

AMENAGEMENT D'UNE RAVINE EN ASSOCIATION AVEC LES AGRICULTEURS :
CAS DE LA RAVINE DE SAGARA (MUMIRWA CENTRAL, BURUNDI).

Hervé DUCHAUFOUR, Marc LEBRETON, Melchior BIZIMANA et Joelle LECUYER
et le concours de Canisius MIKOKORO et Epogémine SINDAKIRA

*Projet de Recherche pour la Protection de l'Environnement
(ISABU/FAC)*

PARTIE I : Etude du fonctionnement hydraulique

RESUME

Le Mumirwa est la région montagneuse située à l'Est de la plaine de l'Imbo. Elle constitue le versant Ouest de la chaîne de montagne "crête Zaïre-Nil" qui domine Bujumbura. Le relief y est très accidenté avec des pentes abruptes supérieures à 60% en moyenne.

Pourtant, malgré cette géomorphologie hostile, le Mumirwa Central est l'un des secteurs ruraux les plus peuplés du Burundi (450 hab/km²) en raison de sa proximité de la capitale. Ceci se traduit par une occupation des sols très dense accompagnée d'une mise en culture quasi-systématique d'une topographie très accidentée.

Avant cette forte pression démographique, la région était couverte d'une végétation naturelle protectrice (activités sylvo-pastorales essentiellement) qui maintenait et protégeait la couverture pédologique au demeurant très fertile et propice à l'agriculture.

Maintenant, l'éclaircie de la surface et les pratiques culturales intensives et inappropriées à la sévérité du paysage contribuent à une érosivité accrue qui détériore les sols de façon irréversible.

Sans pratique agricole adaptée et avec des infrastructures rurales génératrices d'écoulements non-maîtrisés, la population ne peut faire face à tous les processus d'érosion qui se développent. Ceci entraîne une accélération du régime des cours d'eau dont les crues engendrent des dégâts de plus en plus importants dans la ville de Bujumbura (Décembre 1986 et 1989).

Pour répondre à ces problèmes, le Projet Urbain de Bujumbura a demandé au Projet de Recherche pour la Protection de l'Environnement (PRPE) de mener une étude sur les différents processus d'érosion dans le Mumirwa Central et d'établir un plan d'aménagement de la région. La restauration de la ravine de la colline de SAGARA est une des actions entreprises par le PRPE avec l'appui financier du Projet d'Appui au développement des communes d'Isale - Mubimbi - Kanyosha (Coopération Suisse).

Son aménagement a été réalisé avec le concours de la population locale concernée. Il est considéré comme le témoignage d'une réalisation communautaire parfaitement intégrée.

Dans une première partie, l'étude hydrologique et l'analyse historique de la ravine nous permettront de comprendre la dynamique de ce phénomène d'érosion; dans une seconde partie, nous verrons quels sont les moyens qui ont été mis en oeuvre pour l'aménager et enfin dans une troisième partie, un suivi de recherche soulignera les points positifs et négatifs de l'aménagement.

I. INTRODUCTION

Pour éviter un trop fort ruissellement sur leurs parcelles, les paysans détournent les eaux des toitures ou des champs à l'aide de petits drains vers les sentiers. Cette technique provoque une concentration de l'écoulement et favorise l'érosion le long d'un axe précis.

En général, le sentier est orienté dans le sens de la pente. Lorsqu'il est dépourvu de toute végétation de bordure, il devient vulnérable à l'érosion et le creusement s'y développe très rapidement.

La ravine de SAGARA, avec à certains endroits une largeur de 15 mètres et une profondeur supérieure de 12 mètres, est l'exemple le plus marquant de ce type d'érosion dans le Mumirwa central. Ce processus contribue en partie aux fortes concentrations des eaux et aux importants transports solides dans la NTAHANGWA qui traverse Bujumbura.

En effectuant un aménagement expérimental, cette opération a pour but :

- de définir les techniques les plus appropriées pour lutter contre le développement de ravines importantes.
- d'estimer de façon concrète les coûts d'une telle intervention.
- d'améliorer nos connaissances sur ce type d'érosion.

Le programme de l'opération est réparti en trois étapes chronologiques :

1. Etude préliminaire (1ère partie)
2. Aménagement (2ème partie)
3. Suivi expérimental (3ème partie)

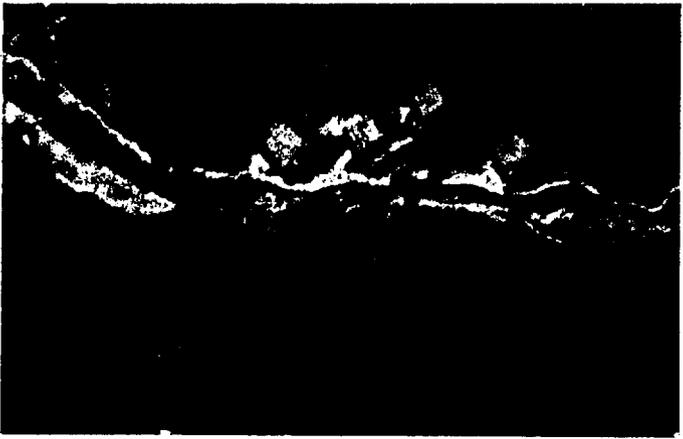
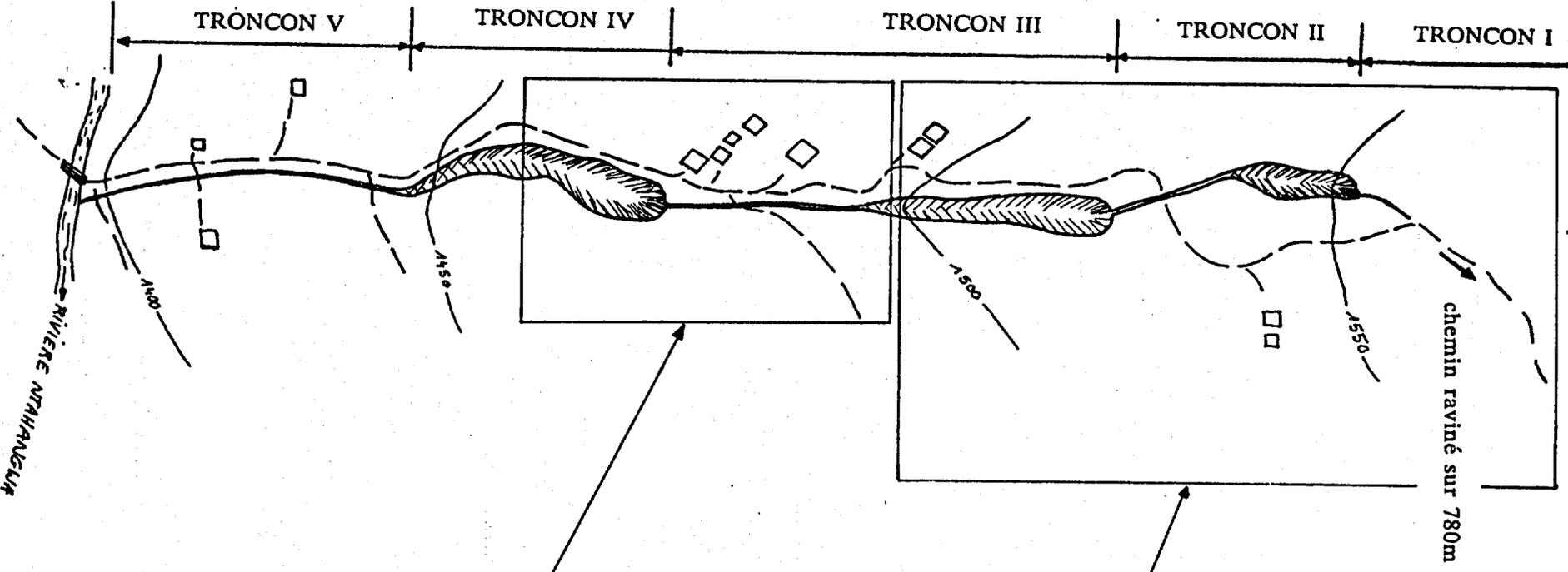
Situation géographique et description de la ravine

La ravine de SAGARA se situe à 15 Km à l'Est de Bujumbura dans le bassin versant de la NTAHANGWA. Elle s'étend sur une longueur de 1100 m (distance projetée sur l'horizontale) avec une dénivelée de 350 m (figure 1).

Son profil variable lui confère une morphologie particulière: sa section reste très modérée avec un écartement de l'ordre de 0,5 m sur la majorité du parcours et atteint des dimensions étonnantes en aval avec une largeur et une profondeur de l'ordre d'une dizaine de mètre, le long de trois biefs distincts.

Nous avons réparti cette ravine en 5 tronçons dont les caractéristiques sont les suivantes (figure 1) :

- Tronçon I composé du chemin raviné avec un creusement qui n'excède pas 1,2 m de profondeur.
- Tronçon II qui correspond au trou I : l'excavation atteint 8 mètres de profondeur et 8 mètres de large.
- Tronçon III qui correspond au trou II dont la profondeur maximale est de 10 mètres et une largeur supérieure à 11 mètres.
- Tronçon IV où s'est formé le plus grand trou (III) avec une profondeur de 12 mètres et une largeur supérieure à 15 mètres en certains points.
- Tronçon V où la largeur est très étroite (inférieure à 1 mètre sur tout le tronçon) et la profondeur dépasse 6 mètres en quelques points.



II. ETUDE PRELIMINAIRE

L'objectif de cette pré-étude est double :

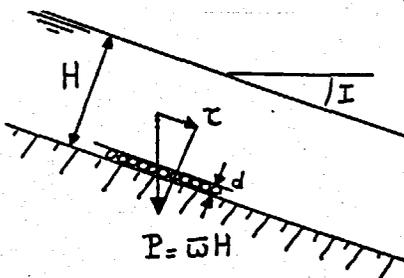
- d'une part, étayer tous les facteurs pour comprendre la dynamique de formation de la ravine.
- d'autre part, disposer de tous les paramètres nécessaires pour définir l'aménagement approprié.

II.1. Aperçu théorique.

Le transport solide, synonyme d'érosion, s'effectue suivant deux processus distincts:

- Le transport en suspension qui dépend de la vitesse et de la turbulence de l'écoulement.
- Le charriage qui résulte de la force de frottement due au poids de la colonne d'eau sur le fond dans lequel les matériaux se déplacent par saltation.

Cette force de frottement s'exprime : $\tau = \bar{\omega} HI$ (en N/m²)



où :

H est la hauteur (en m) d'eau
I est la pente (en %)
d est la granulométrie
 $\bar{\omega}$ est le poids spécifique de l'eau

Elle s'oppose à la résistance des matériaux : $\tau_0 = \bar{\omega} dk$
ou $\tau_0 = 0,08 d$ (formule empirique de MEYER-PETER)

La force d'entraînement s'écrit alors : $F = \bar{\omega} HI - 0,08 d$

On en déduit l'équation pour le débit solide : $G_s = \lambda (\bar{\omega} HI - 0,08 d)$

Les paramètres qui interviennent dans le calcul du volume de terre érodée sont donc :

- La pente I que l'on va déterminer en chaque point par l'étude topographique.
- La hauteur d'eau H liée au débit d'eau.
- La granulométrie d, définie par l'analyse d'échantillons en laboratoire suite aux prélèvements lors de l'étude géo-pédologique.

II.2. Etude topographique.

Les mesures au théodolite ont permis d'établir un profil en long détaillé, qui compte 76 points de mesures avec les caractéristiques suivantes :

- la profondeur
- la largeur
- la pente.

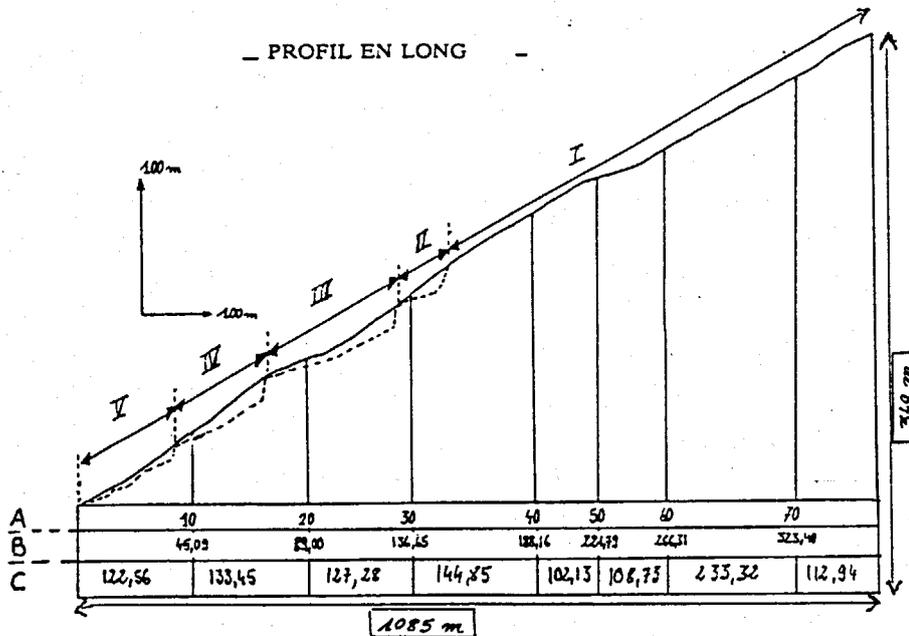
D'autre part, 5 profils en travers ont été relevés avec une dizaine de points de mesure chacun.

Le schéma ci-dessous représente le plan du profil en long simplifié, avec les délimitations des 5 tronçons différenciés suivant la forme de leur section :

- Tronçon I, où la ravine est légèrement ravinée avec un creusement qui n'excède pas 1,2 m de

profondeur.

- Tronçon II, III et IV, qui représentent les 3 cavités distinctes avec une section en forme de V. Leur largeur et profondeur sont de 10 m en moyenne.
- Tronçon V, où la profondeur dépasse 6 m par endroit, alors que la largeur reste inférieure à 1 m, ce qui lui confère un profil en U.



- A = n° du point de relevé topographique
- B = hauteur par rapport au point O
- C = distance entre les points (projetée sur l'horizontale)
- - - - - fond de la ravine
- ↔ délimitations des tronçons.

II.3. Estimation des débits.

Deux méthodes sont utilisables pour faire une estimation du débit de la ravine. Notre intérêt est d'appliquer les deux séparément pour les confronter ensuite et ainsi approcher au mieux la valeur du débit réel.

Méthode rationnelle.

Le calcul est régi par l'équation suivante :

$Q_p = C I A$ avec : - Q_p : débit de pointe de la crue en m^3/h
 - C : coefficient de ruissellement ($0 \leq C \leq 1$)
 - I : Intensité nominale de pluie en m/h
 - A : surface drainante en m^2

Pour obtenir le débit maximum, nous considérons la valeur maximale de l'intensité de pluie $I = 75 \text{ mm/h}$ qui correspond à la pluie décennale relevée dans le Mimirwa central (ISABU, rapport annuel 1989-1990).

Le long de la ravine, la surface drainante est répartie en fonction du coefficient de ruissellement. On distingue trois types de surface :

- Surface de toiture et périmètre d'habitation, où l'infiltration est quasiment nulle (C= 0,9).
- Surface du chemin et de la ravine où la végétalisation est pauvre (C = 0,5)
- Surface drainante des eaux provenant des parcelles cultivées (C = 0,15).

Le tableau ci-dessous indique l'évaluation du débit de l'aval vers l'amont :

Point de repère	Surface de toiture	Surface du chemin et de la ravine	Surface parcelles	Débit
76				
72	200 m ²			
68	350 m ²			
62	500 m ²			
59	650 m ²			
57	750 m ²			
55	950 m ²			
53	1000 m ²			
51	1350 m ²			
50	1350 m ²	1355 m ²	10920 m ²	75 l/s
34	1350 m ²	2815 m ²	15300 m ²	105 l/s
30	1550 m ²			
28	1550 m ²	3570 m ²	16950 m ²	120 l/s
22	1700 m ²			
20	1850 m ²			
18	1850 m ²	5565 m ²	20630 m ²	160 l/s
10	1850 m ²	7315 m ²	23100 m ²	185 l/s
1	1950 m ²	8175 m ²	26050 m ²	205 l/s

Finalement le débit estimé par cette méthode, considéré comme débit décennal de crue, s'élève à plus de 200 l/s. On estime que la contribution du débit à l'exutoire (point n°1) est de 20 % pour les eaux provenant des surfaces de toitures métalliques, de 40 % pour celles du chemin et de la ravine, de 40 % pour les eaux excédentaires des parcelles cultivées.

Néanmoins, ces valeurs doivent être considérées avec méfiance car toutes les surfaces n'ont pas été mesurées avec précision, de même les coefficients de ruissellement ont été choisis à partir de critères généraux ou approchés suivant nos résultats sur parcelles Wischmeier. Le calcul suivant va nous permettre de vérifier partiellement ces résultats.

Méthode de Manning.

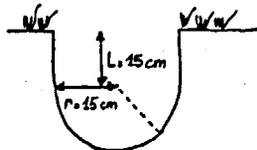
Le principe est d'estimer la valeur de la vitesse moyenne sur un bief de section constante à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * i^{1/2}$$

\downarrow pente du bief considéré
 \downarrow rayon hydraulique (= surface/périmètre mouillé)
 \downarrow indice de frottement

Au repère 28 du profil topographique, la ravine a une section très étroite. En considérant cette section comme surface maximum débitante, on déduit le débit maximum parcourant la ravine à cet endroit.

Section au repère 28 :



Calcul des paramètres : Surface $S = \frac{\pi r^2}{2} + 2 rL = 0,0803 \text{ m}^2$

$$\text{Périmètre} = \pi r + 2L = 0,771 \text{ m}$$

$$\text{d'où la valeur du rayon hydraulique : } R = \frac{0,0803}{0,771} = 0,104 \text{ m}$$

Le coefficient de retardation ou indice de frottement est déterminé à partir d'un abaque (d'après GRAY, "Handbook on the Principles of Hydrology"). Les caractéristiques de la ravine sont semblables à celles d'un chenal pierreux avec une végétation dense; ce qui correspond à : $n = 0,1 \text{ s/m}^{1/3}$

La pente entre les points de repère 28 et 29 est, d'après le plan du profil topographique : $i = 0,3766 = 37,66 \%$

$$\text{On déduit la valeur de } V = \frac{1}{0,1} (0,104)^{2/3} (0,3766)^{1/2} = 1,35 \text{ m/s}$$

$$\text{d'où : } \underline{Q_{\max} = V \times S \simeq 109 \text{ l/s}}$$

Conclusion :

Finalement, le débit maximal au point 28, calculé par chacune des méthodes est :

$$\underline{Q_{\max} = 120 \text{ l/s}}$$

par la méthode rationnelle

$$\underline{Q_{\max} = 110 \text{ l/s}}$$

par la méthode de Manning

La valeur du débit maximal est approchée à 10 % près ; ceci confirme le tableau d'évolution des débits le long de la ravine établi par la méthode rationnelle.

Cependant, les valeurs affichées correspondent à celles engendrées par une pluie décennale (leur probabilité d'occurrence étant donc d'une fois tous les dix ans). Pour éviter d'utiliser ces données trop extrêmes, nous exprimerons pour simplifier le débit en fonction de l'intensité de la pluie, qui sera conservé comme paramètre.

On a donc le tableau suivant pour l'évolution des débits le long de la ravine :

Point de repère	Débit en l/s
76	0
50	I
34	1.4 I
28	1.6 I
18	2.13 I
10	2.46 I
1	2.73 I

I, intensité de la pluie, s'exprime en mm/h

II.4. Analyse géologique et pédologique.

Une étude pédologique et géologique s'est avérée indispensable pour compléter la compréhension du phénomène érosif qui s'est produit sur la colline de SAGARA.

Description globale du soubassement et des sols.

Selon la carte géologique au 1/100.000ème du BURUNDI (Ministère de l'Energie et des Mines, 1989), le substrat de la colline est composé :

- dans sa partie sommitale de formations arénacées: grés-quartzitiques, quartzites et quartzophyllades.
- dans sa partie sous-jacente de micaschistes et paragneiss.

Les observations sur le terrain, montrent au-delà de 1820 mètres, la présence d'un soubassement de grés-quartzitique associés à de nombreux affleurements de quartzites, et de filons de quartz intrusifs. Des plantations de Callitris ont pu se développer sur un lithosol sableux à horizon humifère mince.

En contrebas, tout le long de la ligne de crête de la colline, apparaît un système complexe de gneiss et micaschiste indifférenciés, interstratifiés à de rares endroits de bancs grés-quartzitiques. Le produit d'altération de ces matériaux a contribué au développement de sols argileux profonds mais toujours imprégnés de sables et de graviers colluvionnés dans les zones influencées par les apports du sommet ou par le recouplement des bancs de grés-quartzitiques dans les zones plus basses.

Toposéquence pédologique de la colline.

Une série de sondage pédologique a permis d'établir une toposéquence détaillée des sols rencontrés (figure 2):

A partir de 1.710 m, après un microreplat formé par des affleurements de gneiss, débute le creusement de la ravine. Une rigole se développe après la rupture de pente en suivant l'axe du chemin et incise irrégulièrement le sol. Des fragments rocheux et des cailloux de quartz provenant de la nappe de gravats sont arrachés et se concentrent dans le fond des microcavités ou forment localement des petits barrages naturels.

La rigole s'élargit en trois trous au niveau des tronçons plus raides. Le profil le long des berges de ceux-ci présente chacun les caractéristiques suivantes :

1. Les bordures formées par l'horizon humifère (souvent mince) sont maintenues par les racines du couvert végétal (effet de micro-corniche).
2. L'horizon B argileux est hérité d'une forte structuration polyédrique dont les fissurations principales peuvent individualiser des blocs de grandes dimensions susceptibles de basculer dans le fond de la ravine.
3. L'altérite de gneiss dont l'épaisseur peut atteindre 8 m d'épaisseur subit également des fissurations de décollement issus du prolongement des fissures de l'horizon B susjacent.
4. Une nappe de gravats et une charge caillouteuse qui se trouvent à des profondeurs irrégulières (stone line, filons de quartz peu altérés, lentilles quartzieuses résiduelles, etc...).

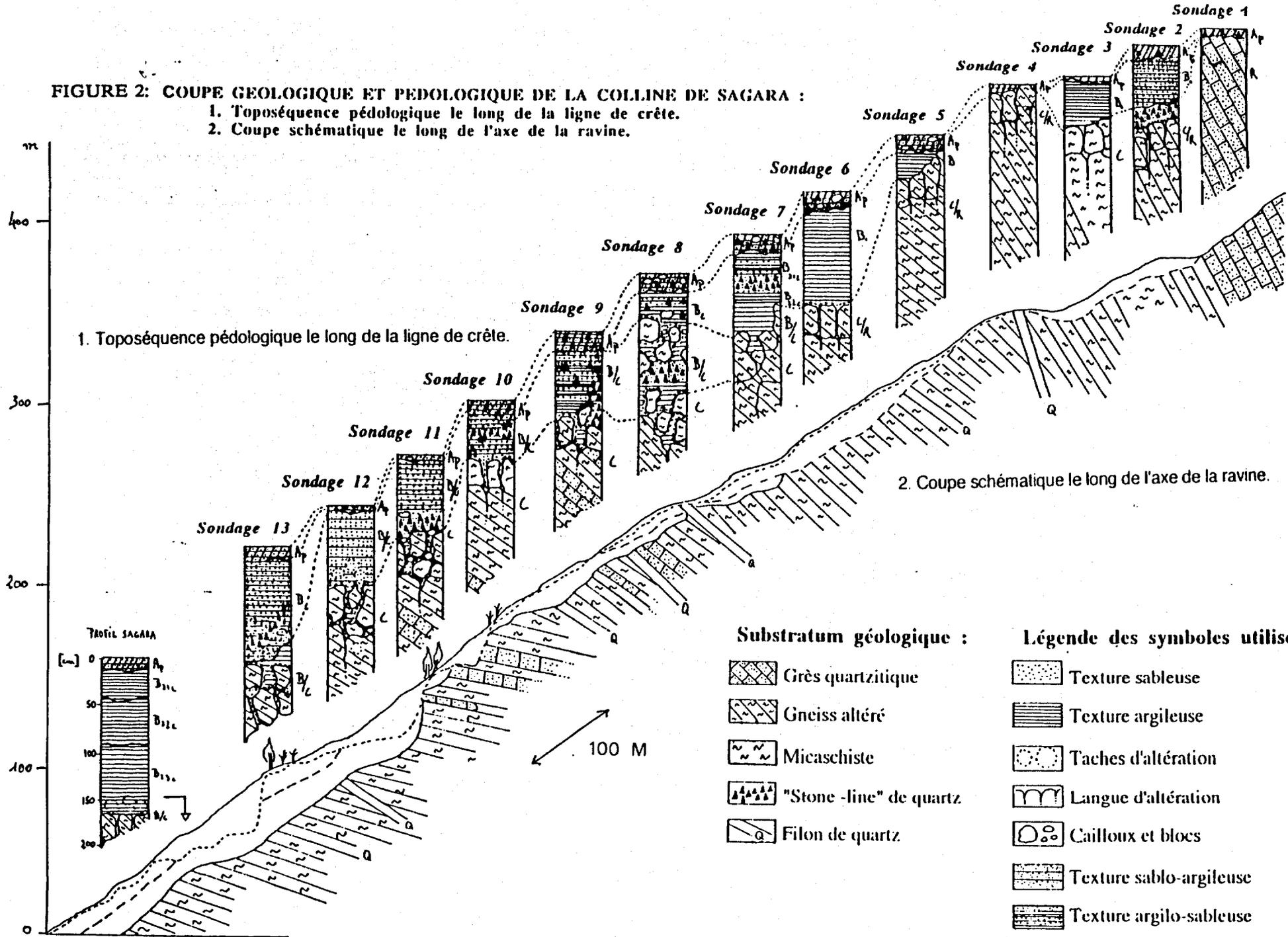
D'autre part, la tête de la première excavation montre à partir de 2,5 m un passage de grés-quartzitique interstratifié dans le gneiss. Ce banc en place forme le soubassement et freine considérablement l'érosion régressive (seuil rocheux naturel).

II.5. Historique de la formation.

Avant de proposer une intervention avec les habitants, nous avons établi un premier contact avec eux pour connaître leur sensibilité vis-à-vis des problèmes liés à la ravine. L'objectif de cette démarche était de connaître l'historique de la formation et les réactions des paysans. Pour ce faire, nous avons mené une enquête sur la colline afin de recenser tous les habitants concernés et de les convoquer à une animation de groupe le 09/07/1991.

FIGURE 2: COUPE GEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE DE LA COLLINE DE SAGARA :

1. Toposéquence pédologique le long de la ligne de crête.
2. Coupe schématique le long de l'axe de la ravine.



DESCRIPTION DE LA TOPOSEQUENCE PEDOLOGIQUE

(sondages 1 jusqu'à 13 et description du profil Sagara).

Sondage 1 : Lithosol humique sur grès quartzitique au niveau du sommet de crête.

- Sol mince sableux et caillouteux (quartz), sur bancs en place de grès quartzitiques (à pendage subvertical) associé à des quartzitiques (horizon R).
- Horizon humifère Ap peu profond.
- Présence de formations herbueses d'*Eragrostis* par touffes en dessous de plantations de Cyprès et *Callitris*.

Sondage 2 : Hygroxéoferralsol typique sur gneiss au niveau d'un microreplat.

- Sol sablo-argileux, brun foncé, sur argile sableuse rougeâtre à partir de 20cm. En profondeur, présence d'une colluvion de quartz dans le substrat gneissique altéré.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-15/20cm : horizon Ap, brun foncé, sablo-argileux, assez épais.
 - 15/20-70/80cm : horizon B_{21c}, rouge-jaunâtre (5 YR 4/6), argilo-sableux.
 - >80cm : horizon C/R, substrat gneissique avec colluvium de quartz.

Sondage 3 : Hygroxéoferralsol typique sur micaschiste (localisé).

- Sol argileux, brun-rougeâtre foncé, sur micaschiste altéré; à faible profondeur (50-70cm), présence d'un stone-line de quartz.
- Horizon humifère peu épais et partiellement enfouis localement.
- Jusqu'à 50cm, horizon B_{21c}, brun-rougeâtre foncé, très argileux (estimation au doigt : teneur en argiles autour de 70%).
- Présence d'un "stone-line" ainsi que de gros cailloux de quartz.

Remarque : l'existence de micaschistes est localisée, le substrat principalement rencontré étant du gneiss.

Sondage 4 : Lithosol typique sur gneiss au niveau du dôme d'un replat.

- Sol mince, caillouteux sur gneiss (ou gneissmicaschistes) avec de nombreux affleurements de gneiss (à pendage Nord-Sud) et d'orthose.

Remarque : à partir du dôme, débute le faciès de la ravine (figure : en pointillés sur la coupe schématique). Une rigole se forme dans l'axe du chemin après le dôme.

Sondage 5 : Régosol lithique associé à des Lithosols sur gneiss.

- Sol sablo-argileux, à charge caillouteuse très importante pouvant devenir argileux et profond.
- Horizon Ap moyennement épais (jusqu'à 25/30cm), très caillouteux.
- Présence d'un horizon B, argileux, d'épaisseur très variable.

Sondage 6 : Hygroxéoferralsol typique sur gneiss au niveau de la rupture de pente.

- Sol sablo-argileux, brun-rougeâtre, sur argile rouge-jaunâtre épaisse et compacte.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-20cm : Ap, horizon de surface moyennement épais, sablo-argileux, très caillouteux.
 - 20-120cm : B_{12c}, rouge-jaunâtre (2,5 YR 4/6), argileux lourd et compact.
 - >120cm : gneiss altéré (rubifié).

Sondage 7 : Hygroxéoferralsol lithique sur gneiss.

- Sol argilo-sableux, caillouteux, brun rouge sur argile rougeâtre interrompu par un stone-line de quartz vers 50cm.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-15cm : Ap, horizon humifère brun rouge foncé (5 YR 3/4), peu épais, caillouteux.
 - 15-45cm : B_{12c}, rouge, argilo-sableux.
 - 45-70cm : B_{22c}, rouge (2,5 YR 4/7), argileux après un stone-line de quartz.
 - 70-120cm : horizon B/C, rouge-jaunâtre.

Remarque : l'altérite peut atteindre 2 à 3 mètres d'épaisseur (même davantage) et la texture varie de sablo-argileuse à argilo-sableuse d'après l'influence plus ou moins importante du quartz résiduel. Le long du sentier, l'absence de végétation rend le sol vulnérable à l'agressivité des pluies. Une rigole se creuse facilement dans l'altérite épaisse de gneiss et atteint le "stone-line" qui arrête temporairement la progression de ce phénomène.

Sondage 8 : Hygroxéoferralsol lithique sur gneiss.

- Sol de surface, brun rouge foncé, argilo-sableux, très caillouteux, sur une altérite de gneiss très épaisse, argilo-sableuse, contenant une charge importante de cailloux de quartz.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-15/20cm : horizon Ap, brun rouge, argilo-sableux avec présence abondante de cailloux et de blocs.
 - 15/20-50/80cm : horizon B_c, rouge, argilo-sableux, caillouteux.
 - 50/80cm à 3m : B/C, altérite de gneiss très épaisse, argilo-sableuse; un "stone-line" de quartz apparaît vers 1m, de manière irrégulière.

Remarque : le ravinement est plus prononcé à ce niveau et la rigole s'approfondit jusqu'à une profondeur de 1m.

Sondage 9 : Régosol lithique.

- Sol argilo-sableux, caillouteux, brun rouge foncé en surface reposant sur une altérite de gneiss d'épaisseur variable, argilo-sableuse, à très forte charge caillouteuse; le stone-line se présente en poches. Des bancs gréseux sont intercalés dans le gneiss.
 - Description sommaire du sondage : 0-20cm : Ap, gris-rougeâtre foncé, argilo-sableux, très caillouteux.
 - 20-50/80cm : B/C d'épaisseur variable, rouge, avec une charge caillouteuse très élevée; le "stone-line" est en poches. Présence de gros cailloux de quartz et grès quartzitique.
 - 50/80 à >120cm : C, gneiss bariolé de couleur rouge foncé à jaune-brunâtre; le substrat est contaminé par des bancs de grès quartzitiques.
- Remarque : Nous avons observé ici un profil "naturel" creusé pour la fondation d'un rugo; il est situé à proximité du sentier actuel qui longe parallèlement la ravine.

Sondage 10 : Hygroxéoferralsol typique à proximité de la tête de la première excavation.

- Sol sablo-argileux, chargé en nombreux petits cailloux, avec un stone-line perturbé de quartz vers 40-50cm. L'altérite est très épaisse, fortement altérée et sablo-argileuse.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-10/20cm : horizon Ap, organique, d'épaisseur variable, sablo-argileux, très chargé en petits cailloux de quartz.
 - 10/20-60cm : horizon B/C, très caillouteux, sablo-argileux avec un "stone-line" perturbé vers 40cm ainsi que des lentilles de cailloux de quartz.
 - 60cm à >2m : C, altérite très décomposée de gneiss.

Sondage 11 : Hygroxéoferralsol typique au niveau du rétrécissement entre les trous III et trou II

- Sol argilo-sableux en surface avec petits cailloux (quartz) devenant sablo-argileux en profondeur; l'altérite de gneiss est très épaisse avec un stone-line vers 40cm et une charge caillouteuse très différenciée.
- Description sommaire du sondage :
 - 0-5/10cm : Ap très mince, argilo-sableux, caillouteux; l'horizon est souvent décapé.
 - 5/10-60cm : horizon B/C, sablo-argileux.
 - 60-70cm : "stone-line" de quartz et charge caillouteuse très différenciée (gneiss, grès quartzitique, quartz....).
 - 70- >150cm : C, altérite de gneiss.

Sondage 12 : Hygroxéoferralsol typique à proximité du deuxième trou de la ravine.

- Sol sablo-argileux, souvent décapé en surface, reposant sur une altérite épaisse de gneiss.
 - Description sommaire du sondage :
 - 0-5/10cm : Ap, horizon très mince à absent (décapé), sablo-argileux.
 - 5/10-80cm : B/C, sablo-argileux, présent localement dès la surface (dépôts de sables).
 - 80 à >150cm : C, saproliithe de gneiss et éventuellement de micaschistes; taches d'altération fréquentes.
- Remarque : Le stone-line n'a pas été observé dans ce sondage-ci. Il faut noter que celui-ci apparaît à des profondeurs variables et souvent de manière irrégulière (en poches, en ligne ou disloqué). Il contribue à la charge importante de cailloux anguleux de quartz dans certains horizons. Un autre sondage effectué à proximité aurait pu déceler sa présence.

Sondage 13 : Hygroxéoferralsol typique entre la section étroite des trous II et I.

- Sol humifère, brun rougeâtre, argilo-sableux, sur un horizon argilo-sableux à 30cm. Présence d'un "stone-line" entre 50cm et 1m sur du gneiss fortement altéré (taches d'altération).
- Description sommaire du sondage :
 - 0-30cm : horizon Ap, brun-rougeâtre, sablo-argileux et à charge peu importante.
 - 30-120cm : B_c, rouge, argilo-sableux, avec un "stone-line" ondulé en profondeur.
 - 120cm- >2m : B/C, gneiss très altéré, bariolé.

193

Durant cette première concertation, les 46 personnes présentes ont répondu à nos questions :

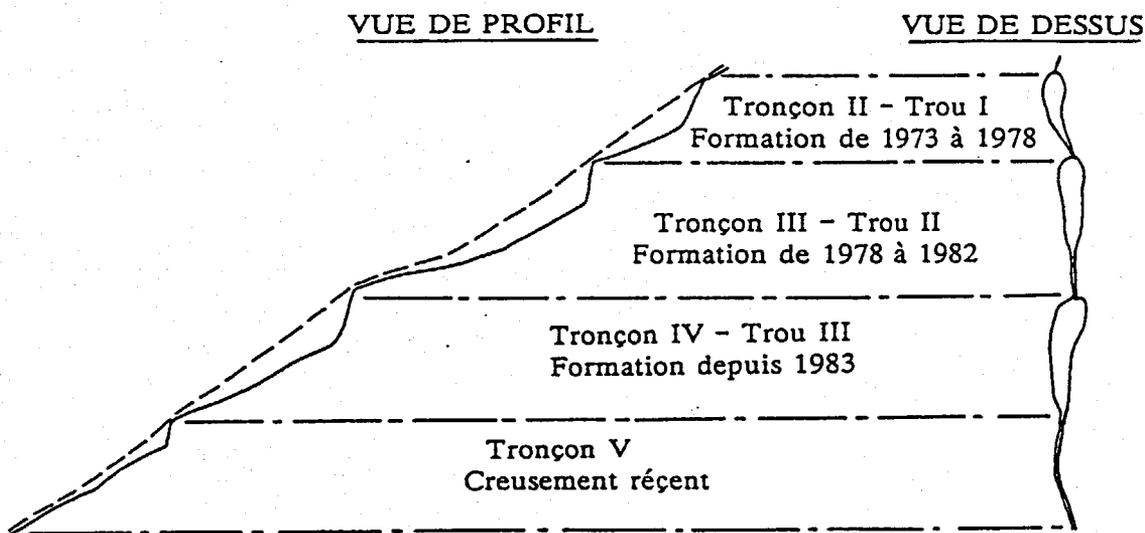
- Comment la ravine s'est développée ? Quelle a été la chronologie de sa formation ?

La ravine est apparue en 1961, lors d'une saison de pluie particulièrement intense. Elle s'est creusée le long du chemin qui ne desservait à l'époque que quatre maisons. En fin d'année, sa forme était celle d'une rigole continue de 5 à 10 cm de profondeur. Dès lors, l'axe d'écoulement pour toutes les eaux excédentaires était déterminé.

En 1973, les paysans ont commencé à appréhender le phénomène en notant l'apparition du premier trou de 1 m de profondeur. Les années suivantes, il n'a cessé de s'aggrandir jusqu'en 1978 où il s'est stabilisé.

La même année l'érosion s'est concentrée sur le tronçon III, pour entamer la formation de la 2^{ème} excavation qui s'est achevée en 1982. La formation du dernier trou, le long du tronçon IV, a démarré en 1983.

schémas: HISTORIQUE DE FORMATION



- Comment est perçu ce phénomène ? Quels sont les problèmes engendrés ?
Comment la population est intervenue ?

La ravine se creuse puis s'élargit en empiétant sur les terres cultivables. Le chemin en bordure est de plus en plus détérioré et finit par être déplacé aux dépens des cultures. Cette dégradation s'amplifie au cours des années et prend des dimensions alarmantes. Les habitants s'inquiètent au sujet de l'avenir de leurs enfants quant au devenir de leur terre et de la colline entière.

Face à ce problème, ils ont tenté de limiter l'érosion en jetant par endroits des pierres dans le fond. Ils ont aussi renforcé les passages où le chemin traversait cette dernière, comme par exemple à la jonction des tronçons IV et V où l'on constate la présence d'un seuil en pierre. A d'autres endroits, le chemin a été dévié sur plusieurs mètres afin de laisser une végétalisation naturelle se développer au fond.

A la tête des biefs II et III, la présence de microboisements d' Eucalyptus, plantés vers les années 1940, a permis de stopper complètement le recul de la ravine. Sans ces seuils naturels, la ravine n'aurait été constituée que d'un seul bief béant. Ces obstacles végétaux montrent l'indéniable efficacité que peuvent avoir les racines des arbres pour stopper ce genre de phénomène.

Toutes ces actions ont certainement contribué à freiner l'érosion mais ces interventions individuelles n'ont malheureusement eues que des impacts ponctuels. Il est évident que devant l'importance du phénomène, la population manque de coordination et de moyens pour éviter son ampleur. Les paysans disent eux-mêmes : "l'Administration doit intervenir en plus des travaux communautaires !".

II.6. Synthèse sur la dynamique de formation.

Mécanismes généraux de formation des ravines.

La dynamique de l'érosion en ravine peut se ramener à trois mécanismes principaux :

- L'érosion en profondeur,
- l'érosion régressive,
- l'érosion des berges.

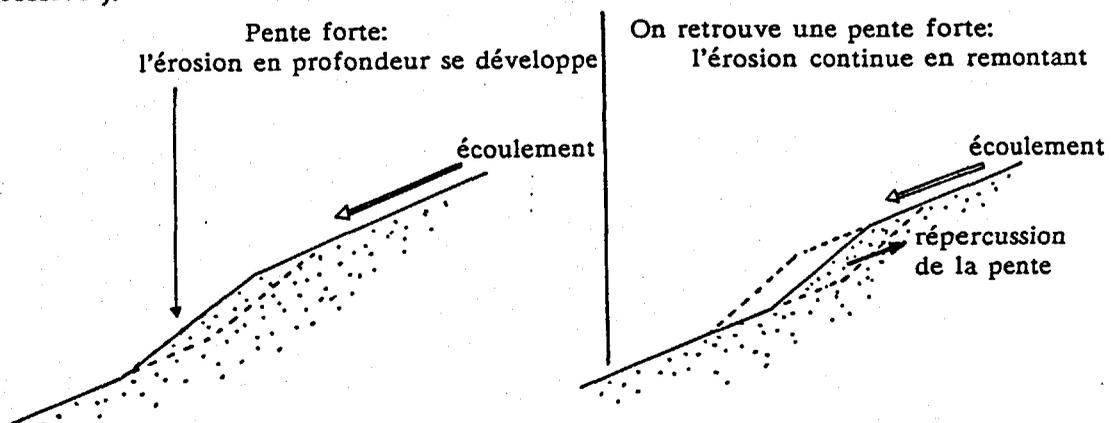
La première s'attaque au fond de la ravine. Elle est régie par l'équation du débit solide: $G_s = \lambda (\bar{\omega} HI - 0,08 d)$. Pour un écoulement donné avec un débit Q , on peut définir en chaque point les caractéristiques suivantes :

- H : la hauteur d'eau qui est fonction de la géométrie de la section mouillée.
- I : la pente du bief considéré
- d : la granulométrie du substratum

Il existe donc en tout point un débit Q seuil, à partir duquel le creusement se déclenche, c'est à dire quand : $\bar{\omega} HI > 0,08 d$

En pratique, cette érosion se présente rarement sous la formation d'une abrasion continue, l'eau creusant en fonction des aléas du sol. Rapidement le fond est profilé en forme d'escalier et la discontinuité du creusement s'accroît en des points précis: le fond devient une succession de petites cavités. Celles-ci s'agrandissent petit à petit pour devenir ce que l'on appelle couramment des "marmites de géants". On obtient une excavation continue et au profil sinueux lorsque ces dernières communiquent.

L'érosion régressive (ou remontante) est une conséquence de l'érosion en profondeur. En effet, le creusement en un point accentue la pente du côté amont, ce qui déclenche l'érosion dans ce sens. Ce phénomène se répercute par récurrence en remontant la pente (d'où l'expression "érosion régressive").

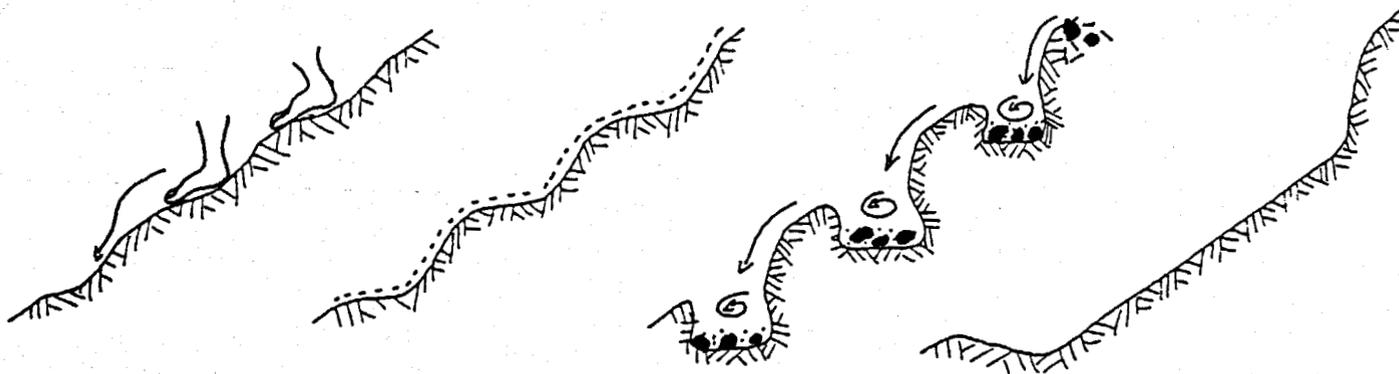


Après l'érosion en profondeur et régressive, la ravine a un profil en U dont le fond topographique est sinueux. Quand la profondeur est importante, les talus ne peuvent rester stables. Ils s'effondrent petit à petit en fonction du sol en place et confèrent un profil en V à la ravine.

APPLICATION A LA RAVINE DE SAGARA.

Phases de creusement

Au départ, les eaux exédentaires provenant des habitations et des champs se concentrent suivant l'axe du chemin. L'absence de végétation et l'irrégularité de sa microtopographie, due en particulier aux piétinements successifs et aux différents modes de tassement, le rendent vulnérable à l'érosivité des écoulements. Une rigole se forme en épousant ces différentes variations topographiques. De nombreuses cascates se suivent selon un tracé sinusoïdal et engendrent des petites cavités qui piègent du sable grossier issu des sols sableux sur quartzite développés en amont et des éléments grossiers (taille centimétrique) arrachés des stone line. Leurs chutes d'eau occasionnent des tourbillonnements dont l'énergie entraîne ces matériaux dans un mouvement circulaire suffisamment important pour abraser les bords de la cavité (principe de formation des marmites de géant des torrents). Au fil des années, le creusement s'approfondie lorsque ces "marmites de géant" se rejoignent.

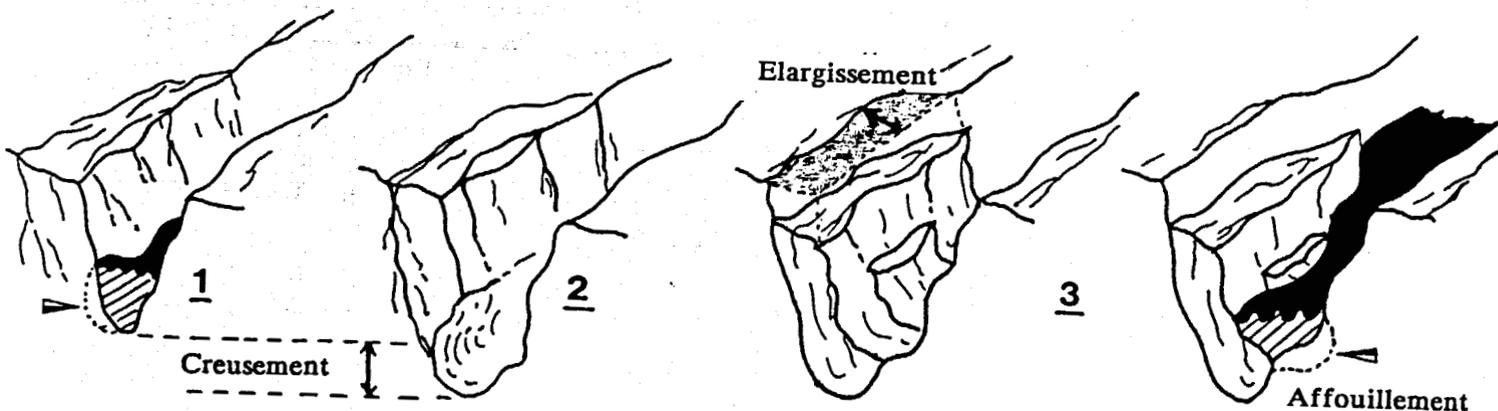


1. L'érosion se concentre aux endroits les plus vulnérables.
2. La topographie se profile en forme d'escalier. (profil sinueux)
3. L'eau tourbillonne avec l'énergie de chute (abrasion)
4. Les "marmites de géant" se rejoignent.

Phase d'élargissement des trous

Le mécanisme d'élargissement a conféré à ces excavations un profil en V, dont la largeur atteint par endroit 15 mètres. Ce mécanisme d'érosion des berges s'identifie aux glissements de terrain et s'explique de la manière suivante:

1. L'eau suit le tracé sinueux du fond et affouille la base des parois au niveau des méandres.
2. Le talus se déstabilise le long des microfissures naturelles du sol et de l'altérite du gneiss. Leur décollement est accentué par les alternances d'humectation et de dissection.
3. Une fois la limite de rupture atteinte sous l'effet gravitaire, des pans du talus se rompent et glissent le long de la paroi en colmatant partiellement le fond de la ravine. Ils constituent ainsi un obstacle temporaire qui dévie les écoulements suivants et favorise les affouillements sur les bords opposés.



Dynamique du processus

Cette ravine présente la particularité d'être composée de trois creusements distincts, plutôt que d'une seule excavation continue comme dans la majorité des cas. La description chronologique de l'érosion en profondeur et de l'érosion régressive permet d'élucider la configuration spatiale des différentes excavations. Les différentes étapes de son évolution sont les suivantes (figure 3):

1ère étape.

Dès 1961, le chemin est utilisé comme exutoire par les eaux excédentaires des champs, des parcelles d'habitation et du chemin lui-même. Au fil des années, suite à l'accroissement de la population et de l'occupation des sols, le débit qui parcourt le chemin augmente progressivement depuis sa source (au sommet de la colline) jusqu'à son déversement dans la rivière NTAHANGWA.

Sur les premières centaines de mètres, la concentration et la charge des eaux sont insuffisantes pour causer une érosion importante (creusement ne dépassant pas 1,2 m de profondeur). Au niveau du point de repère topographique n° 32, l'écoulement rencontre une pente particulièrement forte (pente de 48 % pour une valeur moyenne de 32% sur l'ensemble du chemin) sur un substrat gneissique altéré (donc facilement érodable). Le débit en ce point s'élevant à 1,4 I (soit 105 l/s pour une intensité de pluie de 75 mm/h), tous les facteurs sont réunis pour que l'érosion s'y développe d'abord par une phase de creusement puis formation de la première cavité.

Son élargissement a démarré au cours de l'année 1973 et s'est poursuivi jusqu'en 1978 (d'après les témoignages des paysans). L'érosion régressive est ensuite freinée (voir stoppée) par la présence d'un banc de grès quartzitique, substratum rocheux très résistant constituant un soubassement stable.

2ème étape.

Au fur et à mesure de l'élargissement de cette première cavité, les débits se chargent en matériaux solides et l'énergie de l'écoulement est dispensée dans le transport de la terre du premier trou jusqu'à la rivière. A partir de ce moment, le débit à l'aval de ce premier trou dispose d'un potentiel érosif maximal par accroissement de la charge de matériaux solides transportés. Ce phénomène se répercute successivement en creusant profondément la première pente forte rencontrée c'est à dire au niveau du point de repère n° 25 où le sol est épais et développé sur un gneiss profondément altéré avec une pente s'élevant à 42 %.

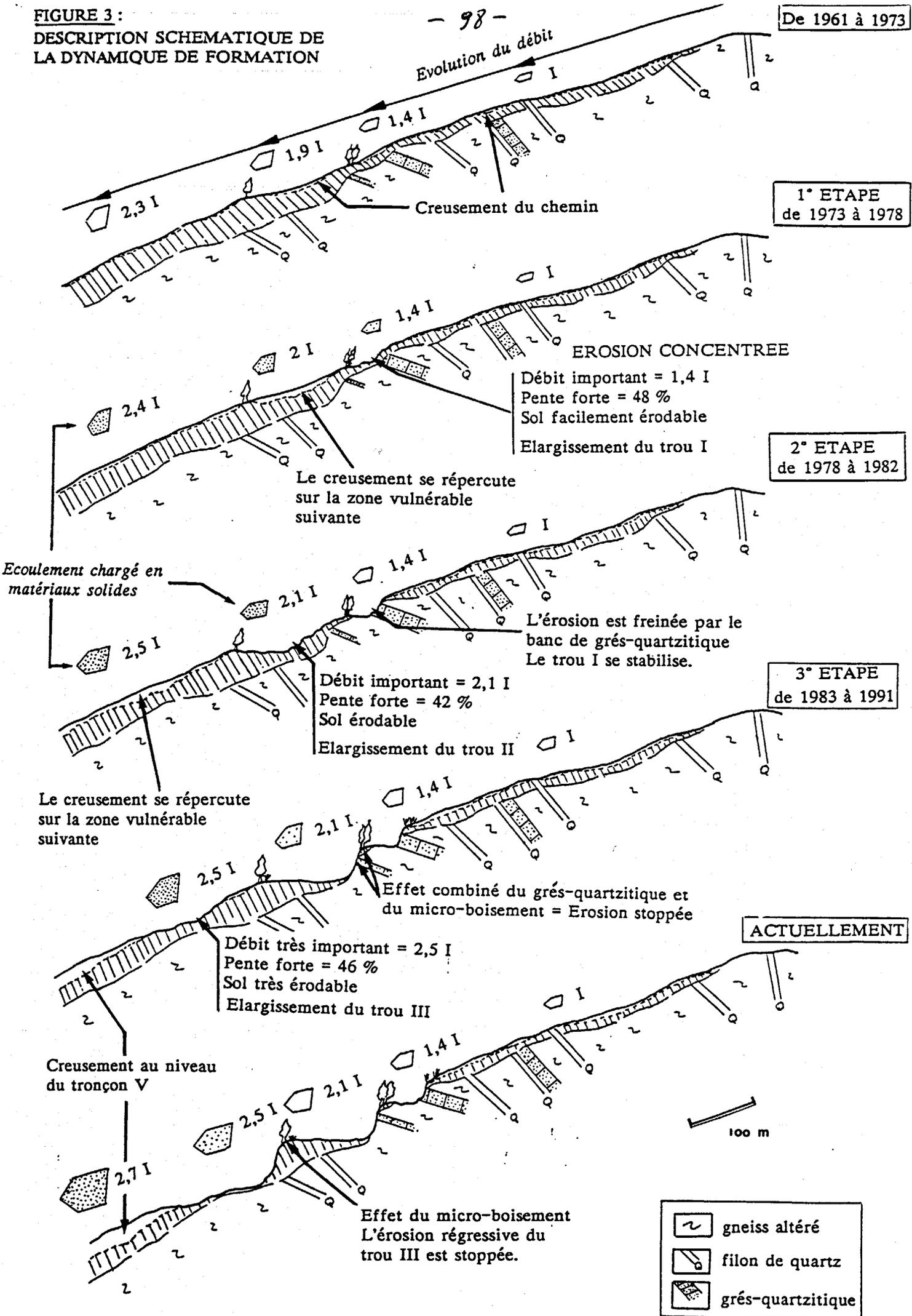
Suite à ce creusement la formation de la deuxième cavité commence en 1978. Son érosion régressive est atténuée puis stabilisée définitivement en 1982. Par ailleurs, son recul a été stoppé par la présence d'un micro-boisement d'une dizaine d'Eucalyptus et d'une végétation arbustive dense dont les racines maintiennent le sol en place.

3ème étape.

De la même manière que les étapes 1 et 2, le phénomène de creusement se répercute en aval au niveau du point de repère n°14 où l'eau s'écoule sur un sol très profond avec une pente de 46%, propice à l'érosion. La formation du troisième trou est ensuite amorcée en 1983.

Aujourd'hui, il semble que cette dernière excavation soit stabilisée (également grâce à la présence d'un micro-boisement d'eucalyptus) au dépens d'un nouveau creusement d'apparition récente qui se dessine le long du cinquième tronçon. En effet, on remarque son profil en U très étroit qui confirme sa formation récente et qui est prêt à s'élargir.

FIGURE 3 :
DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE
LA DYNAMIQUE DE FORMATION



III. CONCLUSION

Suivant les témoignages de la population locale, les tous premiers creusements du chemin de la colline de Sagara auraient débuté au début des années 60. Ce n'est que bien plus tard, en 1973, qu'apparaît l'élargissement de la première excavation. En conséquence il aura fallu attendre douze années pour que la phase de creusement est jouée son rôle alors qu'il aura suffi de 18 années pour l'élargissement des trois grands biefs, profonds d'une dizaine de mètres chacun.

Il s'agit donc d'un phénomène qui s'accélère très rapidement une fois que la phase de creusement initiale est dépassée: la formation du troisième trou, profond de 12 m et large de 15 m à certains endroits, en huit années seulement en est un exemple remarquable. Cette augmentation rapide de la vitesse de formation est due d'une part à l'accroissement des habitations alentours et d'autre part aux effondrements successifs des bords de la ravine qui, une fois remaniés, chargent les écoulements en matériaux solides. Dès lors, le pouvoir abrasif des eaux est considérablement accru et accélère le creusement dans la zone vulnérable suivante.

Les estimations hydrologiques montrent que les débits peuvent atteindre plus de 200 l/s lors des crues maximales (cas d'une pluie de 75 mm/h). Avec de tels régimes d'écoulement, on comprend aisément la rapidité des dégâts observés sur place, le désarroi des agriculteurs concernés et la contribution de ce genre de phénomène dans les crues dévastatrices des rivières torrentielles du MUMIRWA.

Une intervention apparaissait donc urgente, sans quoi le dernier tronçon de la ravine atteignant parfois plus de 6 mètres de profondeur aurait déjà commencé sa phase d'élargissement avec les risques de gagner trois zones d'habitation.

**AMENAGEMENT D'UNE RAVINE EN ASSOCIATION AVEC LES AGRICULTEURS :
CAS DE LA RAVINE DE SAGARA (MUMIRWA CENTRAL, BURUNDI).**

Marc LEBRETON, Hervé DUCHAUFOR, Melchior BIZIMANA et Joelle LECUYER
et le concours de Canisius MIKOKORO, Epogémine SINDAKIRA
et Prime RUPIYA

*Projet de Recherche pour la Protection de l'Environnement
(ISABU / FAC)*

PARTIE II : Aménagement expérimental

RESUME

L'analyse de la dynamique de fonctionnement de la ravine de SAGARA (partie I) démontre que l'ampleur du phénomène s'accroît de façon très rapide d'année en année: la déstabilisation et l'effondrement des berges empiètent sur les surfaces adjacentes cultivées, les écoulements successifs le long du chemin rendent son parcours de plus en plus impraticable.

Pour répondre à la demande des agriculteurs, le Projet de Recherche pour la Protection de l'Environnement a entrepris dès Juillet 1991 (saison sèche) un aménagement expérimental défini et réalisé avec la population rurale concernée par le problème.

Son opération consiste en premier lieu à initier la population à ce type d'aménagement en utilisant des techniques appropriées, ensuite de tester à long terme l'efficacité de ces techniques, d'estimer le coût de l'intervention et d'améliorer nos connaissances sur ce type d'érosion fréquemment rencontré au BURUNDI.

Trois phases distinctes ont été adoptées:

- Construction de microbarrages perméables au fond de la ravine en utilisant différents types de matériaux locaux suivie d'une végétalisation des atterrissements;
- Végétalisation d'un périmètre de bordure et aménagement du chemin;
- Collecte des eaux de toiture

I. INTRODUCTION

Techniquement, les deux idées directrices qui nous ont guidé dans la conception de l'aménagement sont de réduire le débit et de limiter le charriage. Dans ce sens, notre objectif principal a été de diversifier les techniques pour connaître tous les facteurs d'adaptabilité aux conditions de milieu.

Finalement, ces considérations nous ont amené à définir un aménagement réparti en trois phases:

1. Stabilisation du lit de la ravine en installant différents types de barrages micro-hydrauliques suivis d'une végétalisation des remblais;
2. Végétalisation d'un périmètre de protection en bordure de la ravine et aménagement du chemin
3. Récupération des eaux de toiture avec des citernes de collecte.

II. CONCEPTION DE L'AMENAGEMENT

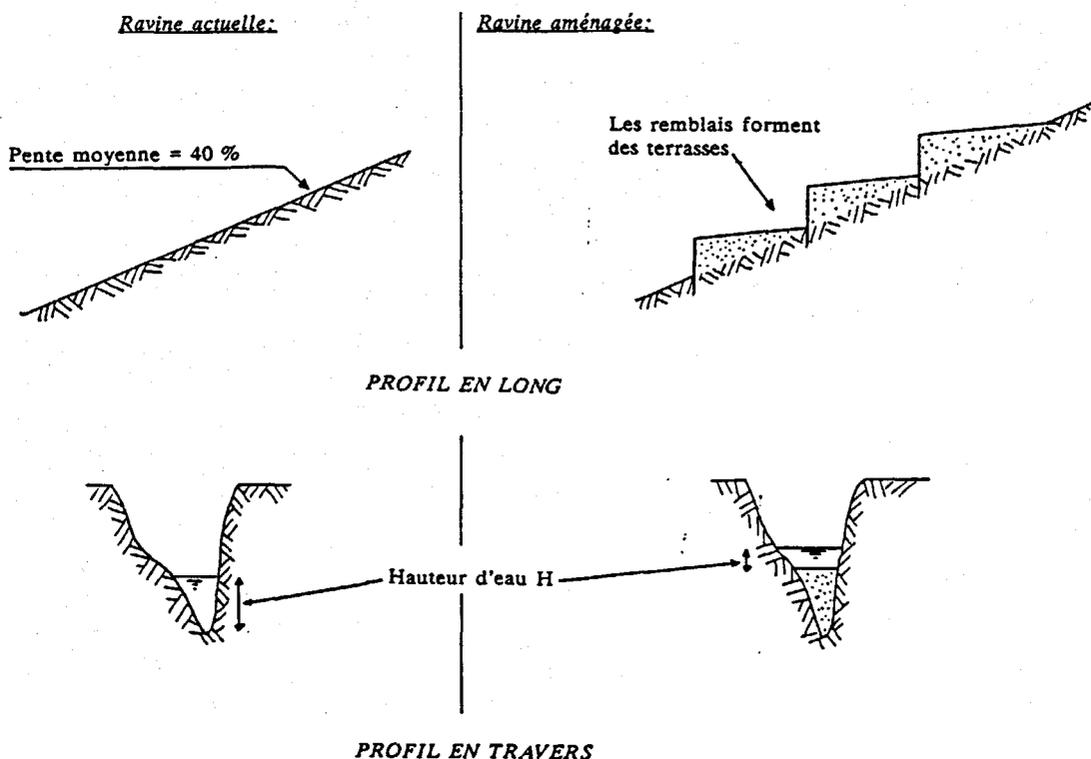
Phase 1 : Stabilisation du lit de la ravine

a. Principe.

L'objectif de cette première phase est de stabiliser le fond afin d'éviter l'érosion en profondeur qui est la première étape de formation des ravines. Cela consiste à installer un certain nombre de barrages successifs qui seront remblayés par décantation des matériaux solides transportés. Le fond aura aussi un profil en forme d'escalier où la pente sera réduite en tout point. De plus, la section sera élargie ce qui minimisera la hauteur d'eau H.

Par ailleurs, le volume des remblais formera un excellent aquifère propice à l'infiltration et à la végétalisation. Avant d'être saturés en eau, ces remblais auront alors un effet tampon sur l'écoulement.

Les schémas suivant illustrent les modifications escomptées :

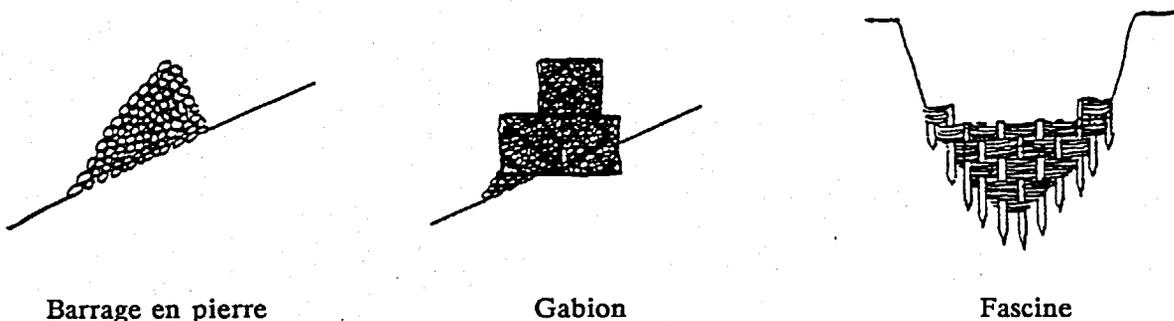


b. Caractéristiques des barrages.

Les barrages seront poreux afin d'éviter qu'ils supportent une charge dynamique et hydrostatique trop importante.

Trois types de barrages sont utilisables pour cet aménagement :

- barrage en pierre (ou "barrage poids")
- barrage en pierre avec armature sous forme de gabions superposés
- fascines en bois

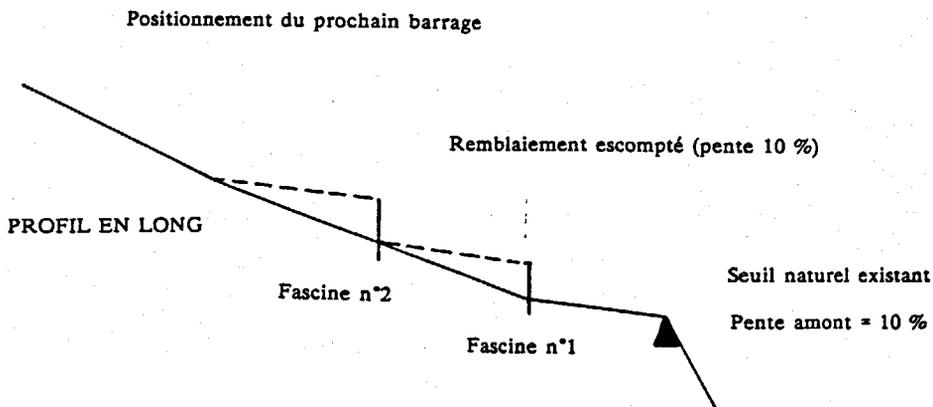


Etant donné que les pierres sont peu disponibles à proximité de la ravine, nous avons opté pour les fascines en bois aux endroits où la section est supérieure à 1 mètre de large et pour les barrages en pierre pour les sections plus étroites.

c. Dimensionnement.

Pour obtenir un remblaiement maximum, des barrages d'une hauteur moyenne de 2m 50 avec un ancrage dans le sol de 1m de profondeur ont été prévus.

Le positionnement des ouvrages est défini à l'aide du profil topographique. Après implantation du premier ouvrage, on dessine la pente de remblaiement amont afin de positionner le second ouvrage au point d'intersection (remblaiement - profil en long), et ainsi de suite comme l'illustre le schéma suivant:



La pente de remblaiement correspond à la pente d'équilibre. Or il y a équilibre quand $\tau = \tau_0$
d'où $I_0 = \frac{0,08d}{\omega H}$ (cf. partie I).

Cette pente a été estimée à partir du profil en long qui présente en trois points distincts des seuils naturels avec une pente d'équilibre de 10% en amont.

Finalement, les précalculs ont prévu :

- 17 fascines de 2m50 de haut en moyenne
- 2 barrages en pierre.

Une fois le remblaiement des barrages terminé, des boutures de bambou (*Bamboussa aureostriata* et *Arundinaria alpina*), de *Bana-grass* et de *Ficus ingens* seront plantées avec des écartements de 1 m.

Phase 2 : Végétalisation et aménagement du chemin.

a. Problématique.

Par temps de pluie, le sol de texture argilo-limoneuse devient glissant. Dans ces conditions le chemin est rendu difficilement praticable en raison de sa forte pente. Les passants n'ont d'autres solutions que de marcher sur le sol végétalisé en bordure du parcours pour gravir la pente. Finalement le sentier n'a cessé de s'élargir : à plusieurs endroits, le sol nu couvre une bande de plus de 10 mètres de large avec de nombreux couloirs de passage qui empiètent sur les champs voisins constituant ainsi un réseau dendritique complexe propice aux multiples ruissellements concentrés.

Cette détérioration progressive sur les terres cultivables (essentiellement par piétinement) diminue considérablement l'infiltration des eaux sur une surface de plus en plus importante. Conjointement, ce phénomène augmente le débit dans la ravine.

b. Solution.

Pour remédier à ce problème, la première étape consiste à rendre le chemin facilement utilisable tout en conservant des dimensions convenables (il dessert toute la colline). Dans cet objectif, il sera profilé en escalier afin de permettre aux passants de marcher sans glisser et de briser l'énergie du ruissellement.

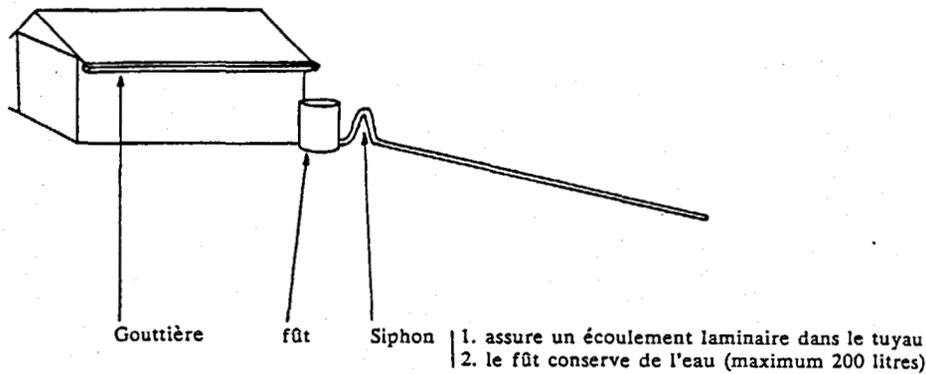
Le deuxième étape consiste à instaurer un périmètre de protection végétal autour de la ravine pour limiter les risques d'effondrement des talus et diminuer le ruissellement en bordure. Le long des tronçons II à V, une bande de cinq mètres de large en moyenne sera réservée à la végétalisation de différentes espèces graminéennes et arbustives. L'intérêt de cette diversification consiste à effectuer par la suite un suivi qui s'insèrera dans les recherches sylvicole et agroforestière du P.R.P.E. et de fournir à long terme une production mélangée de révolution et d'utilisation différentes aux paysans qui en bénéficieront.

Arbres introduits:

- *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus globulus maidenii*
- *Acrocarpus fraxinifolius*
- *Grevillea robusta*
- *Cedrella serrulata*
- *Alnus nepalensis*

Graminées herbacées:

- *Panicum maximum T58*
- *Panicum maximum CV C1*
- *Tripsacum laxum*
- *Setaria sphacelata*
- *Paspalum sp.*
- *Hyparrhenia sp.*



Avantages

- Prix très abordable : 12.000 FBu(*)
- Occupe peu de place
- Délivre un minimum d'eau
- La réserve d'eau est très facilement utilisable : il suffit d'abaisser le tuyau flexible.

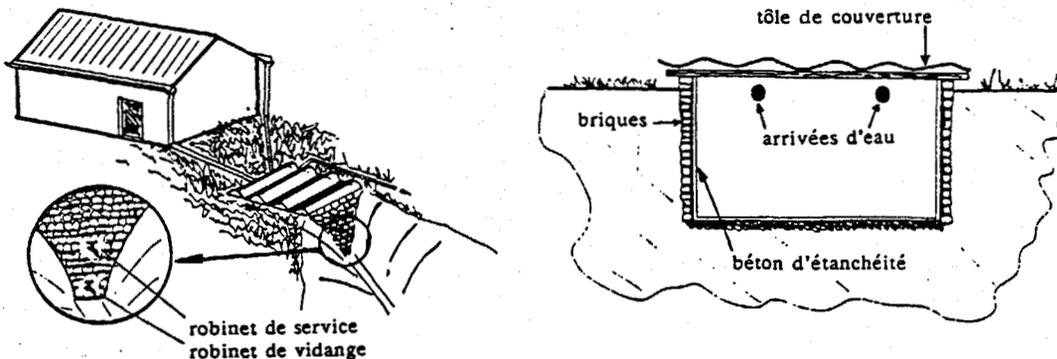
Inconvénients :

- PEU adapté lors des très fortes pluies ($I = 75 \text{ mm/h}$), le tuyau ne pouvant évacuer un excédent de $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Il est donc indispensable de bien définir la zone d'installation, avec les critères suivants :
- * Pente faible
- * Végétalisation dense
- * Erodabilité faible
- * Forte perméabilité (s'encquerir de la susceptibilité au glissement de terrain).
- * Paillis dense ou dans compostière

(*): 1 FF = 35 FBu 1991

2. Bassin de stockage:

Cette installation capte la totalité des eaux de toiture et la conserve dans un bassin de stockage à la disposition du propriétaire.



Description du fonctionnement : Collectée par les gouttières, l'eau se déverse dans un bassin de 4 m^3 (pour une maison moyenne). Le propriétaire utilise l'eau à l'aide du robinet de service et peut vidanger la totalité du volume par le robinet au point le plus bas. Si cette eau n'est pas suffisamment exploitée lors des fortes pluies, un système de "trop plein" évacue les eaux excédentaires.

Avantages :

- Emmagazine toute l'eau de toiture et annihile ainsi toute possibilité d'érosion liée au toit.
- Délivre le maximum d'eau.

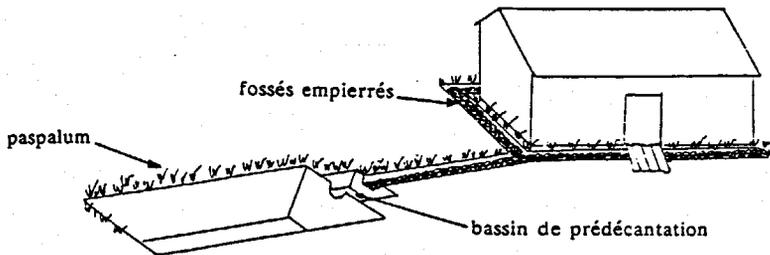
Inconvénients :

- Système complexe nécessitant plusieurs dépenses qui rendent l'installation très coûteuse pour l'habitant (53.000 FBU)
- Occupe de la place.
- Exige un suivi continu du niveau de l'eau pour minimiser la probabilité de débordement

3. Bassins d'infiltration

- Bassin d'infiltration simple

Ce bassin est conçu pour éviter toute possibilité de débordement, le fond perméable n'étant pas revêtu. Le système de collecte présenté est donc indépendant du type de toiture.



Description du fonctionnement : Les fossés, disposés à la verticale du toit, récoltent l'eau et l'acheminent dans un petit bassin de pré-décantation. Les particules solides contenues dans l'écoulement s'y décantent en partie. L'eau se déverse ensuite dans le bassin principal, où elle s'infiltré progressivement.

D'après les mesures effectuées au "perméamètre à double anneaux", on constate que la perméabilité moyenne des sols sur la colline de SAGARA est d'environ 10^{-5} m/s (soit 3,6 cm/h). Le volume maximal d'eau contenu dans le bassin s'élevant à 4 m³ et en considérant une surface au sol de 3 m², le temps d'infiltration serait de l'ordre de 40 heures.

Avantages :

- Très bon marché (3.000 Fbu)
- Annihile toute probabilité de ruissellement.

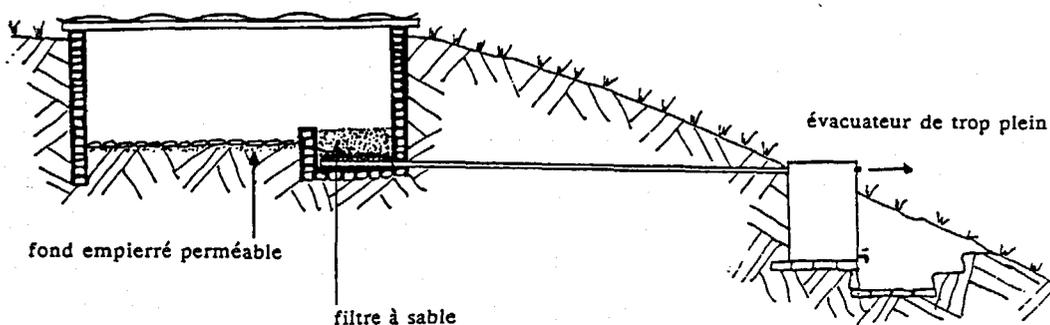
Inconvénients :

- Nécessite un entretien courant pour éviter que le fond ne se colmate avec les particules décantées.
- Eau non salubre
- Ne s'adapte pas sur tous types de sol

- Bassin d'infiltration + collecte eau

En plus d'un bassin d'infiltration, cette installation est équipée d'un drain dans le fond du bassin qui conduit une partie de l'eau dans un fût de stockage :

Descriptif du fonctionnement : Le système de collecte qui peut être composé soit de gouttières soit de fossés à la verticale du toit, déverse l'eau dans le bassin. La surface du fond est subdivisée en deux parties: une zone où l'eau s'infiltré directement dans le sol et une autre où elle est filtrée par une couche de sable avant de rejoindre le fût de stockage.



L'intérêt du filtre est double : il assure une bonne salubrité de l'eau dans le réservoir et il permet, en fonction de sa perméabilité et de sa section, de maîtriser le volume dévié.

Avantages :

- Réduit totalement l'écoulement de surface.
- Délivre une eau de bonne salubrité

Inconvénients :

- Ce système fait appel à une pré-étude rigoureuse avec des mesures de la perméabilité du sol.
- Ne s'adapte pas sur tous types de sol
- Nécessite un entretien régulier
- Prix élevé (35.000 Fbu)

III ORGANISATION DES TRAVAUX

Trois réunions entre les membres du projet, l'Administrateur Communal et les habitants de la colline nous ont permis de définir ensemble les objectifs de l'aménagement, de prévoir le déroulement des opérations et d'organiser la répartition des tâches.

Notre rôle s'est réduit à approfondir les techniques proposées. Finalement, nous avons abouti au plan d'aménagement défini ci-dessus en respectant la répartition des travaux suivante:

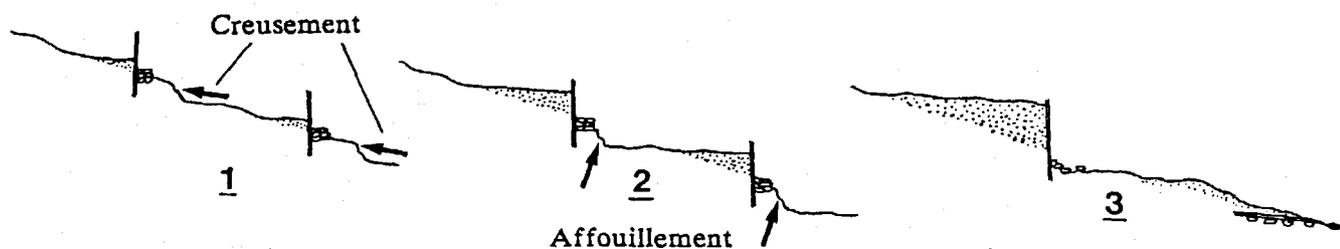
- La collecte des bois d'éclaircie dans le boisement industriel de RUGAZI (FED);
- La construction des barrages par des ouvriers (personnes volontaires issues de la colline) rémunérés et encadrés par un technicien spécialisé;
- L'aménagement du chemin et la végétalisation pris en charge par les travaux communautaires durant trois matinées de la semaine;
- Les travaux de la dernière phase effectués par le propriétaire.

CRITIQUE DE L'AMENAGEMENT

a. Stabilisation du lit

Toutes les fascines ont été construites pendant les mois d'Août et Septembre (mois secs). Les pluies du mois d'octobre et du mois de Novembre nous ont permis d'analyser le fonctionnement des ouvrages. Les profils en long succédant à chacune de ces précipitations illustrent bien la dynamique de l'érosion entre chaque barrage :

1. A la première pluie, le remblaiement a débuté à l'amont tandis qu'un surcreusement survient à l'aval de chaque barrage.
2. A la seconde pluie, le remblaiement augmente au dépens de l'érosion régressive qui continue à l'aval des barrages.
3. A la troisième pluie, le surcreusement atteint et affouille le pied des fascines; avec le poids du remblaiement, les pieux soutenant les ouvrages et leur mur de soutènement en pierre finissent par s'affaisser.



Rappelons que la dynamique de l'érosion entre chaque barrage est régie par l'équation pour le débit solide $G_s = \lambda(\tau - q_{0B}\alpha)$; si τ varie, G_s augmente (cf. Partie I).

Avant d'arriver au niveau d'un barrage, l'écoulement transporte une quantité maximale de matériaux. En rencontrant l'obstacle le flux est freiné et les matériaux se déposent. A l'aval, l'écoulement retrouve rapidement son énergie et se recharge en matériaux en creusant la pente non remblayée ce qui revient à dire que chacun des tronçons discontinus fonctionnent indépendamment en "érosion-dépôt".

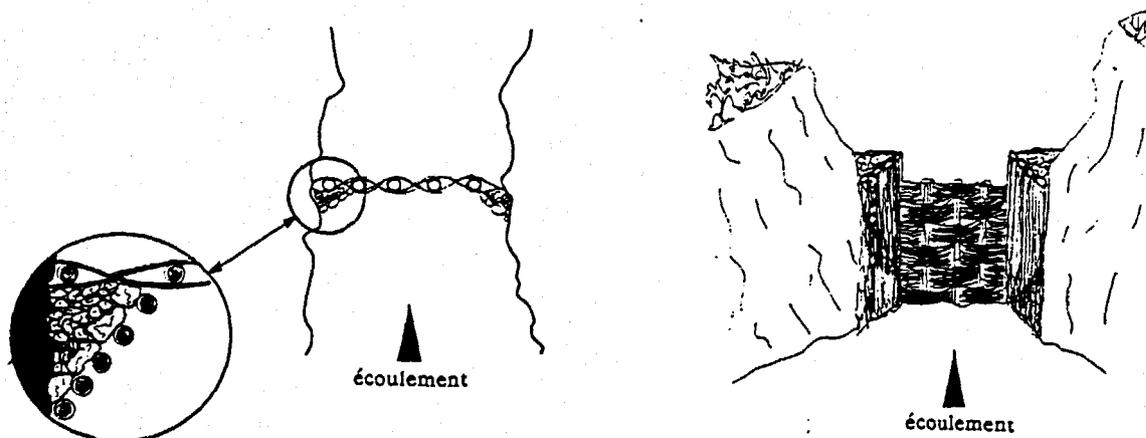
Finalement le 15 Novembre, les quatre fascines et leur barrage en pierre situés sur la plus forte pente étaient détruits. Face à ces incidents, les ouvrages restants ont été consolidés et de nouvelles mesures ont été préconisées pour la reconstruction des quatre autres.

Toutes les fascines ont été renforcées en apposant un gabion à l'aval de chacune afin d'aider l'ouvrage à supporter le poids du remblaiement et d'éviter son affouillement à la base en bloquant le front d'érosion régressive. De cette expérience, nous avons effectué la construction des fascines de l'aval vers l'amont et en interaction avec les pluies:

1. construction de la première fascine au point le plus bas de la ravine.
 2. après remblaiement de la fascine n° 1, construction de la fascine n° 2.
 - N. après remblaiement de la fascine n° N-1, construction de la fascine n° N
- ..., ainsi de suite jusqu'au début de la ravine.

En positionnant ainsi chaque fascine à la limite du remblaiement de la précédente, on annihile toute possibilité d'érosion à l'aval.

Il faut également souligner l'importance de la protection des bordures lors de la construction des fascines. En effet, tant que le remblaiement n'est pas atteint, l'écoulement tourbillonne à l'encontre de l'obstacle avec une tendance à affouiller les bords. Nous avons donc placé une colonne de pierres de chaque côté des fascines:

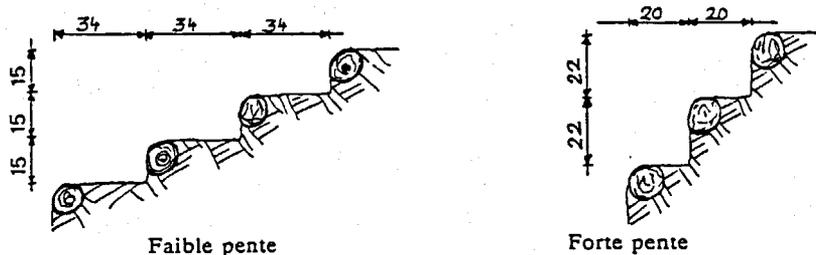


Dés le 15 Janvier 1992, les plantations de bambous, de Bana-grass et de Ficus ont été effectuées comme prévu sur les remblais stabilisés.

b. Aménagement du chemin

Lors de sa conception notre idée était de minimiser le nombre de rondins en formant des marches espacées d' un mètre en moyenne avec une pente intermédiaire. Ce calcul s'est avéré trop juste après avoir constaté que l'escalier est parfois contourné soit par manque d'habitude des utilisateurs, soit parce que certaines marches sont difficiles à gravir (surtout pour des passants qui transportent fréquemment des charges supérieures à 30 Kg).

Nous avons donc doublé le nombre de marche aux endroits contournés en respectant la proportion ergonomique $2h + g = 64$ (où h est la hauteur de marche et g le giron) qui s'applique à toutes les pentes:



c. Périmètre de protection végétalisé.

Afin d'instaurer le périmètre de protection, nous avons demandé aux agriculteurs de retirer leurs cultures situées sur l'emprise du périmètre en échange d'une indemnisation fixée suivant le barème d'expropriation établi par l'ordonnance ministérielle n° 710/129 du 11 juin 1982 (Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage). Chaque agriculteur a reçu une somme fixée à la moitié du prix de l'expropriation en signant un contrat qui énumère les prescriptions relatives au bon développement de la végétation en accord avec son protocole de suivi et qui les associe tous dans un groupement chargé de son entretien et de son exploitation.

Ce groupement, constitué de quatorze agriculteurs, a également la responsabilité du maintien des dispositifs en place. Les techniciens du PRPE chargé du suivi technique rendront compte de l'efficacité de cet engagement qui a été décidé en commun accord et qui se veut original et indépendant.

IV COUTS DE L'OPERATION

DENOMINATION	BUDGET
Préliminaires : " Précalculs et dimensionnement"	92.200 Fbu
- Mesures topographiques	
* Technicien + appareil	20.000 Fbu
* ouvrier (2H * 10j)	2.200 Fbu
* ingénieur (1H * 2j)	6.000 Fbu
- Calculs et Dimensionnement	
Préparation projet sommaire d'aménagement	
* ingénieur (1H * 8j)	24.000 Fbu
- Transport	
* 1 voiture (40 km * 10j)	40.000 Fbu

**Etape 0 : "Collecte du bois à Rugazi"
(pour fascines et chemin)**

373.500 Fbu

- Achat du bois	70.000 Fbu(*)
* 13m3 Pinus patula	
* 1m3 Grevillea	
* 1m3 Casuarina	
* 1m3 Cyprès	
* 15m3 Pinus oocarpa	
* 1m3 Callitris	
* 0,4m3 Ficus	
- Coupe + Débardage	
* ouvriers (10H * 10j)	11.000 Fbu
* contre-maître (1H * 10j)	2.500 Fbu
* outils (3 scies, 3 haches)	24.000 Fbu
* tronçonneuse (2j)	10.000 Fbu
- Transport	
* Camion 7 tonnes (500 Km)	250.000 Fbu
- Prospection - Organisation	
* ingénieur (1H * 2j)	6.000 Fbu

Etape 1 : "Construction des fascines"

440.200 Fbu

- Achats 20 gabions	195.000 Fbu
- Collecte des pierres	
* ouvriers (20H * 10j)	22.000 Fbu
- Réception du bois	
* ouvriers (20H * 6j)	13.200 Fbu
- Construction des fascines	
* ouvriers (30H * 20j)	66.000 Fbu
* technicien (1H * 20j)	20.000 Fbu
- Supervision ingénieur	60.000 Fbu

**Etape 2 : "Aménagement du sentier
+ Végétalisation"**

173.600 Fbu

- Indemnités d'expropriation	25.000 Fbu
- Achats plants de pépinières (*)	
* Grevillea (800 plants)	2.400 Fbu
* Cedrella (800 plants)	2.400 Fbu
* Eucalyptus (800 plants)	1.600 Fbu

- Achats graminées (*)	
* Panicum T58 d(20.000 éclats de souches)	2.000 Fbu
* Pennisetum (20.000 éclats de souches)	2.000 Fbu
* Banagrass (40.000 boutures)	4.000 Fbu
* Paspalum (6.000 mottes)	1.800 Fbu
- Transport	
* Camion 7 tonnes (50Km)	50.000 Fbu
* Voiture (40Km * 10j)	40.000 Fbu
- Supervision	
* technicien (1H * 10j)	10.000 Fbu
* ingénieur (1H * 10j)	30.000 Fbu

Etape 3 : "Captage des eaux de toitures" 380.000 Fbu

Cette étape est actuellement au commencement; le budget prévu pour l'achat des matériaux est de 300 000 Fbu + transport + temps ingénieur et technicien

TOTAL 1.456.600 Fbu

Le montant total de l'aménagement est donc revenu à 1.456.000 Fbu, soit l'équivalent de 41.600 FF au taux de change de 1991 (35 Fbu pour 1 FF). Ce coût relativement élevé est en grande partie dû à l'achat des 20 gabions importés d'Europe par la Direction Générale des Routes. Néanmoins, nous avons comptabilisé volontairement les bois (*) de récupération d'éclaircie du boisement FED de Rugazi ainsi que tous les plants forestiers et herbacées (*) qui nous ont été offerts à titre gracieux. Quant à la majeure partie du budget, il a été assuré par le projet Suisse qui appuie le développement de la Commune d'Isale où se situe la colline de SAGARA.

Une simple constatation nous montre qu'un aménagement lourd constitué uniquement de gabions aurait demandé 3.900 000 Fbu (\approx 112.000 FF), soit près du triple du coût expérimental. Si ces moyens expérimentés s'avèrent résistants sur plusieurs années avant que la végétalisation du fond de la ravine est une totale emprise sur les remblais, il est certain qu'ils pourront être reconduits sur d'autres sites similaires, très nombreux au Burundi.

V CONCLUSION

La restauration de la ravine de SAGARA aura demandé six mois et demi de travaux avec une trentaine d'ouvriers-agriculteurs qui ont été initiés à la construction de barrages micro-hydrauliques par un technicien spécialisé. Son coût total s'élève à un peu plus de 40.000 FF en utilisant des matériaux simples (pieux en bois et branchages pour les fascines + végétaux divers pour la fixation des bordures), c'est à dire trois fois moins qu'un aménagement lourd en gabion. Le suivi de recherche expérimental indiquera dans quelle mesure le système mise en place sera pérenne et résistera en particulier aux fortes charges des atterrissements et aux variations fréquentes d'humidité et de dessiccation.