

INTRODUCTION GENERALE

Pour que le vrai développement soit effectif, surtout au domaine routier, il ne faut pas se contenter de la réhabilitation mais songer à la conservation des routes nationales importantes afin qu'elles atteignent sa durée de vie optimale. Ceci n'est pas le cas si on se limite au cas de la RN 2. Un éboulement demandant une somme exorbitante pour l'entretien d'urgence, est toujours au rendez-vous chaque année après des pluies exceptionnelles ou un passage cyclonique. Or, cet entretien est toujours en vain puisque lors d'un entretien d'urgence, il n'y a pas de place pour une étude profonde. Les talus se montrent apparemment stables après l'intervention, alors qu'ils nous réservent une mauvaise surprise dont les conséquences sont loin d'être négligeables. Sommes nous conscients de la situation de ces gens en pleur devant leur existence en ruine. Nous voulons parler là de ces petits commerçants, de ces paysans qui n'ont que, directement ou indirectement, la RN 2 pour assurer leur survie. Il est vrai que les entrepreneurs et les transporteurs sont les plus concernés mais nous aussi, les Malgaches tout entiers, ne sont pas à l'abri d'une crise provoquée par l'arrêt temporaire. La crise de 2002 intensifié essentiellement par la non circulation de marchandises reste toujours gravée dans notre mémoire. On ne peut pas accepter une chose pareille surtout si la raison est d'ordre technique. On dirait que le sujet est classique mais jusqu'à maintenant le problème persiste.

Pour pouvoir décrypter ce que masque le phénomène d'instabilité des talus, nous commencerons par la recherche de la position du problème. Nous pouvons affirmer dès le début que si ce problème persiste le long de la RN 2, c'est que les solutions déjà entreprises étaient insuffisantes ou inadaptées. Quant à l'insuffisance de la solution, nous essayerons d'attirer l'attention des responsables face aux risques qu'ils encourent en négligeant ce phénomène. Quand elles sont inadaptées, c'est la raison d'être de la deuxième partie dans laquelle on a commencé notre étude par la genèse, l'eau, suivi de l'état du bassin versant et finalement la résistance des talus.

Connaissant toutes ces données, nous allons proposer des solutions à long terme pour la résolution de ces cruciaux problèmes.

C'est pourquoi notre mémoire est intitulé **“contribution à la résolution du problème d'instabilité des talus le long de la RN 2”**.

PREMIERE PARTIE

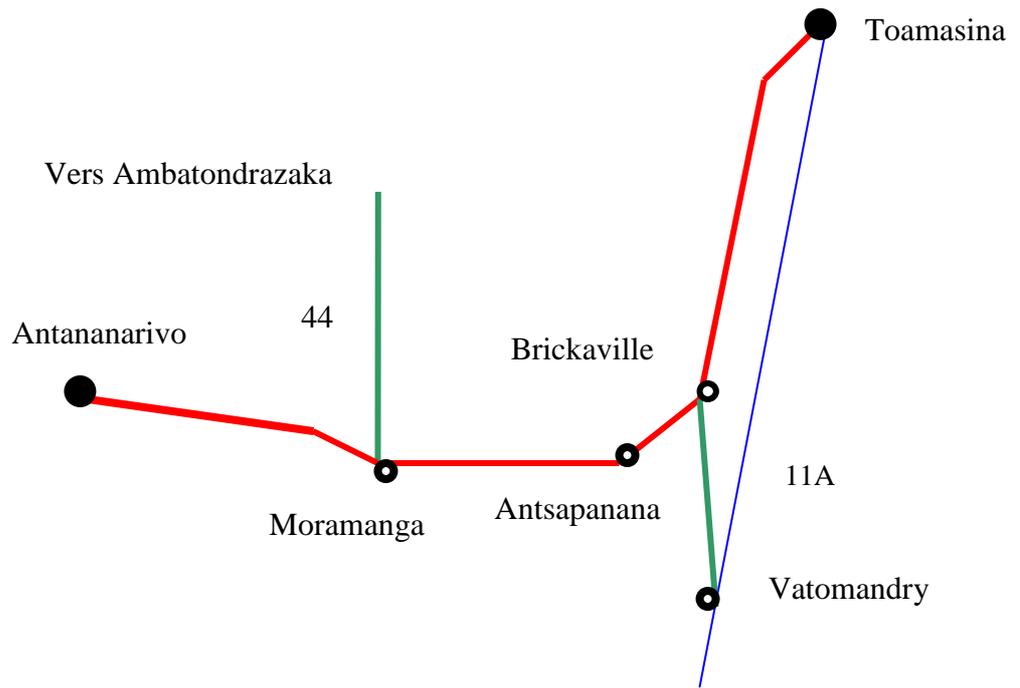
POSITION DU PROBLEME

INTRODUCTION

Intitulée position du problème, cette partie traitera en premier lieu la vue d'ensemble de la RN2 qui nous donnera une ordre d'idée sur l'aspect général du problème. Quelle conséquence engendre-il ? Pour savoir les préoccupations des responsables, on relatera en dernier lieu les solutions déjà apportées.

I - Généralités :

La RNP2, de longueur 354 Km relie Antananarivo sur la haute terre centrale à Toamasina sur la côte Est en franchissant le grand escarpement oriental. Outre ces deux villes, à savoir Manjakandriana (PK 48), Moramanga (111) et Brickaville (PK270). Certaines routes nationales n'ont aucune raison d'existence sans la RN 2 ; en effet la RNS 44, reliant Andilamena à Moramanga en passant par Ambatondrazaka, et la RNT11A, communiquant Mahanoro et Vatomandry à Antsapanana (RN 2 aux environs du PK 218, devraient se joindre à ce fameux tracé pour conduire soit à Antananarivo soit à Toamasina. A l'intérieur du province autonome de Toamasina, on a enregistré 1320 Km de routes nationales entretenues, 402 Km de routes provinciales dont la plus longues est la RIP 215 (Marolambo- Anosibe An'Ala - Moramanga) qui elle aussi, figure parmi les affluents de la RN 2. Tous ces renseignements réunis, s'y ajoute la potentialité économique de la région où est implanté le premier port international de Madagascar, on pourrait imaginer l'importance de cette route qui est la seule, vu que la TCE (Tananarive à la côte Est) ne fonctionne bien actuellement, à assurer l'acheminement des marchandises vers la Province de Tananarive.



Carte N°1 : Tracé de la RN2

a- Profil en long :

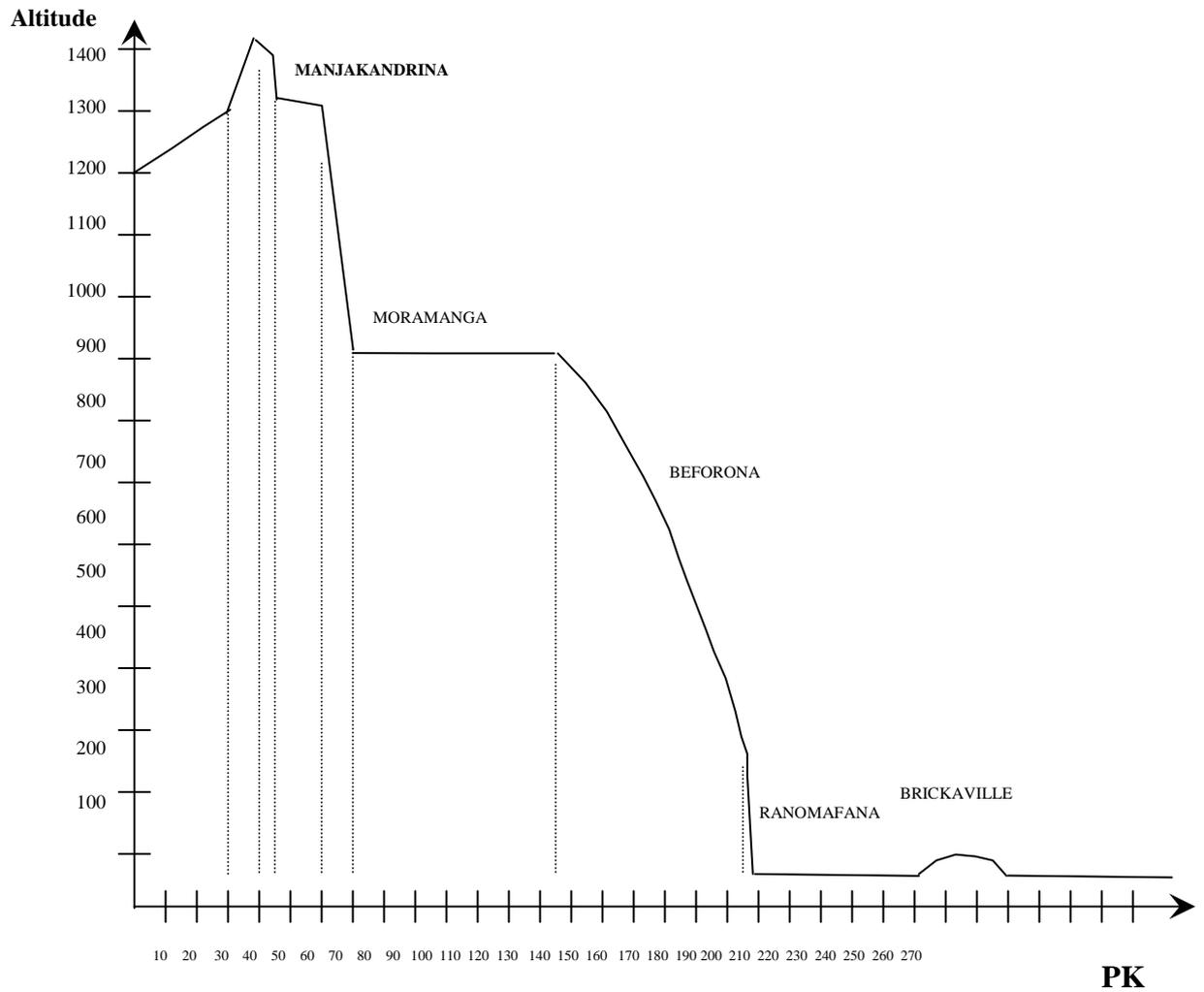


Figure 1 : Profil en long

b – Profil en travers :

Le profil mixte est le plus dominant mais, quelquefois, on rencontre un tracé sur le terrain naturel. La hauteur du talus est variable d'un lieu à un autre tout en restant élevée.

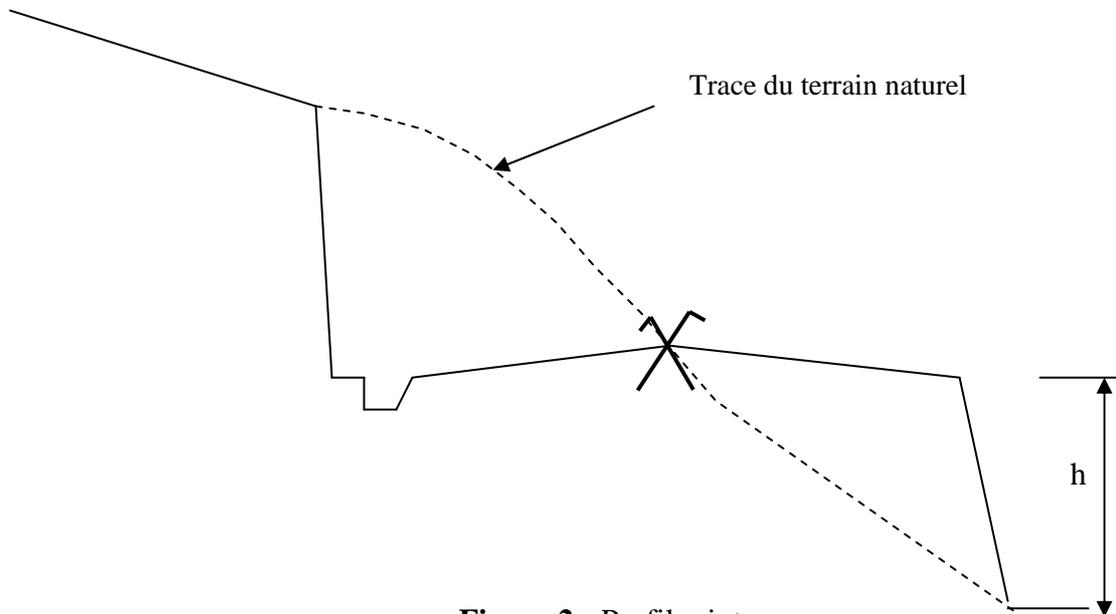


Figure 2 : Profil mixte

c - Description :

D'Antananarivo à Manjakandriana, aussi bien à gauche qu'à droite de la route, les reliefs sont dominés par des collines découpées en terrasse qui cèdent rapidement sa place à des collines disséquées couvertes de forêts secondaires aux abords du col de Mandraka (PK 62). La cote de la plate forme y est supérieure à 1200m.

La descente de Mandraka (PK 62 AU PK72) est le tracé correspondant au franchissement du premier escarpement qui délimite le compartiment effondré de la plaine de Mangoro. Sur une distance d'environ 1300m à vol d'oiseau, la dénivelée est de 600m que la route récupère par un tracé extrêmement sinueux.

De Marozevo (PK 72) à Moramanga jusqu'à l'embranchement d'Andasibe, la route se dirige toujours vers l'Est en passant maintenant par un terrain plus ou moins plat alors que l'altitude tourne encore autour de 900m.

L'embranchement d'Andasibe (PK 136 cote 860m) jusqu'à Marovoalavo

(PK 200 côte, 110m) correspond au second escarpement qui domine la plaine côtière. La grande originalité de cette zone est la présence de la forêt primaire très dense qui masque totalement le relief sur une bande Nord-sud d'environ 10 Km de largeur à l'Est du croisement. Le tronçon est tracé sur un relief à grand versant aux formes générales anguleuses entaillées par des ravines actives.

Cette longue descente passée, la route qui s'oriente vers le Nord en suivant le littoral Est de Madagascar conserve jusqu'à Fanandrana une cote autour de 100m. Cette cote diminue jusqu'à Toamasina.

II - Problèmes rencontrés

La RN 2 est caractérisée par les problèmes géologiques et géotechniques tels que le tassement de la plate forme, l'instabilité des talus. Ce dernier est le plus fréquent puisque, en 2002, sur 150 Km, entre Brickaville et Toamasina, lors du passage du cyclone tropical Kesiny, on a dénombré 285 points de glissement rendant impossible la circulation des poids lourds pendant plus de 15 jours. La période pendant laquelle ce problème se manifeste le plus souvent s'étale entre Janvier et Mars sans que nous ayons pu examiner réellement le phénomène qui se passe. La consultation des documents et archives au sein du Ministère des Travaux Publics permet de constater que :

- ⇒ Sauf dans quelques cas où la route est tracée sur un bassin versant à pente raide, la majorité des talus affectés sont les résultats d'un mouvement en masse contrairement à ce que l'on pense à priori : l'érosion en nappe ;
- ⇒ Le dégât se présente surtout durant le passage cyclonique ou après une saison de pluie persistante ;
- ⇒ L'intensité, la fréquence et l'amplitude de ces mouvements de terrain sont différentes d'un tronçon à un autre et ce qui nous amène à considérer sur la RN 2, 3 zones dont les risques ne sont pas les mêmes.

a- Les zones à risque faible :

Ceci concerne le premier tronçon de la RN 2 (PK 0 à 60) où on ne rencontre de mouvement de terrain qu'accidentellement. S'il en existe, la masse de terre éboulée est très faible et n'affecte que l'accotement de la chaussée. Ici le risque se présente lorsque l'intervention arrive trop tard étant donné que ces masses de terres pourraient obstruer le fossé et par conséquent à déstabiliser la structure. Le deuxième tronçon à risque faible se trouve tout près de Toamasina (PK 330 à 354) où le profil en travers marqué par un déblai semble disparu.

b- Les zones à risque moyen :

Sont considérées à risque moyen :

- les zones du PK 70 à 130 où les dégâts, ponctuels et de faibles fréquences, sont d'intensités très fortes pouvant entraver voire couper la circulation ; outre les glissements de terrain suivis d'un endommagement de la descente d'eau, l'éboulement des talus de remblais dû au phénomène d'érosions progressives est typique de cette région. Vu la surface du bassin versant qui commence à être dénudée, les eaux de ruissellement du bassin versant amont déferlent par-dessus la chaussée et qu'un écoulement en nappe se produit sur le talus aval non protégé. La rupture se fait alors de manière progressive et peut entraîner l'ensemble du versant par affouillement. Le cercle de glissement critique serait profond en ce moment.

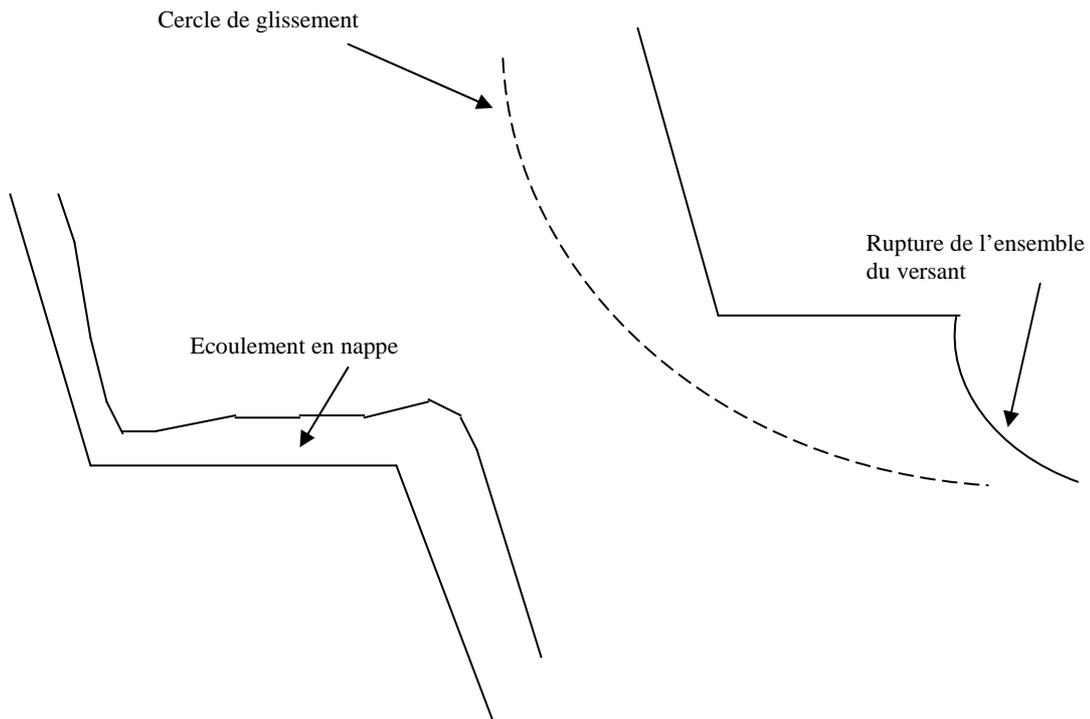


Figure 3 : Erosion progressive

D'autre part, on remarque déjà une trace d'instabilité dans le bassin versant environnant ; dans la mesure où la route est entaillée à proximité de ces zones, un mouvement en masse très intense pourrait apparaître. Ces instabilités se présentent d'une part sous la forme des entailles linéaires ou ramifiées qui sont des ravines concentrant l'écoulement des eaux le long ou au pied du versant et d'autre part sous la forme de " lavaka " se développant dans les argiles rouges qui, par leur cohérence, sont capables de garder une profondeur élevée. A titre d'exemple, du PK 72 au PK 77, le bassin versant est victime d'une entaille ramifiée et du PK 94 au PK 101, les ravinements généralisés sont recolonisés par la végétation.

Les zones du PK 200 à PK 330 où les instabilités, nombreuses, sont d'intensités moyennes. Les talus y sont aussi de hauteur moyenne et les incidents, caractérisés par un cercle de glissement quasi-sphérique, ne surviennent qu'après une précipitation exceptionnelle ou après un passage cyclonique. Lorsque le cyclone tropical Kesiny a sévi sur la partie Est de Madagascar, on a recensé, en moyenne, 3 points de glissement par kilomètre.

c- Les zones à risque fort :

Ce sont les tracés correspondant au franchissement des deux escarpements à savoir la descente de MANDRAKA et la descente de Beforona.

L'escarpement apparaît comme un rocher contre lequel sont plaqués des terrains meubles mais parfois on rencontre des affleurements rocheux sur le talus. On constate que la stabilité d'ensemble des terrains que traverse la RN 2 dans cette zone est naturellement précaire.

La constatation géomorphologie fait apparaître des déstabilisations anciennes telles que l'érosion progressive ou " lavaka ". Certaines portions de la route, actuellement intactes, risquent dans l'avenir d'être déstabilisées en cas de propagation des phénomènes susmentionnés. Les glissements ponctuels se traduisent par l'effondrement de tout un pan de versant capable de mobiliser une quantité de matériaux assez élevée. Les principaux mécanismes de rupture sont les suivants :

- Dans le déblai en matériaux meuble, l'écoulement en coulée de la tête de talus provoqué par le ruissellement sur le front de taille s'intensifie et se manifeste de façon spectaculaire.

- Dans le déblai rocheux, le déplacement d'une quantité importante de blocs rocheux vers la route pourrait gêner la circulation. Ce phénomène se présente dans les roches stratifiées où les eaux s'infiltrent facilement dans le réseau de diaclase. Les couches d'argiles se trouvant dans les joints rocheux se ramollissent alors pour devenir " une couche de savon " caractérisée par sa faible cohésion et dans le cas où les plans de fissuration sont orientés vers la route, les équilibres de ces blocs rocheux ne sont plus assurés.

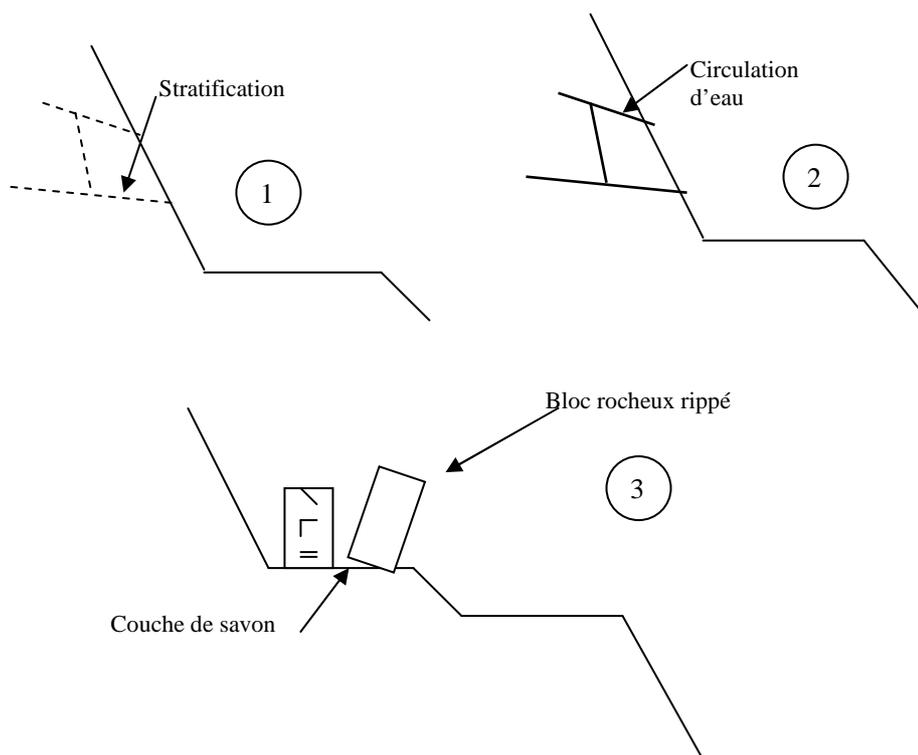


Figure 4 : Eroulement des blocs rocheux

- A cause de la pente trop raide du bassin versant en amont, le phénomène d'érosion progressive est aussi à craindre surtout pour le tronçon descente de MANDRAKA.

En somme, les risques de mouvement en masse ainsi que le phénomène d'érosion, s'y ajoute l'instabilité naturelle du bassin versant se conjuguent pour rendre l'état de ce tronçon critique.

CLASSIFICATION DES RISQUES	1994		1996	
	Nombre de dégâts	Pourcentage (%)	Nombre de dégâts	Pourcentage (%)
Zone à risque fort	68	68	46	75
Zone à risque moyen	19	19	11	18
Zone à risque faible	13	13	4	7

Tableau 1 Répartition des dégâts en 1994 et en 1996

Commentaires :

- Sur 100 points de glissements les plus dangereux recensés en 1994, 68 % se trouvaient dans les zones à risque fort contre 19 % aux zones à risque moyen.
- En 1996, sur 61 points affectés dangereusement, 46 soit 75 % ont eu lieu dans les zones à risque fort.

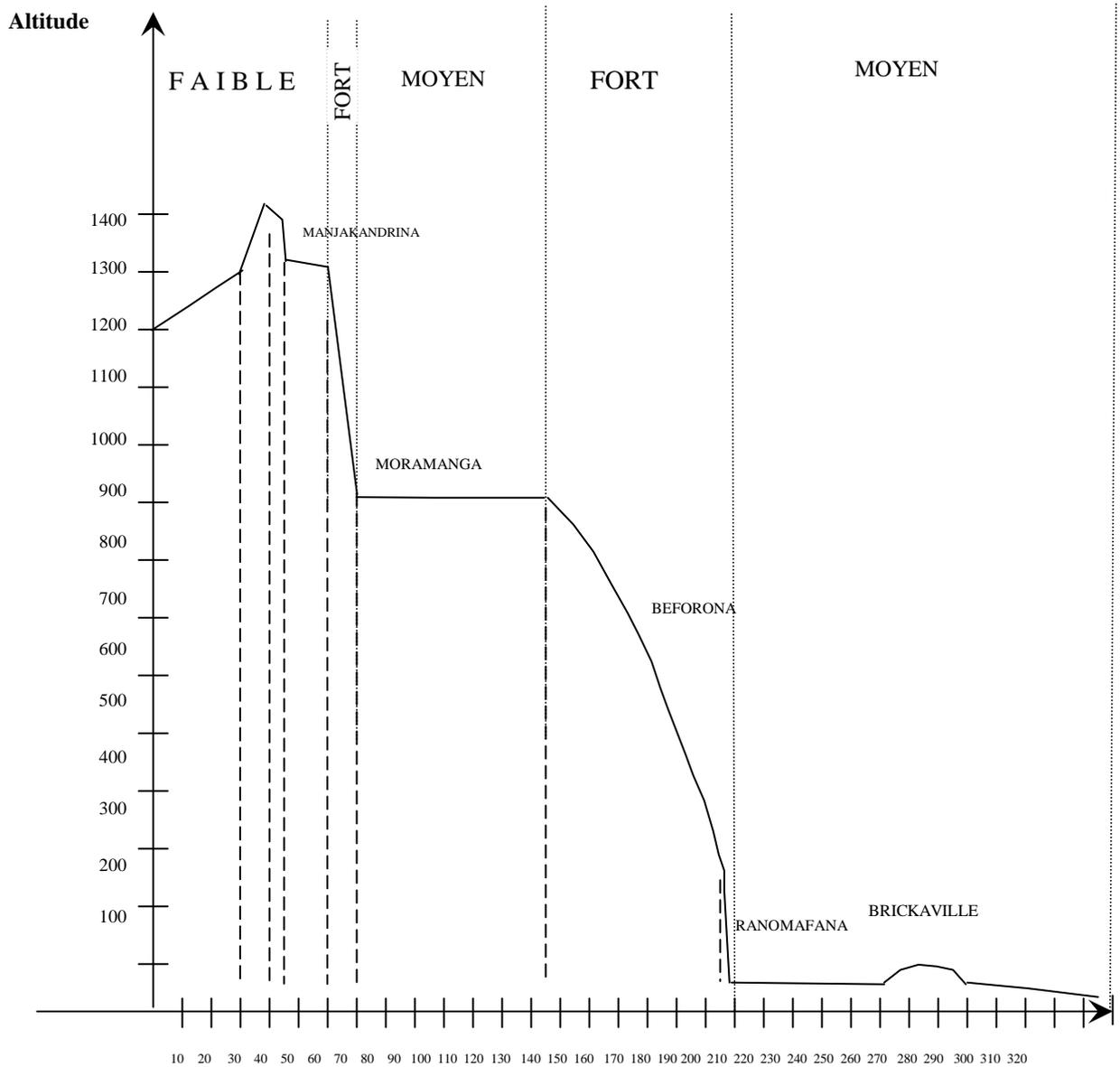


Figure 5 : Risque en fonction du profil en long

Chapitre II : **REPERCUSSIONS DE L' EBOULEMENT**

On a vu qu'en général la RN 2 n'est pas à l'abri des désordres causées par l'instabilité des talus aussi bien en amont qu'en aval de la route. Mais une question émanant des responsables des travaux publics se pose : A quoi bon de se préoccuper à un talus si ceci n'influe pas sur la plate forme ni sur la circulation ?

Les conséquences structurelles et les conséquences économiques feront l'objet de ce chapitre.

I - Conséquences structurelles :

L'éboulement, surtout si l'intervention est tardive, ne reste pas là où il s'est présenté mais engendre un trouble tant dans les plates-formes que dans les réseaux d'assainissement. De peur que les dégâts ne s'aggravent et que la coupure de la circulation ne soit prolongée, le responsable d'entretien routier a dû se recourir à l'aide des entreprises à la fois compétentes et rapides durant l'exécution, à tel point que la somme demandée est exorbitante. En effet, en 2002, dans le tronçon compris entre Brickaville et Toamasina qui fait partie des zones à aléa moyen, il fallait dépenser 7 milliards de Francs Malagasy pour la réouverture de la circulation et la remise en état général. Pire encore, cette somme pourrait doubler si le cyclone a sévi dans des zones à risque fort.

Ces travaux consistent en :

a- L'enlèvement des éboulements :

Il consiste à débarrasser l'emprise. Les matériaux éboulés doivent être évacués, mis en dépôt et régalés sommairement dans des endroits où les conséquences néfastes sur l'environnement et la population avoisinante ne sont pas à craindre.

Sont aussi compris dans cette tâche :

- la réfection ou le réglage et la finition des fossés ;
- le curage des dalots et buses.

b– Le traitement des talus :

Il se limite à :

- reprofiler le talus de déblai et le talus de remblai ;
- mettre au point des dispositifs de protection.

Le tableau ci-après donne la liste des brèches qui ont été traitées entre Brickaville et Toamasina ainsi que les solutions adoptées.

LOCALISATION PK	COTE	REMBLAIS				GABION	ENROCHEMENT
		LONGUEUR (m)	LARGEUR MOY (m)	HAUTEUR (m)	VOLUME (M ³)	VOLUME (M ³)	VOLUME (M ³)
263+950	G	20	6	10	1846	90	
293+000	D	50	15	15	2414	156	
297+800	G	20	6	06	440	0	34 ,5
298+200	G	15	4	04	217	36	
299+500	G	30	10	10	295	72	
301+500	G	20	10	10	4368	102	
310+800	G	24	6	6	1470	96	
312+100	D	28	6	6	494	0	126
315+100	G	55	4	4	603	0	40,5
315+800	D	17	8	8	1205	84	
316+600	D	14	10	10	882	84	

Source : MTP 2002

Tableau 2 : Liste des brèches entre Brickaville et Toamasina

c– La réhabilitation de la chaussée :

Des déformations excessives conduisant à l'apparition des fissures se manifestent sur la surface de chaussée. La cause principale de cette dégradation est l'infiltration des eaux dans la structure, modifiant ainsi les caractéristiques mécaniques et géotechniques des couches constituantes. On devrait alors procéder à un renforcement ou à une reconstruction selon le degré de dégradation.

Le tableau ci-après récapitule toutes les sections de chaussée dégradée.

LOCALISATION PK	LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	SURFACE (M ²)
Entrée pont Brickaville	110	5,4	594
Sortie pont Brickaville	21,2	5,6	118,72
249+800	44,2	6,2	274,04
267+060	22	6	132
301+010	18	7	126
303+000	29,5	6	177
311+100	25	7	175
311+120	15	6,3	94,5
312+200	15	6	90
315+550	15	6	90
317+800	15	6	90
326+600	36,5	6	219
332+970	15	6,2	93
333+600	24	6	144
335+900	72	6,5	468
336+500	30	7,5	225
337+100	15	6,5	97,5
T O T A L			3207,76

Tableau 3 : Récapitulation des sections dégradées (source MTP)

II – Conséquences économiques :

Le terme « Economie » peut se définir comme un ensemble de faits, y compris l'étude, relatifs à la production, à la consommation, à la répartition et à la circulation des richesses tant à l'échelle nationale qu'internationale. D'une manière analogique, on étudiera les conséquences de l'éboulement sur la production de la population riveraine d'une part et d'autre part sur le mouvement des biens et marchandises, traduit par la circulation des

trafics. Il faut noter que d'après les enquêtes menées auprès de certains responsables, la coupure de la circulation, surtout à l'égard des véhicules poids lourds, peut durer de 15 à 20 jours selon la gravité de la situation.

a- La population riveraine :

Le long de la RN2 coexistent de nombreux groupes sociaux à savoir les Betsimisaraka, les Bezanozano, les Merina, les Antesaka et les Chinois. L'existence de la route a une influence déterminante sur la fonction du système d'exploitation agricole riveraine. Certes, les activités dominantes sont l'agriculture mais d'autres en proportion non négligeable s'adonnent également à des activités telles que la prospection aurifère, la commercialisation des cafés, gingembres (PK 153 à 220), bananes (PK 59 à 138). Nous savons que la fréquence et la nature de ces commerces de produits est un indicateur d'une certaine spécialisation régionale sous l'influence de la route.

Pour ces commerçants dont le nombre diminue actuellement, la coupure de la circulation (de fréquence biannuelle environ) se traduit par l'exploitation davantage de la terre et ce en pratiquant le « tavy » non seulement néfaste à l'égard de l'environnement mais aussi considéré comme facteurs aggravants l'instabilité des talus.

Le tableau ci-dessous nous renseigne sur la densité des commerçants le long de la route.

DEPARTEMENT	PK DEBUT – PK FIN	NOMBRE DES COMMERCANTS
ANTANANARIVO NORD	6 - 15	6
MANJAKANDRIA NA	15 – 20	10
	20 – 29.5	3
	29.5 – 35	3
	36 – 43	6
	43 – 70.5	1

MORAMANGA	70.5 – 84	4
	84 – 94	6
	94 – 105.5	3
	105.5 – 118	4
	118 – 138	2
	138 – 153	1
	153 – 169.5	1
BRICKAVILLE	169.5 – 217	1
	217 – 242	3
	242 – 253	1
	253 – 274	0
	274 – 304	0
TOAMASIN A II	304 – 314	9
	314 – 340	3
	340 - 352	5

Source MTP 1996

Tableau 4 : Renseignements sur les densités des commerçants le long de la route

b – Echanges de biens et marchandises :

La RN2 relie Toamasina où se trouve le premier port international de Madagascar à Antananarivo, le Capital.

L'interdépendance entre ces deux Chefs lieu de Province s'avère donc évidente en première constatation étant donné que l'état de la TCE (Tananarive à la Côte Est) est critique. Ce qui explique d'ailleurs ce débit journalier élevé.

Les véhicules légers, y compris les taxi – brousse, occupent une place importante sur la RN2 grâce à l'intérêt touristique de Toamasina. Bon nombre de Touristes venant du monde entier ainsi que des vacanciers issus des nombreuses régions de Madagascar y séjournent pour admirer la richesse naturelle de cette région. Une coupure de la circulation influe sensiblement sur le secteur touristique et de l'hôtellerie.

Tableau : donnant l'évolution du nombre des visiteurs hébergés dans les hôtels de Tourisme(voir annexe)

Les poids lourds occupent aussi une place non négligeable du fait que tous produits, exportés comme importés, devraient passer aux ports de Toamasina. En 2000, Madagascar a importé 494 689 101 Kg de marchandises, hormis les produits pétroliers, s'élevant à 5 134 122 035 Fmg contre 211 112 401 Kg pour l'exportation. On dirait que le taux de couverture était de 16%. Avec une coupure de circulation partielle, qui ne feront que rendre pertes ceux qui s'adonnent principalement aux activités du secteur tertiaire, en l'occurrence le transport.

La RN2 est caractérisée particulièrement par les passages fréquents des camions à citerne puisque les produits pétroliers devraient être acheminés vers Antananarivo, Antsirabe pour éviter des troubles au sein des industries, des compagnies dont la plus sensible d'entre elles est « Air Madagascar ».

Le tableau ci – après récapitule les quantités des produits pétroliers importés en 2000.

DESIGNATIONS	POIDS NET (KG)	VALEUR (FMG)
Somme butane liquéfié	878 605 354	1 661 475 170 528
Somme carburants mélangés	948	24 324 802
Somme essence aviation	78 624	580 324 802
Somme essence de tourisme	3 299	34 886 277
Somme fuel-oil	0	0
Somme gasoil	3 000	16 564 000
Somme gaz de pétrole	137	4 090 560
Somme gaz naturel liquéfié	0	0
Somme huile de base	36 000	139 144 706

Somme huile de graissage	5 838 280	31 532 529 532
Somme huiles légères	1 498	27 177 223
Somme huiles lourdes	473 270	2 436 134 540
Somme huiles moyennes	62 606	296 911 478
Somme jet-fuel	22 900	208 876 491
Somme pétrole lampant	6 752	24 833 957
Somme propane liquéfié	156	3 724 605
Somme super carburant	0	0
Somme white spirit	624	3 080 576
T O T A L	1 763 738 802	3 358 283 364 070

Source INSTAT

Tableau 6 : Récapitulation des qualités des produits pétroliers importés en 2000

En outre, nous savons qu'une partie du budget de fonctionnement du FER est alimentée par la TUPP (Taxe Unique sur les produits Pétroliers). Il s'agit d'un prélèvement fiscal à la pompe, c'est-à-dire une somme d'autant plus faible que l'achat fait par les consommateurs est moindre. Les 40 coupures réparties sur tout le territoire de Madagascar, recensées dernièrement, ont pesé sur le fonctionnement du FER. Une raison de plus qui explique l'insuffisance, voire l'inexistence dans certaines régions, de l'entretien à Madagascar.

Chapitre III : LES SOLUTIONS DEJA APPORTEES

Il convient de mentionner dans ce chapitre qu'il existe 2 types d'entretien :

- L'entretien préventif dans lequel est classé l'entretien courant et l'entretien périodique ;
- L'entretien curatif qui englobe la réhabilitation et l'entretien d'urgence.

Tant qu'on parle encore d'une route nationale, tous ces travaux d'entretiens relèvent des Ministères des travaux publics, en l'occurrence le FER ou Fonds d'Entretien routier.

Devant les cruciaux problèmes d'instabilités de talus de la RN2, l'entretien devient un pôle d'activités importantes au sein de ce Ministère.

Les solutions qu'il a prises ont elles donc abouti à des résultats satisfaisants ?

I – Traitement de la chaussée :

Il consiste en :

- La réouverture rapide de la circulation et ce, en enlevant les matériaux éboulés ;
- le traitement de quelques surfaces ou corps de chaussée dégradée.

II - Résolution du problème d'éboulements :

a – Elargissement de l'emprise

Dans certains tronçons où le risque de glissement est élevé, l'élargissement de l'accotement s'avère important pour les raisons suivantes :

- Les usagers de la route sont à l'abri des dangers en cas de rupture brutale et spontanée de talus ;
- En qualité moyenne, les coulées boueuses n'affectent pas directement la plate forme circulaire, ce qui permet le passage normal des véhicules.

Selon le degré des risques qu'encourent les exploitants de la route, la largeur de l'accotement varie de deux (02) à quatre (04) mètres.

La réfection, la remise en état et le curage des fossés ont été faits parallèlement à cette tâche.

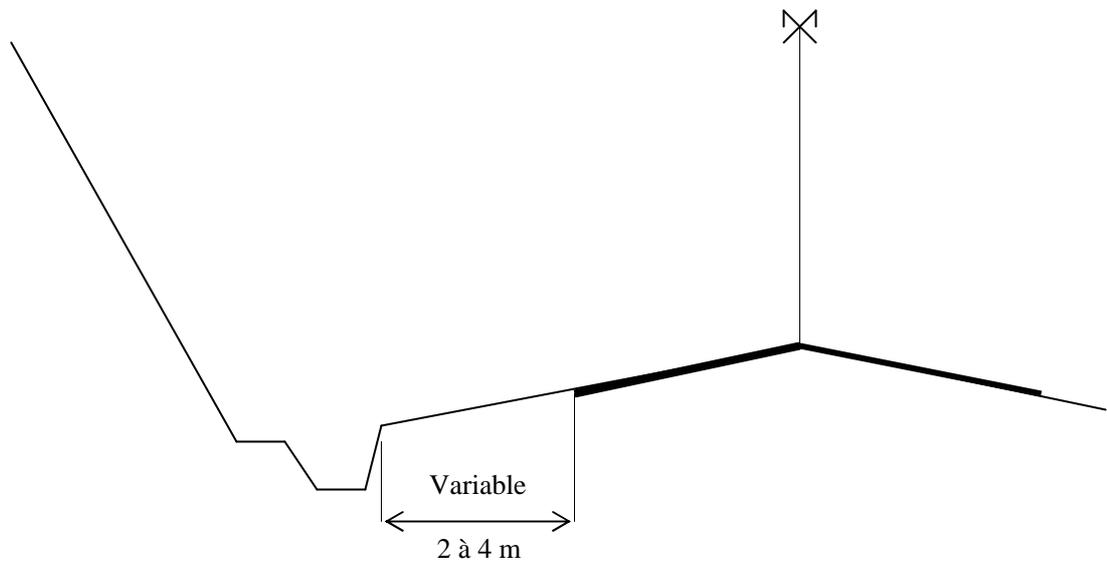


Figure 6 : Elargissement de l'accotement

b – Les ouvrages de soutènement :

Il existe différentes sortes d'ouvrages de soutènement à savoir les Murs – cantilevers, les murs en terre – armée, les parois moulées, les rideaux de palplanches et les murs poids.

Par leurs coûts et leurs techniques de mise en œuvre, ces ouvrages se distinguent les uns des autres.

Grâce à leur facilité d'exécution, ne demandant pas une main d'œuvre plus qualifiée, le choix des responsables se portait souvent sur les murs poids parmi lesquels on peut énumérer :

- les gabions : Technique de mise en œuvre

Il faut tout simplement noter que la plus petite dimension des moellons doit être au moins égale au triple de la plus grande dimension de leurs mailles et que tous les éléments d'un même gabionnage doivent former un ensemble monolithique indéformable. A cet effet, toutes les crêtes communes seront solidarisées à l'aide d'un fil galvanisé continu. De plus, loin du remplissage, les faces opposées de chaque gabion seront haubanées à mi hauteur par des tendeurs en fil galvanisé

- Maçonnerie de moellons

Hourdées par des mortiers dosés à 350, les maçonneries de moellons présentent beaucoup plus de sécurité vis-à-vis des usagers. Elles font parties des murs stabilisés par son poids.

On les rencontre souvent sur la route nationale N°2 en tant qu'ouvrage de soutènement des remblais.

c – Stabilisation génie – biologique

La définition de la Biologie comme une science des êtres vivants est trop large pour décrypter ce que masque l'expression « stabilisation Génie – Biologique » Il serait plus proche de partir du mot « Botanique » qui est une branche de la biologie et qui peut se définir comme une science traitant particulièrement les végétaux tels que les algues, les bryophytes (mousses), les cryptogames vasculaires, les phanérogames et les champignons.

La stabilisation génie biologique est donc l'ensemble des méthodes permettant de se prémunir contre les effets néfastes des eaux de ruissellement et des eaux d'infiltration sur les talus, et ce en recourant aux aides des végétaux.

Notons que certains végétaux comme les mousses, aide précieuse pour la protection contre l'effet de splash et l'érosion en nappe, empêchent l'assèchement du sol et que d'autres de genre Eucalyptus et bambous contribuent à assécher le sol par transpiration, et par voie de conséquence, à atténuer les risques d'éboulements. A la demande du Ministère des Travaux Publics, une étude effectuée conjointement par le FER et ONG en 2002 entre Brickaville et Toamasina et ils ont préconisé de :

- Mener une vaste campagne d'élagage sur le tronçon, et qui porte sur le flanc de talus et les sommets des talus sur une bande de 5 m étant donné que ces plantes, non élagués, alourdissent les talus et déclenchent les glissements à cause des secousses sismiques dues à l'effet du vent sur les frondaisons.

- reboiser le bassin versant environnant avec un arbre à forte transpiration, de fût de moyenne hauteur et à enracinement profond (de genre eucalyptus).

Remarques :

Tant qu'on reste encore dans le domaine de stabilisation génie biologique, la VGT (Vétiver Grass Technology) est sans doute la technologie la plus répandue et la plus vulgarisée mais pour le tronçon susmentionné, elle n'était recommandée pour les raisons suivantes :

- la plantation de vétivers est un dispositif de protection contre l'érosion en nappe alors que les cas fréquents observés faisaient état de mouvements en masse ;
- la végétation naturelle est proliférante et le vétiver sera vite envahi, étant donné qu'il ne se développe pas à l'ombre.

III – Résultats obtenus :

Depuis le premier bitumage de la RN 2, l'instabilité de talus, qui était à l'origine d'autres dégradations, restait toujours le problème le plus menaçant et jusqu'à maintenant, on n'arrive pas à l'écarter définitivement.

A cause des tassements différentiels et des mouvements incessants des terrains, conduisant à une forte poussée, les gabions s'écroulent encore, les maçonneries de moellons sont tellement fissurées qu'elles n'arrivent pas à assurer leurs fonctions. Les talus récemment aménagés sont encore sujets à des éboulements. La stabilisation génie biologique accompagnée du Programme environnementale II (PE II) et de la gestion locale sécurisée (GELOSE) des bassins versants environnants n'ont pas encore donné ces derniers mots.

De nombreuses explications peuvent éclaircir l'échec de toutes ces solutions mais il se pourrait que le fond du problème s'articule autour d'un point : le défaut de mesures préventives telles que les entretiens courants, la création et le curage des fossés de crêtes.



CONCLUSION

La RN2 subit chaque année des désordres de talus surtout durant la période cyclonique. L'intensité et la fréquence de ces dégâts ne sont pas les mêmes d'un tronçon à un autre et on a, de ce fait, divisé la zone d'étude en trois tronçons différents : zone à risque fort, zone à risque moyen, zone à risque faible. Par ailleurs, il faut signaler que les solutions déjà apportées n'arrivaient pas à écarter définitivement le problème.

PK	LOCALISATION	Véhicule particulier et Berline		Familiale et Bachée		Camion PT<10T		Camions 10T<PT<16T		Camions PT<16T		Trains doubles et remorques (citernes)	
		98	2000	98	2000	98	2000	98	2000	98	2000	98	2000
101 + 000	Antsirabe	470	313	480	381	289	84	415	312	17	12	473	260
206 + 000	Ranomafana	154	174	141	157	28	38	63	179	3	5	137	242
238 + 000	Ambalabe	188	133	128	153	51	19	88	86	2	10	147	157
328	Fanandrana	255	182	228	254	101	42	179	148	23	28	253	298

Source VPM

Tableau 5 : Evolution du trafic sur la RN2 de 1998 à 2001 (les plus récentes données)

DEUXIEME PARTIE

FACTEURS ENTRANT DANS L'INSTABILITE DE TALUS

INTRODUCTION

Partant du fait qu'aucun glissement ne se manifeste pas que lorsqu'une pluie exceptionnelle arrive, nous pensons que les facteurs climatiques ne sont pas écartés pour chercher les causes de l'instabilité.

Ruissellement et infiltration, lequel de ces deux paramètres sont les plus dangereux ? Agissent-ils simultanément ? C'est en dernier lieu qu'on évaluera la résistance de notre talus face à l'action de l'eau.

Chapitre premier : **FACTEURS CLIMATIQUES**

Lorsque le temps se détraque, occasionnant une pluie diluvienne, les terrains et particulièrement les talus, sont sujets à des désordres telles que les éboulements, les glissements. En effets, presque la totalité des dégâts recensés le long de la RN 2 ont été déclenchés par des conditions climatiques exceptionnelles ou tout simplement après une pluie persistante. Le climat de la zone étudié est généralement de type tropical chaud et humide avec une forte pluviométrie. C'est la raison pour laquelle l'étude dans ce chapitre portera sur les facteurs climatiques qui influent sur la stabilité des talus.

I – Précipitations :

a– Généralités :

Sources principales de l'approvisionnement en eau, les précipitations apparaissent comme des eaux en provenance de l'atmosphère et qui tombent soit à l'état liquide (pluie) soit à l'état solide (grêle). Elles sont, sous une température moindre, les résultats de la condensation des vapeurs d'eau en suspension à forte humidité, nombreux processus pourrait aboutir à la formation des précipitations (voir annexe)

b– Données :

Auprès des responsables du service météorologique, on a collecté des données en matière de précipitation dans les zones par lesquelles passe la fameuse route nationale n° 02
Tableau donnant les pluies d'Antananarivo à Manjakandriana. (Voir annexe)

TABLEAU RECAPITULATIF

Situation	Pluie annuelle (mm)	Nombre de jours (mm)	Pluie maximale pendant 24h (mm)
Antananarivo	1365.3	136	147
Manjakandriana	1620.0	165	227.5
Mandraka	2301.4	157	267.2
Moramanga	1400.8	205	183.3
Andekaleka	2929.4	192	310.5
Brickaville	2951.5	212	315.5
Toamasina	3367.6	255	358.6

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des précipitations**c- Commentaires :**

A l'issue d'une constatation globale, il paraît évident que : d'une manière décroissante, Décembre – Janvier – Février sont les mois les plus pluvieux.

- Hormis à Moramanga, l'intensité de la pluie annuelle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'océan indien, la surface évaporante, qui, grâce à sa température élevée ($> 24^{\circ}\text{C}$ en moyenne), dégage constamment une vapeur humide.

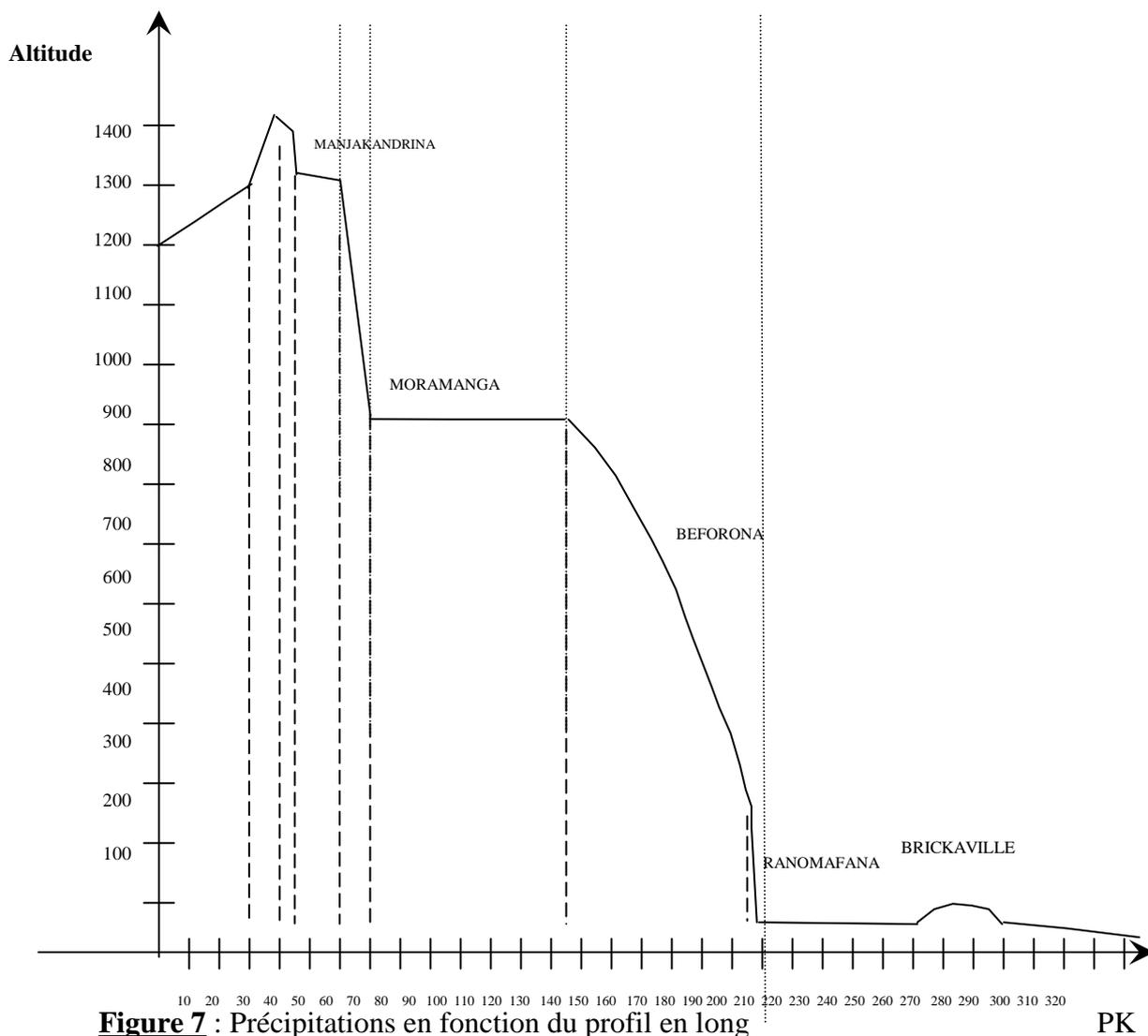
Par ailleurs, on peut diviser la zone en 4 zones climatiques homogènes ;

- la zone au voisinage de MANJAKANDRIANA et d'ANTANANARIVO où les précipitations annuelles tournent autour de 1500 mm réparties dans 150 jours de l'année.
- les régions correspondant aux 2 escarpements, celle de MANDRAKA et d'Andekaleka, où la précipitation élevée, est tout simplement répartie dans la moitié de l'année. Cette condition climatique se traduit par une intensité journalière de pluie excessive et par conséquent dévastatrice. Au mois de janvier par exemple, l'intensité est de 25 mm/jour
- la zone se trouvant entre la falaise d'Angavo et la falaise de Betsimisaraka où la précipitation annuelle, comparativement moindre, est répartie dans plus de 200 jours par an.

C'est la raison pour laquelle le tronçon de la RN 2 se trouvant dans cette zone est classé à risque moyen bien qu'il se trouve à une altitude élevée (900 m).

- la zone côtière où chaque mois est caractérisé par une pluie persistante (20 jours par mois) conduisant ainsi à une précipitation annuelle d'une telle ampleur (3300mm). Si l'itinéraire traversant cette zone est classée à risque moyen, c'est que les facteurs climatiques y sont prépondérants. On peut résumer tous ces commentaires par le graphique suivant :

Pluie Annuelle (mm)	1500	2301	1400,8	2930	3300
Nombre de jours (j)	150	157	205	192	250



II – Les cyclones

a– Généralités

Les cyclones tropicaux sont des dépressions qui, dans l'hémisphère sud, font leur apparition au début de l'été austral, soit vers le 15 Novembre. La saison cyclonique dure en général jusqu'au 15 avril. Ces cyclones tropicaux prennent naissance, le plus souvent, vers 10° S dans les zones de basses pressions intertropicales, au niveau de la zone de convergence entre l'alizé austral du sud-est et l'alizé boréal du nord-est. Immenses tourbillons de vent d'une violence inouïe pour certains, les cyclones tropicaux figurent parmi les catastrophes naturelles les plus puissantes et les plus dangereuses. Les cyclones tropicaux, appellation dans l'océan indien, sont connus sous différents noms. (Voir annexe)

b – Situation de la zone d'étude

Comme les cyclones tropicaux prennent souvent naissance à 10°S et compte tenu des trajectoires qui s'orientent vers le Sud-ouest, Madagascar, surtout les régions de Tamatave, dont la latitude avoisine 18°, souffre annuellement d'un , de deux (voire plus) passages cycloniques. C'est ainsi que de 1939 à 1972, 46 cyclones ont sévi à Madagascar et pire encore, ce nombre augmente incessamment ces dix dernières années.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des cyclones qui intéressent notre zone d'étude : (voir aussi trajectoire de cyclones)

Saison cyclonique	Nom du cyclone tropical	Région de passage	Quantités de pluies max en 24 h (mm)
93 - 94	DAISY	Tamatave	39
		Moramanga	32
	GERALDA	Tamatave	190
		Moramanga	68
	KELVINA	Tamatave	198
Moramanga	127		
LITONNE	Tamatave	85	
	Moramanga	143	
NADIA	Tamatave	94	
95 - 96	BONITA	Tamatave	170
	EDWIGE	Moramanga	164
	HONORININA	Moramanga	164
96 - 97	FABRIOLA	Tamatave	128
99 - 2000	ELINE	Brickaville,	98,7
	GLORIA	Tamatave	139,6
	HUDAH	Tamatave	106,1
		Tamatave	

Source :service météorologique

Tableau 8 : Caractéristiques des cyclones

c – Commentaires

Comme nous pouvons les constater, les cyclones tropicaux apportent des quantités de pluies importantes qui, nous les verrons dans le chapitre suivant, favorisent l'infiltration tout comme le ruissellement et qui, par suite, engendreront des instabilités des talus. Pendant la période cyclonique, les arbres qui sont appelés à protéger les terrains fonctionnent inversement. En effet, les secousses sismiques dues à l'effet du vent qui change de sens de temps à temps sur la frondaison pourraient déclencher des dégâts à l'encontre des talus.

Les désordres sont et chaque année au rendez-vous sur la RN 2 si l'on étudie la trajectoire des cyclones de genre Géralda dont la période de retour est de 10 ans.

III- Autres facteurs

Une évapotranspiration importante se traduit par un assèchement rapide du sol et par l'atténuation des eaux de ruissellement. Elle dépend non seulement de la nature de la surface évaporante mais aussi de la condition atmosphérique.

En effet, la transpiration qui est un phénomène physique d'évaporation de l'eau des plantes vers l'atmosphère peut être considérée comme la réponse de la plante à la demande d'évaporation de l'air.

Appelée aussi pouvoir évaporant de l'air, la demande d'évaporation représente l'énergie disponible pour évaporer une certaine quantité d'eau. Elle relève de nombreux facteurs à savoir l'humidité et la température de l'air, le rayonnement solaire et la régimes des vents

a – Le vent

Il remplace l'air humide situé au contact des surfaces évaporantes par des masses d'air plus sèches.

Le pouvoir évaporant est d'autant plus grand que la vitesse du vent est élevée. Le vent dominant reste toujours l'alizé qui est caractérisé par une direction sud ou sud-est. L'épaisseur de l'alizé varie entre 2000 et 4000 mètres et les basses couches sont déviées par les reliefs vers le nord. Ce qui explique cette direction Sud dans la région de Toamasina.

b - Humidité atmosphérique

L'air plus sec possède un pouvoir évaporant plus grand

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité à Toamasina	85	87	87	87	87	87	88	86	85	84	85	85
Humidité à Antananarivo	81	81	79	78	78	78	78	76	72	71	76	79

Tableau 9 : Moyenne d'humidités mensuelles

22 Juin 01, 1961-1990, Longitude : 49° 24'E, Latitude 18° 07 S

Source :service météorologique

L'alizé véhicule des masses d'air humides qui proviennent de l'évaporation au niveau de la surface de l'océan indien. On s'attend donc à une forte humidité, laquelle diminue au fur et à mesure qu'on quitte la région côtière.

c - Température de l'air et le rayonnement solaire

Une température élevée agit favorablement à l'évaporation. Par ailleurs, l'évaporation est un phénomène consommateur d'énergies, lesquelles sont fournies par le rayonnement solaire.

La température à Toamasina varie de 16°C (mois de Juin) à 32°C (mois de Décembre), soit une température moyenne annuelle de 24°C .

D'Est en Ouest jusqu'à Antananarivo, la température diminue incessamment.

Chapitre II ANALYSE DES BASSINS VERSANTS

Selon le mécanisme représenté par la figure ci-dessous, l'eau précipitée se répartira en eau évapo-transpirée, en eau infiltrée et en eau ruisselée, entre lesquelles existent une interdépendance qui est à l'origine du cycle global de l'eau.

L'importance de chacun de ces paramètres hydrauliques (précipitation, infiltration, ruissellement, évaporation) relève de la caractéristique de l'atmosphère déjà traitée précédemment et de la lithosphère qui fera l'objet de ce chapitre.

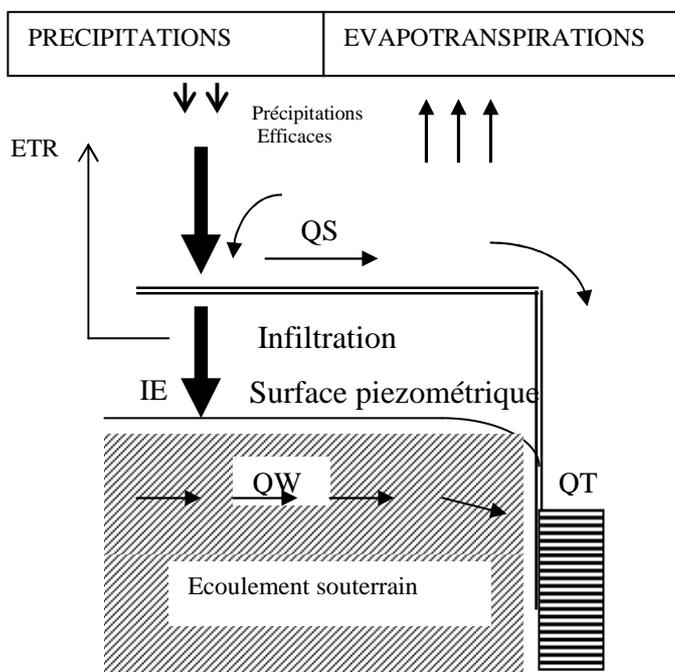


Figure 8 : Répartition des précipitations

I - L'infiltration

L'estimation de l'importance du processus de l'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines.

a - Définitions et paramètres descriptifs de l'infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de suction. L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

- le régime d'infiltration $i(t)$ nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.
- l'infiltration cumulative, notée $I(t)$ est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (figure ci- dessous)

$$I(t) = \int_0^t i(t) dt$$

$t = t_0$

Avec $I(t)$: infiltration cumulative au temps t [mm]

$i(t)$: régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h]

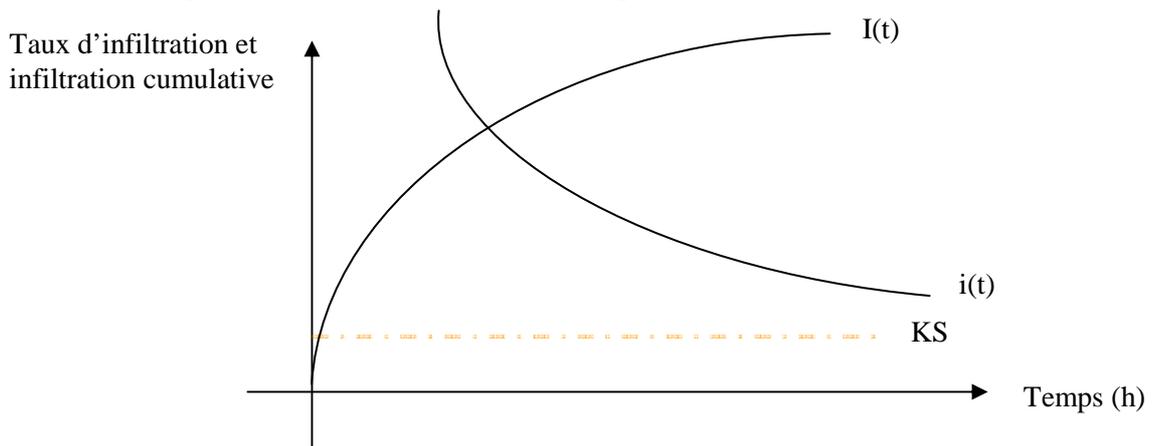


Figure 9 : Taux d'infiltration et infiltration cumulative en fonction du temps

- **La conductivité hydraulique** à saturation K_S est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et

homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul d'infiltration.

- **La capacité d'infiltration** ou capacité absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est-à-dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

- **La percolation** désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.

- **La pluie nette** représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. La pluie nette est déduite de la pluie totale, dans des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain. La séparation entre la pluie infiltrée et la pluie écoulee en surface s'appelle fonction de production.

b - Facteurs influençant l'infiltration

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs ci-dessous :

- Le type de sol (structure, texture, porosité). Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'absorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie d'infiltration.

- La compaction de la surface du sol due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques). L'utilisation de lourdes machines agricoles dans les champs peut par exemple avoir pour conséquence la dégradation de la structure de la couche de surface du sol et la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur (sensible au labour). La figure ci-dessous montre à titre d'exemple les différentes évolutions du régime d'infiltration au cours du temps selon le type du sol

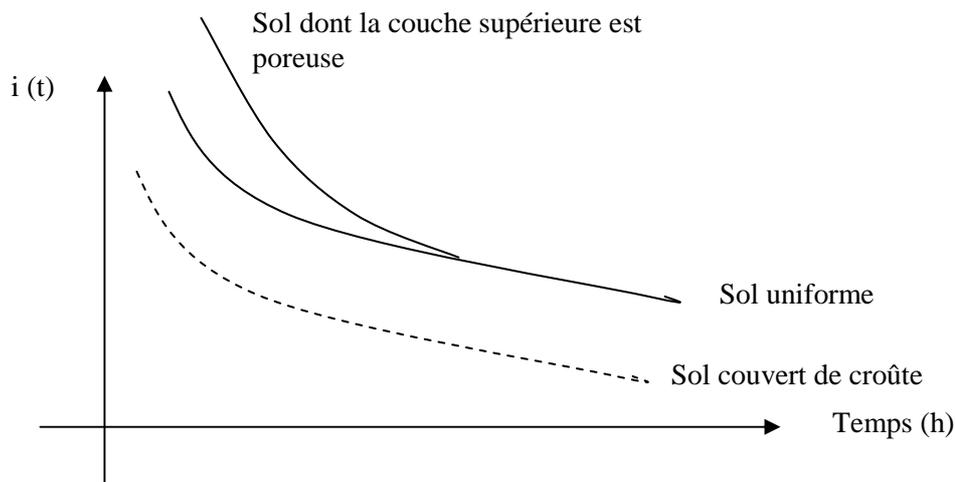


Figure 10 : Régime d'infiltration en fonction du temps pour différents types de sol (d'après Musy, Soutter, 1991)

- La couverture du sol : la végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau pour pénétrer à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système racinaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue par voie de conséquence le phénomène de battance.
- La topographie et morphologie : la pente par exemple agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.
- La teneur en eau initiale du sol (conditions antécédentes d'humidité). L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol.

Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide. L'humidité d'un sol est généralement appréhendé en étudiant les précipitations tombées au cours d'une certaine période précédant un événement pluvieux.

Les indices de précipitations antécédentes (IPA) sont souvent utilisés pour caractériser les conditions d'humidité antécédentes à une pluie.

Finalement, les facteurs les plus influents, pour une même topographie, sont le type de sol, sa couverture et son taux initial d'humidité.

c – Variation du taux d’infiltration au cours d’une averse

La variabilité spatiale et temporelle de la teneur en eau dans le sol est décrite par des profils d’infiltration ou plus généralement profils hydriques successifs représentant la distribution verticale des teneurs en eau dans le sol, à différents instants donnés. Dans un sol homogène et lorsque la surface du sol est submergée, le profil hydrique du sol présente : une zone de saturation, située immédiatement sous la surface du sol ; une zone proche de la saturation et en apparence uniforme ; et finalement une zone d’humidification qui se caractérise par une teneur en eau fortement décroissante avec la profondeur selon un fort gradient d’humidité appelé front d’humidification qui délimite le sol humide du sol sec sous-jacent (figure ci-dessous)

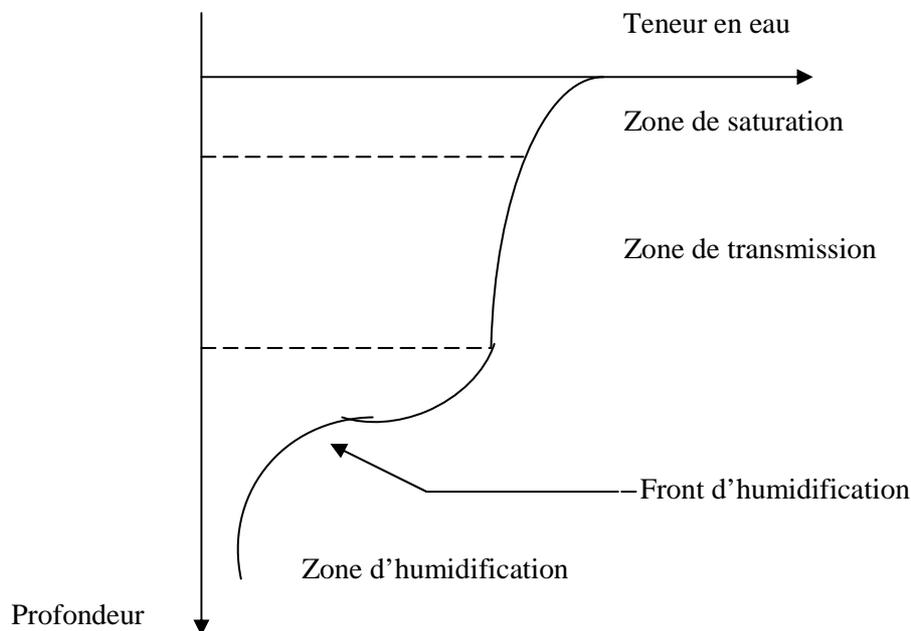


Figure 11 : Caractéristiques du profil hydrique au cours d’une infiltration (tiré de Musy, Soutter 1991)

Finalement la pluie qui arrive à la surface du sol y pénètre assez régulièrement selon un front d’humectation qui progresse en fonction des apports, selon le jeu des forces de gravité et de succion. La figure ci-dessous montre comment au cours d’une infiltration, la zone de transmission s’allonge progressivement tandis que la zone et le front d’humidification se déplacent en profondeur, la pente de ce dernier augmentant avec le temps.

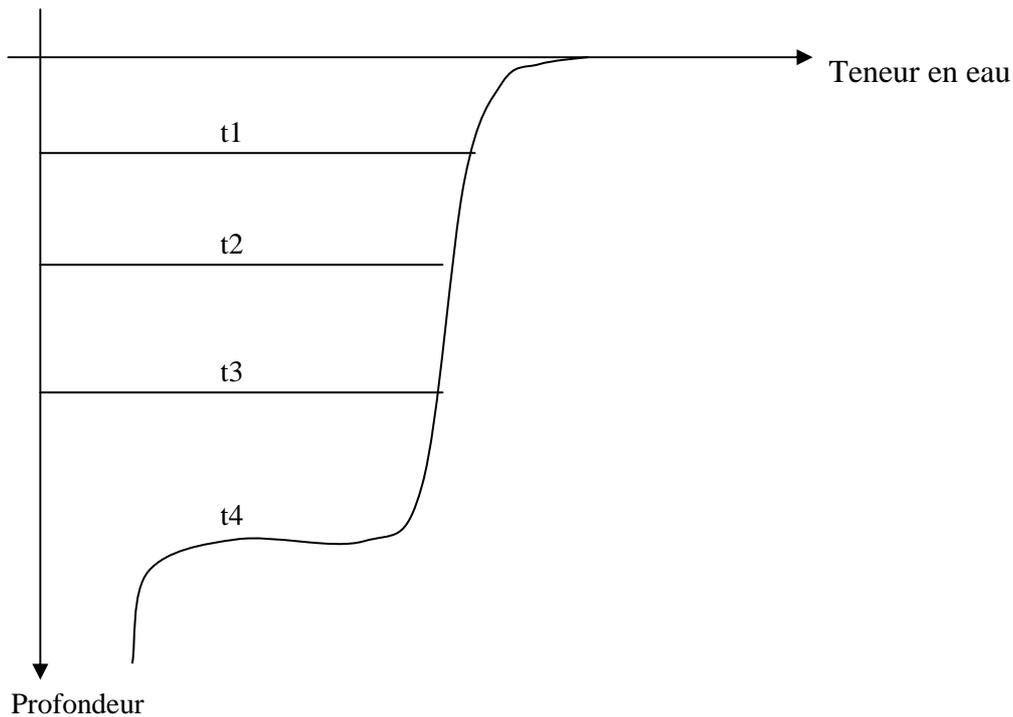


Figure 12 : Evolution du profil hydrique au cours de l'infiltration (tiré de Musy, Soutter 1991)

Au cours d'une averse, la capacité d'infiltration du sol décroît d'une valeur initiale jusqu'à une valeur limite qui exprime le potentiel d'infiltration à saturation. En fait, elle diminue très rapidement au début de l'infiltration par suite, la décroissance est plus progressive et tend en règle générale vers un régime constant, proche de la valeur de la conductivité hydraulique à saturation. Cette décroissance, due essentiellement à la diminution du gradient de pression, peut être renforcée entre autre par le colmatage partiel des pores et la formation d'une croûte superficielle suite à la dégradation de la structure du sol provoquant la migration de particules.

Si l'on compare l'intensité de la pluie et la capacité d'infiltration d'un sol, il existe deux possibilités :

- Tant que l'intensité est inférieure à la capacité d'infiltration, l'eau s'infiltré aussi vite qu'elle est fournie. Le régime d'infiltration est dans ce cas déterminé par le régime d'alimentation. C'est le cas au début du processus. Le temps nécessaire pour égaler la capacité d'infiltration est variable. Il dépend principalement des conditions antécédentes d'humidité du sol et de l'averse. Le temps requis est d'autant plus long

que le sol est sec et que le régime d'alimentation est voisin de la conductivité hydraulique à saturation K_s .

- Lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, l'excédent d'eau s'accumule en surface ou dans les dépressions formant des flaques ou bien encore s'écoule en suivant les dénivelés topographiques. Dans ce cas, on a atteint le temps de submersion et l'on parle d'infiltration à capacité (le régime d'infiltration est limité par la capacité d'infiltration du sol). Comme la détermination du seuil de submersion définit le début de l'écoulement superficiel (principe de Horton), on peut alors déduire la lame ruisselée provoquée par une averse (volume du ruissellement divisé par la surface du bassin versant). Celle-ci correspond à la pluie nette (figure ci-dessous).

Auteur	Fonction	Légende
Horton	$I(t) = i_f + (i_0 - i_f) e^{-yt}$	<p>$i(t)$: capacité d'infiltration au cours du temps</p> <p>i_0 : capacité d'infiltration initiale</p> <p>i_f : capacité d'infiltration finale</p> <p>y : constante fonction de la nature du sol [min^{-1}]</p>

II – Les écoulements

a- Généralités

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On distingue dans un premier temps deux grandes types d'écoulements, à savoir : les écoulements " rapides" et par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de " lents" qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires. Les écoulements qui gagnent rapidement l'exutoire pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface et en écoulement de subsurface :

- L'écoulement de surface ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérantes.
- L'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de violence plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

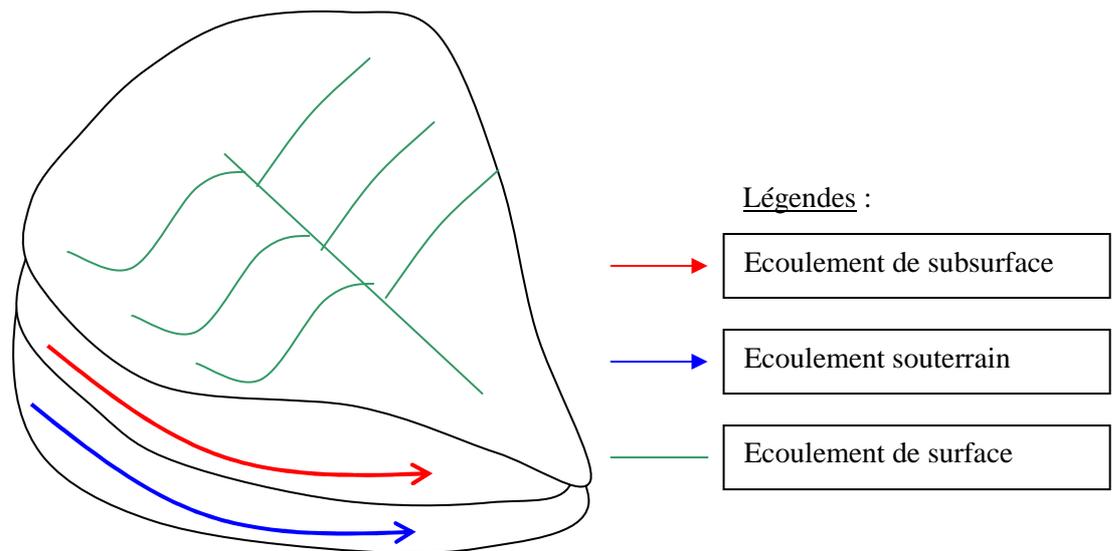


Figure 13 : Les différents types d'écoulements

Les différentes composantes de l'écoulement dans le cas simple d'une averse uniforme dans le temps et dans l'espace, sont également représentées schématiquement dans la figure ci-dessus.

Ces processus qui se produisent à des vitesses très différentes, mobilisent des eaux d'âges d'origine et de cheminement très distincts, et permettent d'expliquer la plupart des comportements hydrologiques rencontrés sur les bassins versants, depuis les crues de

"ruissellement pur" jusqu'aux crues où la contribution à l'écoulement final est essentiellement hypodermique ou phréatique.

Les éléments les plus importants dans la génération des crues sont finalement des écoulement de surface et subsurface et les précipitations directes à la surface du cours d'eau, l'écoulement souterrain n'entrant que pour une faible part dans la composition du débit de crue.

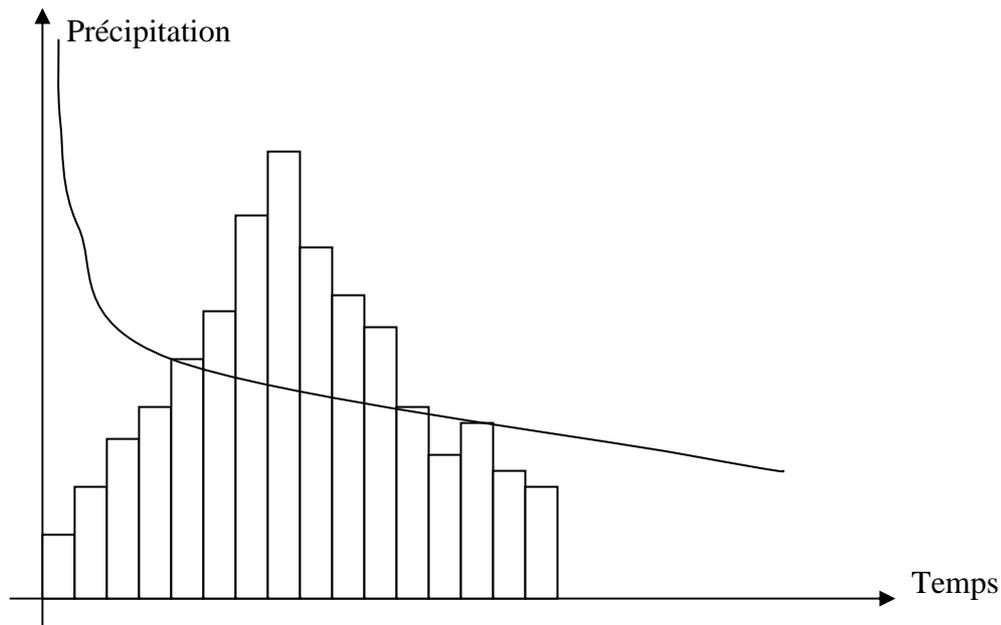


Figure 14 : Découpage des différentes phases d'un hydrogramme de crue

Rappelons que l'écoulement de surface ne peut pas être mesuré directement sur un versant, sauf dans le cas de très petites parcelles expérimentales équipées à cet effet. Généralement, on mesure indirectement cette composante des écoulements par l'évaluation des débits dans le réseau hydrographique. Les procédures permettent de distinguer l'écoulement de surface de l'écoulement hypodermique et souterrain.

b -L'écoulement de surface

Après interception éventuelle par la végétation, il y a partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol :

- en eau qui s'infiltré et qui contribue, par un écoulement plus lent à travers les couches de sol, à la recharge de la nappe et au débit de base.
- et en ruissellement de surface dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable, entre autre selon l'humidité du sol). Cet écoulement de surface, ou l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes, forme l'essentiel de l'écoulement rapide en crue.

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol (écoulement Hortonien) est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydraulique des bassins en climats semi-arides ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. Il est généralement admis que même des sols naturels présentant une conductivité hydraulique élevée en climats tempérés et humides peuvent avoir une capacité d'infiltration inférieure aux intensités maximales des précipitations enregistrées.

Cependant des crues sont fréquemment observées pour des pluies d'intensité inférieure à la capacité d'infiltration des sols. Dans ce cas, d'autres processus tel que l'écoulement sur des surfaces saturées en eau, permettent d'expliquer la formation des écoulements. Des zones de sol peuvent être saturées soit par nappe perchée par exemples, soit par contribution directe des précipitations tombant sur ces surfaces saturées.

Il existe ainsi deux modes principaux d'écoulement de surface qui peuvent se combiner :

- l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (écoulement hortonien)
- l'écoulement sur surfaces saturées

c- L'écoulement de subsurface

Une partie des précipitations infiltrée chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître.

III – Caractéristiques de la zone d'étude

Madagascar présente un relief accidenté. Le 2/3 de l'île est constitué par un socle cristallin à relief important (plus de 1500 à 1800 d'altitude) dont 3/5, soit 40% de la superficie, sont formés par un sol ferrallitique. De d'autre coté, les forêts denses de la patrie orientale commencent à être défrichées pour devenir des forêts secondaires ou savoka.

a– Relief et paysage

La région de Manjakandriana, couverte d'eucalyptus, de savanes et de steppes à Aristide est formée par une succession de collines coupées par un chaos de boules granitiques. A Mandraka, une zone de falaise d'Angavo, les forêts sont denses, sempervirentes et pluristratifiées. Les émergents peuvent dépassés 30m de hauteur et les sous bois sont caractérisés, par l'abondance de fougères arborescentes sur la falaise de Betsimisaraka qui est le résultat des mouvements tectoniques s'échelonnant depuis le précambrien jusqu'à nos jours. On y rencontre des forêts défrichées hormis celles qui se trouvent en haute altitude où les habitants sont encore clairsemés. Aussi bien à Moramanga qu'à Brickaville jusqu'à Toamasina, on assiste à des peuplements de forêts secondaires puisque l'activité principale demeure la culture traditionnelle de riz su Tavy et, dans certaine région, l'exploitation forestière. La différence réside surtout sur le fait que ces forêts se développent sur des reliefs polyédriques, à haute altitude à Moramanga

b– Pédologie

La pédologie est une branche de la géologie qui étudie les caractères chimiques, physiques, et biologiques des sols. On se limitera dans ce paragraphe aux caractéristiques pédologiques qui pourraient influencer sur le ruissellement et l'infiltration.

La partie orientale de Madagascar est formée par des sols ferrallitiques jaunes sur rouges sur granites et granites migmatiques. En effet, d'après G. Aubert, la ferralitisiation est un ensemble de phénomènes qui aboutissent à une individualisation des éléments tels que silice (Si O₂), oxyde et hydroxydes en particulier de fer et d'aluminium, origine de la couleur vive ; ces derniers s'accumulent dans l'horizon appelé aussi horizon d'accumulation.

Une température élevée et une pluviométrie annuelle d'au moins 1000mm, ce qui

est le cas dans la partie orientale de Madagascar, sont nécessaires pour que la ferrallitisation puisse se produire. C'est pourquoi d'ailleurs ces sols constituent une vaste ceinture centrée sur l'équateur.

De l'autre côté, si la ferrallitisation est très poussée, la gibbsite, en présence de silice combinée donneront naissance à des kaolinites à ce point que l'argile rencontrée dans notre itinéraire sont essentiellement kaolinitiques.

Bien que ces sols soient tous dénommés sols ferrallitiques, on observe des différences d'une région à une autre surtout au niveau de la nature des horizons constituants.

On distingue les trois sous classes suivantes :

- les sols ferrallitiques pénévulés ou fortement rajeunis ; présence faible profondeur, en général à moins de 60cm, d'un horizon limoneux où l'on reconnaît des minéraux primaires plus ou moins altérés. Les agrégats sont généralement poreux et la cohésion est toujours faible. Ces sols sont toujours situés sur pente forte.
- les sols ferrallitiques rajeunis : il existe en moyenne profondeur (60cm à 2,5m) un horizon BC ou C limoneux. Ils se trouvent dans les zones moins pentues que le précédent.
- les sols anciens : même au-delà de 3m, on rencontre encore des horizons argileux. Cela veut dire que le processus d'altération est très poussé sans qu'une période érosive, origine de phénomène de rajeunissement, n'a affecté le terrain.

Profils représentatifs d'un sol fortement rajeuni PK 147

0 – 20cm : horizon A humifère

20 – 30cm : horizon de transition AB

30-100cm : CB : Argile limoneuse, rouge ou rouge jaunâtre. Cohésion moyenne à faible

à partir de 100cm : limons sableux, présence de minéraux primaires.

Structure polyédrique à tendance particulière

Forte porosité, cohésion faible

Profils représentatifs d'un sol rajeuni

0 – 20 cm : horizon A humifère grumeleux, de couleur brune jaunâtre argileux, cohésion moyenne.

Passage assez progressif avec l'horizon sous – jacent

20 – 70cm : Horizon BC de couleur rouge jaunâtre texture argileuse, structure polyédrique.

70 – 130cm : Horizon CB de couleur jaune rougeâtre. Limons sableux. Structure polyédrique particulière.

A partir de 130 cm : Roche de couleur beige jaunâtre à beige blanchâtre. Sable – limoneux, structure particulière, nombreux (quartz, feldspath)

IV – Estimation du ruissellement et de l'infiltration :

Le cycle de l'eau dépend de nombreux facteurs, et parfois lesquels influent contradictoirement. Certains favorisent l'infiltration alors qu'en même temps d'autres facilitent le ruissellement. L'exemple le plus convaincant concerne un bassin versant de pente abrupte mais couvert de végétation, moyennement perméable et dont le débit d'alimentation est élevé. L'estimation demeure une opération délicate si bien qu'il faut tenir compte des résultats expérimentaux obtenus sur terrain.

a – Résultats de l'expérience :

L'expérience, faite par les spécialistes du Ministère des Eaux et Forêts, s'est déroulée à Analamazaotra, à environ 140 Km de Tananarive si l'on suit le RN2.

Rappelons que les bassins versants, de pente raide, sont constitués par des sols ferrallitiques fortement rajeunis sur gneiss migmatite de texture argilo – sableuse.

L'opération consistait à mesurer le débit de ruissellement pour pouvoir calculer le coefficient de ruissellement (hauteur d'eau ruisselée/ pluviomètre)

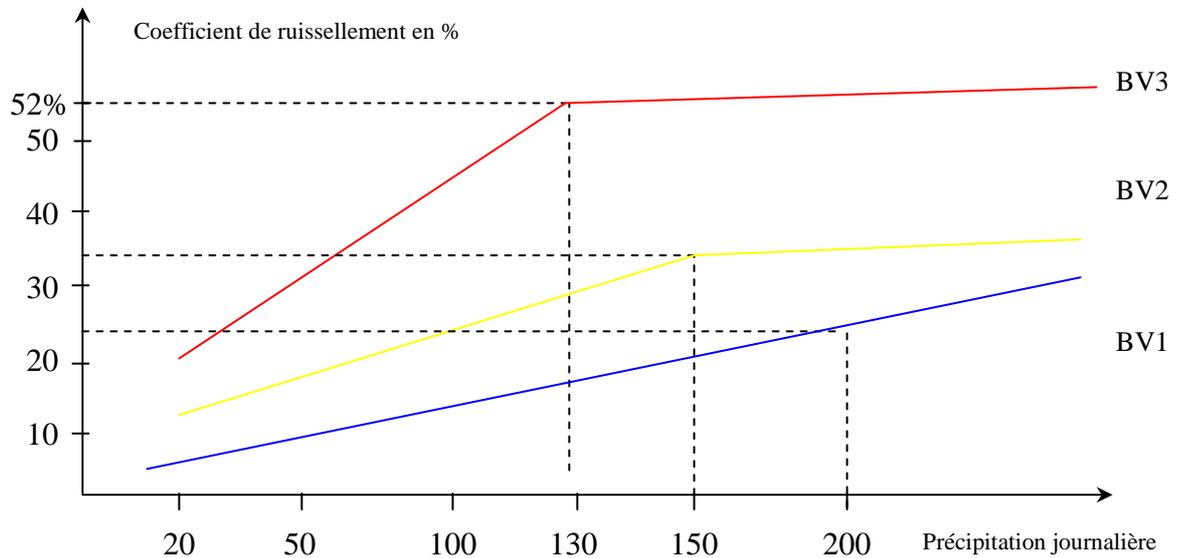


Figure 15 : Résultat de l'expérience à Analamazaotra

BV1 : Bassin versant couvert d'eucalyptus

BV2 : Bassin versant couvert de forêt primaire

BV3 : Bassin versant couvert de Savoka à forêt secondaire

- A partir d'une pluviométrie de 20mm/j, ce qui est déjà exceptionnelle, le coefficient de ruissellement augmente régulièrement jusqu'à une valeur maximale dépendant de la couverture du sol.

- connaissant la valeur maximale du coefficient de ruissellement lors d'un passage cyclonique ou lors d'une précipitation exceptionnelle, et en estimant la valeur de l'évapotranspiration, on peut déduire la proportion de l'eau qui s'infiltre efficacement.

- lorsqu'il pleut normalement (pluviométrie < 20mm/j). Ces courbes ne méritent aucun intérêt mais on peut affirmer que le coefficient de ruissellement reste faible.

- signalons que l'expérience a été faite sur des bassins versants déjà gorgés d'eau (pluie abondante tombant au plus de 24 h avant l'essai) ; cela veut dire que la valeur maximale trouvée est un maximum absolu.

b – Antananarivo - Manjakandriana

Par rapport aux bassins versants d'Analamazaotra, ceux de la région de Manjakandriana présentent une pente et une humidité initiale faibles. On déduit aisément que le coefficient de ruissellement y est largement inférieur à 26%.

A Analamazaotra, si le coefficient de ruissellement pour des bassins versants couvert de forêts autochtones est plus élevé par rapport à ceux peuplés d'eucalyptus, c'est que :

- l'évaporation directe à travers la litière serait plus grande sous couvert d'eucalyptus. Ceci serait plausible puisque les feuilles étroites souvent disposées verticalement favorisent l'insolation.
- la consommation d'eau par l'eucalyptus serait plus grande que celle des arbres autochtones. Ceci est possible également parce que la production de matière ligneuse est nettement supérieure donc vraisemblablement son besoin en eau.

L'eucalyptus est une plante à forte transpiration et compte tenu de la condition atmosphérique, caractérisée par l'humidité de l'air et la vitesse du vent comparativement faible, le pouvoir évaporant de l'air serait plus élevé. On peut donc affirmer que la majeure partie de la quantité d'eau qui ne ruisselle pas est disparue par évapotranspiration.

En somme, seul le ruissellement qui est à craindre mais à une quantité faible.

c – Région de MANDRAKA et d'Andekaleka :

Les résultats obtenus à Analamazaotra (BV2) sont représentatifs de toutes les zones hormis au voisinage du bas – Mangoro qui est couvert de Savoka et où on devrait prendre les résultats du BV3. En effet, on aperçoit généralement un même type de sol, une topographie semblable et une pareille condition climatique qui se traduisent par un taux d'humidité initial sensiblement égal.

L'estimation peut se résumer comme suit

	MANDRAKA et haut MANGORO	Bas MANGORO
Coefficient de ruissellement	32%	52%
Couverture de sol	- forêts primaires évapotranspiration assez élevée	- forêts secondaires évapotranspiration assez faible
Atmosphère	Pouvoir évaporant de l'air assez élevé	Pouvoir évaporant de l'air faible
Infiltration	à craindre	à craindre

Tableau 10 : Résumé des paramètres hydrologiques – MANDRAKA

d – Région de MORAMANGA :

Compte tenu de la pente raide du bassin versant et de la couverture en savoka, les résultats du BV N°3 à Analamazaotra sont plutôt représentatifs. Mais, vu la précipitation comparativement faible et régulièrement répartie dans toute l'année, ce qui rend le taux d'humidité initiale faible, on s'attend à un coefficient de ruissellement un peu moindre mais demeure toutefois élevé.

Cette région est dotée d'une atmosphère et des couvertures de capacité d'évapotranspiration moyenne si bien que l'infiltration mérite une attention particulière.

e – Région littorale entre Brickaville et Toamasina :

Par rapport au bassin versant n°3 de la région d'Analamazaotra, les vitesses de ruissellement sont moindres. Il ne faut perdre de vue que nous nous trouvons dans une zone pluvieuse. La pluviométrie annuelle de 3200 mm répartie presque dans toute l'année se traduit par une présence permanente d'eau dans le sol d'autant plus que les plantes et l'environnement atmosphérique ne contribuent pas à l'assèchement.

f – Remarque et Résumé :

Les feux de brousse et la culture sur brûlis deviennent actuellement une pratique habituelle à Madagascar. Comme 2 à 3 ans sont nécessaires pour la recouverture des bassins versant de ce genre, il faut faire attention puisque le coefficient de ruissellement pourrait augmenter excessivement s'élevant jusqu'à 92% à Analamazaotra par exemple.

Cette remarque a été tenue compte dans les analyses précédentes parce qu'apparemment il n'y avait pas des terrains récemment incendiés.

D'une manière générale, on distingue deux sortes d'érosions : l'érosion en masse lors de laquelle les particules tendent à se déplacer en masse essentiellement sous l'effet de la pesanteur et l'érosion superficielle qui correspond à la mise en mouvement des particules du sol par des forces autre que la pesanteur, par exemple le ruissellement de l'eau à la surface du sol, l'impact de la goutte des pluies ou du vent.

L'érosion en masse correspond les divers types de glissements tels que les enroulements ou chutes de masse rocheuse de grande ampleur, les glissements plans et les glissements rationnels dans les déblais ordinaires. On ne sait pas où on va classer les coulées boueuses qui sont des déplacements des masses de sol suites au dépassement de la limite de liquidité des matériaux considérés et provoqués par les eaux de ruissellement.

Il reste à savoir maintenant si les talus tiennent bien face aux désordres causées par l'eau de ruissellement et par la présence d'eau en écoulement ou non dans la partie du massif susceptible de se déplacer.

I - Caractéristiques des talus

Elles comprennent la géométrie, la propriété du sol et la couverture des talus. A chaque talus correspondent des caractéristiques mais il nous est impossible de donner ici toutes ces caractéristiques si bien qu'on a pris un profil représentatif de chaque tronçon.

Vu la diversité du profil d'un talus à un autre, on est amené à donner ici le profil représentatif de chaque tronçon que nous jugeons homogène.

Au niveau des caractéristiques du sol, on prendra les hypothèses suivantes :

- pour les sols ferallitiques rajeunis, la présence de l'horizon B argileux et rubéfié est fort probable si bien qu'un sol de nature « Limon – argileux » serait considéré.
- pour un sol fortement rajeuni, l'hypothèse d'un sol de nature « Limon – sableux » s'avère intéressante puisque le phénomène d'altération n'est pas encore développé et il existerait des minéraux qui ne sont pas encore altérés à savoir la silice (SiO_2) et le feldspath (silicate double d'aluminium et de potassium).

a - Tronçon 1 (Antananarivo – Manjakandriana)

Talus dénudés

Profil représentatif de chaque tronçon

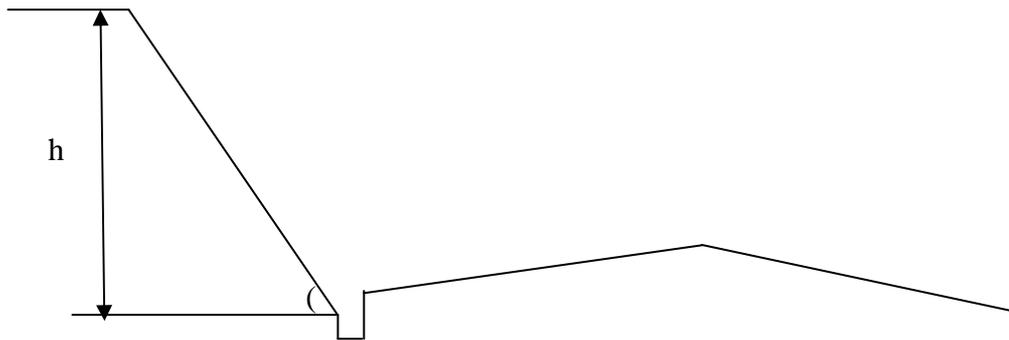


Figure 16 : Profil en travers du tronçon Antananarivo – Manjakandriana

Tronçon Antananarivo – Manjakandriana

Hauteur : 6m ; angle : 60°

b - Tronçon 2 (Mandraka)

Couvert de végétation, parfois des plantes ligneuses mais dénudés après éboulement.

Hauteur : 15m ; angle : 70°

c - Tronçon 3 (Moramanga)

Talus dénudés (hauteur : 7m ; pente : 60°)

d - Tronçon 4 (Beforona)

Dénudés en, haut et ouvert de végétation

Hauteur : 15m ; angle : 60°

e - Tronçon 5 (Brickaville – Tamatave)

Couvert de végétations arbustives

Hauteur : 6m ; angle : 45°

II - Résistance à l'érosion superficielle

Le phénomène d'érosion est engendré dès qu'une première particule détachée du reste de sol par l'action combinée de la percussive de la goutte de pluie et du pouvoir dispersant de l'eau est entraînée par les forces du ruissellement. A partir de ce moment là, il se produit une concentration de l'écoulement donc une augmentation de son débit et de sa vitesse à l'endroit où se trouvaient les particules précédentes, soit enfin de compte une plus grande potentialité pour entraîner les particules suivantes et ainsi de suite. L'érosion pluviale est un phénomène qui, une fois amorcée, s'accélère et se poursuit tant que la condition de la pluie qui l'a initiée ne régresse pas et qui lorsqu'il est interrompu, peut reprendre dès que les conditions de son réamorçage sont à nouveau retrouvées.

Le mauvais état voire l'inexistence des ouvrages d'assainissement tels que fossé extérieur et descente d'eau pour collecter la quantité d'eau de la part des bassins versants expose notre talus à des désordres graves parmi les quelles on peut citer les suivantes :

a - Coulées boueuses

La limite de liquidité de limon argileux est de l'ordre de 27%. Le dépassement de cette valeur dû à l'action des eaux de ruissellement entraîne des écoulements qui sont à l'origine de l'obstruction de quelques parties du réseau d'assainissement.

b - Effet de cascade

Le cascade ou chute d'eau provoque l'affouillement des pieds de talus qui, par suite, engendrera des glissements emportant des quantités des matériaux assez élevées.

c - L'atteinte à l'esthétique

La condition « confort des usagers » n'est pas satisfaite à cause de la formation des petites ravines sur le talus dues à l'écoulement de l'eau couplé par l'effet de splash sur le talus.

L'atteinte à l'esthétique ainsi que les 2 autres susmentionnés se manifestent sur des talus dénudés ou récemment glissés par la lavakisation.

Si elle prend naissance sur le bassin versant amont, la lavakisation constitue une menace pour la stabilité des talus.

III - Résistance au glissement

a - Mécanisme d'infiltration

Les sols ferallitiques fortement rajeunis sont constitués d'un horizon moyennement perméable en surface et à partir de 2 à 3m de profondeur environ, les couches deviennent de plus en plus poreuses en profondeur. Aux moments de précipitation, l'eau d'infiltration est perchée temporairement à une profondeur et il s'établit un écoulement avec un gradient hydraulique que nous avons pris égal à 0,15 dans notre cas. Le niveau de cette eau d'infiltration descend si l'apport fourni par la pluie et les crues persiste.

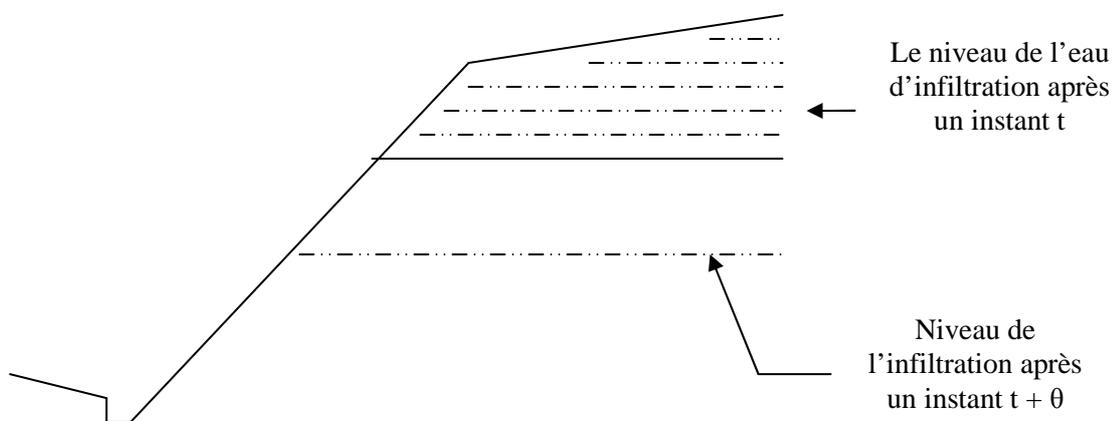


Figure 17 : Mécanisme d'infiltration

Si la cadence de l'infiltration reste ainsi, il n'y aurait pas de glissements d'ensemble. Seul des glissements au flanc de talus risqueraient d'arriver. Or, après une pluie persistante, il apparaît souvent des glissements en masse sur le RN2, ce qui suppose que la vitesse de filtration augmente dès que l'eau d'infiltration a franchi une certaine épaisseur de la couche moyennement perméable susmentionnée. Ainsi, lorsque le temps continue à se détraquer au point que l'eau d'infiltration arrive à saturer cette couche moyennement perméable, le niveau d'eau descend rapidement et atteint la majorité du massif se trouvant à l'intérieur de surface de glissement critique.

Justement, nous avons programmé un calcul de coefficient de sécurité pour différentes pentes et hauteurs et pour différentes profondeurs de l'eau d'infiltration.

b - Calcul du coefficient de sécurité

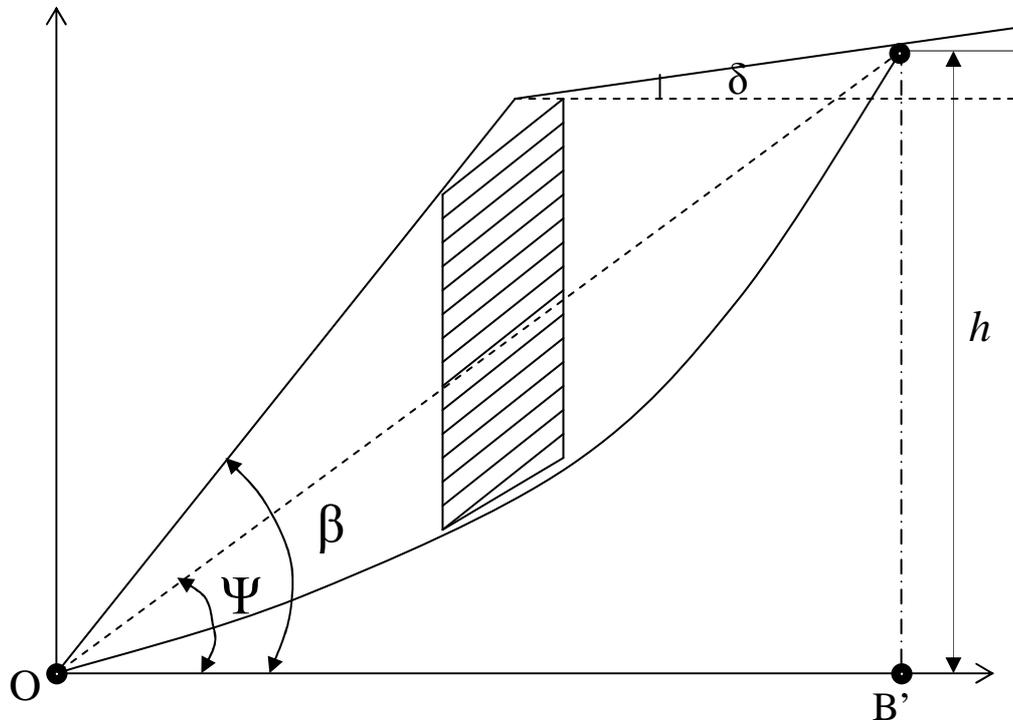


Figure 18 : Cercle de glissement critique

$$\beta = 60^\circ \quad \varphi = 20^\circ$$

L'abaque de Costet – Sanglerat nous donne $\psi = 46.5^\circ$ et $\theta = 60.4^\circ$

Le rayon du cercle de glissement est donné par la formule

$$R = \frac{h}{2x \sin \psi \sin (\theta/2)}$$

$$AN : R = 13.70 \text{ m}$$

$$\alpha = \psi + (\pi/2) - (\theta/2)$$

$$\alpha = 106.3^\circ = 1.85 \text{ Rad}$$

Le centre du cercle de glissement a donc pour coordonnées

$$\begin{cases} X_c = R \times \cos \alpha = -3.85 \text{ m} \\ Y_c = R \times \sin \alpha = 13.15 \text{ m} \end{cases}$$

$$OB' = 2x Rx \sin (\theta /2). \text{Cos } \psi$$

Divisons ce segment en dix tranches égales

Soit S_i la surface de la tranche N° i

Le poids de cette tranche est égal à $Q_i = \gamma \times S_i$

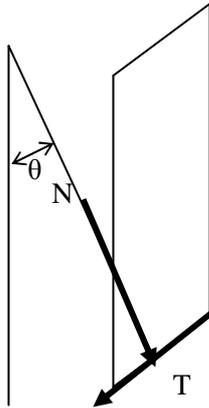


Figure 19 : Géométrie d'une tranche

$$N_i = Q_i \cdot \text{Cos } \theta$$

$$T_i = Q_i \cdot \text{Sin } \theta$$

N_i désigne la force normale et T_i la force tangentielle.

$$\text{Si } \sin \theta < 0 \text{ alors } T'_i = - T_i$$

Finalement, le coefficient de sécurité sera connu à partir de la formule :

$$F = \frac{\sum (N_i \cdot \tan \varphi + C \frac{b}{\text{Cos } \theta} + T'_i)}{\sum T_i}$$

dans laquelle C et φ désignent les caractéristiques mécaniques du sol.
 b : largeur de chaque tranche

c - Contenu de la programmation

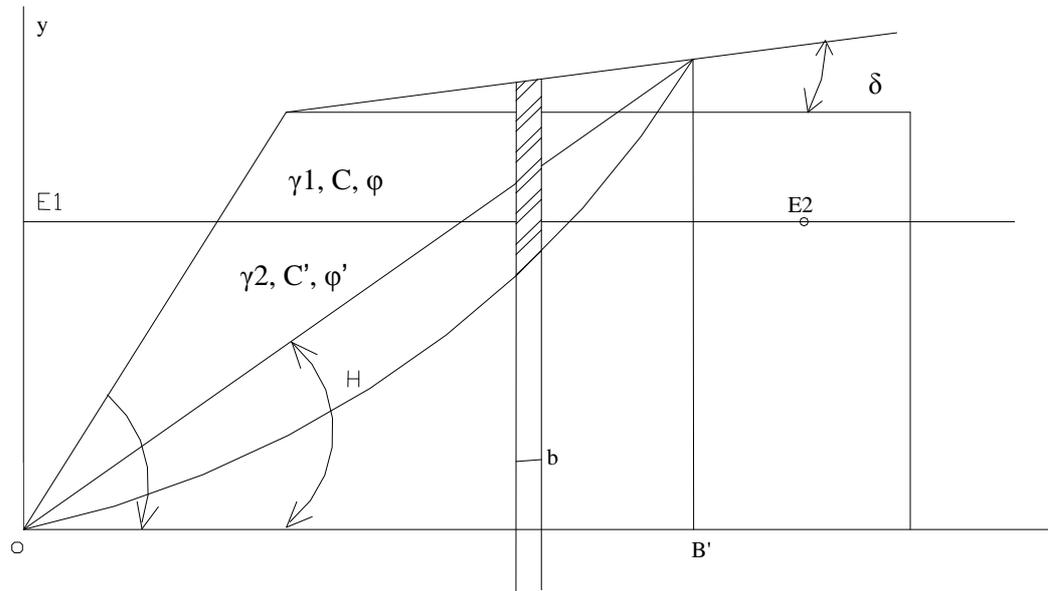


Figure 20 : Géométrie du cercle de glissement

h, β sont données par l'utilisateur connaissant β et à partir de l'abaque de Costet-Sanglerat, l'utilisateur peut entrer la valeur de ψ et θ . Le cercle de glissement critique est connu à partir de cette action.

En effet
$$\alpha = Q + \frac{\pi}{2} - \frac{Q}{2}$$

Rayon de Cercle :
$$R = \frac{h}{2 \sin \psi \sin \theta}$$

$$\text{Coordonnées du Centre de Cercle : } \begin{cases} x_C = R x \cos \alpha \\ y_C = R x \sin \alpha \end{cases}$$

la longueur horizontale $OB' = 2 x R \sin(\theta/2) x \cos \psi$

On a divisé cette longueur en n tranches (entrées par l'utilisateur). Donc, la largeur de chaque tranche est $b = \frac{2}{n} x R \sin \frac{\theta}{2} x \cos \psi$

Le niveau de l'eau d'infiltration est connu si on donne la coordonnée de 2 points E1 et E2 par lesquels passe la droite.

Justement, nous avons programmé un calcul de coefficient sécurité.

(γ, c, φ) sont les caractéristiques du sol immergé par l'eau d'infiltration et (γ_2, c', φ') caractéristiques du sol qui n'est pas atteint par l'eau.

Le programme affiche la valeur w_2 des forces stabilisantes et la valeur de q_2 de forces motrices.

Le coefficient de sécurité $f = \frac{q_2}{w_2}$ est également affiché.

γ_3, γ_4 prennent la valeur de poids volumique de l'eau selon qu'on considère ou non l'action de l'écoulement.

Remarques :

(c', φ') ne sont pas forcément les valeurs habituelles.

c' n'est pas la valeur de la cohésion drainée, il présente ici la cohésion du sol à l'état humide

θ' n'est pas la valeur de l'angle fortement drainé, il s'agit de l'angle de frottement du sol à l'état humide.

L'icône ainsi que le contenu de la programmation seront présentés à l'annexe v

d - Résultats

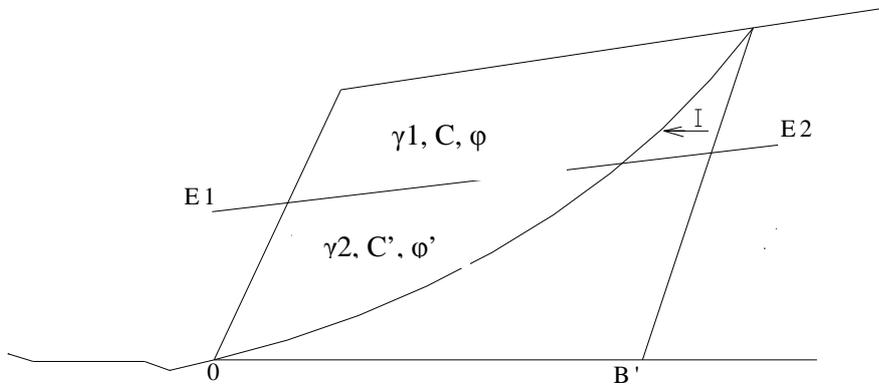


Figure 21 : Cercle de glissement de calcul

Nous avons pris $x_{E_1} = 0$ et $x_{E_2} = 8$ et $I = 0,15$ (gradient hydraulique)

$\gamma_1 = \gamma_{sat}$: poids volumique saturé : $2,1 \text{ t/m}^3$

$C = C_u$: cohésion non drainée : $2,5 \text{ t/m}^2$

$\varphi = \varphi_u$: angle de frottement pris égal à 0

$\gamma_1 = \gamma_h$: poids volumique humide : $4,5 \text{ t/m}^3$

$C' = C_h$: Cohésion de sol à l'état humide : $4,5 \text{ t/m}^2$

$\varphi = \varphi_h$: angle de frottement à l'état humide : 26°

A partir de $2,50 \text{ m}$ de profondeur :

- $C = 0,8 \text{ t/m}^2$
- $\varphi = 24^\circ$

Hauteur (m')	Pente du talus (°)	Etat du sol (y_{E1} et y_{E2} en m)	OB' (m)	Coefficient de sécurité
4	60	$y_{E1} = 0,5$; $y_{E2} = 1,7$	5,1	1,86
	60	$y_{E1} = 0,3$; $y_{E2} = 1,5$	3,8	1,47
	75	$y_{E1} = 0,8$; $y_{E2} = 2$	3,01	1,49
	85	I $y_{E1} = 1,5$; $y_{E2} = 2,7$	2,70	1,45
5	45	$y_{E1} = 0,05$; $y_{E2} = 1,25$	5,27	1,66
	60	$y_{E1} = 0,5$; $y_{E2} = 1,7$	4,10	1,43
	75	$y_{E1} = 1,66$; $y_{E2} = 1,86$	3,5	1,57
	85	I $y_{E1} = 2,5$; $y_{E2} = 3,7$	3,27	1,52
7	45	$y_{E1} = 0,3$; $y_{E2} = 1,5$	7,38	1,51
	60	$y_{E1} = 1,75$; $y_{E2} = 4,95$	5,74	1,54
	75	$y_{E1} = 3,8$; $y_{E2} = 5$	4,89	1,53
	85	I $y_{E1} = 5,5$; $y_{E2} = 6,7$	4,54	1,5
10	45	$y_{E1} = 1$; $y_{E2} = 2,2$	10,54	1,5
	60	$y_{E1} = 5$; $y_{E2} = 6,2$	8,2	1,5
	75	humide	6,99	1,44
	85	humide	6,33	1,22
13	45	$y_{E1} = 4$; $y_{E2} = 5,2$	13,71	1,49
	60	$y_{E1} = 11$; $y_{E2} = 10,2$	10,66	1,49
	75	humide	9,08	1,2
	85	humide	8,45	1,02
15	45	$y_{E1} = 7$; $y_{E2} = 8,2$	15,82	1,51
	60	humide	12,30	1,38
	75	humide	10,48	1,08
	85	humide	9,74	0,93

Tableau 11: Calcul de coefficient de sécurité

La stabilité d'ensemble dépend donc de l'épaisseur de cette couche moyennement perméable ou d'une autre manière dépend du temps pendant lequel l'eau arrive à pénétrer cette couche, un talus qui présente un horizon imperméable de forte épaisseur possède un coefficient de sécurité qui ne change que lentement. Pendant une pluie passagère, même à forte intensité, pourvu que la couche moyennement perméable n'est pas dépassée, le talus perit plutôt par l'action de l'eau superficielle. Un talus de 15 m peut résister en ce moment. Par contre, lorsque les pluies persistent, ce qui se passe lors de la période cyclonique, même les talus de 5 m trace à 45° ne tiennent pas.

Le long de la RN 2, surtout lorsqu'on franchit les 2 escarpements, l'épaisseur de cette couche moyennement perméable atteint exceptionnellement la valeur de 2 m 50 qui pourrait bien être dépassée par l'eau d'infiltration lors du passage cyclonique.

CONCLUSION

En somme, les précipitations de durée importante et d'intensité élevée favorisent à la fois le ruissellement et l'infiltration. Lorsqu'une pluie habituelle tombe sur les bassins versant, au point que l'infiltration en profondeur n'est pas encore arrivée, le talus résiste bien et seul le ruissellement venant de l'amont du bassin versant attaque le talus. Dès que cette pluie commence à être exceptionnelle, occasionnant une infiltration en profondeur, le glissement suivi de l'érosion et les coulées boueuses apparaissent.



TROISIEME PARTIE

SOLUTIONS A PRECONISER

INTRODUCTION

Ces eaux, aussi bien le ruissellement que l'infiltration provoquent une conséquence néfaste sur la tenue et l'état du talus. La solution que nous essayons d'adopter consiste à éviter ou au moins à diminuer l'arrivée des eaux au voisinage du point faible de talus.

Devant une situation où le talus présente une résistance interne élevée pendant la saison chaude, voyons si les fossés de crêtes et les tranchées drainantes avec système de filtration en géotextile sont faisables et fiables sur la RN2

I - Généralités

La mise en place de fossés fait partie des travaux d'assainissement. Les fossés de crête peuvent se définir comme des ouvrages destinés à collecter l'eau venant de l'impluvium extérieur et à la guider ensuite vers des endroits où son action n'est pas à craindre. Les fossés latéraux se définissent de la même manière mais à la différence, elles collectent principalement les eaux de la plate forme routière et des zones attenantes autres que le bassin versant en amont du fossé de crête.

Signalons que les fossés de crête sont souvent trapézoïdaux avec une pente de talus 3/2 plus adaptées au déblai ordinaire.

II - Particularité de la solution fossé de crête

Devant les désordres causées par l'action de ruissellement, on a en général 2 possibilités d'intervention.

- Soit on reconforte le talus de façon à ce qu'il résiste à l'action de l'eau. On peut citer la stabilisation géo biologique, la mise en place d'un géotextile alvéolaire.
- Soit on évite tout simplement l'arrivée des eaux de crête ruissellement sur le talus : c'est la solution fossé de crête

Vu son moindre coût et sa facilité de mise en œuvre, cette dernière solution est la plus utilisée et la plus répandue. Non seulement, elle peut aller en parallèle avec d'autres solutions mais elle paraît être la solution la plus sûre pourvu que son entretien soit assuré convenablement.

III - Conception

Les fossés ne sont en général placés que dans les endroits où l'eau a naturellement tendance à venir se rassembler et à circuler. On parle là du thalweg du bassin versant. Dans le cas où la route est implantée sur le flanc d'un versant, tous points déversent ces eaux vers le talus et en ce moment les fossés doivent jouer le rôle d'un ouvrage de ceinture qui a pour but d'empêcher l'eau extérieure de pénétrer dans la zone à assainir.

La dimension du fossé dépend de nombreux facteurs à savoir le débit à évacuer, la pente du terrain naturel et celle du fossé, la vitesse acceptable pour le terrain.

a – Pente

La pente se détermine par une étude sur terrain. Elle doit être régulière et ne pas être trop faible à l'aval pour éviter des dépôts.

En règle générale, la pente doit être dans l'ensemble aussi forte que le permet la nature du terrain. Dans le cas d'une pente forte ne dépassant pas la limite admissible mais conduisant à des déblais importants, on peut diviser le profil du fossé en pentes convenables qui seront séparées par des chutes. Il faut s'assurer dans ce cas que $L > 15 L_G$

L : longueur entre 2 chutes successives

L_G : largeur en gueule du fossé

b- Section

Les dimensions sont croissantes de l'amont vers l'aval, au fur et à mesure que s'accroît le débit à évacuer.

c - Vitesse de l'eau

Elle est déterminée par la pente et la forme de la section. Cependant, elle doit rester dans les limites assez étroites, ni trop forte pour ne pas raviner les berges, ni trop faibles pour ne pas provoquer des dépôts. Ces fossés sont munis, au côté aval, d'un cavalier ou d'une banquette formant diguette.

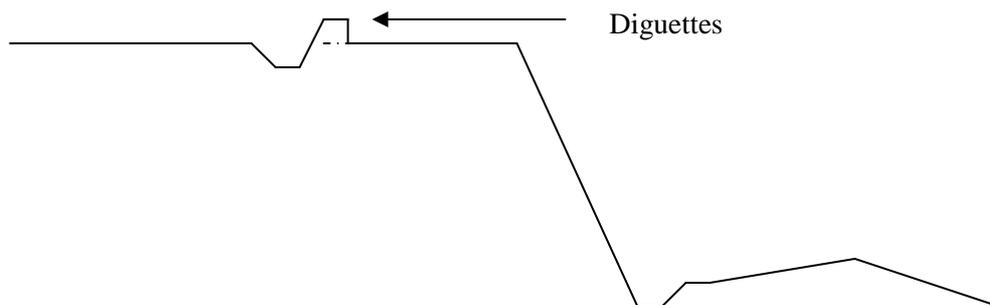


Figure 22 : Diguettes

d – Emplacement

Connaissant la trace du cercle de glissement critique, les fossés de crêtes doivent être implantés à, au moins ,1m du point d'intersection du terrain naturel et l'arc de cercle.

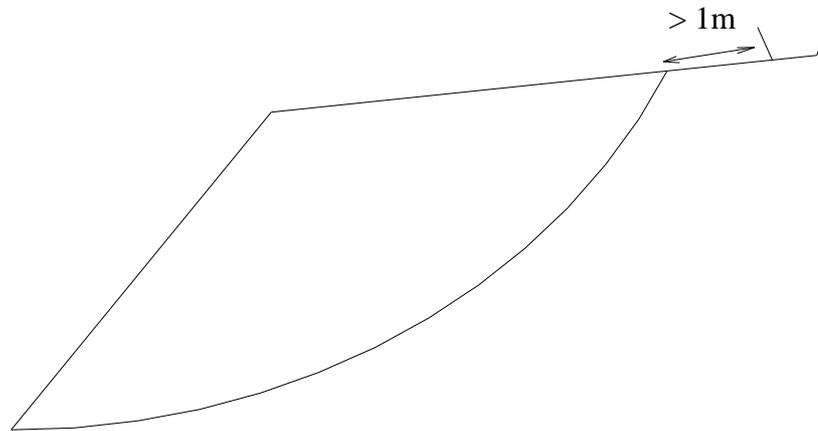


Figure 23 : Emplacement du fossé de crêtes

e - Entretien

Il faut curer au moins une fois par an, rectifier la paroi qui s'éboule facilement sous l'action des infiltrations latérales et enlever les herbes qui y croissent abondamment et nuisent à l'écoulement de l'eau.

IV- Dimensionnement

Trois conditions doivent être vérifiées pour le dimensionnement des fossés.

- ❖ La vitesse de l'eau circulant dans le fossé ne doit pas dépasser la vitesse d'affouillant $V \geq V_{aff}$
- ❖ Cette vitesse ne doit pas non plus descendre au dessous de la vitesse d'ensemblement $V < V_{ens}$.
- ❖ La différence relative entre débit à évacuer et débit évacuable ne doit pas être supérieure à 5%.

$$\frac{|\Delta Q|}{Q} \times 100 \leq 5\%$$

Pour avoir une section acceptable, il faut réitérer autant de fois l'opération, c'est la raison pour laquelle nous avons programmé le calcul.

On peut obtenir le débit à partir de nombreuses approches, mais les plus utilisées sont celles de Louis Duret et la méthode rationnelle

a – Méthode rationnelle

$$\boxed{Q = \alpha \times C \times I \times A} \quad \text{avec } \alpha = 1/3.6$$

Où Q - exprimé en m³/s

I – Intensité de la pluie en mm/h

$$I = 10t^{-0,56} \text{ pour } t \leq 2,5 \text{ heures}$$

$$I = 50t^{-0,89} \text{ pour } t > 2,5 \text{ heures}$$

dans lesquelles :

t – durée de la pluie exprimée en minutes et donnée par la formule :

$$t = 3,98 \left[\frac{L}{i_m} \right]^{0,77} \quad \text{où } i_m \text{ – pente moyenne}$$

L - Longueur

A – surface du bassin en km²

C - coefficient de ruissellement pondéré donné par la formule :

$$C = \frac{\sum C_j \times S_j}{\sum S_j} \quad \text{avec } S_j \text{ représente la surface du sous bassin } j \text{ et}$$

qui a pour coefficient de ruissellement C_j

b – Méthode de la LOUIS DURET pour les petits bassins versants (S_{BV} < 10km²) :

$$Q_p = 0,278 \times S \times I [t_u, P] \times \left[1 - \frac{36}{H(24,P)} \right]^2 \quad \text{avec } t_u = 0,85 \times t_c^{0,82}$$

$$\text{Où } t_c = 7,62 \times \left[\frac{S_{BV}}{I_{BV}} \right]^{0,56} \quad [\text{mn}]$$

$I(t_u, P)$ – intensité de pluie qui sévit pendant le temps utile t égal à un temps provoquant la crue maximale de période de retour P ;

$H(24, P)$ – hauteur de pluie maximale en 24 heures de période de retour P données par les courbes des isohyètes.

D'une manière générale, l'Intensité de pluie qui sévit pendant un t et de période de retour P est donnée par la relation :

$$\text{Si } t < 3h, I(t, P) = 28(t + 18)^{-0,763} I(1h, P) \text{ [mm]}$$

$$\text{Avec } I(1h, P) = 0,22 H(24, P) + 56$$

$$\text{Si } t > 3h, I(t, P) = \frac{1}{t} H(24, P) \left[\frac{t}{24} \right]^{0,35} \text{ [mm]}$$

t_u – temps utile provoquant la crue maximale de période de retour P

t_c – temps maximale que met une goutte d'eau de pluie tombée à l'intérieur du bassin versant pour atteindre l'exutoire (en mm)

c – géométrie de fossé

Premièrement, on calcule la section mouillée ω par la formule :

$$\omega = 0,5Y + 1,25 \sqrt{\frac{Q}{K \times \beta^{0,5+Y} \times i^{0,5}}}$$

Où k – coefficient de rugosité des parois et du fond du fossé (rugosité des matériaux qui le constituent)

On pose :

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\alpha - m}}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{m^2 + 1}$$

$$Y = \frac{1,5}{\sqrt{k}}$$

Connaissant l'ouverture efficace, on détermine h et b

$$h = \sqrt{\frac{\omega}{(\alpha - m)}} \quad \text{et } b = h(\alpha - 2m)$$

avec h – hauteur de l'eau dans le fossé

b – base du fossé trapézoïdal

La profondeur total du fossé se traduit par la relation :

$$H = h + 0,20 \text{ (m)}$$

Le calcul de la vitesse maximale d'écoulement de l'eau nécessite la détermination des grandeurs suivantes :

- Le périmètre mouillé du fossé

$$x = 2 \sqrt{[\omega (\alpha - m)]}$$

- Le rayon hydraulique :

$$R = \frac{\omega}{X}$$

Connaissant le rayon hydraulique, nous pouvons déterminer la vitesse maximale de l'écoulement par la relation :

$$V_{\max} = K \times R_{\max}^{0,5+Y} \times i^{0,5}$$

Si l'on doit dimensionner le tronçon amont suivant, on gardera b constante et on aura h par la formule :

$$h = h_a + l_a (i_{\text{tna}} - i_a)$$

avec h_a – hauteur de la section du fossé aval

l_a – longueur du fossé aval

i_{tna} – pente du terrain naturel aval

i_a – pente du fossé aval

d – Résultats de la programmation

Pour avoir un ordre d'idée sur le débit à évacuer par le fossé, quelques bassins versants de la RN2 ont été considérés avec leurs caractéristiques réelles. Les calculs ont été faits sur excel.

Nous proposons ensuite la dimension ou la géométrie du fossé qui correspond à chaque débit pour une pente du terrain naturel et une pente du fossé données.

Surface du BV (km ²)	Pente moyenne du BV (m/m)	Coefficient de ruissellement	Hauteur de pluie max en 24 h (mm)	Temps de concentration en minutes	Intensité de pluie en 1 h (mm)	Intensité de pluie pendant t_c (mm)	Débit Q	Débit cumulé
0,5	0,36	0,25	250	8,98	111	251,5	8,74	8,74
0,09	0,4	0,3	260	3,64	113,2	203,8	2,28	11,02
0,12	0,5	0,4	240	3,73	108,8	290,7	3,80	14,90
0,07	0,3	0,45	220	3,68	104,4	279,5	2,44	17,35

Tableau 12 : Débit de quelques bassins versants

➤ Fossé constitué d'un seul tronçon

Le tableau ci-dessous nous donne les pentes à ne pas dépasser pour éviter l'affouillement.

$$V_{\text{aff}} = 6,5 \text{ m/s}$$

Débit (m^3/s)	Pente du fossé (%)	Vitesse (m/s)	b (m)	h (m)
0,5	0,28	6,49	0,12	0,19
1	0,173	6,48	0,16	0,27
2	0,107	6,48	0,23	0,38
3	0,081	6,48	0,28	0,47
4	0,07	6,48	0,32	0,52
5	0,055	6,49	0,36	0,65
6	0,05	6,46	0,4	0,66
7	0,045	6,47	0,43	0,72
8	0,04	6,41	0,47	0,77
9	0,038	6,49	0,49	0,81
12	0,031	6,47	0,57	0,94
15	0,026	6,42	0,64	1,05

Tableau 13: fossé constitué d'un seul tronçon

➤ **Fossé constitué de deux tronçons**

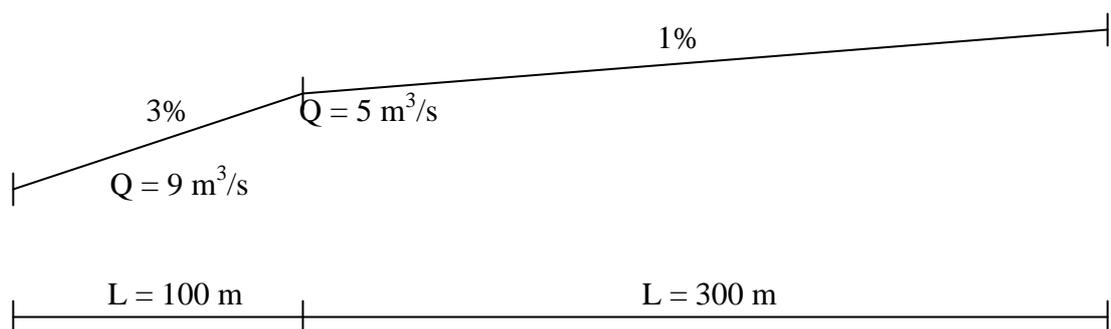


Figure 24 : Profil en long du fossé

	$k = 71 ;$	1 ^{er} tronçon $V_{\text{aff}} = 6,5 \text{ m}^3/\text{s} ;$	$m = 1,5$		
Pente TN (%)	Pente fossé	Longueur (m)	V (m/s)	Largeur (m)	Hauteur (m)
3	2,8	100	6,46	0,49	0,80

	$K = 51 ;$		2ème tronçon $V_{\text{aff}} = 2,5 \text{ m}^3/\text{s} ;$	$m = 1,5$		
Pente TN (%)	Pente fossé	Longueur (m)	V (m/s)	Largeur (m)	Hauteur (m)	ΔQ
1	0,63	300	2,44	0,49	1,00	1,18

Tableau 14: Résultats pour le fossé constitué de deux tronçons

De la même manière que dans le chapitre précédent, on peut se prémunir des dégâts dus à l'action de l'eau d'infiltration par 2 façons :

- soit on laisse cette eau agir et on empêche le glissement en donnant au talus une pente beaucoup plus faible ou en conservant un ouvrage de soutènement et de renforcement ;
- Soit on empêche l'eau d'infiltration de développer son action et en ce moment, le talus qui est stable en période sèche restera tel qu'il est en période pluvieuse.

I - Différentes solutions

a - pente critique de talus

On entend par pente critique, la pente avec laquelle le talus est stable même s'il est totalement atteint par l'eau d'infiltration.

Le tableau ci-dessous donne la valeur du coefficient de sécurité au glissement de quelques talus immergés.

Hauteur (m)	Pente (°)	Coefficient de sécurité
4	30	1,81
5	30	1,61
	45	1,10
7	30	1,40
	45	0,96
10	30	1,23

Tableau 15 : Valeur du coefficient de sécurité au glissement de quelques talus immergés

- Pour un talus de 5m de hauteur, il faut ramener la pente à 30° pour assurer la stabilité.
- Pour un talus de 7m, il faut donner une pente au dessous de 30° pour assurer la stabilité.
- Au delà de 10m, même avec une pente de 30°, la stabilité du talus est déjà critique.

b - Les ouvrages de soutènement

Parmi les murs de soutènement habituels, le mur en gabion est le plus utilisé pour traiter ce genre de problème grâce à sa souplesse et à sa capacité de recueillir et d'évacuer les eaux d'infiltration.

En effet, les murs poids en maçonnerie et le mur cantilever en bâton armé demandent une couche de fondation très résistante si l'on ne veut pas confronter à des problèmes de tassement différentiels. Quant au mur en terre armée et ses diverses variantes, une largeur trop élevée est nécessaire pour sa réalisation, ce qui fait appel à des intenses travaux de déblai et de remblai.

Par ailleurs, si l'on devrait penser à un mur renforcé par un tirant d'ancrage, il faut s'assurer de l'existence d'un rocher auquel on ancrera les tirants.

Cependant, les murs en gabions ont aussi leurs points faibles. En présence d'eau d'infiltration, le talus n'affiche pas une stabilité. Le mur en gabion est appelé à stabiliser un talus dont le coefficient de sécurité est moindre. Il s'ensuit donc qu'un volume très élevé doit être construit. Or, en règle générale, un mur en gabion ne doit pas dépasser la hauteur de 4,00m en ce sens qu'il n'est pas toujours possible de stabiliser une pente avec ce soutènement.

D'autre part, dans notre cas où la coulée boueuse se manifeste souvent ce qui entraînerait une érosion mécanique du fil, la durée de vie des ouvrages diminue notablement.

En tout cas, le mur en gabion était déjà employé maintes fois dans certains tronçons de la route nationale n°2 mais le problème persiste toujours. Le mur se déformant excessivement finira à terme par se rompre.

II - Généralités sur les géosynthétiques

L'idée n'est pas nouvelle d'utiliser les matériaux synthétiques sous la forme de nappe résistante, soit tissée ou non tissée mais perméable, soit en membrane étanche pour l'amélioration des qualités du sol dans les diverses utilisations de la géotechnique appliquée de génie civil : étanchéité, drainage, augmentation de la résistance, protection de talus.

a - Les géotextiles

Entrés dans le domaine routière en 1970, les géotextiles sont de matières ou produits textiles se présentant généralement sous forme de nappe de fibre synthétique, perméable, souple, résistante, filtrante que l'on emploie dans les terrassements, travaux routiers, ferroviaires hydrauliques, la lutte contre l'érosion, et la protection de l'environnement.

On distingue les géotextiles non tissés qui sont des nappes constituées par des filaments continus disposés de façon aléatoire et liés par des différents procédés mécaniques (l'aiguilletages thermiques : compression à chaud de la nappe de fibres en le faisant passer entre 2 rouleaux) et chimique (imprégnation de la nappe de fibre d'un liant) ; géotextiles tissés qui correspondent à l'entrecroisement de 2 nappes de fils ou de bandelettes perpendiculaires. Ils peuvent jouer différents rôles.

Propriétés	Fonctions	Caractéristiques
Mécaniques	Séparation : placé entre 2 matériaux différents, le géotextile empêche leur mélange sous l'effet des sollicitations mécaniques telles que le trafic	Porométrie Résistance à la traction Allongement à l'effort maximum.
	Renforcement : placés à intervalles réguliers, les géotextiles développent des efforts de traction que le sol ne peut reprendre et augmente la résistance globale du massif renforcé. A la base des remblais sur sols mous, ils augmentent la stabilité de ceux-ci et permettent ainsi de réduire le nombre de phases de construction	Résistance à la traction Raideur Frottement Adhérence
	Protection : placé entre une géomembrane et le sol support ou la couche de protection, le géotextile absorbe les contraintes localisées et protège la géomembrane des perforations	Epaisseur élevée et Résistance au poinçonnement

Hydrauliques	<p>Drainage : épais et de forte porosité, le géotextile permet de transporter des débits d'eau notables dans leur épaisseur et donc de drainer les sols</p> <p>Filtration : par sa structure fibreuse, le géotextile empêche la passage des particules fines tout en restant très perméable. Il remplace maintenant couramment les matériaux granulaires même dans les ouvrages aussi délicats que les barrages</p>	<p>Permittivité Transmissivité Epaisseur</p> <p>Porométrie Permittivité Souplesse</p>
--------------	---	---

Tableau 16 : Différents rôles des géotextiles

b - Les géomembranes

L'utilisation des géomembranes dans les ouvrages de génie civil est récente, depuis moins de 15 ans, leur succès étant lié à différentes propriétés spécifiques :

- légère : 0,5 à 10 kg / m²
- caractéristiques diversifiés et adaptés à tous les cas
- les caractéristiques mécaniques couvrent une large éventuelle de déformabilité ou de résistance à la traction avec un point commun, une grande flexibilité.

Les géomembranes sont des produits minces, souples, continus, étanches aux liquides, adaptés bien au génie civil.

Son utilisation couvre un large domaine à savoir la lutte contre la pollution des nappes phréatiques, imperméabilisation du masque amont d'un barrage, étanchement des bassins de remblais, de talus et de fossés.

c -Les géocomposites

Les composites ou plutôt les matériaux composites sont des matériaux composés d'éléments très différents pour leur communiquer des propriétés voulues meilleurs telles que résistance, capacité de drainage, étanchéité.

Les géocomposites sont réalisés à partir d'au moins un géotextile ainsi que des produits apparentés incluant les géomembranes, géogrilles.

III - Intervention dans la zone d'étude

Notre solution consiste à empêcher l'arrivée de ces eaux dans la masse susceptible de se glisser (masse à l'aval de la surface de glissement). Nous devons non seulement éviter la pénétration des eaux à travers la surface directement au dessus du cercle de glissement mais aussi s'obtenir de l'apport en eau de la part du bassin versant en amont.

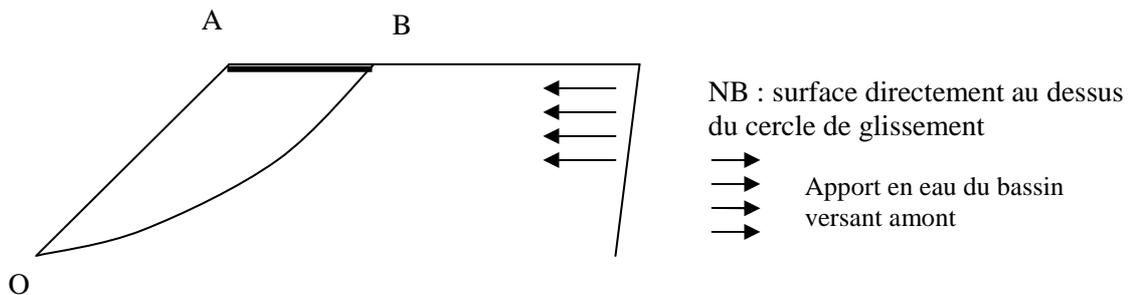


Figure 25 : Explication de l'intervention

a - Protection contre les eaux d'infiltration en amont du bassin versant

Si les eaux d'infiltration continuent à descendre en profondeur, c'est que la vitesse de déplacement vers l'aval n'est pas assez et que ces quantités d'eau stagnent trop longtemps dans le sol. La mise en place d'une tranchée drainante avec système de filtration en géotextile nous paraît comme une solution adéquate pour ce problème puisque cette eau tend préférentiellement vers cette tranchée plutôt que de descendre en profondeur. Le déplacement vertical ou la percolation de ces eaux est donc très lent pour qu'on puisse le négliger et on se trouve dans le cas d'une nappe libre dirigé vers le drain.

On creusera la tranchée au dessous du fossé de crête puisque 2 déblais à la fois, celui pour la tranchée drainante et celui pour les fossés, peuvent diminuer la résistance interne du terrain.

Pour avoir une sécurité accrue, nous préconisons une tranchée atteignant toute la couche moyennement perméable. Pour chaque profondeur de tranchée, nous évaluons ici le débit à évacuer.

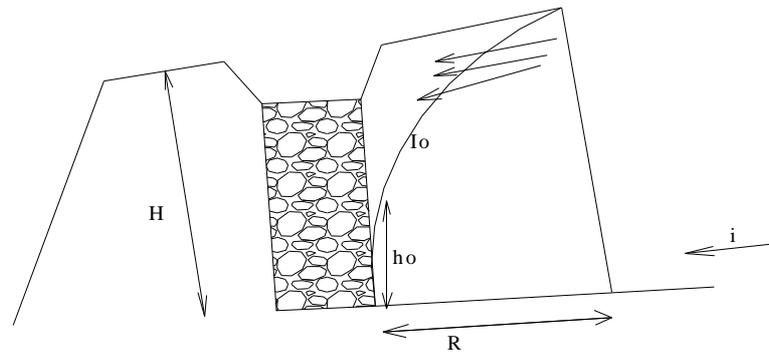


Figure 26 : Tranchée drainante

$$h_o = \frac{I_o}{2 - I_o} \times H$$

$$R = \frac{H - h_o}{I_o}$$

Finalemnt $Q = \frac{kB}{2R} (H^2 - h_o^2)$

k : coefficient de perméabilité = 5m/ jour pour l'exemple ci – dessous

I0 : courbe de dépression = 50% pour l'exemple ci –dessous

Q : débit à évacuer

Nous donnerons ci – après quelques valeurs du débit Q pour une profondeur de la tranchée drainante.

H (m)	ho (m)	R (m)	B (m)	Q (m ³ /s)
1	0,33	1,34	100	0,0019
			150	0,0029
			200	0,0038
			300	0,0057
1,5	0,495	2,01	100	0,0029
			150	0,0044
			200	0,0058
			300	0,0087
2	0,66	2,68	100	0,0038
			150	0,0057
			200	0,0076
			300	0,0114

3	1,00	4	100	0,0109
			150	0,0164
			200	0,0218
			300	0,0327

Tableau 17 : Valeur de débit pour une profondeur de la tranchée drainante

Trois conditions doivent être vérifiées pour les dimensionnements du tuyau de drainage :

- Condition de non affouillement

$$i_{t \leq} \left[\frac{V_{\text{aff}}}{k \left[\frac{dt}{4} \right]} \right]^{0,66} \quad 2$$

dt : diamètre du tuyau

it: pente à donner au tuyau

Vaff : vitesse d'affouillement

- Condition de non ensablement

$$i_{t \geq} \left[\frac{V_{\text{ens}}}{k \left[\frac{dt}{4} \right]} \right]^{0,66} \quad 2$$

V ens : vitesse d'ensablement

- Condition d'évacuation de débit

$$i_{t \geq} \left[\frac{1,5Q}{\pi \left[\frac{dt}{2} \right]^2 k \left[\frac{dt}{4} \right]} \right]^{0,66} \quad 2$$

On procède par réitération : si les trois conditions ne sont pas vérifiées simultanément, il faut changer la valeur de d_t donnée précédemment

Le long de la RN2, on rencontre souvent des ouvrages en gabions installés au pied de talus. Ces ouvrages, de par sa dimension, n'assureront pas la stabilité de ce talus si un glissement arrivera. Sans doute ils sont appelés par ses caractéristiques particulières : un ouvrage en gabion peut assurer la fonction de drainage. Il peut recueillir et évacuer des eaux d'infiltration. On peut lui adjoindre des ouvrages annexes d'évacuation des eaux drainées. Toutefois, si l'on veut lui faire jouer ce rôle, il faut que les règles de filtre soient vérifiées. Il suffit d'intercaler entre les ouvrages en gabion et les sols à drainer un géotextile d'infiltration.

b - Dispositif contre l'infiltration directe des eaux d'infiltration à l'aval de la tranchée

Première variante

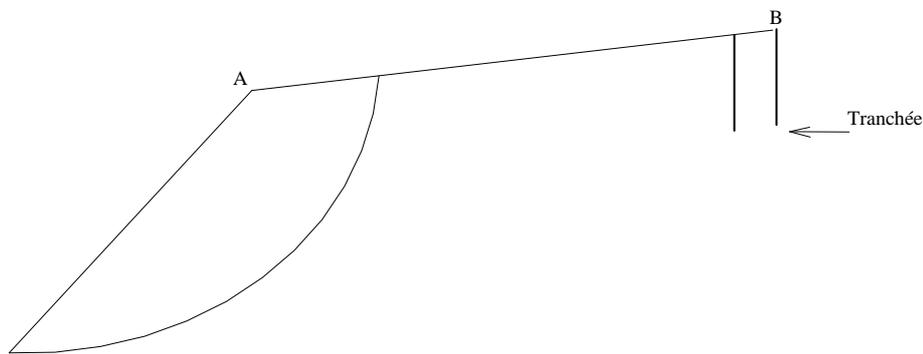


Figure 27 : Imperméabilisation de la surface critique

La solution la plus sûre consiste à étancher la surface représentée sur la figure par la ligne AB. L'utilisation d'une géomembrane nous paraît comme une solution adéquate pour les raisons suivantes :

- elle assure correctement l'étanchéité
- elle est facile à mettre en œuvre

D'autre part, on devrait mettre en dessus de la géomembrane une couche de remblai, pour assurer sa protection et pour permettre l'engazonnement. Mais ce remblai peut être emporté le cas d'orage. C'est la raison de la mise en place d'un géofilet de retenu, relativement fermé très résistant.

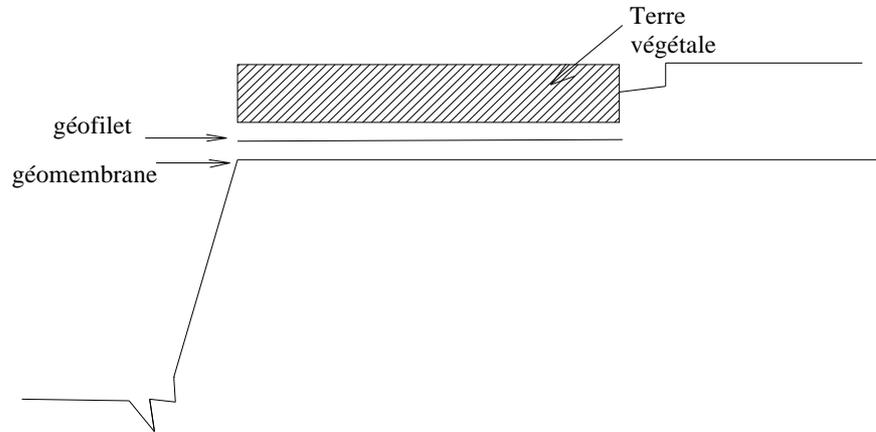


Figure 28 : Mise en œuvre des géomembranes

Mais son utilisation demeure limitée parce qu'il n'est pas toujours possible de bien préparer le terrain qui recevra les géomembranes surtout si on rencontre un bassin versant protégé (aire protégée, forêt).

D'autant plus la mise en place de 2 matériaux géosynthétique à la fois conduira à un coût exorbitant. Nous avons donc proposé une 2^e variante beaucoup moins chère.

2^e variante

En assurant un système de drainage efficace en aval de la zone à assainir, une quantité d'eau importante se dirige vers le drain au détriment de celle qui diminue en profondeur.

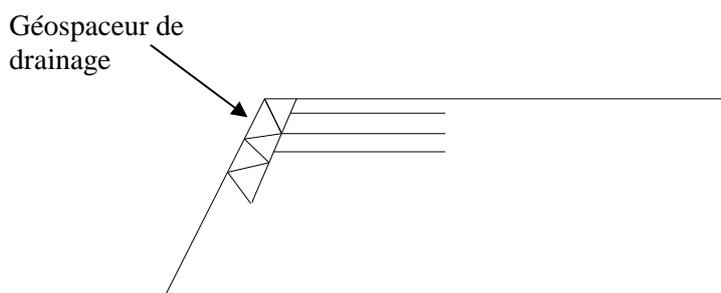


Figure 29 : Utilisation de géospaceur

On ne peut pas construire une tranchée sur cette zone. C'est la raison pour la quelle, on a pensé à l'utilisation des matériaux synthétiques et composites obtenus par l'association de géospaceurs et le géotextile de filtration. Les géospaceurs sont des grilles de polyéthylène extrudées.

Le long de la route nationale N°2, on rencontre souvent des ouvrages en gabion installés au pie

Le tableau suivant donne la capacité de drainage de ces matériaux.

DEBIT (l/s)	Applications verticales	Applications horizontales
Bidim spacer DC 3514 / 1 Grille PEHD avec 1 filtre bidim	1764	432
Bidim spacer DC 3514 / 2 Grille PEHD avec 1 filtre bidim	900	187

Source bidim géosynthétique

Tableau 18 : Capacité de drainage des géospaceurs

Le tableau ci-dessous nous donne la largeur minimale AB de la surface sur laquelle on doit étendre les géomembranes.

Hauteur (m)	Pente de talus (°)	Largeur AB (m)
4	75	2,00
	85	1,62
5	60	1,85
	75	2,42
	85	2,93
7	60	2,59
	75	3,39
	85	4,10
10	45	2,80
	60	3,70
	75	4,85
13	45	3,60
	60	4,78
15	45	4,20
	60	6,33

Tableau 19 : Largeur minimale de la surface sur laquelle on étendra les géomembranes

La pérennité du système de drainage et du fossé dépend de la réalisation de celui-ci et du choix des matériaux qui conviennent surtout au niveau des matériaux synthétiques. Autant que possible, il faut éviter ou au moins minimiser la pénétration des fines.

I - Les causes de l'inefficacité du système de filtration

Les dysfonctionnements des systèmes de filtration sont dus à une mauvaise adéquation entre leurs caractéristiques et les propriétés du sol à retenir, rendant impossible la constitution de l'auto filtre granulaire stable d'interface. Ces dysfonctionnements sont regroupés en deux catégories :

a - Mauvaise rétention ou lessivage du sol

Les causes peuvent être les suivantes :

- Aucun maintien du squelette du sol (ouverture de filtration trop grande ou mauvais contact entre sol et système de filtration)
- Dommages (trous, déchirures) lors de la mise en œuvre des systèmes de filtration ou des granulats (grave drainante, enrochements) en contact direct avec eux.

Ce sont les mêmes risques rencontrés en l'absence de système de filtration.

b - Perméabilité insuffisante du système de filtration initiale ou à long terme

Dans ce cas, les causes peuvent être :

- Une mauvaise perméabilité initiale
- Une pollution lors de la mise en œuvre
- La rétention de la fraction du sol transportée en suspension
- Une instabilité du squelette du sol dont les particules mobiles viennent obstruer les pores du système de filtration.

Dans notre cas où le système de filtration est nécessaire, un dimensionnement précis des caractéristiques importantes pour la fonction filtration s'impose.

II - Approche globale de dimensionnement des systèmes de filtration

Pour que le géotextile de filtration puisse atteindre la durée souhaitée de fonctionnement tout en assurant leurs rôles, il faut bien dimensionner les caractéristiques fonctionnelles initiales, caractéristiques liées à la mise en œuvre et les caractéristiques liées à la durabilité.

a - Caractéristiques fonctionnelles initiales

➤ Ouverture de filtration

L'ouverture de filtration correspond à la taille de la plus grosse particule qui peut traverser le géotextile sans être retenu le long du chemin qu'elle emprunte.

Elle s'exprime souvent en μm

Le critère de « rétention du squelette du sol à filtrer » se traduit par la règle suivante :

$$d_{\text{squelette}} \geq O_{100}$$

La non rétention des particules fines transportées en suspension est assurée

$$\text{si } O_0 \geq 50 \mu\text{m}.$$

Dans cette formule

$$d_{\text{squelette}} = C \times d_{85 \text{ sol à filtrer}}$$

avec C : coefficient pondérateur

O_0 : ouverture minimale de filtration du géotextile

O_{100} : ouverture maximale de filtration de géotextile

➤ Nombre de constriction

Pour traverser un système de filtration géotextile, les particules doivent cheminer entre les fibres. La constriction d'un non tissé correspond au passage délimité par au moins trois fibres au travers duquel passe les particules du sol.

La constriction d'un tissé correspond au passage délimité par le croisement de quatre bandelettes.

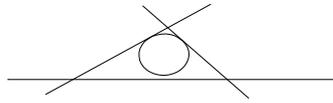


Figure 30 : Constriction d'un géotextile non tissé

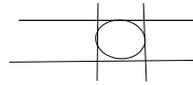


Figure 31 : Constriction d'un géotextile tissé

Le nombre de constriction m est le nombre de couches de fibres qui constituent son épaisseur.

Le nombre de constriction ne doit pas être assez faible pour permettre le passage des squelettes solides (ouverture de filtration : taille de la plus petite constriction).

Il ne doit pas non plus trop élevé pour éviter le colmatage interne (plus de constriction signifie probabilité élevée de rétention du squelette à l'intérieur du géotextile).

En principe, $25 \leq m < 40$

➤ **Perméabilité**

K_n système de filtration $\geq FS \times K_n$ sol

K_n : perméabilité du système du sol à filtration

K_n sol : Perméabilité du sol à filtrer

➤ **Souplesse**

La souplesse d'un système de filtration correspond à son aptitude à épouser lui-même la surface d'un sol irrégulier.

Le géotextile doit être assez souple pour pouvoir jouer le rôle de catalyseur pour la formation d'un auto- filtre granulaire.

b - Caractéristiques liées à la mise en œuvre

➤ **Résistance au poinçonnement statique**

En contact direct avec des granulats, sous des contraintes parfois très élevées, les systèmes de filtration sont très sollicités par des poinçonnements statiques.

La résistance du géotextile doit être au moins de 0.5 kN/m

➤ **Résistance à la perforation dynamique**

La mise en place des granulats sur les systèmes de filtration correspond à des sollicitations dynamiques.

Il faut que le géotextile résiste à cette action. La résistance de ce dernier est donnée par un essai ou fournie par le fabricant.

➤ **Allongement à l'effort maximum**

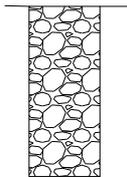


Figure 32 : Comportement du géotextile dans une tranchée

Lors de la mise en place d'un système de filtration, il est rare que le géotextile épouse parfaitement la surface du sol surtout au fond de la tranchée. Afin d'éviter les mises en tension inutiles pouvant provoquer sa rupture, le géotextile doit posséder un allongement suffisant.

Tranchée de 1m de profondeur : $\varepsilon \geq 37\%$

Tranchée de 2m de profondeur : $\varepsilon \geq 48\%$

c - Caractéristiques liées à la durabilité

Les méthodes citées auparavant servent à sélectionner les géosynthétiques convenables. En tout cas, il faut procéder à un essai de simulation de ces géotextiles puisque s'ils sont mal choisis, conduisant à son colmatage, le risque d'éboulement augmente.

III - Réalisation

a - Exécution de la tranchée drainante

L'exécution comprend : le tracé de l'emprise, fouille de la tranchée, règlement du fond de la tranchée, et pose des tuyaux et l'introduction des matériaux drainants.

➤ **Matérialisation de l'axe**

Il faut matérialiser l'axe sur le terrain par des jalonnets espacés environ de 50m. On ne fait que traduire ou plutôt convertir les distances mesurées sur le plan.

➤ **Nivellement**

On plante des piquets au ras du sol en principe décalé d'une certaine distance à côté de l'axe proprement dit. On nivelle ces piquets et on obtient un profil en long du sol, le projet donne le profil en long de l'axe du plafond du canal, on en déduit la profondeur du canal au droit de chaque piquet. On plante alors à côté des piquets une jalonnnette courte sur le blanc de laquelle on croit la profondeur de la tranchée.

b - Précaution à prendre face à l'exposition aux rayons ultraviolets

Une telle exposition doit être évitée, car c'est l'ennemi numéro 1 des polymères. Les systèmes de filtration doivent être rapidement recouverts par les granulats de la structure de drainage ou par les enrochements de protection de large. Dans ce dernier cas, il faut veiller à ce que la couche d'enrochement soit suffisamment épaisse pour que le géotextile ne soit pas exposé aux rayons de soleil passant entre les blocs.

Si une exposition de courte durée est prévue, il faut la prendre en compte dès l'étape de dimensionnement pour choisir le type de protection le plus approprié.

c - Conception d'une sortie de drainage souterrain

La sortie est l'élément le plus important de tout système de drainage souterrain. Elle nécessite une installation soignée et au moins deux inspections d'entretien par année.

Dans la mesure du possible, il faut limiter au minimum le nombre des sorties.

La sortie de drainage doit être contre l'érosion, les baissements, les rongeurs, les glissements et les dommages causés par le bétail.

Il faut utiliser un tuyau non perforé et dans le cas où on doit choisir un tuyau plastique, celui-ci doit être traité chimiquement pour résister à la dégradation par le rayonnement ultraviolet. La protection contre l'érosion est assurée par l'aménagement, sous le tuyau de sortie, un tablier constitué d'un enrochement ou plutôt d'une maçonnerie de moellon recouverte d'un enduit de ciment.

Le tuyau de drainage souterrain doit pénétrer dans le tuyau de sortie sur une longueur d'au moins 0,15m. Il faut prendre soin de bien sceller le joint afin d'assurer son étanchéité. A cet égard, on peut étendre soigneusement du coulis de ciment dans l'espace entre le tuyau de drainage et le tuyau de sortie.

Il importe de protéger les tuyaux de sortie contre les rougeurs par une grille de protection articulée pour permettre le basculement vers l'intérieur.

IV - Estimation des prix de l'intervention

Rappelons que notre solution consiste à mettre en œuvre une tranchée en amont du déblai et à étancher la surface que nous jugeons critique. Dans ce paragraphe, afin d'avoir une idée sur l'intervention à faire, nous donnerons les définitions de ces prix et quelques sous-détails de prix.

a – Drains longitudinaux

Le prix s'applique au METRE LINEAIRE de massif drainant longitudinal selon le plan type

Il comprend :

Toutes les sujétions de fournitures et d'exécution prévues, notamment :

- Fournitures et mise en œuvre des géotextiles ;
- Fouille en terrain de toute nature ;
- Réglage du fond de fouille selon la pente souhaitée pour l'évacuation des eaux drainées ;
- Le chargement, le transport sur toutes distances, le déchargement et le réglage aux lieux de dépôt des terres et gravois ;
- La mise en œuvre des matériaux drainants (sable et pierre cachée) ;
- La mise en œuvre du béton au fond de la tranchée ;
- Fourniture et mise en œuvre des tuyaux de drainage.

Les quantités à prendre en compte seront celles des résultats des attachements contradictoires.

b – géomembrane

Ce prix s'applique au METRE CARRE (M2) en place

Il comprend :

- Désherbage et décapage ainsi que toutes les préparations requises pour la pose de la géomembrane, éventuellement la mise en place de géotextile de protection ;
- Mise en œuvre de remblai pour recevoir les gazons ;
- Engazonnement ;
- Fourniture des géofilets sur toutes distances ;
- Fourniture des géomembranes sur toutes distances.

Les quantités à prendre en compte seront celles résultant des attachements contradictoires.

c – Fossé de crête en terre

Ce prix s'applique au METRE LINEAIRE (ml) de fossé de crête d'une section de 0,60 m x 0,60 m ou d'une section mouillée équivalente.

Il comprend la mise en cordon ou l'évacuation des matériaux extraits de la fouille sur toutes distances et toutes les sujétions d'accès. Les quantités à prendre en compte seront celles résultats des attachements contradictoires.

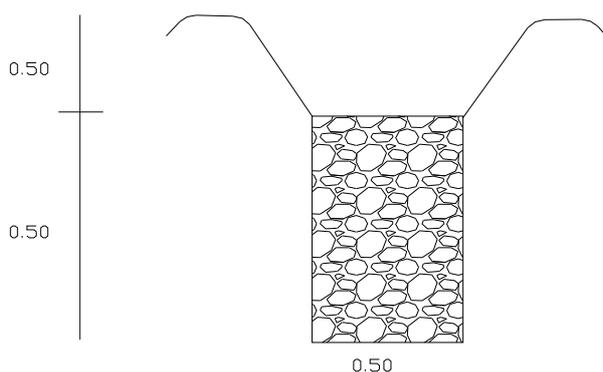


Figure 33 : Tranchée de calcul

d- Calcul estimatif

Notre enquête permet de proposer les prix unitaires :

- ✓ 14 000 fmg le prix unitaire des travaux de déblais
- ✓ 1 050 000 fmg le prix unitaire du mètre cube de béton Q400
- ✓ 28 300 fmg le mètre carré du géotextile de filtration (se référer à l'annexe indiquant le prix du m² des matériaux synthétiques)
- ✓ 80 000 fmg le prix du m³ des graviers jouant le rôle des matériaux drainant
- ✓ 40 000 fmg la fourniture et la pose des tuyaux de drainage

On a le BDE suivant :

DESIGNATION DES TRAVAUX	Unité	Quantité	P.U (fmg)	Montant FMG
Fouille en déblai	m ³	0,876	14 000	12.250
Fourniture et pose des géotextiles	m ²	3,51	48 200	170.630
Béton Q400	m ³	0,025	1 050 000	26 250
Fourniture et mise en œuvre des matériaux drainant	m ³	0,25	80 000	20.000
Fournitures et pose des tuyaux de drainage	U	1	40 000	40.000
TOTAL				269 100

Tableau 20: Devis estimatif de l'intervention (Tranchée drainante)

Le prix du mètre linéaire HTVA s'élève donc à 269.100 fmg y compris mise en œuvre des fossés.

Lorsque nous descendons en profondeur, les travaux deviennent de plus en plus difficile. Il ne faut pas oublier de considérer une plus value pour une profondeur supplémentaire.

Pour la réalisation sur terrains des géomembranes, on a l'estimation suivante :

DESIGNATION DES TRAVAUX	Unité	Quantité	P.U (fmg)	Montant FMG
Désherbage et débroussaillage	m ²	1	12 500	12 500
Engazonnement	m ²	1	5 500	5 500
Géomembrane	m ²	1	48 000	48 000
Géofilet	m ²	1	48 000	48 000
Remblais	m ³	0,2	37 500	7 500
TOTAL				121 500

Tableau 21 : Estimation de la réalisation des géomembranes

e – Calcul du coefficient de majoration des déboursés K

Prix du règlement = Déboursés x K

Formule à utiliser pour les calcul du coefficient de majoration de déboursés K

$$K = \left[1 + \frac{A_1}{100} \right] \times \left[1 + \frac{A_2}{100} \right]$$

“ K ” sera arrondi à la deuxième décimale par défaut. Les différents paramètres de cette formule sont définis dans le tableau ci-dessous :

Origine des frais	Décomposition à l'intérieur de chaque catégorie de frais	Indice de composition de catégorie	
Frais généraux proportionnels aux déboursés	Frais d'agences et patente Frais de chantier Frais d'étude et de laboratoire Assurance	a.1 a.2 a.3 a.4	A1
Bénéfice brut et frais financiers proportionnels au prix de revient	Bénéfice et impôts sur le bénéfice Aléas techniques Aléas de révision de prix Frais financiers	a.5 a.6 a.7 a.8	A2

$$A1 = a.1 + a.2 + a.3 + a.4 \text{ et } A2 = a.5 + a.6 + a.7 + a.8$$

Note :

On entend par :

Frais de chantier : tous les éléments tels que :

- salaires, charges, indemnités, frais de déplacement, etc. du personnel d'encadrement ;
- logements de chantier, mobiliers, installations diverses non comprises dans le forfait " Installation de chantier "

Ces frais de chantier ne doivent pas prendre en compte l'entretien des ouvrages qui est rémunéré dans le cadre de ce marché.

Frais d'étude et de laboratoire : tous les éléments tels que :

- frais de conception et de dessin de plan d'exécution des ouvrages
- frais de laboratoire au titre des essais de convenance, d'agrément, de contrôle

Ces frais d'étude et de laboratoire ne doivent pas prendre en compte les frais correspondants aux prestations particulières (Diagramme d'aménagement, prospection géotechnique et etc.) dues au titre de l'étude.

Remarque : cette formule est valable seulement pour les entreprises dont le siège se trouve à Madagascar. Sinon, on utilisera la formule suivante:

$$K = \frac{[(1 + A_1 / 100) \times (1 + A_2 / 100)]}{1 - A_3 (1 + T / 100)}$$

Avec T : Taxe sur la valeur ajoutée pour les marchés des travaux

V- Limite de la solution

Notre solution est conçue spécialement pour les talus qui tiennent pendant la saison sèche. Or, il existe le long de la RN2 des tronçons dont le coefficient de sécurité est faible même pendant la saison sèche. Pour cela, nous préconisons l'utilisation des murs renforcés par des géotextiles à parement végétalisés associant flexibilité, qualité, construction, intégration dans un environnement paysager. Le *bidim rock* sera mise en œuvre en nappes horizontales disposées à intervalle régulier entre chaque couche de remblai d'une épaisseur de 0,40m. La qualité d'exécution réside dans la maîtrise de la géométrie du massif en terre et la parfaite mise en tension de géosynthétiques. Ces derniers allient l'optimum en matière de renforcement grâce à leur structure monodirectionnelle de renfort et l'avantage du non-tissé qui protège les filaments lors de la mise en œuvre.

CONCLUSION

Fossé de crête, tranchée drainante avec système de filtration en géotextile, géomembrane, telles sont les solutions que nous avons proposées. Leur point commun est la facilité de la mise en œuvre. Dans le cas où le talus présente un coefficient de sécurité faible même pendant la saison sèche, nous préconisons l'utilisation de la technique de renforcement par les géotextiles. La particularité de notre solution est qu'elle utilise autant de fois des matériaux synthétiques et demande des importations si la société ici à Madagascar ne peut pas assurer sa fourniture.

CONCLUSION GENERALE

La route nationale N°2 n'est pas à l'abri des désordres chaque année. Certains tronçons sont sujets à des dégâts de toute sorte tels que coulées boueuses, glissements, érosions, écoulement de bloc rocheux. Tous ces dégâts sont, d'après nous, dus à l'action de l'eau qui agit dangereusement non seulement en surface par le ruissellement mais aussi à l'intérieur de sol par l'infiltration. Les solutions entreprises depuis longtemps consistaient à reconforter les talus de façon à ce qu'ils soient stables même en présence d'eau.

Or, l'analyse des bassins versants, tout en tenant compte les facteurs climatiques, permet d'affirmer qu'il existe bel et bien une infiltration. Nous avons même insisté sur ce paramètre parce qu'on a toujours tendance à le négliger alors qu'il pourrait être à l'origine de nombreux dégâts.

Quant à nous, devant un talus qui résiste bien pendant la saison sèche, nous avons essayé de conserver cette résistance en évitant ou du moins en diminuant l'arrivée des eaux. Ceci est plausible d'après l'analyse du sol qui nous montre une couche superficielle moyennement perméable et un horizon en profondeur très poreux mais seulement, nous devons faire appel à des géosynthétiques.

Ces matériaux interviennent par deux façons. D'une part, les géomembranes empêchent l'infiltration directe des eaux de pluies dans la masse susceptible de se glisser. D'autre part, les géotextiles de filtration améliorent la fonction et la durée de service de la tranchée drainante en amont du talus.

Notre solution est limitée dans le cas de talus présentant un coefficient de sécurité acceptable pendant la saison sèche. Dans le cas échéant, nous préconisons encore l'emploi de ces matériaux (gamme renforcement) pour le soutènement et la végétalisation du talus. Son succès est très connu en Europe.

Certes, notre solution demande un investissement élevé du fait de l'importation des matériaux et des technologies mais ne serait-il pas temps de résoudre une bonne fois pour toute ce problème ?

BIBLIOGRAPHIE

- 1- Hydraulique routière (GUY VAN TUY)
- 2- Les ouvrages en gabions CEMAGREF (ROYET, Paul)
- 3- Le savoir faire français en matière de géotextile et géomembrane (CEMAGREF, LCPC, BAGNEUX, 1987)
- 4- Cours de mécanique de sol TOM II (COSTET + Jean Sanglerat + Guy)
- 5- Memotech génie civil CASTEILLA (JM Pestrac + D.Lefaiivres + Y.Maldeut)
- 6- Drainage par tuyaux ou fossée (M Poirée et CH Ollier)
- 7- Cours de mécanique de sol . Cours de Mr RASOLONJATOVO
- 8- Cours de mécanique de sol . Cours de Mr RABENATOANDRO Martin
- 9- Hydraulique routière . Cours de Mr RABENATOANDRO Martin
- 10- Bidim biosynthétique News
- 11- Bidim géosynthétique Gamme filtration
- 12- Bidim géosynthétique Gamme drainage
- 13- Aménagement du Bassin Versant de la RN2 SOMEAH SOGREA
- 14- Rapport de l' analyse du bassin versant de la RN2 ONG lalana
- 15- Les sols ferrallitiques (PARIS ISTED, 1990) (BAGARRE Edmond)
- 16- Technique de L'Ingénieur : Résistance au cisaillement du sol (Jacques LEGRAND) et stabilité de pentes
- 17- Evaluation du ruissellement sur la foret Perinet (Ministère des eaux et forets)
- 18- Monographie de l'Est (Ministère de l' agriculture)

ANNEXES

ANNEXE 1 : DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Les différents processus de formation des pluies sont :

- le processus de coalescence qui se manifeste comme l'union des 2 gouttes d'eaux due à l'attraction électrostatique, à l'attraction hydrodynamique et à la collision des gouttes sous l'effet de turbulence ;

- les processus de Bergeron : 2 particules ayant des températures différentes se trouvent en contact, celle qui a la température la plus élevée s'évaporise pour agrandir la dimension de l'autre.

Notons que sans la présence de la particule appelée noyau de condensation, ce processus de grossissement génère difficilement des pluies.

Selon leurs origines, on distingue 3 catégories de précipitations :

- la précipitation convective : par échauffement à la base, l'air se dilate et par conséquent entame une ascension au cours de laquelle il se refroidit à raison de 1°C/100m dans le cas d'air saturé et de 0,5°C/100m

dans le contraire. L'air ainsi refroidi forme des nuages de types cumuliformes d'épaisseur au moins 500mm.

- la précipitation orographique ou effet de foehn : ce type de précipitation se produit lorsqu'un vent chargé d'humidité aborde une barrière montagneuse. Pour surmonter cet obstacle, ce vent humide s'élève et se condense pour produire des nuages dont la précipitation intéresse toute la région de la face concernée.

- la précipitation d'origine cyclonique.

Finalement on peut classer la précipitation selon le diamètre de la goutte de pluie.

Diamètre (mm)	0,05	0,2	0,45	1,5	3
Nature	Brouillard	Pluie fine	Pluie légère	Pluie forte ou averse	Pluie orageuse

Source : Service météorologique

Tableau 22 : Classification des pluies

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle /Km	270,4	256,9	183,1	50,5	20,1	7,2	11,1	15	9,5	66,6	170,8	304,1
Nombre de Jours	18	17	17	9	6	6	8	9	4	8	14	20
Max de 24 h Mm	147	98,7	128	56,5	42,6	31,8	23,5	33,1	33,4	52,4	115,2	105,4

Source : Service météorologique

Tableau 23 : Pluviométrie à Antananarivo

Antananarivo SCM Altitude 1310

Manjakandriana : Longitude 47°48' , Latitude 18°55' , Altitude 1378

(51-80)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle	300,1	233,4	270,9	65	42,2	40,4	47,9	59	26,2	19	212,8	303,1
Nombre de Jours	20	17	21	10	9	11	13	12	8	8	16	20
Max de 24 h mm	125,7	113,5	227,5	40,5	31,5	35,9	21,5	39,4	31,7	66,5	95,1	92,3

Source : Service météorologique

Tableau 24 : Pluviométrie à Manjakandriana

Anjiro : Longitude 47°58'E , Latitude 18°53'S' , Altitude 881M

(51-80)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle	377,8	290,3	325,4	107,5	58,3	51,2	66,7	59,6	31,6	61,3	208,9	422,1
Nombre de Jours	17	16	18	11	9	10	12	10	6	7	12	18
Max de 24 h Mm	160,5	114,2	252,5	72,6	66,1	38,8	48,4	50,7	49,5	81,2	107,6	108,3

Source : Service météorologique

Tableau 25 : Pluviométrie à Anjiro

Mandraka : Longitude 47°54'E , Latitude 18°55'S , Altitude 1210

(51-80)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle	386,8	369,6	351	111	66,8	64	91,7	119,9	51,8	86,7	232,8	369,3
Nombre de jours	19	17	19	11	9	10	12	12	8	8	14	18
Max de 24 h mm	142,7	140,6	267,2	95,7	48,3	37,3	60,6	50,4	60,9	54,1	105,7	123,7

Source : Service météorologique

Tableau 26 : Pluviométrie à Mandraka

Moramanga : Longitude 48°13 , Latitude 18°53 , Altitude 1210

(61-80)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation												
Mensuelle	253	227,2	173,4	68,2	44,4	38,4	58	50,2	28	60,9	143,6	
Nombre de jours	20	18	21	15	16	17	19	19	13	13	15	
Max de 24 h mm	172,6	183,3	105,5	111,7	42	41,6	21,9	34	36,3	59,9	94,7	131,2

Source : Service météorologique

Tableau 27: Pluviométrie à Moramanga

Andekaleka : Longitude 48°35 , Latitude 18°48 , Altitude 378M

(61-80)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation												
Mensuelle	444,1	453,7	487,6	175,3	104,2	119,7	185,4	167,3	88,1	113	189,3	401,8
Nombre de jours	18	18	20	15	15	14	17	19	11	12	14	19
Max de 24 h mm	238,1	310,5	237,5	117,4	44,1	84,8	77,6	74	35,3	127,2	82	166

Source : Service météorologique

Tableau 28: Pluviométrie à Andekaleka

Brickaville : Longitude 49°04'F , Latitude 18°48'S

(51à 78)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle	391,6	396,3	522,9	193,6	176,5	222,7	236,2	194	89,5	91,6	166,2	270,4
Nombre de jours	20	18	21	18	17	19	21	21	14	12	14	17
Max de 24 h mm	298,4	315,5	252,9	110,2	180,8	191,3	124,7	122,4	57	103,5	156,5	272,2

Source : Service météorologique

Tableau 29 : Pluviométrie à Brickaville

Toamasina : Aérogare Longitude 49°24 , Latitude 18°07 , Altitude 6M

(61à190)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Précipitation Mensuelle	410,1	382,1	478,4	322,2	228,3	259	288,6	218,2	121,1	132,6	169,7	357,3
Nombre de jours	23	20	24	21	22	21	25	24	19	18	17	21
Max de 24 h mm	358,6	237,8	241,4	292,3	125,4	162,7	118,7	96,3	87,4	139,1	101,3	243,3

Source : Service météorologique

Tableau 30: Pluviométrie à Toamasina

Le tableau ci-après récapitule la classification depuis 1982 des perturbations selon l'association régional I (Afrique) sur proposition du comité des cyclones tropicaux pour le Sud Ouest de l'Océan Indien.

1- Zone perturbée	Zone où la pression est basse par rapport au voisinage et où les nageuses ne semblent pas être organisées
2- Perturbation tropicale	Zone dépressionnaire d'échelle synoptique non accompagnée d'un système frontal prenant naissance au dessus des eaux tropicales et présentent une convection renforcée et un ou quelques indices de circulation cyclonique
3- dépression tropicale faible	Tempête tropicale dans laquelle on estime que le vent ne dépasse pas 33 nœuds (61 Km/h, 17 m/s, force 7 beauforts au moins)
4- Dépression tropicale modérée	Tempête tropicale dans laquelle on estime que la vitesse moyenne de vent est comprise entre 34 et 47 nœuds (63 et 87 Km/h, 17 et 24 m/s, force 8 et 9 beauforts)
5- Forte tempête dépression tropicale	Tempête tropicale dans laquelle on estime que la vitesse moyenne de vent est comprise entre 48 et 63 nœuds (89 et 117 Km/h, 25 et 32 m/s, force 10 ou 11 beauforts)
6- Cyclone tropical	Tempête tropicale dans laquelle on estime que la vitesse moyenne de vent est comprise entre 64 et 90 nœuds (118 et 167 Km/h, 33 et 46 m/s, force 12 beauforts)
7- Cyclone tropical intense	Tempête tropicale dans laquelle on estime que la vitesse moyenne de vent est comprise entre 91 et 115 nœuds (168 et 212 Km/h, 47 et 59 m/s, force 62 beauforts)
8- Cyclone tropical très intense	Tempête tropicale dans laquelle on estime que la vitesse moyenne de vent dépasse 115 nœuds (212 Km/h, 59 m/s, force 12 beauforts)
9- Cyclone extratropical	Zone dépressionnaire se tournant hors de la zone tropicale.

Source : Service météorologique

Tableau 31 : Classification des cyclone

Les différentes appellations des cyclones d'une région à une autre sont :

- ✓ Typhons dans la pacifique Ouest ;
- ✓ Ouragan dans l'atlantique Ouest, Nord, Pacifique Est, et les caraïbes (Antilles) ;
- ✓ Willy willy en Australie.

Un cyclone bien constitué est toujours composé de l'œil, la partie centrale, dans lequel on observe une zone d'accalmie où la condition climatique est nettement meilleure, et de la couronne, d 20 à 50 Km de largeur, où les vents, tout comme les pluies, pourraient provoquer des dégâts de grande ampleur.

A 100 Km du centre, l'intensité du paramètre cyclonique atteint son paroxysme.

Toamasina aérogare Longitude 49°24E Latitude 18°07'5 Altitude 6M

1966 à 1985

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vent moyen (Km/h)	6	6	6	5	5	6	6	7	7	7	6	6
Direction	SE/E	SE/E	SE/E	SE/E	SE/E	SE	SE	SE	SE/E	SE/E	E	E
Vent max (Km/h)	65	79	94	86	54	58	54	93	58	79	97	65

Source : Service météorologique

Tableau 32 : Caractéristiques des vents à Toamasina

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vent moyen (Km/h)	9	9	9	9	9	8	9	9	9	8	8	8
Direction	SE/E	SE/E	SE/E	S	S	S	S	S	S/SE	SE/E	SE/E	SE/E
Vent max (Km/h)	76	140	94	68	72	58	83	61	68	72	61	86

Source : Service météorologique

Tableau 33 : Caractéristiques des vents à Antananarivo



**LES CYCLONES TROPICAUX AYANT
INTERESSE LA REGION DE TOAMASINA
DURANT LES 05 DERNIERES ANNEES
(1998 - 2003)**

Noms des perturbations Cycloniques	Dates de passages	Quantités de pluies maximales en 24 heures (mm)		Vitesse de vents maximales en (km/h)
C.T. ELINE	17.02.00	Antananarivo	128.0	>120
		Moramanga	-	>180
		Brickaville	-	>180
		Toamasina	98.7	>180
C.T. KESINY	08 - 09 - 10 - 11.05.02	Antananarivo	36.6	-
		Moramanga	-	-
		Brickaville	-	-
		Toamasina	891.0	-
C.T. MANOU	08.05.03	Antananarivo	6.6	>30
		Moramanga	>50	>30
		Brickaville	>150	>100
		Toamasina	20.0	>50

Source : Service Météorologique

Tableau 33 bis : CYCLONE TROPICAL
AYANT INTERESSE LA REGION DE
TOAMASINA



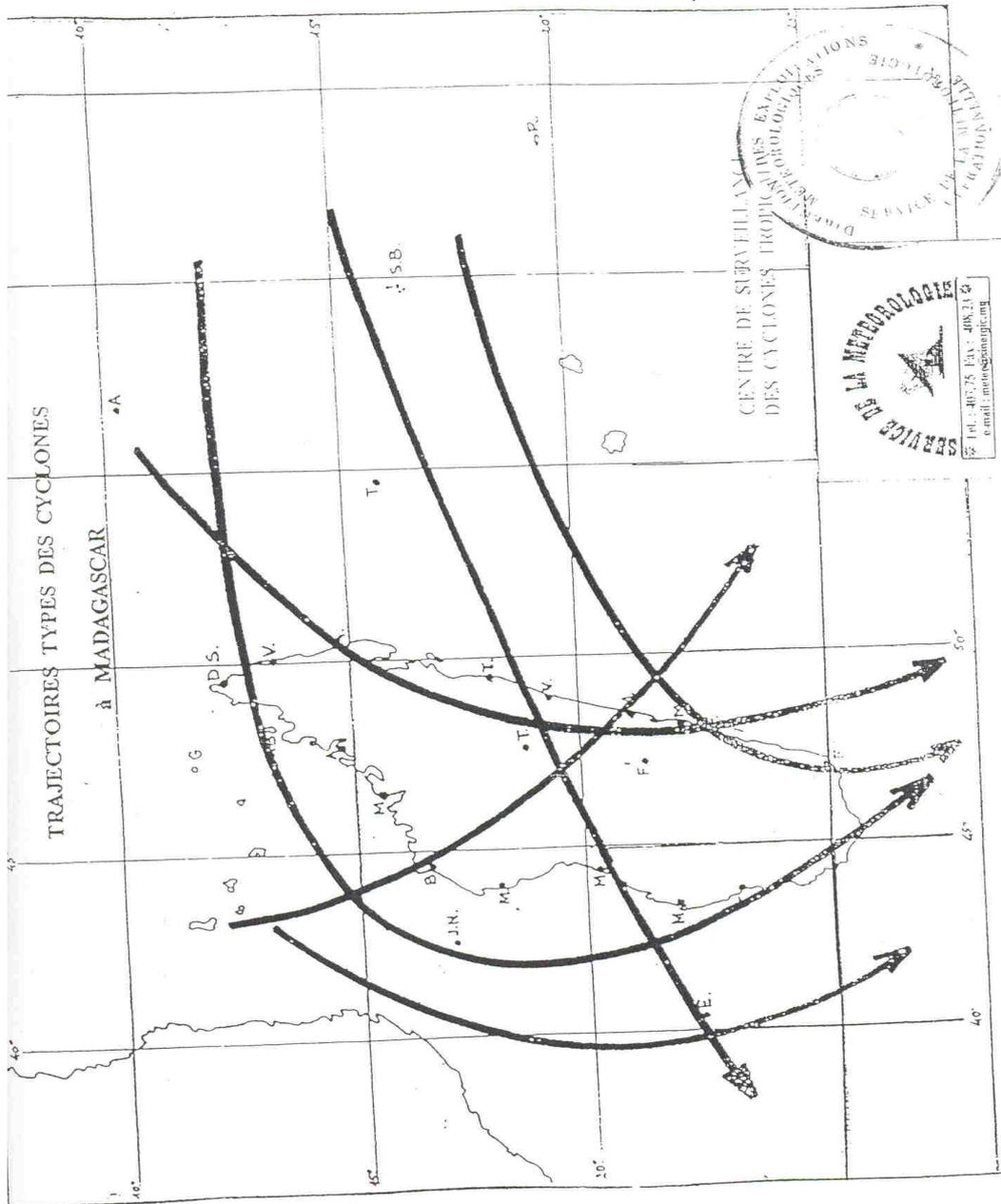


Fig 33 bis : Trajectoires types des cyclones

ANNEXE 2 : DEGATS RECENCES LE LONG DE LA RN2

PK	DEGATS
70 + 240	Glissement de terrain en aval de la route
70 + 140	Glissement de terrain en aval de la route
69 + 450 et 69 + 690	Eboulement en amont de la route
69 + 420	Eboulement et érosion du terrain en aval de la route
69 + 150	Glissement du terrain en aval de la route
68 + 940	Glissement du terrain en aval de la route
68 + 810	Glissement du terrain en aval de la route
68 + 610	Glissement du terrain en avale de la route
68 + 580	Glissement du terrain en avale de la route
68 + 460	Glissement du terrain en avale de la route
68 + 230	Glissement du terrain en avale de la route
67 + 660	Glissement du terrain en avale de la route
67 + 550	Eboulement en aval de la route
67 + 490	Glissement du terrain en avale de la route
66 + 810	Glissement du terrain en avale de la route
67 + 250	Eboulement en amont de la route
66 + 310	Glissement du terrain en avale de la route
66 + 040	Glissement du terrain en avale de la route
65 + 190	Glissement du terrain en avale de la route
64 + 450	Glissement du terrain en avale de la route

Source : VPM

Tableau 34 : Dégâts sur la descente de MANDRAKA (document APS sur travaux confortatifs Mandraka Avril 1994)

Lors de la réhabilitation du tronçon Moramanga-Toamasina, on a enregistré les dégâts suivant :

PK	DEGATS
115 + 300	Erosion
116 + 200 – 130 + 500	Glissement
116 + 700 – 130 + 500	Erosion
131 + 400	Glissement
134 + 800 – 140 + 700	Erosion
142 + 500	Affouillement
145 + 000 – 145 + 400	Erosion
147 + 900 – 148 + 000	Eboulement et érosion
148 + 400	Affouillement
149 + 100 – 150 + 300	Erosion
152 + 000 – 152 + 100	Erosion et glissement
152 + 000 – 152 + 800	Erosion
166 + 500	Erosion de berge
167 + 000	Glissement
168 + 700	Eboulement et érosion
170 + 000 – 171 + 800	Erosion
172 + 100 – 172 + 800	Eboulement
173 + 000 – 174 + 700	Eboulement et érosion
174 + 900	Eboulement et érosion
175 + 800	Erosion
176 + 900	Erosion
177 + 000	Erosion et affouillement
178 + 400	Erosion
181 + 300	
182 + 500	Erosion
182 + 600	Glissement

183 + 100	Erosion et glissement
184 + 900	Erosion
186 + 000	Erosion
186 + 200	Erosion
187 + 000	Erosion et glissement
188 + 100 – 188 + 200	Erosion
189 + 600	Glissement et érosion
189 + 700 – 197 + 100 et 197 + 200 – 198 + 900	Erosion
202 + 100	Erosion
204 + 100	Erosion
242 + 800	Erosion des culées
243 + 000	Affouillement
251 + 100	Affouillement
262 + 200	Eboulement
268 + 500	Affouillement
271 + 900 – 272 + 000	Affouillement

Source : VPM

Tableau 35 : Réhabilitation RN2 : Moramanga à Toamasina
Etude de dégâts cycloniques 1994

Lors de la saison de pluies exceptionnelles en 1996, on a dénombré les dégâts suivants :

PK	DEGATS
125 + 800	Chute de descente d'eau endommagée
130 + 300	Remblai érodé Déformation de la chaussée
130 + 300	Eboulement de talus de déblai Mur en gabion démoli Fossé maçonné obstrué Glissement de Erosion de talus de remblai
132 + 600	Eboulement de talus de remblai
139 + 100	Erosion de talus de remblai
145 + 950	Eboulement de remblai
146 + 950	Eboulement de talus de remblai
147 + 200	Eboulement de talus de remblai
150 + 900	Glissement des talus de remblai Chaussée fissurée Dislocation de l'accotement
151 + 200	Chaussée fissurée transversalement due à un glissement
153 + 600	Glissement de talus de remblai
154 + 800	Glissement de talus de déblai
155 + 500	Fissures transversalement due à, un glissement
155 + 950	Eboulement de talus de déblai
156 + 050	Eboulement de talus de déblai
156 + 650	Eboulement de talus de déblai
158 + 500	Eboulement de talus de déblai
163 + 500	Eboulement de talus rocheux Dégradation partielle de la chaussée

164 + 300	Erosion Tassement de la route
163 + 500	Glissement de remblai
169 + 600	Eboulement de talus de déblai
170 + 900	Affaissement de la chaussée
171 + 700	Eboulement de talus de déblai
172 + 500	Eboulement rocheux
173 + 800	Eboulement de talus de déblai
176 + 100	Dégradation de la chaussée Obstruction de fossé Dégâts dus à une arrivée d'eau au niveau de talus de déblai
176 + 900	Fissure transversale
180 + 250	Eboulement de talus de déblai Gabion et caniveau maçonné endommagé
185 + 500	Eboulement de talus de déblai
185 + 600	Eboulement de talus de déblai
185 + 900	Dislocation de la partie droite de la chaussée
186 + 400	Eboulement de talus de déblai
187 + 100	Eboulement de talus de déblai
197 + 100	Tassement de la chaussée
252 + 500	Glissement de terrain vers la ligne de chemin de fer
276 + 200	Eboulement de talus de déblai
315 + 600	Dégradation de la chaussée
337 + 900	Glissement de talus de remblai

Source : VPM

Tableau 36 : Dégâts sur la RN2 pendant la saison des pluies 1995 – 1996

ANNEXE 3 : INTERETS ECONOMIQUES DE TOAMASINA

Pays émetteurs	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Europe	2 497	2 573	2 446	2 084	1 727	3 710	1 640
Afrique	188	425	277	448	246	846	494
Amérique	189	115	127	151	103	192	81
Océanie	47	56	64	59	25	27	33
Asie	48	53	14	2	18	45	49
VINR	2 969	3 222	3 028	2 734	2 119	4 821	2 292
RE	851	596	621	428	142	658	3 601
RN	2 059	2 626	2 272	476	225	4 631	494
Nuitées VINR	9 388	10 911	10 473	10 559	7 299	12 999	5 983
Nuitées RE et RN	4 531	5 274	4 177	2 327	1 373	9 877	8 950

Source : INSTAT

Tableau 37 : Nombre des visiteurs et des vacanciers fréquentant TOAMASINA

10/09/03

Tarif Hors Taxes

TARIF GEOTEXTILES BIDIM

Réf	DESIGNATION	Unité	P.U HTVA
SY000006	PGM 14 3,6 x 150	m ²	7 500
SY000008	F 60 600G/m ² 6 x 100	m ²	28 300
SY000001	S 32 1254G/m ² 6 x 250	m ²	5 400
SY000002	S 41 180G/m ² 6 x 225	m ²	6 400
SY000004	S 51 200G/m ² 6 x 175	m ²	8 500
SY000003	S 71 325G/m ² 6 x 100	m ²	13 900

Source : Bidim

Tableau 39 bis : Tarif géotextiles

COMPAGNIE MADECASSE - BP 567 - 101 ANTANANARIVO
Tél : 22 224 08/221 19/229 74/671 63 Fax 22 335 73
E-mail : madeco@madecasse.mg
Site Internet : www.lk.oi.com/madecasse

ANNEXE IV –SOUS DETAILS DES PRIX

Désignation des prix	N°	Unité	R/j	K
Géotextile		M ²	90	1,3

Désignation	Unité		Dépenses journalières						Récapitulation des dépenses Fmg
	U	Qté	U	Qté	Coût Unitaire Fmg	Dépenses- matériels Fmg	Dépenses- Main d'œuvre Fmg	Dépenses- Matériaux Fmg	
1- <u>Matériels</u> lot d'outillages	Fft	1	H	8	1500	12000			12000
2- <u>Personnels</u> Chef d'équipe	Hj	1	H	2	4000		8000		
Ouvriers spécialisés	Hj	4	H	8	3000		96000		
Manœuvres	Hj	3	H	8	2000		48000		152 000
3- <u>Matériaux</u> géotextile	M ²	1	M ²	90	35000			3 150 000	3 150 000
TOTAL déboursés (D)									3 314 000

$$PU = K \times \frac{D}{R}$$

PU arrondi à 48 000 Fmg

Tableau 38 : Sous détails des prix « Géotextile »

Désignation des prix	N°	Unité	R/j	K
Réparation de gabion		M ²	225	1,3

Désignation	Unité		Dépenses journalières						Récapitulation des dépenses Fmg
	U	Qté	U	Qté	Coût Unitaire Fmg	Dépenses- matériels Fmg	Dépenses- Main d'œuvre Fmg	Dépenses- Matériaux Fmg	
<u>1-Matériels</u>									
Camion	U	1	J	0,2	1025000	205000			255 000
lot d'outillages divers	Fft	1	J	1	50 000	50000			
<u>2-Mains d'œuvre</u>									
Chef d'équipe	Hj	1	J	0,25	32 000		8 000		120 000
Ouvriers spécialisés	Hj	2	J	1	24 000		48 000		
Manœuvres	Hj	4	J	1	16 000		64 000		
<u>3-Matériaux</u>									
Cage métallique	M ²	0,11	M ²	25	251 000			6 275 000	6 275 000
TOTAL déboursés (D)									6 650 000

PU arrondi à 38 500 Fmg

Tableau 39 : Sous-détails des prix « Réparation des gabions »

TARIF GEOTEXTILES BIDIM

Réf	DESIGNATION	Unité	P.U HTVA
SY000006	PGM 14 3,6 x 150	m ²	7 500
SY000008	F 60 600G/m ² 6 x 100	m ²	28 300
SY000001	S 32 1254G/m ² 6 x 250	m ²	5 400
SY000002	S 41 180G/m ² 6 x 225	m ²	6 400
SY000004	S 51 200G/m ² 6 x 175	m ²	8 500
SY000003	S 71 325G/m ² 6 x 100	m ²	13 900

Source : BIDIM

Tableau 39 bis : Tarif géotextile

ANNEXE V : PROGRAMMATION

The screenshot shows a Windows application window titled "Form1" with a blue title bar. The window contains two main calculation sections. The top section is titled "ENTRER LES DONNEES SUIVANTES" and includes input fields for Beta (1,047), h (10), C (4), Phi (0,436), Xe1 (0), Xe2 (8), C' (3), Phi' (0,349), Ye1 (-10), Ye2 (-8), Delta (0,175), Gama1 (2), Gama2 (2,1), Gama3 (1), and gamma4 (1). There are also radio buttons for "Valeur en degré" and "Valeur en radian", and a "atsika agny tyf" button. Below this section are two result labels: "RESULTAT 1: Coordonnées du point F:" and "RESULTAT 2: Valeur de Gama'". The bottom section is also titled "ENTRER LES DONNEES SUIVANTES" and includes input fields for Psi (0,810), Teta (1,126), R (Label22), Alpha (Label23), Xc (Label26), Yc (Label27), NOMBRE DE TRANCHE n (10), and Valeur de b (Label28). It also features a "CALCULER" button and result labels "RESULTAT FINALE:" and "Label33". The Windows taskbar at the bottom shows the start button, a clock at 16:27, and several open applications including "Projet1 - Microsoft Wi..." and "Form1".

Editeur de code de la programmation sous Visual Basic:

```
Public a, d, r, alpha, xc, yc, b, g, zer, zez, zeze, eeee, ze, T, f, T1p, h, j, ya, z, k, yb, ycc, yg, j1,
g1, v, yk, yj, cc, sino, coso, phi1, s, w, s1, w1, N1, q, ww, q2, w2 As Double
Const pi = 3.141592654
Public n, i, m As Integer
```

```
Private Sub Command1_Click()
    ze = CDbl(T1.Text) * (pi / 180)
    Label17.Caption = CDbl(T10.Text) - CDbl(T11.Text)
    a = CDbl(T2.Text) / Tan(CDbl(T1.Text) * (pi / 180))
    Label13.Caption = a
    Label15.Caption = T2.Text
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
    zer = CDbl(T12.Text) * (pi / 180)
    zez = CDbl(T13.Text) * (pi / 180)
    zeze = zez / 2
    MsgBox ("a valeur de co et:")
    eeee = 2 * (Sin(CDbl(T12.Text) * (pi / 180))) * (Sin(CDbl(T13.Text) * (pi / 180) / 2))
    MsgBox ("la valeur de est : ")
```

```

Label35.Caption = eeee
r = (Cdbl(T2.Text)) / eeee
MsgBox ("r=") & r
alpha = (zer) + (pi / 2) - zez / 2
Label35.Caption = "alpha=" & alpha
xc = r * Cos(alpha)
yc = r * Sin(alpha)
Label26.Caption = xc
Label27.Caption = yc
Label22.Caption = r
Label23.Caption = alpha
End Sub

Private Sub Command3_Click()
Dim T1p,h, As double
h = Cdbl(T2.Text)
ze = Cdbl(T1.Text) * (pi / 180)
i = 0
n = Cdbl(T14.Text)
b = (2 / n) * r * (Sin(zez / 2)) * Cos(zer)
m = n - 1
q2 = 0
w2 = 0
For i = 0 To m
g = i * b
j = (r * r) - ((g - xc) * (g - xc))
ya = yc - Sqr(j)
If g <= a Then
yb = Tan(Cdbl(T1.Text) * (pi / 180)) * g
Else
yb = (g * Tan(Cdbl(T15.Text) * (pi / 180))) + (h * (1 - (Tan(Cdbl(T15.Text) * (pi /
180)) / Tan(ze))))
End If
k = (Cdbl(T17.Text) - Cdbl(T16.Text)) / (Cdbl(T6.Text) - (Cdbl(T5.Text)))
z = k * (g - Cdbl(T5.Text)) + Cdbl(T16.Text)
If z > yb Then
ycc = yb
End If
If z < ya Then
ycc = ya
End If
If z <= yb And z >= ya Then
ycc = z
End If
g1 = (i + 1) * b
j1 = (r * r) - ((g1 - xc) * (g1 - xc))
yg = yc - Sqr(j1)
If g1 <= a Then
yk = Tan(Cdbl(T1.Text) * (pi / 180)) * g1
Label33.Caption = yk

```

```

Else
    yk = (g1 * Tan(CDbl(T15.Text) * (pi / 180))) + (h * (1 - (Tan(CDbl(T15.Text) * (pi /
180)) / Tan(ze))))
    End If
    v = k * (g1 - CDbl(T5.Text)) + CDbl(T16.Text)

If v > yk Then
    yj = yk
End If
If v < yg Then
    yj = yg
End If
If v <= yk And v >= yg Then
    yj = v
End If
If ya < z Then
    cc = CDbl(T7.Text)
    phi1 = CDbl(T8.Text) * (pi / 180)
Else
    cc = CDbl(T3.Text)
    phi1 = CDbl(T4.Text) * (pi / 180)
End If
sino = (((i + 0.5) * b) - xc) / r
coso = Sqr(1 - (sino * sino))
s = (b / 2) * (ycc + yj - ya - yg)
'zz = CDbl(T10.Text)
w = CDbl(T10.Text) * s
s1 = (b / 2) * (yb + yk - ycc - yj)
w1 = s1 * CDbl(T9.Text)
N1 = (w + w1) * coso
If sino > 0 Then
    T = (w + w1) * sino
    T1p = 0
Else
    T = 0
    T1p = -(w + w1) * sino
End If
q = (N1 * Tan(phi1)) + ((cc * b) / coso) + T1p
ww = (CDbl(T11.Text) * ((CDbl(T17.Text) - CDbl(T16.Text)) / (CDbl(T6.Text) -
CDbl(T5.Text))) * s) + T + (CDbl(T20.Text) * ((CDbl(T17.Text) - CDbl(T16.Text)) /
(CDbl(T6.Text) - CDbl(T5.Text))) * s1)

    q2 = q + q2
    w2 = ww + w2
Next
Label33.Caption = ("q2=") & q2
Label34.Caption = ("w2=") & w2

If w2 = 0 Then

```

```

    MsgBox ("HAMARINO NY DONNEES ANAO AZAFADY")
    w2 = 1

End If
    f = q2 / w2
    Label32.Caption = ("f=") & f
End Sub

Private Sub Command4_Click()
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
    ' pi = 3.14
    i = 0

    m = n - 1
    q2 = 0
    w2 = 0
End Sub

Private Sub T14_Change()
    n = T14.Text
    zez = CDBl(T13.Text) * (pi / 180)
    zer = CDBl(T12.Text) * (pi / 180)
    m = n - 1
    b = (2 / n) * r * (Sin(zez) / 2) * (Cos(zer))
    Label28 = b
End Sub

Private Sub talus_Change()
Text2.Text = CDBl(talus.Text) * 0.017453292
End Sub

Private Sub Text3_Change()

End Sub

Private Sub text20_Change()

End Sub

```

DIMENSIONNEMENT DE FOSSE DE CRETE

PARAMETRES D'ENTREE

Vitesse d'affouillement: 6,5
 Vitesse d'ensablement: 0
 Débit à évacuer: 1,67

Pente TN: 0,008
 Pente Fossé: 0,008
 Coef. de Manning: 62
 Talus Fossé: 1,5

TRAITEMENT

b: h:

VERIFICATION

v:

Frame4

Windows taskbar: démarrer, 2020, Projet1 - Microsoft Wi..., DIMENSIONNEMENT ..., Document1 - Microsof..., FR, 16:30

DIMENSIONNEMENT DE FOSSE DE CRETE

PARAMETRES D'ENTREE

Vitesse d'affouillement: 6,5
 Vitesse d'ensablement: 0
 Débit à évacuer: 1,67

Pente TN: 0,008
 Pente Fossé: 0,008
 Coef. de Manning: 62
 Talus Fossé: 1,5

TRAITEMENT

b: h:

VERIFICATION

v:

Frame4

Windows taskbar: démarrer, 2020, Projet1 - Microsoft Wi..., DIMENSIONNEMENT ..., Document1 - Microsof..., FR, 16:31

Dim VAff As Double
Dim VEnsab As Double
Dim Qdebit As Double
Dim PenteTN As Double
Dim kMan As Double
Dim PenteFoss As Double
Dim Em As Double

Dim ksi As Double
Dim beta As Double
Dim ygreyk As Double

Dim pe As Double
Dim pe1 As Double
Dim peER As Double

Dim De As Double
Dim En As Double
Dim Omega As Double

Dim hHauteur As Double
Dim bLarg As Double

Dim lambda As Double
Dim Rrayhyd As Double

Dim Vcalc As Double

Private Sub Command1_Click()

VAff = CDBl(Text1.Text)
VEnsab = CDBl(Text2.Text)

Qdebit = CDBl(Text3.Text)

PenteTN = CDBl(Text4.Text)
PenteFoss = CDBl(Text7.Text)
kMan = CDBl(Text6.Text)
Em = CDBl(Text5.Text)

ksi = 2 * Sqr(Em ^ 2 + 1)
beta = Sqr(1 / (ksi - Em)) / 2
ygreyk = 1.5 / Sqr(kMan)

pe = 0.5 * ygreyk + 1.25
peER = 1 / pe
pe1 = 0.5 + ygreyk

De = kMan * beta ^ pe1 * PenteTN ^ 0.5
En = Qdebit / De

$\Omega = E_n \wedge p_{eR}$

$h_{\text{Hauteur}} = \text{Sqr}(\Omega / (\text{ksi} - E_m))$ 'à afficher

$b_{\text{Larg}} = h_{\text{Hauteur}} * (\text{ksi} - 2 * E_m)$ 'à afficher

$h_{\text{Hauteur}} = \text{Format}(h_{\text{Hauteur}}, "0.00")$

$b_{\text{Larg}} = \text{Format}(b_{\text{Larg}}, "0.00")$

$\lambda = 2 * \text{Sqr}(\Omega * (\text{ksi} - E_m))$

$R_{\text{Rayhyd}} = \beta * \Omega \wedge 0.5$

$V_{\text{calc}} = k_{\text{Man}} * R_{\text{Rayhyd}} \wedge p_{e1} * P_{\text{enteFoss}} \wedge 0.5$

Text9.Text = CStr(bLarg)

Text10.Text = CStr(hHauteur)

Text8.Text = CStr(Vcalc)

End Sub

Private Sub Command2_Click()

Dim message

Dim message2

Dim message3

Dim message4

Dim message5

Dim message6

message = "Votre canal est assurément affouillé. "

message2 = "Veuillez refaire votre dimensionnement"

message3 = "Votre canal est assurément ensablé. "

message4 = "Veuillez refaire votre dimensionnement"

message5 = "Les valeurs de b et h sont correcte. "

message6 = "Passer à l'étape suivante"

If Vcalc >= VAff Then

MsgBox (message & message2)

End If

If Vcalc <= VEnsab Then

MsgBox (message3 & message4)

End If

If VEnsab <= Vcalc And Vcalc <= VAff Then

MsgBox (message5 & message6)

End If

End Sub

```
Private Sub Command3_Click()  
    NextTronçonFrm.Show  
End Sub
```

```
Private Sub Frame1_DragDrop(Source As Control, X As Single, Y As Single)  
  
End Sub
```

LISTE DES CARTES

CARTE N°1 : Tracé de la RN2	4
-----------------------------------	---

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Profil en long	5
Figure 2- Profil mixte	6
Figure 3- Erosion progressive	9
Figure 4- Ecoulement des blocs rocheux	11
Figure 5- Risque en fonction du profil en long	12
Figure 6- Elargissement de l' accotement	22
Figure 7- Précipitation en fonction du profil en long	29
Figure 8- Répartition des précipitations	34
Figure 9- Taux d' infiltration et infiltration cumulative en fonction du temps	35
Figure 10- Régime d' infiltration en fonction du temps pour différents types de sol	37
Figure 11- Caractéristiques du profil hydrique au cours d' une infiltration ..	38
Figure 12- Evolution du profil hydrique au cours de l' infiltration	39
Figure 13- Les différents types d' écoulement	41
Figure 14- Découpage des différents phases d' un hydrogramme du crue ...	42
Figure 15- Résultats de l' expérience à Analamazaotra	47
Figure 16- Profil en travers du tronçon Antananarivo – Manjakandriana	52
Figure 17- Mécanisme d' infiltration	54
Figure 18- Cercle de glissement critique	55
Figure 19- Géométrie d' une tranche	56
Figure 20- Géométrie du cercle de glissement	57
Figure 21- Cercle de glissement de calcul	59
Figure 22- Diguettes	64
Figure 23- Emplacement du fossé de crêtes	65
Figure 24- Profil en long du fossé	70
Figure 25- Explication de l' intervention	76
Figure 26- Tranchée drainante	77
Figure 27- Imperméabilisation de la surface critique	79

Figure 28- Mise en œuvre des géomembranes	80
Figure 29- Utilisation de géospaceur	81
Figure 30- Constriction d' un géotextile non tissé	85
Figure 31- Constriction d' un géotextile tissé	85
Figure 32- Comportement de géotextile	86
Figure 33- Tranchée de calcul	89
Figure 33 bis : Trajectoire type des cyclones	X

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- Répartition des dégâts en 1994 et 1996	11
Tableau 2- Liste des brèches entre Brickavilles et Toamasina.....	14
Tableau 3- Récapitulation des sections dégradées	15
Tableau 4- Renseignements sur les densités de commerçants Le long de la route	16-17
Tableau 5-Evolution des trafics sur la RN2 du 1998 à 2001	18
Tableau 6- Récapitulation des qualités des produits pétroliers importés en 2000.....	19-20
Tableau 7- Tableau récapitulatif des précipitations	28
Tableau 8- Caractéristique des cyclones	31
Tableau 9- Moyenne d' humidité mensuelles	32
Tableau 10- Résumé de paramètres hydrologiques Mandraka	49
Tableau 11- Calcul de coefficient sécurité	60
Tableau 12- Débit de quelques bassins versants	69
Tableau 13- Fossé constitué d' un seul tronçon	70
Tableau 14- Résultats pour le fossé constitué de deux tronçons	71
Tableau 15- Valeur de coefficient sécurité au glissement de quelques talus immergés	72
Tableau 16- Différents rôles des géotextiles	74-75
Tableau 17- Valeur de débit pour une profondeur de la tranchée drainante	77-78
Tableau 18- Capacité de drainage des géospaceurs	81
Tableau 19- Largeur minimale de la surface sur laquelle on étendra les .géomembranes	82
Tableau 20 : Devis estimatif de l' intervention.....	90
Tableau 21- Estimation de la réalisation de géomembranes	91

TABLEAU DES ANNEXES

ANNEXE 1

Tableau 22- Classification de pluies	I
Tableau 23- Pluviométrie à Antananarivo.....	II

Tableau 24- Pluviométrie à Manjakandriana.....	II
Tableau 25- Pluviométrie à Anjira	III
Tableau 26- Pluviométrie à Mandraka	III
Tableau 27- Pluviométrie à Moramanga	IV
Tableau 28- Pluviométrie à Andekaleka	IV
Tableau 29- Pluviométrie à Brickaville	V
Tableau 30- Pluviométrie à Toamasina	V
Tableau 31- Classification des cyclones	VI
Tableau 32- Caractéristiques des vents à Toamasina	VII
Tableau 33- Caractéristiques des vents à Antananarivo	VIII
Tableau 33 bis : Cyclone tropical ayant intéressé la région de Toamasina	IX

ANNEXE 2

Tableau 34- Dégâts sur la descente de Mandraka	XI
Tableau 35- Réhabilitation de la RN2	XIII
Tableau 36- Dégâts sur la RN2 Moramanga Toamasina pendant la saison des pluies 1995-1996	XV

ANNEXE 3

Tableau 37- Nombre des visiteurs et des vacanciers fréquentant Toamasina	XVI
--	------------

ANNEXE 4

Tableau 38- Sous détails des prix : géotextile	XVII
Tableau 39- Sous détails des prix : réparation des gabions	XVIII
Tableau 39 bis : Tarif géotextile	XIX

LISTES DES ANNEXES

ANNEXE I : DONNEES CLIMATOLOGIQUES

ANNEXE II : DEGATS RECENSES LE LONG DE LA RN2

ANNEXE III : INTERETS ECONOMIQUES DE TOAMASINA

ANNEXE IV : SOUS DETAILS DES PRIX

ANNEXE V : PROGRAMMATION

LISTE DES ABREVIATIONS

BV	Bassin Versant
CT	Cyclone Tropical
D	Droite
ETR	Evapotranspiration
FER	Fond d'entretien routier
G	Gauche
GELOSE	Gestion Locale Sécurisée
IE	Infiltration Efficace
INSTAT	Institut National des Statistiques
IPA	Indice de Précipitation Antécédente
MTP	Ministère des Travaux Publics
PEII	Plan Environnemental n°II
RN	Route Nationale
RNP	Route Nationale Primaire
RNS	Route Nationale Secondaire
RNT	Route Nationale Temporaire
TCE	Tananarive à la côte Est
TN	Terrain Naturel
TUPP	Taxe Unique sur les Produits Pétroliers
VGT	Vetiver Grass Technology
VPM	Vice Primature

TABLES DES MATIERES

Introduction générale	1
Partie I : Position du problème	
<u>Introduction</u>	2
Chap I : vue d'ensemble de la RN2.....	3
I –Généralités.....	3
a- Profil en long.....	5
b- Profil en travers.....	6
c- Description.....	6
II- Problèmes rencontrés.....	7
a- Les zones à risque faible.....	8
b- Les zones à risque moyen.....	8
c- Les zone à risque fort.....	10
Chap II : Répercussions de l'éboulement.....	13
I- Conséquences structurelles.....	13
a- L'enlèvement des éboulements.....	13
b- Les traitements des talus.....	14
c- La réhabilitation de la chaussée	14
II- Conséquences économiques.....	15
a- La population riveraine	16
b- Echange des biens et marchandises.....	17
Chap III - Les solution déjà apportées.....	21
I- Traitement de la chaussée.....	21
II- Résolution du problème d'éboulements.....	21
a- Elargissement de l'emprise	21
b- Les ouvrages de soutènement.....	22

c- Stabilisation génie biologique	23
III- Résultats obtenus.....	24
Conclusion.....	25
Partie II- Facteur entrant dans l'instabilité de talus	
Introduction.....	26
Chap I : Facteurs climatiques.....	27
I- Précipitations.....	27
a- Généralités.....	27
b- Données.....	27
c- Commentaires.....	28
II- Les Cyclones.....	30
a- Généralités.....	30
b- Situation de la zone d'étude.....	30
c- Commentaires.....	31
III- Autres facteurs.....	32
a- Le vent.....	32
b- Humidité atmosphérique.....	32
c- Température de l'air et rayonnement solaire.....	33
Chap II- Analyse des bassins versants.....	34
I- L'infiltration.....	34
a- Définitions et paramètres descriptifs de l'infiltration.....	35
b- Facteurs influençant l'infiltration.....	36
c- Variation du taux d'infiltration au cours d'une averse.....	38
II- Les écoulements.....	40
a- Généralités.....	40
b- L'écoulement de surface.....	43
c- L'écoulement de subsurface	43
III- Caractéristiques de la zone d'étude.....	44
a- Relief et paysage.....	44
b- Pédologie.....	44

IV- Estimation du ruissellement et de l'infiltration.....	46
a- Résultats de l'expérience	46
b- Tronçon Antananarivo- Manjakandriana.....	48
c- Région de Mandraka et d'Andekaleka.....	48
d- Région de Moramanga.....	49
e- Région littorale entre Brickaville et Toamasina.....	49
f- Remarque et résumé.....	50
Chap III – Résistance des talus.....	51
I- Caractéristiques des talus.....	51
a- Tronçon 1 : Antananarivo – Manjakandriana.....	52
b- Tronçon 2 : Mandraka.....	52
c- Tronçon 3 : Moramanga.....	52
d- Tronçon 4 : Beforona.....	52
e- Tronçon 5 : Brickaville – Tamatave.....	52
II – Résistance à l'érosion superficielle.....	53
a- coulées boueuses.....	53
b- Effet de cascade.....	53
c- L'atteinte à l'esthétique.....	53
III- Résistance au glissement	54
a- Mécanisme d'infiltration.....	54
b- Calcul du coefficient de sécurité	55
c- Contenu de la programmation.....	57
d- Résultats.....	59
Conclusion.....	61
Partie III- Solution à préconiser	
Introduction	62
Chap I – Fossés de Crêtes.....	63
I- Généralités.....	63
II- Particularité de la solution « Fossés de Crêtes ».....	63
III- Conception.....	63

a- Pente.....	64
b- Section.....	64
c- Vitesse de l'eau.....	64
d- Emplacement.....	65
e- Entretien	65
IV – Dimensionnement	65
a- Méthode rationnelle.....	66
b- Méthode de LOUIS DURET.....	66
c- Géométrie du fossé.....	67
d- Résultats de la programmation	69
Chap II- La solution en géosynthétique.....	72
I- Différentes solutions.....	72
a- Pente critique du talus.....	72
b- Les ouvrages de soutènement.....	73
II- Généralités sur les géosynthétiques	73
a- Les géotextiles.....	74
b- Les géomembranes.....	75
c- Les géocomposites.....	75
III- Intervention dans la zone d'étude.....	76
a- Protection contre les eaux d'infiltration en amont du bassin versant.....	76
b- Disposition contre l'infiltration directe des eaux d'infiltration à l'aval de la tranchée.....	79
Chap III- Mise en œuvre de la tranchée drainante.....	83
I- Les causes de l'inefficacité du système de filtration.....	83
a- Mauvaise rétention ou lessivage du sol.....	83
b- Perméabilité insuffisante du système de filtration initiale ou à long terme	83
II- Approche globale de dimensionnement du système de filtration.....	84
a- Caractéristiques fonctionnelles initiales.....	84
b- Caractéristiques liées à la mise en oeuvre	85

c- Caractéristiques liées à la durabilité	86
III- Réalisation	87
a- Exécution de la trachée drainante	87
b- Précaution à prendre face à l'exposition au rayon ultraviolet	87
c- Conception d'une sortie de drainage.....	87
IV- Estimation des prix de l'intervention	88
a- Drains longitudinaux.....	88
b- Géomembranes.....	89
c- Fossé de crêtes en terre.....	89
d- Calcul estimatif.....	90
e- Calcul du coefficient de déboursés K.....	91
V- Limite de la solution	92
Conclusion	93
Conclusion générale	94

ANNEXES

Liste des cartes

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

Liste des abréviations

Tables des matières