ et $E_{C/B}$), on peut apprécier la dégradation brutale de la parcelle C dont le ruissellement ne fait que croître à partir de la deuxième campagne et dont les pertes en terre atteignent jusqu'à 2 fois celles observées sur B.

Figure 22: Ruissellement et Perte en terre en C en % de B



Bien qu'avec plus de réserves que dans la comparaison précédente, nous pouvons conclure que l'évolution régressive de la parcelle C est indiscutable surtout quand on la compare à celle de la parcelle B qui, elle, a vu son couvert se reconstituer par la mise en défens.

5.2.2.3 Conclusion sur l'interprétation générale des données

En ce qui concerne le ruissellement, tout d'abord, on constate l'efficacité certaine du travail du sol par traits de labour isohypses pour diminuer de façon durable celui-ci en créant des

zones d'infiltration préférentielle dans l'horizon superficiel induré. On note aussi que, contrairement à ce qui se passe pour les pertes en terre, les ruissellements maxima n'évoluent que très lentement en fonction de l'état de la couverture végétale. Donc, dans le cas où la protection présente un caractère d'urgence, la méthode du « contour furrow » est la seule qui puisse donner rapidement des résultats positifs.

Pour l'étude des pertes en terres, on peut noter l'action bénéfique du labour en bande et de la mise en défens ainsi que l'action nettement dégradante du surpâturage.

5.2.3 Traitement et Modélisation des données

5.2.3.1 Condition de validation du modèle

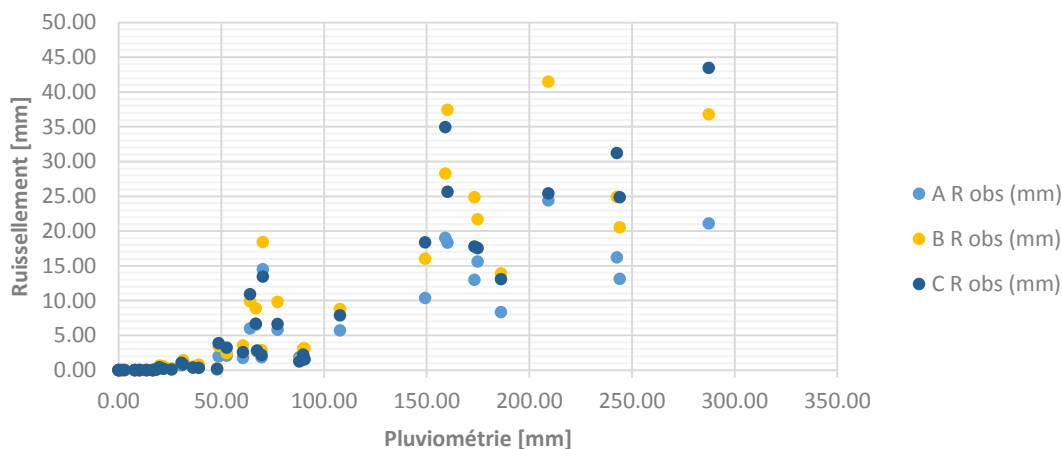
Cinq (5) modèles seront ajustés aux données expérimentales : linéaire, logarithmique, puissance, exponentielle, et polynomiale, pour pouvoir par la suite effectuer une comparaison.

La valeur du coefficient de détermination r^2 pour un risque d'erreur $\alpha = 5\%$ justifiera le choix du modèle.

5.2.3.2 Relation Ruissellement-Pluviométrie

L'examen visuel du diagramme de dispersion montre l'existence d'une corrélation que ce soit pour la totalité des données (des 3 parcelles), ou pour les données prises par parcelles

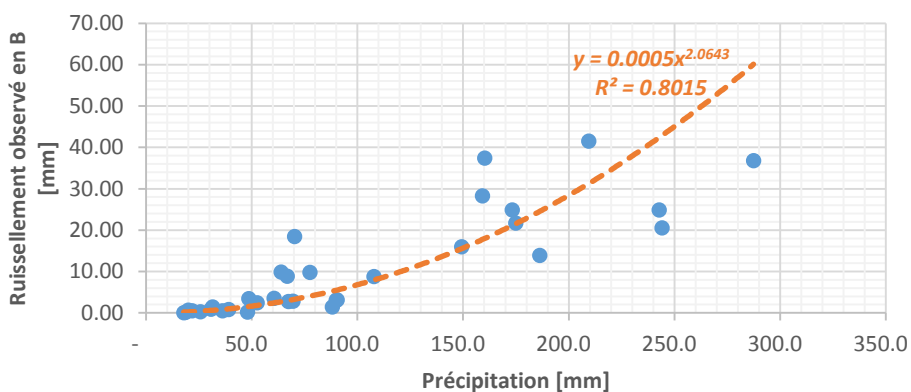
Figure 23: Diagramme de dispersion R-P



Cependant, compte tenu des différents paramètres exogènes intervenant dans la modification du mécanisme du ruissellement en A et C (travail du sol, pâturage), qui sont difficilement chiffrable, on ne tiendra en compte pour la recherche de la relation *ruissellement-précipitation* que la parcelle B dont les données fournies sont les plus « naturelles » par l'absence d'intervention.

Après les différents étapes de calcul de régression, le meilleur ajustement est obtenu par le modèle puissance même si la signification reste assez appréciable avec 80,15% d'explicité d'après le coefficient de détermination r^2 .

En effet, on remarque des différences comparatives plus ou moins notables sur la valeur des lames ruisselées engendré par une quantité de pluie plus ou moins similaire. Des différences allant jusqu'à 15 mm pour certain cas.



On peut émettre une hypothèse que les variations du ruissellement observé pour une même valeur de précipitation et une même parcelle sont dues à l'évolution de la couverture végétale et/ou l'humidité du sol résultant des événements pluvieux antérieurs. Malheureusement, ces types de paramètres n'ont pas été analysés lors de cette expérimentation de 1966. On peut donc dire que le ruissellement varie selon l'état du sol au moment où il reçoit la pluie.

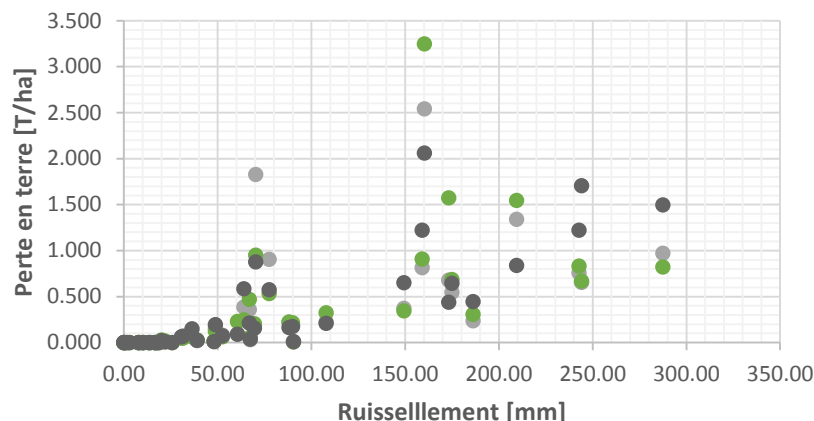
Parcelle B : mis en défens seul		
r^2	$R = f(P)$	Modèle
0.716	$0.1205P$	linéaire
0.6609	$12.373 \ln P - 42.433$	logarithmique
0.749	$-0.0002P^2 + 0.1881P - 5.2547$	polynomiale
0.8015	$0.0005P^{2.0643}$	puissance
0.582	$e^{0.0154P}$	exponentielle

Pour les parcelles A et C, les faibles valeurs des coefficients de détermination issu de la modélisation peut être interprété comme une manque d'information, d'autres paramètres biophysiques non prise en compte qui peuvent servir à expliquer le ruissellement selon l'état type de la parcelle.

Parcelle	r^2	$R = f(P)$
A	0.7267	$0.0013P^{1.7717}$
C	0.7586	$0.0006P^{1.9876}$

5.2.3.3 Relation Perte en terre-Ruissellement

Figure 24: Diagramme de dispersion E-R



De même, par un simple examen visuel du diagramme de dispersion on peut affirmer l'existence d'une corrélation que ce soit pour la totalité des données, ou pour les données prises par parcelles.

Le modèle puissance a été retenue comme meilleur modèle d'ajustement si l'on compare les résultats des autres modèles testés. L'approche adoptée a été la régression par parcelle pour optimiser la corrélation mais aussi à cause des différences de paramètres intervenants sur chaque parcelle.

Parcelle A : 2 traits de labour + mis en défens		
r^2	$E=f(R)$	Modèle
0.6138	$0.0633R$	linéaire
0.4632	$0.2616 \ln R + 0.1547$	logarithmique
0.6153	$-0.0005R^2 + 0.0732R - 0.0131$	polynomiale
0.7972	$0.0619R^{0.9261}$	puissance
0.6701	$0.0512e^{0.1768R}$	exponentielle

Parcelle B : mis en défens seul		
r^2	$E=f(R)$	Modèle
0.6981	$0.0436R$	linéaire
0.4268	$0.2293 \ln R + 0.163$	logarithmique
0.7082	$0.0005R^2 + 0.028R - 0.0312$	polynomiale
0.787	$0.0489R^{0.8835}$	puissance
0.6845	$0.0633e^{0.1007R}$	exponentielle

Parcelle C : parcelle de pâturage		
r^2	$E=f(R)$	Modèle
0.7753	$0.0428R$	linéaire
0.5916	$0.255 \ln R + 0.1233$	logarithmique
0.796	$-0.0005R^2 + 0.0587R - 0.0147$	polynomiale
0.818	$0.0567R^{0.8738}$	puissance
0.6331	$0.0614e^{0.1076R}$	exponentielle

On remarque que pour ces modèles puissances, la valeur de chaque exposant avoisine la valeur de l'unité (=1), ce qui peut être traduit comme une tendance à la linéarité du modèle. De ce fait, on pourrait déduire des interprétations relatives aux pertes en terre dans chaque parcelle via le modèle linéaire.

Le coefficient de détermination r^2 du modèle puissance en C est le plus élevé, modèle pouvant expliquer jusqu'à 82% des variations de la perte en terre avec le ruissellement comme seul paramètre considéré. Ceci peut expliquer le rôle plutôt prépondérant de l'énergie cinétique du ruissellement dans le processus d'érosion dans cette parcelle, vu que le sol a été plus ou moins mis à nu par le (sur)pâturage rendant assez négligeable l'action du couvert végétal.

En A, le coefficient de détermination du modèle puissance est de 79,72%, mais celui du modèle linéaire est la plus bas des 3 parcelles. Le ruissellement ne constitue donc pas le facteur majeur de l'érosion, puisque seulement 61% des variations de la perte en terre en fonction du ruissellement est expliqué de façon linéaire, le reste peut être rattaché au paramètre relatif au travail du sol effectué.

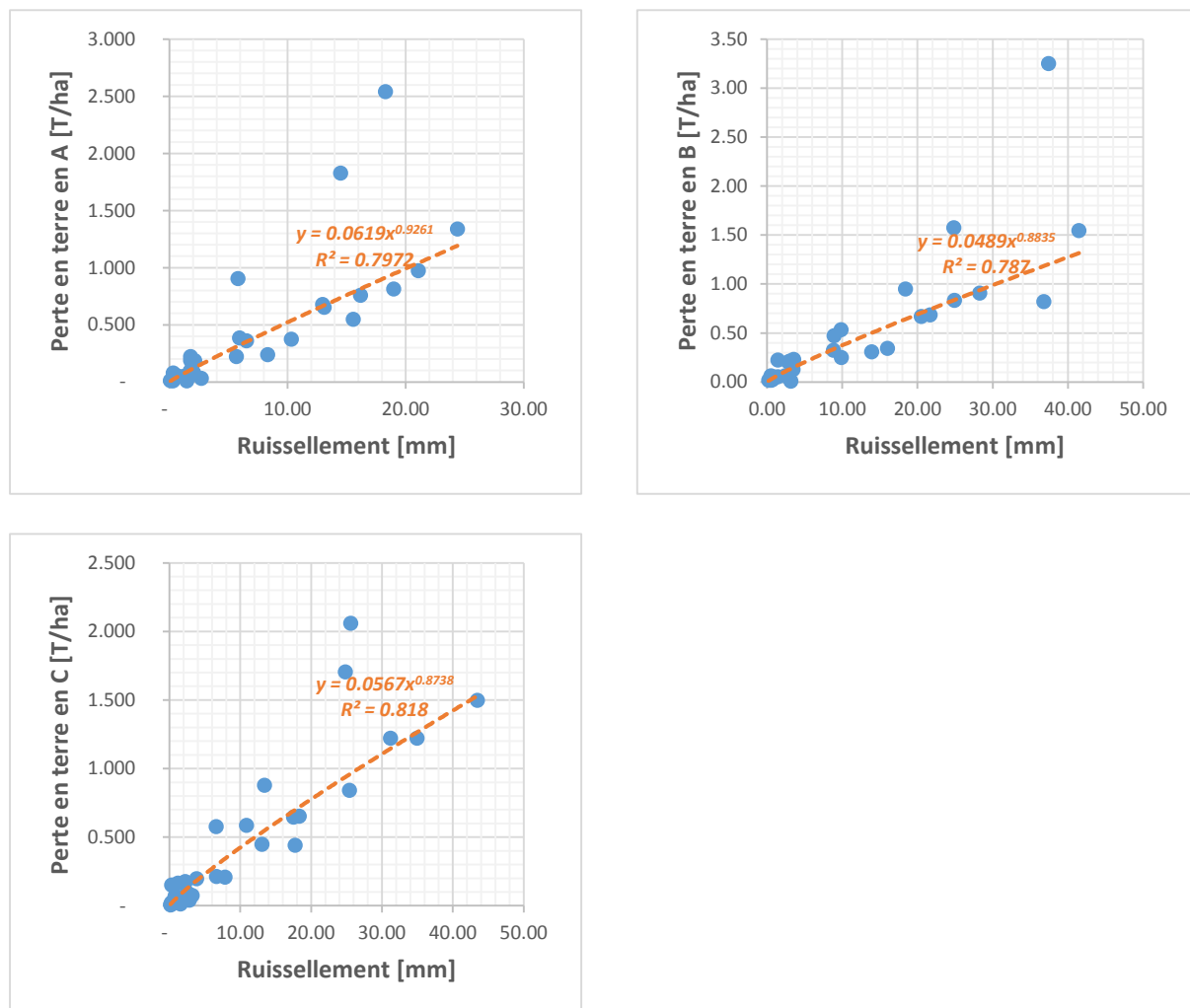


Figure 25: Relation [Perte en terre – Ruissellement] pour les 3 parcelles élémentaires

5.2.3.4 Comparaison avec d'autre modèle

Ici, nous allons comparer les valeurs du ruissellement estimé par le modèle régressif calculé plus haut avec la méthode du SCS.

Cette méthode dite du SCS (Soil Conservation Service USA) est apparue vers 1950. C'est le fruit de plus de vingt années d'analyse des relations *pluies-débits* sur des bassins versants ruraux de petite taille. Elle a été développée par Horner, Horton et Sherman après avoir analysé les résultats obtenus à l'aide d'infiltromètres. Sherman sera alors le premier à proposer une représentation graphique du ruissellement en fonction de la pluie.

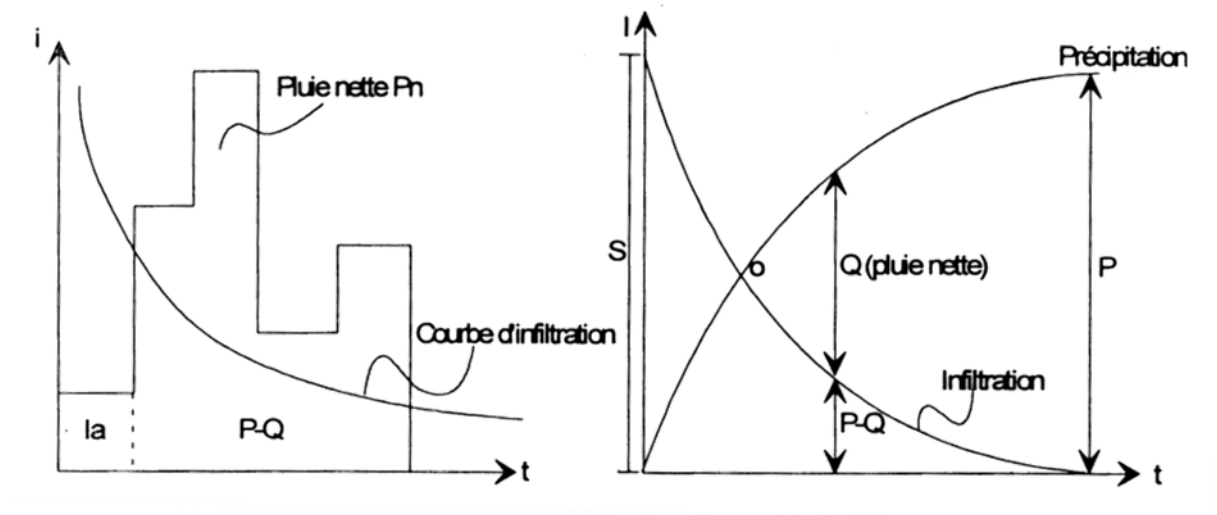


Figure 26: Méthode du SCS

- P : précipitation totale (pluie brute)
- Q : pluie nette (précipitation participant au ruissellement) = R
- $P-Q$: pertes additionnelles (précipitations infiltrés après le début du ruissellement)
- S : pertes maximales potentielles
- Ia : pertes initiales

Et l'expression de la pluie nette proposée par le SCS s'écrit :

$$Q = R = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P - 0,8.S}$$

Afin de standardiser les courbes représentant la pluie nette en fonction de la pluie brute, le SCS a introduit un paramètre sans dimension se nommant « *Curve Number* » (CN). Ce paramètre est normé tel que $0 < CN \leq 100$ et s'exprime par :

$$CN = \frac{25400}{S + 254}$$

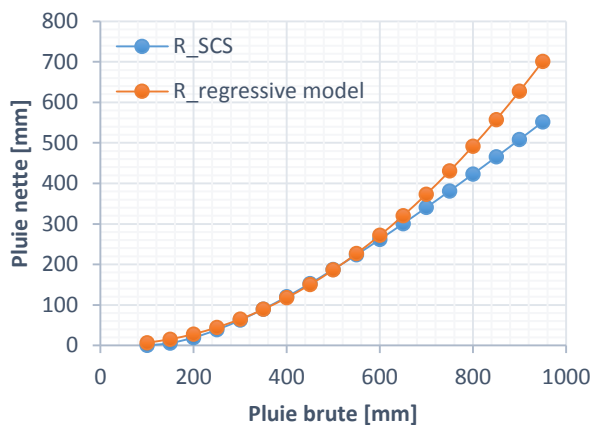
et on a : $S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$

Enfin, le SCS a établi des relations entre les valeurs du CN en fonction du type et d'utilisation de différents sols (voir **ANNEXE 4**)

En ce qui concerne nos parcelles, elles sont implantées sur un sol ferrugineux tropical à texture sableux ou argilo-sableux (l'induration de la surface n'y est pas importante), et sur savane herbeuse. Donc par identification, on prendra $CN=35$.

On peut alors remarquer d'après le graphe ci-dessous que les deux (2) courbes représentatives, l'une pour le modèle SCS et l'autre pour notre modèle régressif, présentent une similitude du point de vue de leur évolution. Les valeurs de ruissellement donnés par les deux modèles sont même presque identiques jusqu'à une certaine valeur de la précipitation. Et ceci peut être donc interprété comme une condition de validation de notre modèle.

Figure 27: Comparaison entre le modèle SCS et le modèle régressif trouvé



5.3 MESURE DU DEBIT SOLIDE DU SAKASAKA

5.3.1 Condition de mise en transport des grains

D'après les critères de Shields, l'érosion du lit est initié quand l'ensemble des grains de diamètre déterminé commence à charrier sur le fond plat, ceci est vérifié quand la valeur de τ^* atteint ou dépasse 0.047 selon Ramette. Pour le cas d'un transport solide total (charriage et suspension, mais pas auto-suspension), la valeur de ce paramètre doit atteindre 0,25

$$\tau^* = \frac{R \cdot i}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \cdot d}$$

τ^* : rapport des forces hydrodynamiques agissant sur les grains = $\frac{F}{P}$

$d = d_{50}$: diamètre médian des grains du fond

ρ_s : masse volumique des particules solides = 2600 – 2700 [kg/m³]

ρ_w : masse volumique de l'eau = 1000 [kg/m³]

$\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)$: densité relative des particules solides

i : pente du fond

R : rayon hydraulique

Tableau 23: Classification de Ramette (1981)

$\tau^* < 0,027$	le grain de diamètre d est au repos
$0,027 < \tau^* < 0,047$	apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide
$0,047 < \tau^* < 0,062$	le grain est charrié sur fond plat
$0,062 < \tau^* < 0,25$	le grain est charrié par dunes
$0,25 < \tau^* < 2,5$	le grain est charrié par dunes en suspension
$\tau^* > 2,5$	le grain est transporté en suspension

Donc :

$\tau^* > \tau^*_{critique} = 0,047$ pour qu'il y ait un début de charriage au fond

$\tau^* > \tau^*_{critique} = 0,25$ pour qu'il y ait transport solide total (charriage + suspension)

Et à cette valeur critique correspond à une hauteur critique h_{cr} qui désigne la hauteur minimale de la lame d'eau ruisselante à partir de laquelle on s'attend à l'érosion du fond des sakasaka.

Dans le cas du sakasaka Horia, où $d_{50} = 0,7\text{mm}$, la largeur moyenne du sakasaka étant de 15m et la pente moyenne $i = 1\%$. Le transport solide total est à espérer dès une hauteur d'eau $h_{cr} = 2,8\text{cm}$!

Cette valeur de h_{cr} sur l'Horia est très petit comparé à la valeur de la hauteur de crue estimé par les laisses de crues qui est d'environ à 0,9m. Ce qui fait donc que chaque crue provoque un transport solide important au sein du sakasaka. D'où la quantité considérable du dépôt de sédiment à l'exutoire.

On peut aussi déduire que la taille maximale des grains pouvant être mis en mouvement (charriage) par une crue de 0,9m sur l'Horia est de $d = 6\text{cm}$, ce qui rentre dans la catégorie

des cailloux. Pour ce qui concerne le transport en suspension, une telle crue peut transporter les grains jusqu'à une taille $d=1,12\text{mm}$, donc les gros sables.

5.3.2 Débit solide total à saturation

Nombre de chercheurs hydrauliciens ont cherchés à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreux modèle réduit ou directement sur les cours d'eau. Ces différentes formules donnent rarement des valeurs comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. La formule universelle de transport solide n'existe pas.

Pour notre étude, trois différentes formules seront utilisées, formules parmi les plus employées pour la détermination du transport solide total (charriage et suspension, mais pas auto-suspension) car le ratio entre les valeurs calculés et observés est supérieur à 50%. Ces formules évaluent la capacité de transport solide constitué de sédiments présents au fond du lit.

i. **Formule 1** : Engelund et Hansen (1967)

Pour $0,15\text{ mm} < d_{50} < 5\text{ mm}$ et $\tau^* > 0,25$

Débit solide total en volume de grains à saturation (exprimé en $[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$)

$$q_s = 0,0062 \cdot K^2 \cdot R^{17/2} \cdot i^{5/2} \cdot d^{-1}$$

K : coefficient de rugosité du lit et des berges de Strickler = $a / d_{50}^{1/6}$ où $a = 21 - 24$

ii. **Formule 2** : Graf et Acaroglu (1968)

Pour $0,3\text{ mm} < d_{50} < 1,7\text{ mm}$

$$\phi = 10,39 \cdot \varphi^{-2,52}$$

avec :

$$\phi = \frac{C_s \cdot U \cdot R}{\sqrt{(\rho_s/\rho_w - 1) \cdot g \cdot d^3}} : \text{paramètre de transport}$$

$$\varphi = \frac{(\rho_s/\rho_w - 1) \cdot d}{i \cdot R} : \text{paramètre de détachement}$$

$$q_s = C_s \cdot U \cdot R$$

d'où :

$$q_s = 10,39 \cdot \left\{ \frac{1,6 \cdot d}{i \cdot R} \right\}^{-2,52} \cdot \sqrt{1,6 \cdot g \cdot d^3} \cdot \frac{h}{R}$$

iii. **Formule 3** : Ackers et White (1973)

Pour $0,04\text{ mm} < d_{50} < 4,0\text{ mm}$ et $Fr > 0,8$

$$\log C = 2,86 \cdot \log d^* - (\log d^*)^2 - 3,53$$

avec :

$$C = \frac{q_s}{q} \text{ alors } q_s = q \cdot C$$

$$d^* = \left(d \cdot 26 \cdot \frac{g}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} = 24 \cdot (d - 0,04) + 1$$

d'où :

$$q_s = q \cdot 10^{\{2,86 \cdot \log d^* - (\log d^*)^2 - 3,53\}}$$

Le débit en phase liquide du sakasaka sera calculé à l'aide de l'équation de Manning-Strickler, en assimilant le sakasaka à un canal à section rectangulaire compte tenu de ses parois verticales abruptes.

$$Q = K \cdot S \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}$$

avec :

$$Q [m^3/s] = q \cdot L \text{ donc } q [m^3/s/m] = \frac{Q}{L}$$

Tableau 24: Débit solide sur l'Horia

	$q_s [m^3/s/m]$	$Q_s [m^3/s]$	$G_s [kg/s]$
ENGELUND & HANSEN	0.00449	0.06293	163.614
GRAF & ACAROGLU	0.02110	0.29547	768.211
ACKERS & WHITE	0.03801	0.53210	1383.463
MOYENNE	0.02120	0.29683	771.763

Q_s : débit solide, en charge total, en volume = $q_s \cdot L$

G_s : débit solide, en charge total, en masse = $Q_s \cdot \rho_s$

Pour le cas du sakasaka Horia, on estime un débit solide de **770 kg/s** pour une hauteur de crue moyenne de 0,9m. Une valeur considérablement élevée, mais qui peut expliquer l'importance des dépôts solides observés dans les parties de ce sakasaka où le changement de paramètre physique et topographique fait que le débit solide dépasse la capacité de transport (élargissement de la largeur du lit, amoindrissement de la pente du fond en allant vers l'exutoire, infiltration de l'écoulement sur le lit de sable, ...)