BENDER PARTNER
GmbH Engineering, Umwelt

Pistes rurales et mesures antiérosives

Recommandations techniques

Heinz Bender

travail en progrès, novembre 2009

Version provisoire

Pistes rurales et mesures antiérosives

Recommandations techniques

Travail en progrès, novembre 2009

Table des matières :

Avant propos 2
1 Cadre de la planification et des études techniques de pistes rurales 4
1.1 Principes de routes simples et économiques 4
1.2 Niveau de service 7
1.3 Choix du tracé horizontal et du tracé vertical 7
1.4 Caractéristiques géométriques du profil 8
1.5 Etudes hydrauliques 9
1.6 Drainage, évacuation des eaux de ruissellement 10
1.7 Etudes géotechnique 10
1.8 Etude topographique et conception provisoire des ouvrages 10
1.9 Etude d'impact et mesures environnementales 11
1.10 Participation des populations villageoises 12
2. Recommandations techniques 13
2.1 Pistes 13
2.1.1 Pistes standards 13
2.1.2 Traversés de plaines submersibles et de dépressions 16
2.1.3 Zones à faible portance 17
2.1.4 Pistes en pente longitudinale forte 18
2.1.5 Zones érodés et/ou de ruissellement fort 20
2.1.6 L'ancien piste érodée est devenue collecteur des eaux de ruissellement 20
2.2 Franchissement des cours d'eau 20
2.2.1 Généralités 20
2.2.2 Radiers 21
2.2 Seuil-radiers 25
2.3 Dalot, buses 31
2.4 Evaluation du type d'ouvrage approprié 32
2.5 Exemples de conception de radiers et de seuil-radiers 33
3. Principes d'entretien 36
4. Mesures antiérosives 37
4.1 Objectifs 37
4.2 Principes de la lutte contre l'érosion de la gestion des eaux et des sols 37
4.2.1 Lutte contre l'érosion 37
4.2.2 Gestion des eaux 38
4.3. Techniques 39
4.3.1 Diguettes 39
4.3.2 Protection biologique 43
4.3.3 Digues filtrantes, digues en pierres sèches ou pierres sèches combinées avec maçonnerie 44
4.3.4 Seuils en maçonnerie 46
4.3.5 Autres techniques 47
4.4 Formation 48

Bender & Partner GmbH
Wybergstrasse 41
CH-8542 Wiesendangen
Texte et photos: Heinz Bender, Dr. Ing. ETH
Graphiques: Judith Bender

Version provisoire

Avant propos

Les problèmes techniques pour les infrastructures rurales, telles que les pistes, les mesures antiérosives et les aménagements des bas fonds sont, pour les zones semi-arides du Sahel, dominées par des sols sableux-limoneux. Ces sols sont en général très sensibles à l'érosion. L'état de dégradation de la végétation, couverture naturelle protectrice des sols a entraîné une augmentation de leurs susceptibilités à l'érosion. Cette situation découle de l'accroissement linéaire de la force érosive de l'eau, conséquence de la forte augmentation des taux de ruissellement, corollaire de l'état de dégradation cité ci-dessus. Pour le traitement de cette érosion, la technique des gabions a été pendant longtemps utilisée et était très répandue il y a peu de temps encore, cette technique s'est avérée peu ou pas appropriée pour de telles conditions. De plus pour l'essentiel, les diverses recommandations disponibles se sont révélées peu efficaces ou inappropriées pour ces zones. Principalement dans le domaine de l'aménagement de bas-fonds, de la réhabilitation et la gestion des ressources naturelles de régions fortement dégradées. La construction de pistes rurales simples pour ces zones, manquait également d'approches et de recommandations techniques cohérentes.

Ce problème avait été déjà constaté en 1988 par le programme de recherche-action PCGES (Programme Conservation et Gestion des Eaux et des Sols au Niger, financement Coopération suisse) étudié en partenariat par l'école Polytechnique Fédérale de Zurich et l'Université de Niamey. Le développement de techniques et d'approches viables spécifiques à ces zones sableuses et dégradées a donc été intégré dans ce programme en ce qui concerne la protection contre l'érosion et l'aménagement des bas fonds. Le PCGES a pris fin en 1998. Depuis 1996 le développement des techniques et approches a été poursuit en dehors du cadre universitaire. En plus la nécessité d'avoir des pistes rurales appropriées, est devenue un sujet importance.
Ce sont les organisations et projets suivants qui ont contribué au développement de ces techniques:

- depuis 1996: Coopération Suisse au Tchad dans la région de Biltine-Ouaddaï;
- 1998 - 2003: Coopération Suisse au Niger dans la région de Téra;
- depuis 1999: PDRT (KfW, GTZ, DED) au Niger, dans la région Tahoua, devenu FICOD (KfW) en 2001 et ensuite FICOD/LUCOP (KfW/GTZ/DED);
- depuis 2001: HIMO (KfW) au Burkina Faso, devenu FICOD-HIMO en 2005 ;
- 2001 - 2002 : PPRR, projet pilote routes rurales, Ministère de l'Equipement et des Transports du Niger, financement Banque Mondiale ;
- depuis 2003 : PREST, Helvetas, région Fada N'Gourma, Burkina Faso ;
- 2003 - 2007 : Banque Mondiale, PST II (Programme Sectoriel Transport) au Burkina Faso, appui à la DGPR ;
- 2003 - 2007 : Lux -Développement dans la région Dosso au Niger;
- depuis 2004 : PRODABO (GTZ, KfW) dans l'Ouaddaï au Tchad.
- depuis 2005 : EON (Entwicklungsorientierte Nothilfe, GTZ) dans l'Ouaddaï au Tchad.

Tous ces programmes ou projets ont commun le besoin de développer des techniques et approches durables et appropriées au contexte. Ce volume de recommandations, ainsi que le volume complémentaire « aménagement de bas fonds à l'aide de seuils d'épandage », se basent sur leurs expériences. Centaines sont validées, d'autres peuvent encore être développées d'avantage. A ce sujet, il est bon de rappeler, qu'il n'existent pas de bonnes ou de mauvaises mesures. Il s'agit de faire la part des choses entre des mesures appropriées et adaptées au contexte et des mesures non appropriés.
Ceci complique l'établissement et l'utilisation de recommandations. Pour ces raisons il est question de compléter plus tard les recommandations par des études de cas.
A cette occasion j'aimerai de présenter mes chaleureux remerciements à tous les collaboratrices et collaborateurs qui à travers différents pays et projets ont eu contribué d'une façon ou d'une autre à faire avancer la recherche de solution adaptée à chaque contexte.

1 Cadre de la planification et des études techniques de pistes rurales

1.1 Principes de routes simples et économiques

La construction de pistes rurales dans les pays sahéliens est confrontée à de multiples difficultés. Une des difficultés est l'absence de normes spécifiques pour les pistes simples. Celles existantes ont été établies pour les routes (avec revêtement et routes en terre). En conséquence, souvent, les pistes ont été considérées comme des routes simples. Cette perception est trop restreinte, car :

- Les **routes** sont liées au contexte socioéconomique et les aspects techniques sont bien normés.
- Les **pistes** sont plus liées au contexte environnemental et pour le contexte socioéconomique à l'agriculture, la sylviculture et l'élevage. Très peu sont normées. Le fait de simplifier les routes, afin de satisfaire exclusivement les exigences économiques nous a amené à la situation insatisfaisante de la la conception des pistes rurales.

Dans la planification et la conception de pistes rurales les éléments suivants nécessitent une attention particulière :

1. La protection contre l'érosion,
2. Les techniques appropriées,
3. L'entretien,
4. L'économie rurale et le développement rural.

Dans la construction routière ces éléments mentionnés ci-dessus, trouvent d'autres réponses que celles définies pour la construction de pistes rurales. Donc, dans un tel contexte, une étude classique n'est plus appropriée. Celle-ci doit être adaptée et simplifiée. Il n'est pas possible de planifier et de construire selon les normes classiques qui ont été essentiellement établies pour des routes principales.

Pour la construction de pistes plusieurs approches sont aujourd'hui pratiquées, dont notamment :

- L'approche HIMO (haute intensité de main d'œuvre),
- L'approche mécanisée,
- L'approche d'aménagement continue des points critiques,
- L'aménagement continue.

Le choix d l'approche n'a relativement peu d'influence sur la planification de la piste et les éléments techniques. Les ouvrages et les points critiques trouvent des solutions très similaires et, en grande partie, il s'agit de travaux manuels. Les travaux restant ne posent en générale pas de problèmes particuliers.

1. La protection contre l'érosion :

Ces pistes secondaires, simples, sont soumises en général à un trafic faible. Par conséquent, les dégâts sont en grande partie liés à l'érosion causée par les ruissellements sur la piste et à proximité de celle-ci. Souvent les dégâts induits par la faible portance sont moins importants que ceux causés par l'érosion. La stabilisation de l'environnement et la protection contre l'érosion à proximité de la piste constituent donc la première priorité.
La conception de la piste doit inclure les mesures antiérosives, notamment à l'aide des radiers et de parties de pistes horizontales et submersibles, qui fonctionnent comme une diguette antiérosive.

Les principes de la protection contre l'érosion sont :

1) l'épandage de l'eau
2) l'infiltration.

Ces mesures favorisent la régénération naturelle de la végétation, ce qui assure une protection durable contre l'érosion. La revégétalisation complémentaire peut être un avantage.
Le paragraphe 4, mesures antiérosives, est conçu pour le personnel de bureaux d'études, services techniques, entreprises et projets peu expérimentés en la matière.
La construction de buses et dalots est tolérée mais sera limitée à des cas particuliers, notamment si l'interruption de la circulation des véhicules est d'une durée inacceptable ou trop fréquente. Car, ces mesures ont un désavantage en ce sens qu'elles conservent ou accélèrent l'érosion.

Des contraintes/limites financières, eux aussi, impliquent une conception similaire de la piste, comme décrit ci haut : les rechargements sont à réduire au maximum. La portance doit être garantie. Cependant, des remblais importants sont à éviter. Ceci favorise la construction de radiers et des parties de piste qui supportent la submersion.

2. Les techniques appropriées :

Le traitement correct des points critiques est l'essentiel dans toutes les approches. En général cela concerne :

- **Les passages d'eau** :
  Toutes les parties de pistes qui traversent un cours d'eau sont considérées comme radier (passage submersible), indépendamment du type de construction et des matériaux utilisés. Ceux-ci peuvent être:
  - un radier en maçonnerie, éventuellement en béton.
  - un enrochement ou rechargement, protégé en amont et en aval par des murets en maçonnerie ou simplement par des digues en pierres sèches (radier à chaussée en matériaux non liés).

  La solution la moins coûteuse, qui fonctionne de manière durable est la solution la plus appropriée. L'expérience montre clairement, que la conception du radier est plus importante pour le fonctionnement correct et la durée de vie, que le choix des matériaux.

- **Les zones à faible portance** :
  Les sols les moins portants à l'état mouillé sont : les sols argileux, les sols dunaires et les sols sableux-limoneux à faible densité. Une portance adaptée au type de trafic est exigée.

- **Les zones soumises à l'érosion** :
  Les dégâts de l'érosion sont à traiter, la piste et son alentour immédiat doivent être protégés contre l'érosion.

- **Les parties du tracé plus basses que le terrain naturel** :
  Ces parties de piste fonctionnent souvent comme collecteur d'eau. Si l'érosion menace le bon fonctionnement, des mesures sont à prévoir, soit le rechargement du tracé ou soit le déplacement de la piste.

- **Trous, ornières profondes, parties caillouteuses et rocheuses** : Au cas où ces parties inconfortables représenteraient des obstacles pour les véhicules, des mesures adéquates telles que rechargement local, rechargement à faible épaisseur ou décapage, sont à étudier cas par cas.

A cause des contraintes ou limites financières, les éléments essentiels suivants sont à respecter :

- Les matériaux de construction, notamment les rechargements sont à réduire au maximum. La portance doit être garantie. Cependant, des remblais importants sont à éviter. Ceci favorise la construction de radiers et des parties de piste qui supportent la submersion.
- Des distances de transport sont à minimiser. Cela nécessite l'exploitation de petits gisements et carrières, et surtout en approche HIMO, l'utilisation de matériaux de construction qui ne sont pas mis en œuvre dans la construction routière classique.

3. Entretien :

Les interventions pour l'aménagement des pistes doivent se faire de façon à **minimiser l'entretien sur l'ensemble de la piste**. Le coût de l'entretien de ces pistes à très faible trafic doit être clairement inférieur à celui des pistes et routes en terre avec un trafic important. L'entretien par des équipes locales, riveraines à la piste, permet de diminuer les coûts d'entretien de manière remarquable, mais sous la condition, que ces équipes soient correctement formées.

Dans le cas d'aménagement des points critiques : la piste doit être traitée comme un tout cohérent. Inutile de traiter un point critique particulier pour satisfaire un type de trafic sans en traiter (ou le traiter partiellement) un autre qui deviendrait ainsi un goulot d'étranglement. L'aménagement doit être cohérent et progressif.

4. L'économie rurale et le développement rural :

L'économie rurale, avec la production agricole et sylvo-pastorale est un élément important dans la gestion des ressources naturelles. Et dans ce système de production les bas fonds, elles occupent une place importante. Sans l'aménagement des bas fonds, l'autosuffisance alimentaire de beaucoup de régions sahéliennes ne serait plus possible. C'est la seule opportunité qui offre la possibilité d'avoir des revenus assez réguliers.
La construction de pistes rurale n'est souvent pas justifiée par des raisons économiques directes. Ce sont des raisons sociales ou de désenclavement. Pourtant, les pistes peuvent occuper une place plus importante dans le développement rural. Par sa conception, la piste peut aussi contribuer directement à la gestion des ressources naturelles.
Pour ces raisons il est important de voir les pistes dans un contexte plus large qui concerne une commune ou une région. Une telle perception élargie est une approche systémique.
Dans la planification de réalisation des voies de transport comme dans le développement rural, en général il faut tenir compte du potentiel des pistes :

- elles peuvent contribuer à la gestion des ressources naturelles,
- elles peuvent contribuer à la production agricole et pastorale,
- elles peuvent contribuer à la création de compétences à plusieurs niveaux :
    - la construction et l'entretien de pistes,
    - la conception et la réalisation de mesures antiérosives,
    - la construction de seuils d'épandages,
    - la maçonnerie en moellons en général. Ils existent des GIE (Groupement d'Intérêt Economiques) au Tchad et au Burkina qui sont plus performantes que la plupart des PME (petites et moyennes entreprises).

La construction de pistes peut déclencher ou soutenir une dynamique économique et de développement. L'approche d'aménagement des points critiques est une approche qui permet de démarrer avec des moyens relativement faibles et de réagir de manière adéquate à un développement économique. Des volets HIMO (ouvrages, mesures antiérosives) ou

l'approche HIMO[1] permettent d'investir de moyens financiers importants dans des villages et communes, favorisant ainsi des activités économiques locales.

Il est à définir dans les termes de références dans quelle mesure les diverses aspects d'aménagement et de protection contre l'érosion sont à intégrer. Il est bien possible de demander dans l'APS deux variantes, une intégration minimale et une intégration optimale, afin de disposer des éléments nécessaires pour l'APD.

1.2 Niveau de service

Le niveau de service est la somme de tous les facteurs d'une piste ou route qui influence l'utilisation de la piste. De manière synthétique il se mesure par la durée du déplacement d'un véhicule de A à B.
Le premier critère d'une piste rurale est la praticabilité durant toute la saison, avec un minimum de temps non praticable durant les périodes de crues. Pour le trafic lourd il s'ajoute encore les interruptions durant les pluies. Les barrières de pluies sont un moyen très utile et approprié à la réduction des dégâts.

Donc le principe pour la planification de pistes et leur construction est clairement défini : la stabilité est placée avant le confort.
Pour une piste stable et protégée contre l'érosion, il est facile d'améliorer le confort et le niveau de service quelques années plus tard. Pour une piste initialement confortable, mais peu stable et, donc, dégradée après quelques années, c'est le cas contraire.
Des vitesses de références et vitesse minimales sont réservées aux routes et ne concernent pas les pistes rurales.

1.3 Choix du tracé horizontal et du tracé vertical

Niveau de la chaussée par rapport au terrain naturel, tracé vertical :

Dans des parties aménagées, la chaussée est en général plus haute que le TN. Dans le cas contraire, la piste, les trous et les ornières en particulier, deviennent des collecteurs d'eau, ce qui diminue fortement la portance et conduit à des dégâts importants.
Dans des dépressions et dans les plaines, il faut veiller que la chaussée soit hors d'eau.
Dans le cas de l'aménagement des points critiques, des parties non traitées de la piste peuvent être plus basses que le TN. Dans ces conditions il faudra chercher à évacuer un maximum d'eau de la piste. Des problèmes d'évacuation d'eau peuvent être une raison pour aménager ces tronçons.

Pour des rechargements très faibles à faible entre 5 à 15 cm, le décapage est à réduire au strict minimum (0 à 5 cm).
Pour des rechargements plus importants, la fouille peut être plus importante. Selon la portance du sol, la fouille est entre zéro et deux tiers de l'épaisseur du rechargement.
Le décapage et la fouille se limitent à la largeur de la chaussée. Les banquettes ou diguettes de protection n'ont pas besoin de fouille. La végétation herbacée, favorisée par ces mesures, est une très bonne protection contre l'érosion.

[1]Cependant, les réflexions systémiques démontrent clairement, qu'il n'est pas approprié de soutenir des approches HIMO dans les cas ou cette approche n'est pas compétitive avec une approche semi-mécanisée ou mécanisée. Mieux d'investir les moyens gagnés, grâce à une approche économique, dans d'autres domaines économiques comme l'aménagement agricole et la lutte contre l'érosion.

Le tracé horizontal :

L'intérêt d'éviter ou de diminuer les parties difficiles (portance, érosion), est le facteur principal pour le choix du tracé horizontal. Dans ce cas, les parties difficiles de bas-fond sont à contourner. Les bas fonds et les cours d'eau sont généralement à traverser de manière perpendiculaire.
L'abattage des arbres est à minimiser. Ils peuvent être contournés à l'aide de virages doux.
Le tracé est à matérialiser par un piquetage et un repère cimenté au minimum tous les 500 m. Les repères seront à une distance de 3 m minimal de l'axe de la piste.

1.4 Caractéristiques géométriques du profil

Largeur de la piste :

La largeur recommandée de la chaussée aménagée varie selon les pays entre 350 à 500 cm. La largeur des radiers est en général de 5 m. La largeur des banquettes est à réduire au minimum nécessaire. Une piste de 450 cm de large, bien protégée contre l'érosion, est une piste confortable. Dans des conditions difficiles, la largeur peut être réduite pour réduire les coûts. Des informations complémentaires se trouvent dans le paragraphe 2.1.1 pistes standards.
Dans la discussion de la largeur il est utile de voir la pratique : Les véhicules roulent dans les deux directions au milieu de la piste, sauf en cas d'obstacles et de croisement de deux véhicules. Pour beaucoup de pistes rurales le trafic journalier est inferieur à 10 véhicules. Donc, les croisements sont très rares et le désagrément est tolérable. Ces réflexions sont utiles dans une approche de développement rurale systémique, qui cherche un développement optimal avec les ressources financières à disposition. Une telle mesure peut être intégrée dans une approche d'aménagement des points critiques. Au cours d'interventions futures, un élargissement de la piste est bien possible.
Les ouvrages de franchissement ont en général une largeur supérieure à celle de la chaussée. Une largeur de 500 cm (extérieur muret-extérieur muret, donc une chaussée de 400 à 420 cm,) est un bon compromis entre confort/sécurité et économie. Pourtant, même pour les radiers une réduction de la largeur peut être discutée et justifiée dans certains contextes.

Dans le cas d'une piste submersible, la partie aval de la piste sera protégée à l'aide d'une diguette en pierres ou en cordon de pierres ou un alignement dense de végétaux pérennes.
Si l'eau peut couler le long de la piste, en absence d'un fossé longitudinal, la bordure de la piste sera protégée par un cordon de pierres (directement à la bordure ou à une distance de quelques mètres, voir paragraphe 2.1) ou un alignement dense de végétaux pérennes.
Ces mesures évitent que la largeur de la chaussée soit réduite par l'érosion des bordures.

Pentes transversales :

Une pente en toit n'est qu'exceptionnellement adaptée à une piste simple, à largeur relativement faible. La pente uniforme est inclinée vers l'aval du terrain, permettant ainsi une bonne évacuation des eaux sur la piste.
Pour des pentes longitudinales faibles de la piste, des pentes transversales de 1 % sont en général suffisantes. Dans le cas des pentes longitudinales importantes, la pente transversale peut être élevée jusqu'à 3 % en cas exceptionnels jusqu'à 4%.
Du point de vue hydraulique, des pentes transversales importantes sont souhaitables. Cependant, ceci augmente considérablement les fouilles et les rechargements nécessaires, donc également les coûts.

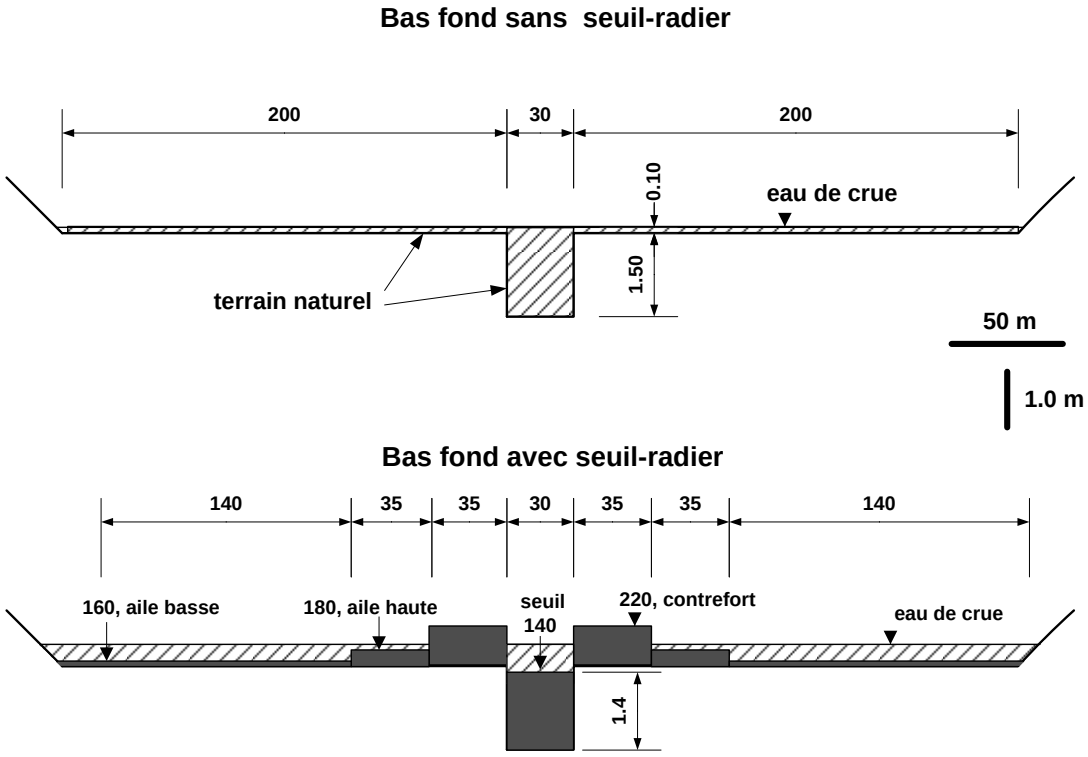
1.5 Etudes hydrauliques

Une étude hydrologique et hydraulique classique n'est pas indiquée. A noter que les résultats de ce genre d'études sont, dans des conditions sahéliennes, souvent très douteux. Cependant, une étude qui se base sur l'observation de terrain : effets des écoulements, niveau des eaux, niveaux maximaux sur plusieurs années (interrogation de la population locale), est indispensable et plus appropriée pour le dimensionnement de radiers ou d'autres ouvrages de franchissement.
Il s'agit donc d'une approche qui base sur le périmètre mouillé, donc à l'aide de réflexions géométriques. A noter, que, dans des conditions sahéliennes, cette approche est également conseillée par certaines écoles techniques.
Pour un radier qui respecte en ordre générale le terrain, le périmètre mouillé permet de concevoir l'ouvrage. Un seuil-radier (ouvrage qui fonctionne comme radier et comme seuil) modifie les écoulements. Son dimensionnement hydraulique se fait sur la base du périmètre mouillé. Le transfert du périmètre mouillé déterminé à l'état initial vers l'état avec ouvrages (voir la figure 1) peut se faire à l'aide :

- estimative,
- des calcule du débit selon Manning-Strickler et le formule des écoulements sur un déversoir.

Une description détaillé avec exemple est présenté dans les recommandations « seuils d'épandage », version novembre 2009.

Figure 1 : Exemples de périmètres mouillés sans ouvrage et avec ouvrage.



Un seuil-radier doit remplir tous les critères d'un seuil. Les recommandations seuils constituent une aide pour sa conception, ainsi que les réflexions par rapport à l'intégration dans l'environnement et par rapport à l'érosion.

1.6 Drainage, évacuation des eaux de ruissellement

L'aménagement de fossés latéraux doit se limiter au strict minimum. L'eau de la piste serait évacuée en aval de celle-ci. Il faut s'assurer que l'eau coule en nappe , qu'elle ne soit pas collectée par des ravins d'érosion.
L'eau de ruissellement en amont de la piste est à contrôler à l'aide de mesures antiérosives. Si nécessaire, des passages où l'eau peut traverser la piste (radiers, routes submersibles), sont à prévoir et/ou à renforcer de manière adéquate.

1.7 Etudes géotechnique

Identification des carrières et gisements : Les sols sont classifiés selon la classification des sols in situ (USCS ou autre système de classification). En cas de doutes, quelques échantillons caractéristiques peuvent être analysés en laboratoire. Cependant, pour des sols connus, notamment des sols graveleux, latéritiques ou non latéritiques, ceci n'est pas nécessaire. Le risque lié au manque d'homogénéité des gisements est plus important que l'erreur sur la classification des sols in situ.
Les carrières sont à identifier en termes de quantité et de qualité. La prospection correcte des carrières est un minimum exigé. La profondeur des trous de prospection doivent aller au –delà de la couche exploitable. Une distance de 50 m entre les différents points de sondage serait l'idéal. En vue de minimiser les distances de transport, il est nécessaire d'exploiter aussi de petits gisements à proximité de la piste. Surtout en approche HIMO, des distances courtes permettent le transport à l'aide de charrettes et brouettes, ce qui réduit les coûts de manière remarquable.

Sondages le long du tracé : Dans des terrains variables, des petits trous de sondages le long de la piste (au niveau de la bordure) de 50 cm en diamètre et 50 cm en profondeur environ, sont recommandés. La distance entre deux trous peut varier de 100 à 200 m dans des sols homogènes et de 50 à 100 m dans des sols hétérogènes. Ces sondages permettent d'avoir :
1) une bonne impression de la portance et de la homogénéité du terrain naturel le long du tracé.
2) parfois il y a des gisements de sol ou rocher latéritique à faible profondeur. Ces gisements peuvent être exploités.

Besoin en eau : L'identification des points d'eau fait partie de l'étude. La disponibilité et l'emplacement des points d'eaux sont à préciser.

Remarque sur les études classiques : Le remplacement de l'étude classique en laboratoire des sols par une classification in situ n'est pas une contrainte importante. Ce qui pèse plus lourd, est le fait, que sans l'essai Proctor, il n'y a pas de test classique pour le contrôle du compactage. Celle-ci est à faire par un contrôle visuel des travaux de compactage.
Des tests sont en cours, afin de développer des équipements simples pour la mesure de la qualité/portance de couches compactées. Vu l'importance du compactage, le développement de tests simples est à soutenir.

1.8 Etude topographique et conception provisoire des ouvrages

L'étude topographique se circonscrit autour de l'emplacement des ouvrages de franchissement, au niveau des dépressions et des plaines submergées. Elle est nécessaire pour le choix adéquat des types d'ouvrages et le calage de l'ouvrage ou de la piste en côte

et en plan. La conception provisoire de l'ouvrage est à faire directement sur le terrain à l'aide du profil topographique.
En général il est nécessaire d'implanter provisoirement un ouvrage ou une partie critique de la piste à l'aide de jalons, en vue de sa conception définitive. Pour des radiers et seuil-radiers la visualisation de la côte projet à l'aide d'une ficelle peut être une aide. Pour les pistes et surtout les ouvrages hydrauliques, la conception provisoire, directement sur le terrain, est nécessaire et elle est plus importante que la conception à l'aide de plans au bureau. La piste et les ouvrages doivent s'adapter au terrain et doivent s'intégrer dans l'environnement naturel, ce qui n'est pas toujours le cas pour les routes principales ayant des vitesses de référence élevées.
En premier vue cette démarche parait d'être plus exigent en temps, que le démarche classique, pourtant c'est tout à fait le contraire. Avec une sortie sur le terrain il est possible de concevoir tout l'ouvrage de manière correcte et adaptée au terrain et de réaliser tous les travaux de terrain, y inclus le scellement des repères. Des petites modifications au niveau de la conception sont toujours possible au bureau, avec les données collectées sur le terrain.

Les relevés topographiques doivent être matérialisés sur le terrain par des repères et/ou le piquetage de la piste. 2 à 3 repères par ouvrage/point critique sont recommandés. Ces repères seront déportés en dehors de l'emprise.

1.9 Etude d'impact et mesures environnementales

Une étude classique d'impact de routes n'a pas trop de sens dans le cas de pistes rurales. Une étude adaptée à l'approche peut être réalisée, afin de démontrer les impacts négatifs et positifs. Pour notre approche, les impacts positifs sont très largement supérieurs aux impacts négatifs..

Les éléments suivants sont demandés par la présente approche:

- La protection de la piste contre l'érosion à l'aide de la conception de la piste et à l'aide de mesures relatives simples (pierres sèches, protection végétale, ouvrages en maçonnerie).
- Le niveau (par exemple minimum, moyen ou optimal) des mesures d'aménagement et de lutte contre l'érosion, décrit ci-haut, peut être demandé dans les tdr,
- La destruction des ressources naturelles doit être minimale.
- La notification des cas pour lesquelles la piste ne peut pas être protégée à court et à moyen terme à l'aide de ces mesures. Ces cas nécessitent une étude particulière par des spécialistes de protection contre l'érosion.
- L'exploitation des carrières doivent se faire en général sur de faibles étendues. L'arrêt de toute érosion dans la zone de carrières et à proximité est exigé. Donc, la plus grande partie des eaux de pluie doivent s' infiltrer, le ruissellement est à réduire au strict minimum Les modifications sur. l'écosystème sont assez localisées dans l'espace , son impact est étendu. .
- La gestion de l'eau de ruissellement doit se faire de sorte que des fossés de drainage de l'eau ne soient généralement pas nécessaires. Donc, une source d'érosion sera éliminée et l'infiltration augmentera.

Une étude d'impact pourrait concerner le bilan du fonctionnement de la piste et faire l'analyse de l'effet des mesures complémentaires sur l'environnement.
Sans être exhaustive, les éléments de l'étude pourraient être :

- La surface des aires protégées contre l'érosion,
- La surface des zones érodées qui ont été réhabilitée,
- La surface des zones agricoles qui profiteraient d'un épandage d'eau.
- La quantification des ressources naturelles détruites par la construction de la piste.

- La quantification des ressources naturelles réhabilitées par les mesures protectrices ect…

Pour les cas des deux variantes de pistes étudiées à savoir
1) avec la protection minimale
2) avec la protection et l'aménagement agricole optimal

L'étude d'impact fourni les éléments nécessaires afin d'opter pour l'une ou l'autre variante. Une telle étude pourrait également s'appuyer sur les liens entre le transport et la gestion des ressources naturelles.

1.10 Participation des populations villageoises

La participation de la population est possible aux niveaux suivants :

- Etudes : les informations qu'elles peuvent fournir sur les écoulements et les gisements de matériaux sont assez capitales.
- Leur connaissance du terrain, leur appui à la recherche de nouveaux tracés peuvent être une aide importante.
- Construction En plus des manœuvres, il est important d'engager des villageois dans les fonctions de chefs d'équipes et de maçons. Ceci créera là compétence locale nécessaire à l'entretien de la piste par des groupements riverains à la piste. Des ouvrages en maçonnerie peuvent être réalisés entièrement par la population locale suite à une formation adéquate au travail.
- Entretien : Les coûts d'entretien peuvent être réduits considérablement grâce à la réalisation des travaux d'entretien par des équipes riveraines à la piste. Cette approche permet l'entretien en plusieurs périodes durant l'année, ce qui 'aide pour le traitement continuel des dégâts, afin d'éviter le développement de gros dégâts.

2. Recommandations techniques

2.1 Pistes

2.1.1 Pistes standards

La conception de la piste cherche à minimiser les matériaux de construction et de la fouille. Le décapage est minimal, selon la portance et la pente transversale.

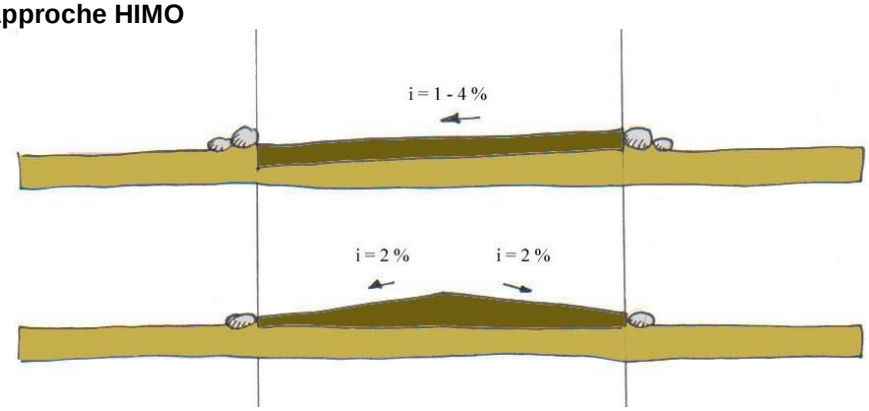
La figure 2 montre les deux types de pistes standards, le premier adapté à l'approche HIMO. Le deuxième est approprié aux approches HIMO ou mécanisée. La protection contre l'érosion proposée correspond à l'optimum. Un niveau de protection plus faible est à voir cas par cas. Quelques points méritent une attention particulière :

- La pente transversale est en générale uniforme vers en aval. Des fossés de drainage ne sont prévus que dans des conditions particulières (voir paragraphe 2.1.4).
- L'importance de la pente transversale augmente avec l'augmentation de la pente longitudinale. Une pente longitudinale faible pour nous serait autour de 1%, le maximum admis serait de 4%. Pour des pentes longitudinales plus importantes d'autres mesures, afin d'évacuer l'eau de la piste sont nécessaires (voir paragraphe 2.1.4).
- La pente transversale est un élément délicat dans l'approche de pistes rurales, surtout en approches HIMO. La formation nécessite un certain temps et une pente forte augmente le volume du décapage et éventuellement l'épaisseur de la couche de rechargement. Pour ces raisons, des compromis sont parfois nécessaires.
- Dans des zones de crêtes ou de plaines, dans lesquelles la pente transversale du terrain change souvent d'un côté sur l'autre, une pente transversale en toit est recommandée. Dans ces conditions l'eau peu stagné localement sur le coté de la piste avant d'infiltrer. La protection directe de la chaussée à l'aide d'un cordon pierreux ou une diguettes en pierres est recommandée au cas où les sols sont susceptibles à l'érosion.
- Une bonne protection contre l'érosion est recommandée, afin d'éviter l'érosion des bordures de la chaussée. Plus la largeur de la piste est faible, plus des dispositions sont apprendre contre cette érosion.
- L'eau de ruissellement en amont doit être au mieux infiltré à l'aide de mesures antiérosives. Dans des approches mécanisées ou semi-mécanisées, des diguettes le long de la piste à une distance de 3-4 m de la bordure, sont très efficaces. Des épis aident à éviter l'érosion causée les écoulements le long de la diguette.
- L'épaisseur du rechargement est de 15 cm pour un terrain de portance moyenne, elle s'adapte à la portance du sol. Pour des couches de rechargement faibles le décapage doit être minimal, afin que la chaussée dépasse clairement le terrain naturel. Dans le cas contraire, la piste risque de devenir évacuateur des eaux.
- Un bon compactage est de rigueur. Le compactage à la main est normalement[2] insuffisant. Un compacteur à fibration est nécessaire. Au cas de problèmes d'eau, un premier compactage à sec et un deuxième en saison de pluies peut être envisagé.

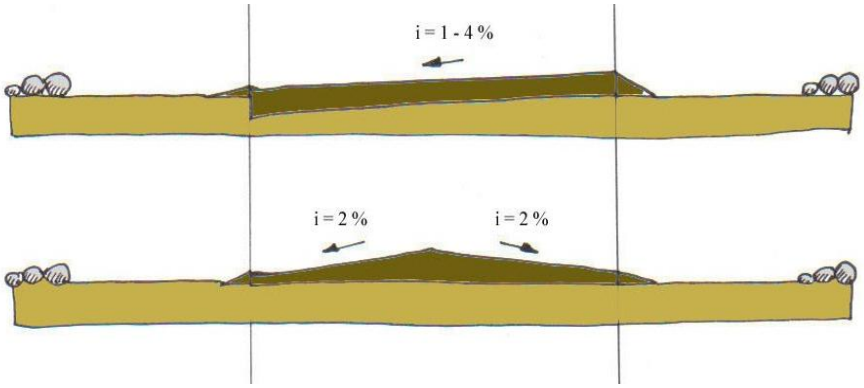
[2] Il est connu, qu' ils existent des sols latéritiques avec un potentiel d'auto-compactage (compactage sous le changement climatique et le trafic). Cependant, ce n'est pas le cas pour tous les sols latéritiques.

Figure 2 : *Profils de pistes avec pente transversale uniforme (cas général) et en toit (cas exceptionnel). Les profils en haut sont adaptés à une approche HIMO, les profils en bas à une approche HIMO, semi-mécanisée ou mécanisée.*
La protection contre l'érosion proposée correspond à l'optimum. Une protection appropriée est à voir cas par cas, selon le type de sol et le ruissellement : deux, une ou aucune diguette en pierres.

Approche HIMO



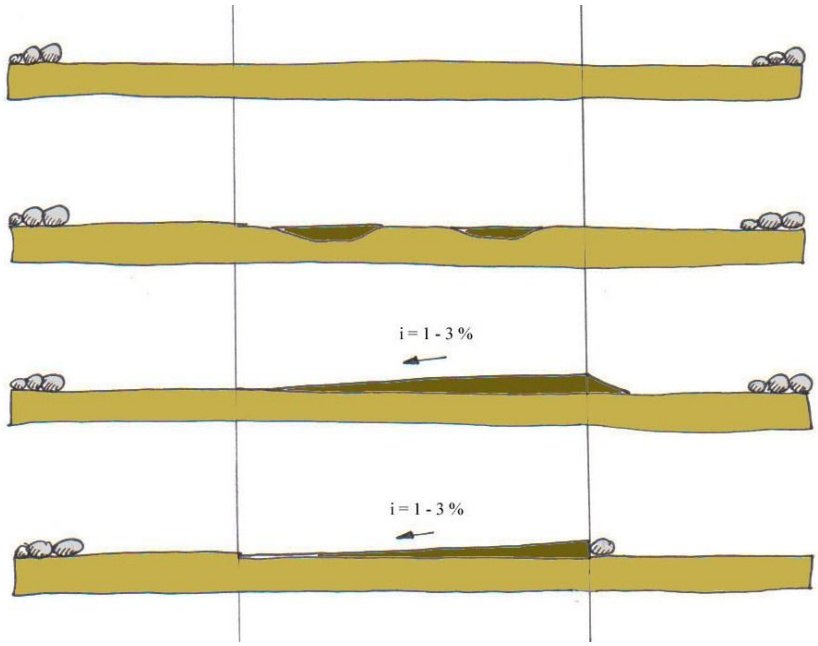
Approche HIMO où mécanisée



Dans des zones de bonne portance, il y a plusieurs variantes, pour l'obtention une piste stable et économique (voir figure 3) :

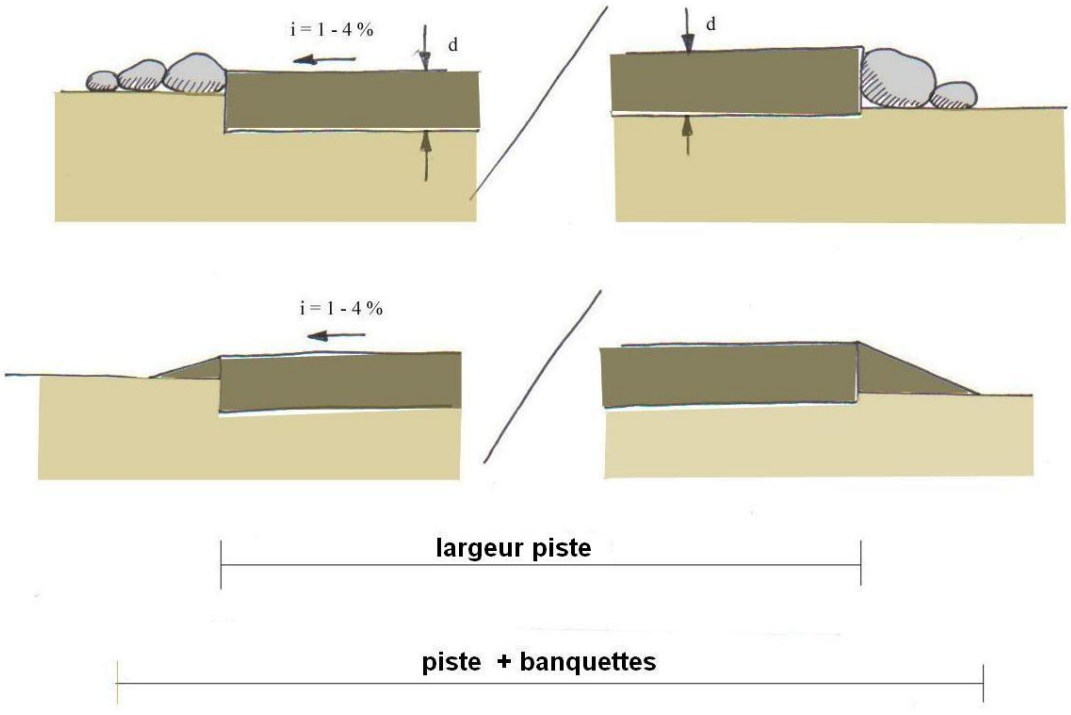
- Aucun rechargement et aucune protection contre l'érosion.
- Pas de rechargement, cependant une ou deux diguettes le long de la piste contre l'érosion. Dans ce cas il est indiqué aussi pour l'approche HIMO de choisir une distance de 9 à 12 m entre les deux diguettes.
- Rechargement des trous uniquement, avec une protection adéquate contre l'érosion.
- Rechargement minimal, afin d'obtenir une pente transversale, avec une protection adéquate contre l'érosion.

Figure 3 : *Exemples de rechargement minimal et protection contre l'érosion dans des terrains à bonne portance. Selon le type de sol et le ruissellement, deux, une ou aucune diguette sont appropriées.*



La figure 4 montre le décapage et les bordures en détail pour les pistes standards. Le décapage se limite à la largeur théorique de la piste. Pour les bordures/épaules, un décapage n'est pas nécessaire. A ce niveau, la terre végétale et la végétation herbacée constituent un élément protecteur. La végétation naturelle stabilise la bordure de la piste et est, donc, une protection biologique. Le débroussaillage est à limiter au minimum. Les racines favorisent l'infiltration de l'eau en profondeur.

Figure 4 *: Décapage et bordures pour les deux types de pistes standards. Le décapage se fait sur la largeur de la piste seulement et le débroussaillage sur la largeur de la piste y inclus les banquettes.*



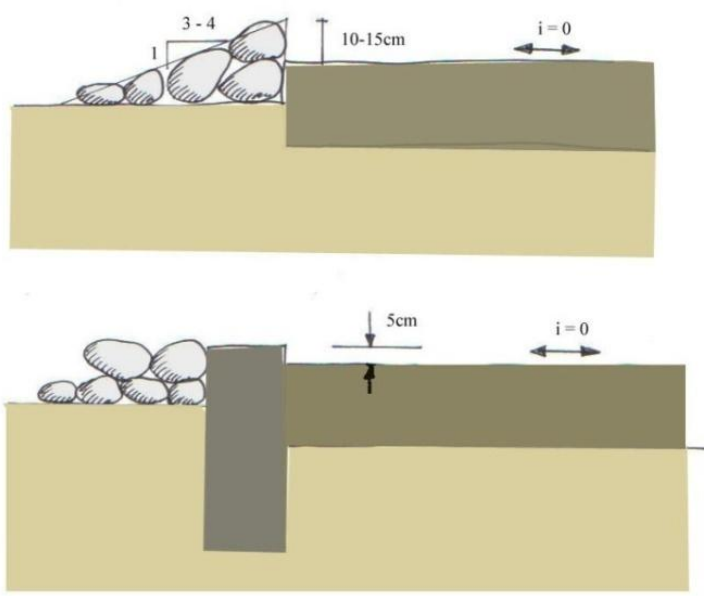
La largeur de la piste est une décision importante à prendre. Celle-ci peut varier de piste en piste ou de tronçon en tronçon. Une largeur de 450 cm avec une bonne protection contre l'érosion est souvent optimale. Cependant, une réduction jusqu'à 300 cm mérite parfois d'être discutée. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs :

- Du trafic : une piste étroite de 300 à 350 cm suffit pour un trafic sporadique. Cependant, il est nécessaire qu'un véhicule puisse quitter la piste avec deux de ces roues sur le bas côté Ce qui difficile dans le cas dans un sol argileux et mouillé.
- Une bonne protection contre l'érosion garantie la largeur de la piste, permettant ainsi une largeur réduite.
- Avec une approche d'aménagement continue des points critiques, il est possible, d'élargir la piste après l'augmentation du trafic. Ceci nécessite le choix d'un profil approprié : par exemple, une chaussé de 300 à 350 cm de large avec une diguette qui protège la partie aval de la piste et une deuxième diguette en amont de la piste, à une distance de 5 à 8 m de la bordure.
- La disponibilité des matériaux de construction, donc, des réflexions économiques.

2.1.2 Traversés de plaines submersibles et de dépressions

Dans des plaines submersibles ou des bas fonds à très faibles écoulements, une piste horizontale est souhaitable. Donc, le tracé préférable suit une courbe à niveau, où il supprime les dépressions. Dans ce cas, l'eau traverse pendant les crues la piste de manière perpendiculaire. Ceci permet une bonne protection de la chaussée à l'aide d'une diguette ou d'un muret en aval de la piste (figure 5). Une telle conception correspond à un radier. La pente transversale est nulle. Ceci nécessite un matériau de construction stable dans l'eau. Si on veut éviter une submersion trop longtemps après une crue, il est possible de réaliser une ou plusieurs parties à 5-20 cm plus bas que le reste.
Dans des dépressions, l'eau reste normalement stagnante après une pluie. Il est à veiller que la chaussée sort de l'eau stagnante. Dans ces conditions, il s'agit normalement de sols argileux, donc, des sols à faible portance, un enrochement serait donc souhaitable.

Figure 5 : *protection en aval d'une piste horizontale submersible. Le contre seuil qui est 5 cm plus haut que la chaussée sur le schéma en bas dispose d'une ouverture de 5 à 10 cm de large tous les 3 à 4 m. Cette mesure permet l'évacuation des eaux après une crue.*



2.1.3 Zones à faible portance

Les zones à faible portance demandent une augmentation de la couche de rechargement, adéquate à la portance. Le décapage augmente avec l'épaisseur de la couche de rechargement. La fouille peut valoir entre un tiers à deux tiers de la couche de rechargement, selon la qualité du sol de fondation et les objectifs visés par la conception de celle-ci.

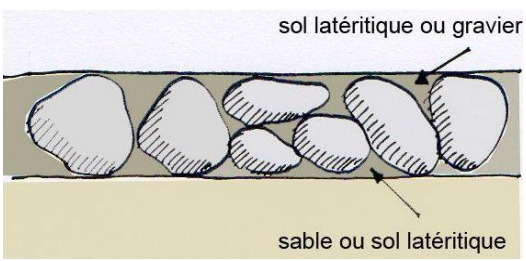
Surtout pour des approches HIMO, des enrochements (simple, double ou triple couche) sont à favoriser par rapport au rechargement en sols granulaires, contenant une fraction limono-argileuse pour les raisons suivantes :

- Le volume de transport est plus faible par rapport à une couche de portance équivalente en sol latéritique.
- La roche est résistante à l'eau.
- Un compactage à sec (à vibration) donne une excellente portance .Souvent même sans compactage la portance est très bonne.

Même dans le cas d'une approche mécanisée, l'enrochement peut offrir des avantages importants.
L'utilisation d'enrochements dépend finalement des coûts. Le choix doit être guidé par les réflexions économiques. Si un bon sol latéritique est clairement moins cher que des rochers/moellons, son utilisation est à favoriser. Néanmoins une combinaison, pierres/moellons et sol latéritique ou graveleux est possible.
En approche HIMO, tous les matériaux stables peuvent être facilement utilisés. Souvent on trouve des petits gisements ou en surface de graviers grossiers ou de petites pierres, qui ne se prêtent pas à une exploitation mécanique, avec une exploitation manuelle, leur exploitation reste possible. Non mélangé, il s'agit d'un matériau non approprié à la construction routière. Mais une fois mélangé avec des matériaux fins ou couvert d'une couche stable, ces matériaux augmentent remarquablement la portance de la couche et ils sont résistants à l'eau.

La figure 6 montre un double enrochement, approprié à une piste exposée à l'eau. Dans des sols argileux il est à veiller que les vides entre le sol de fondation (plateforme en argile dur) et la premier couche de moellons est remplit d'un sol granulaire ou latéritique, afin d'éviter des tassements une fois le sol mouillée. En surface il est souvent favorable de recharger les enrochements de quelques centimètres seulement. Les sols latéritiques ou graveleux de cette couche mince infiltrent sous un compactage à sec à l'intérieur de l'enrochement, stabilisant ainsi les moellons et ils forment une surface plane et stable. L'apparition de l'enrochement en surface (quelques têtes de moellons) est avantageuse. Cela permet de d'atténuer l'usure de la piste et limite la formation de tôle ondulée.

Figure 6 : *A gauche, coupe schématique dans un double enrochement.*
La photo à droite montre la surface d'un enrochement couvert d'une couche faible de sol latéritique. Quelques têtes de moellons sont encore visibles.



2.1.4 Pistes en pente longitudinale forte

Les pistes qui suivent plus ou moins la pente du terrain naturel rencontrent les difficultés suivantes :

- L'eau de pluies, collectée sur la piste nécessite une pente transversale forte, afin de l'évacuer hors de la piste. Sur le bas côté de la piste, l'eau descend selon la pente et enfonce davantage le terrain naturel, la piste est alors sensible à l'érosion qui la menace. Dans ces conditions, un fossé de drainage s'impose. La figure 7 montre deux exemples de fossés, un maçonné et l'autre stabilisé par la végétation et, éventuellement par des tapis de pierres, placés ponctuellement au fond du fossé.
- L'eau de ruissellement en amont de la piste coule le long de celle-ci et érode le terrain et la piste. Il est nécessaire de contrôler ces eaux de ruissellement à l'aide d'un système de diguettes.
- Les cours d'eau qui traversent la piste le font en biais, selon un angle faible et la grande partie coule le long de la piste :
    - Dans le cas d'un cours d'eau relativement important, il est nécessaire de réaliser un radier correct plus ou moins perpendiculaire au cours d'eau. Ceci nécessite souvent un changement du tracé de la piste, la déviation du cours d'eau étant trop risquée.
    - Dans le cas d'écoulements faibles, le tracé de la piste peu être maintenue et l'eau peut être guidée par l'ouvrage de passage.

    - La figure 8 montre la solution avec un petit radier (classique), permettant la traversée des écoulements sans dégât. Parce que la piste est en pente, la rampe et l'accès aval du radier nécessitent parfois des rechargements, afin d'avoir les deux rampes sur le même niveau.

    - La figure 9 illustre une autre solution, un mini-radier, incliné par rapport à l'axe de la piste.

Ces deux mesures décrites ci-dessus permettent aussi d'évacuer l'eau collectée sur ou par la piste même.

***Figure 7** : piste en pente longitudinale forte : Deux types de fossé longitudinal, afin d'éviter l'érosion par l'eau de ruissellement qui coule le long de la piste.*

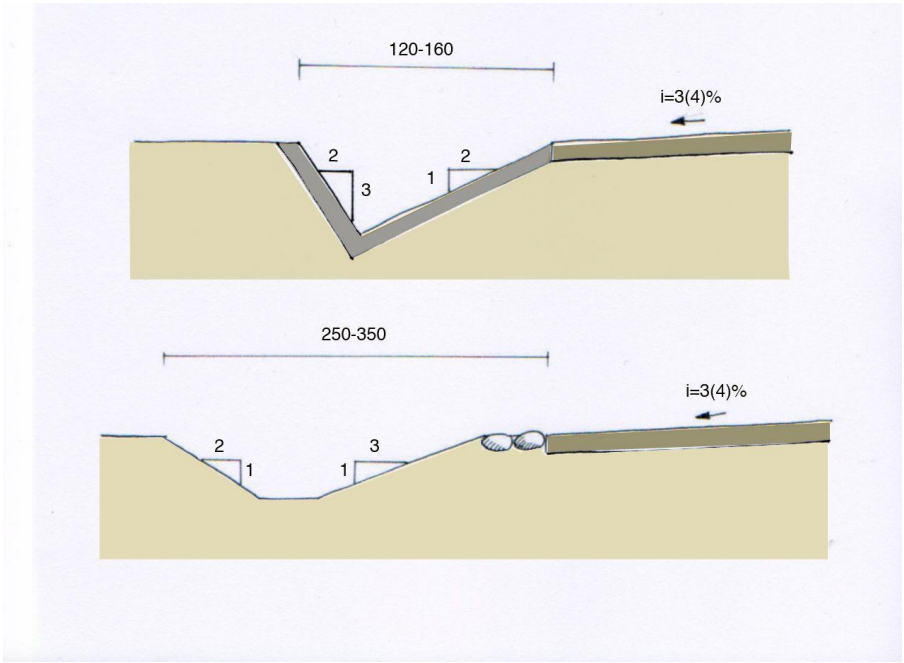


***Figure 8** : piste en pente longitudinale, franchissement de cours d'eau à faibles débits : La variante d'un petit radier (en pierres sèches ou en maçonnerie). Parce que la piste est en pente, la rampe et l'accès aval du radier nécessitent parfois des rechargements, afin d'avoir les deux rampes sur le même niveau*

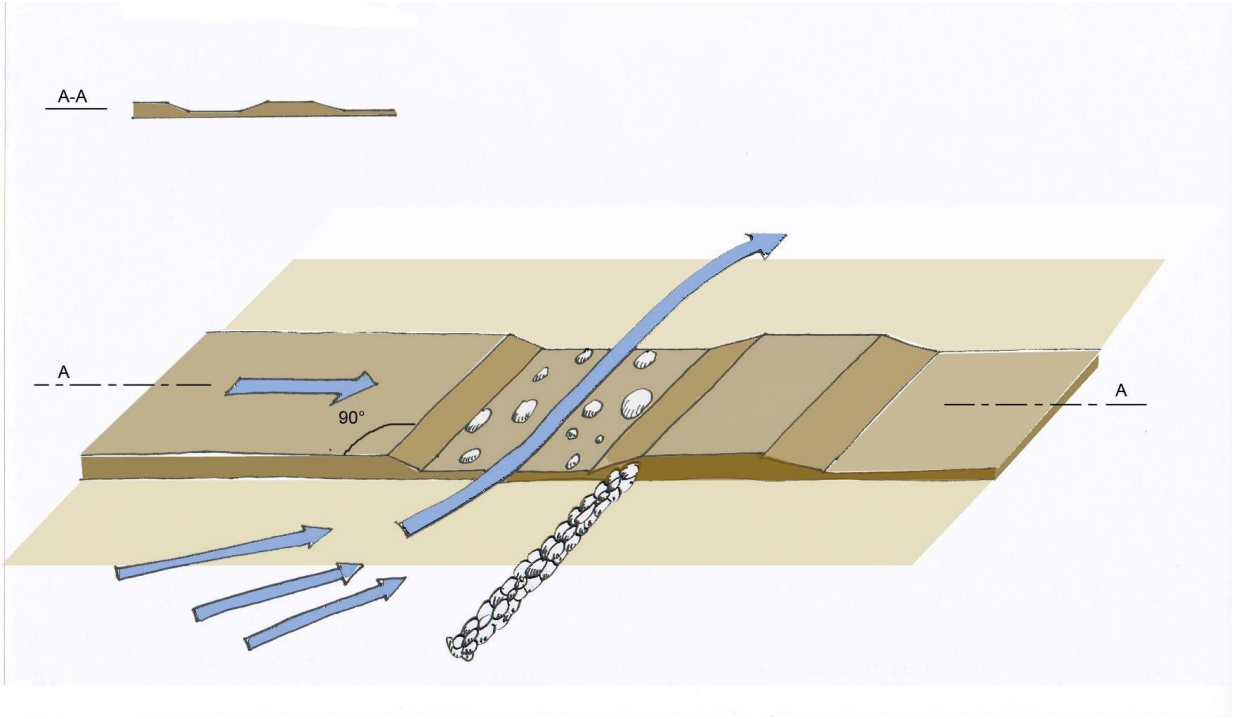
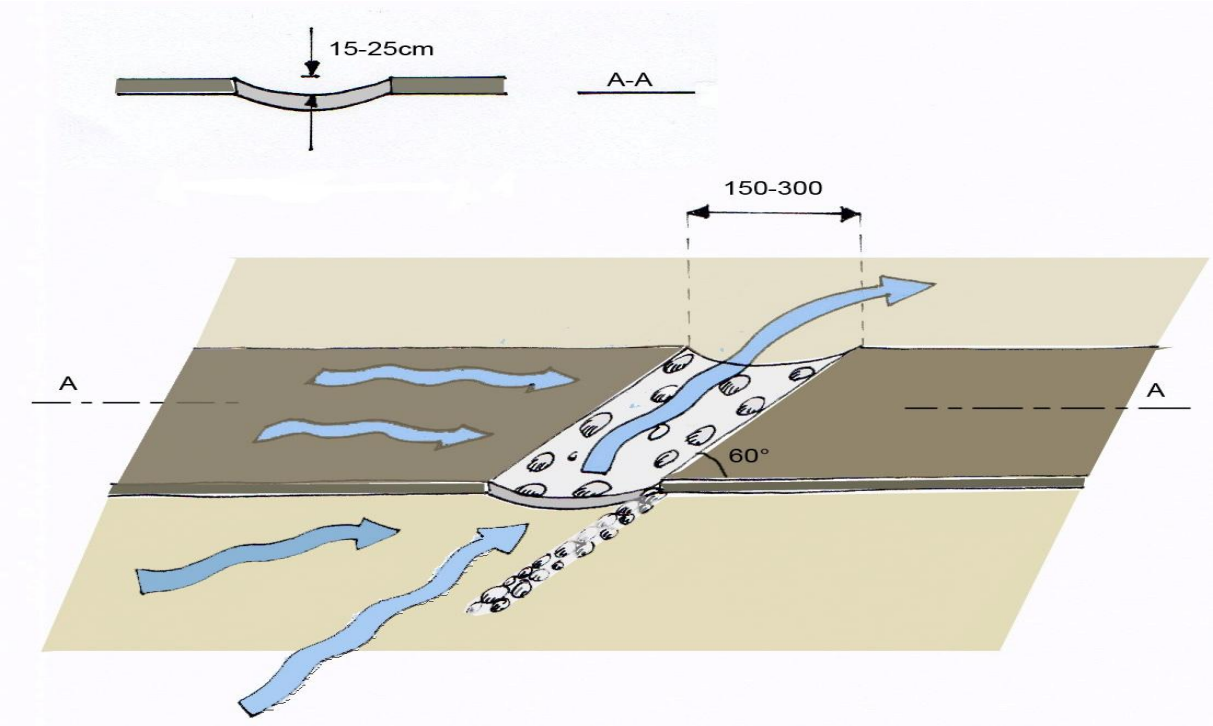


***Figure 9** : piste en pente longitudinale, franchissement de cours d'eau à faibles débits : La variante d'un mini-radier ou un fossé maçonné en forme parabolique. L'ouvrage est en générale incliné de 60° par rapport à l'axe de la piste.*



2.1.5 Zones érodés et/ou de ruissellement fort

Dans ces zones il est nécessaire de stopper l'érosion. Autrement l'érosion régressive détruirait la piste et les ouvrages. Des mesures d'infiltration permettent de diminuer le ruissellement. Quelques ravins d'érosion peuvent être considérés comme des cours d'eau. D'autres sont à supprimer (réhaussement du fond de lit)
Au niveau des ravins supprimés, la piste en tracé horizontal est à adapter à l'ancien terrain naturel. Au niveau des ravins stabilisés et devenus des cours d'eau, un ouvrage de franchissement est à prévoir.

2.1.6 L'ancien piste érodée est devenue collecteur des eaux de ruissellement

La réhabilitation de ce genre de pistes est plutôt l'exception, car trop coûteux. Au cas ou le tracé est érodé jusqu'au niveau d'une couche stable de roche latéritique, il est possible de respecter le tracé sans modification. En général le déplacement du tracé est nécessaire. Dans ce cas, l'ancienne piste peut servir d'évacuateur des eaux. Cependant, sa stabilisation contre l'avancement de l'érosion est nécessaire.
Le déplacement de la piste vers l'amont ou vers l'aval est à étudier cas par cas :

- Normalement le déplacement vers en aval est plus indiqué. La piste est ainsi protégée contre les eaux de ruissellement venant d'en haut. L'inconvénient est le fait que l'eau collectée doit traverser la piste.
- Si l'eau de ruissellement est bien maitrisable en amont de la piste, le déplacement du nouveau tracé vers en amont de l'ancienne piste peut être avantageux.

2.2 Franchissement des cours d'eau

2.2.1 Généralités

La conception d'ouvrages de franchissement pour des pistes rurales doit satisfaire à des critères autres que ceux pour des routes classiques en terre ou bitumées.
Les critères les plus importants, en dehors du niveau de service, sont :

- L'économie.
- En zone sahélienne, l'ouvrage devrait avoir un effet stabilisant sur l'érosion. Autrement, sa protection contre l'érosion devient plus difficile et plus coûteuse.
- Un effet positif sur l'environnement, notamment sur la réahabilitation des terres cultivables dégradées, est souvent souhaité.

Pour ces raisons, des radiers ou des seuil-radiers (fonctionnant en seuil et en radier en même temps) sont des solutions adéquates. Par contre, un dalot ne l'est que dans des conditions exceptionnelles. Le dalot satisfait en générale que le critère niveau de service.

Dans la conception de radiers[3] ou de seuil-radiers l'ingénieur dispose d'une liberté assez importante. Les éléments à concevoir sont:

1. le profil longitudinal (voir ci-après),
2. la structure (voir ci-après):
    - les murets ou protections latéraux,

[3] Le terme radier signifie uniquement un passage renforcé à travers un cours d'eau. Cela peut être un ouvrage en béton, en maçonnerie ou simplement en pierres sèches ou matériaux non liés. Ce qu'on appelle souvent « murette de protection », correctement conçue, est, aussi un radier.
La conception des radiers (dans le sens large) est indépendante des matériaux de construction. Elle est similaire pour tout ouvrage de franchissement. La question des matériaux vient au deuxième rang. Selon la vitesse des écoulements, des ouvrages en béton ou des enrochements avec jointage en ciment sont nécessaires. Dans certains cas, une couche en pierres libres ou en latérite peut être suffisante.

- la chaussée,

3. la protection en aval de radiers et seuil-radiers (voir paragraphe 2.2.2).

Le profil longitudinal, a une influence sur le débit par ml et le niveau par rapport au TN. Donc, la décision à ce niveau conditionne fortement les deux autres.

La conception du radier ou du seuil radier peut varier selon l'importance des facteurs suivants :

- le niveau de service,
- l'économie,
- l'effet sur l'environnement et l'aménagement des terres cultivables,

2.2.2 Radiers

Dans la conception de radiers, il s'agit d'une part, de définir le profil longitudinal et sa côte par rapport au TN et, d'autre part, de choisir une structure (profil en travers) adéquate.

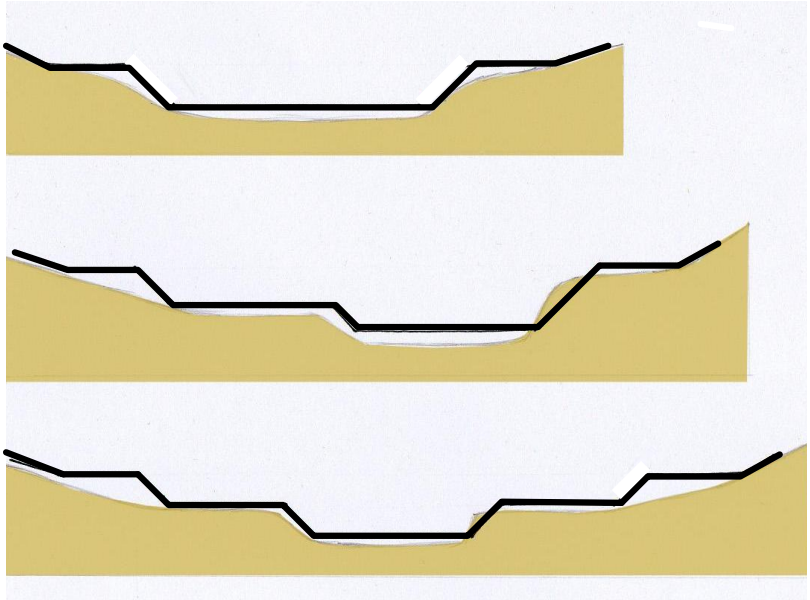
Radiers dans le profil longitudinal :

Les principes de conception sont les suivants :

- Le radier en profil longitudinal est composé des parties horizontales[4] et de rampes.
- La pente des rampes est de 8 à 12 % pour des matériaux liés. Pour les chaussées non liée, la pente peut s'adapter au terrain.

Des exemples de profils longitudinaux sont illustrés dans la figure 10

Figure 10 : *Modes de profils longitudinaux de radiers. Celui-ci peut avoir plusieurs niveaux, cependant, il est toujours composé de parties horizontales et de rampes.*



[4] L'inconvénient majeur d'un radier qui suit direct au terrain est, qu'il est submergé en partie par les eaux stagnantes et qu'il ne soit pas praticable même pour des crues faibles.

Les radiers sont à adapter au terrain. Cependant, ils ne suivent pas le TN. Ils sont composés de parties horizontales et de rampes afin d'assurer un débit constant par unité linéaire. En général, il est souhaitable que la chaussée dépasse le TN moyen légèrement. Cela évite l'ensablement du radier et sa submersion par l'eau stagnante.
Dans le cas où le radier dépasse de manière importante le TN, on parle d'un seuil-radier. Ceci peut être le cas pour des raisons différentes : niveau de service/praticabilité, lutte contre l'érosion, épandages des crues/aménagement agricole.

Profils en travers :

Protections latérales :

Plusieurs solutions sont possibles pour la protection latérale du radier:

- deux murets, un en amont et l'autre en aval du radier,
- un muret en aval[5] et une protection en pierres libres en amont,
- des protections en pierres libres en amont et en aval.

Le choix du type de protection dépend essentiellement du débit par mètre linéaire.

Selon le niveau du radier par rapport au TN, celui-ci nécessite en aval une protection adéquate contre l'érosion, en forme de pierres sèches ou d'un bassin de dissipation en maçonnerie. Les gabions ne sont pas recommandés pour des raisons économiques et de durabilité.

La conception du profil longitudinal (avec rampes et parties horizontales) reste pour toutes les variantes la même.

Chaussée :

Les deux principaux types de chaussée sont:

- des matériaux liés (béton, bitume, maçonnerie/enrochement avec jointage de béton),
- des matériaux non liés (moellons, pierres, gravier, latérite).

Le choix se fait en fonction :

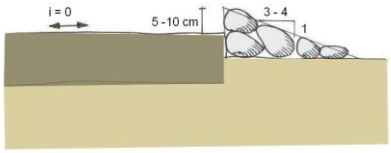
- du débit/m[1]
- du trafic,
- des réflexions économiques.

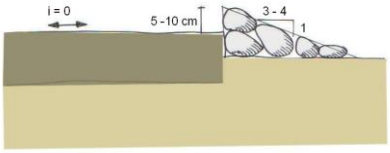
Une lame d'eau de 15 à 25 cm d'épaisseur permet en général d'opter pour une chaussée non liée[6]. Des matériaux peu ou non susceptibles à l'eau sont à favoriser dans ce cas. Une lame d'eau supérieure à 25 à 30 cm nécessite normalement une chaussée liée.

Les différents types de radiers sont illustrés dans les figures 11et 12. La figure 13 montre schématiquement la chaussée maçonnée.

[5] Les murets de protection en aval de la piste sont à considérer et à concevoir comme des radiers.
[6] Dans des terrains plats avec moins que 0.1 % de pente, une chaussée non lié peut même résister à une lame d'eau de 100 à 200 cm.

Figure 11 *: Exemples de radiers à chaussée non liée, avec des différentes modes de protection de la chaussée*





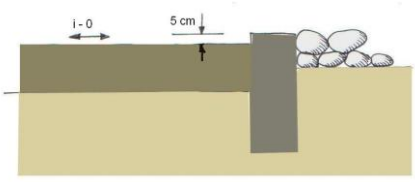


Figure 12 : *Exemple de radier (surélevé) à chaussée liée : la photo en haut montre la régénération végétal en aval du radier. Celle en bas montre la partie amont du radier avec des cultures de riz.*

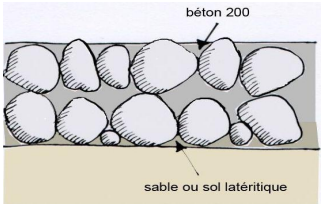
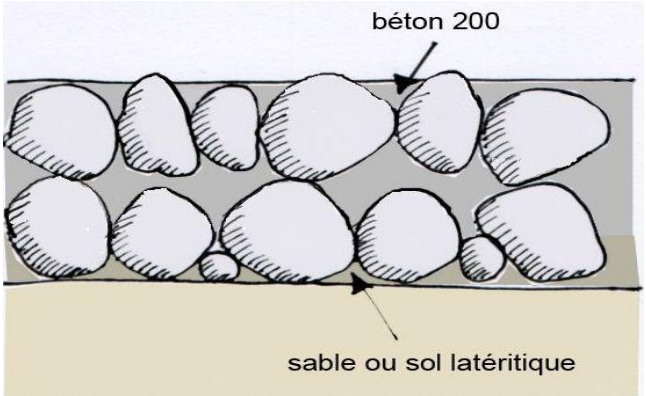


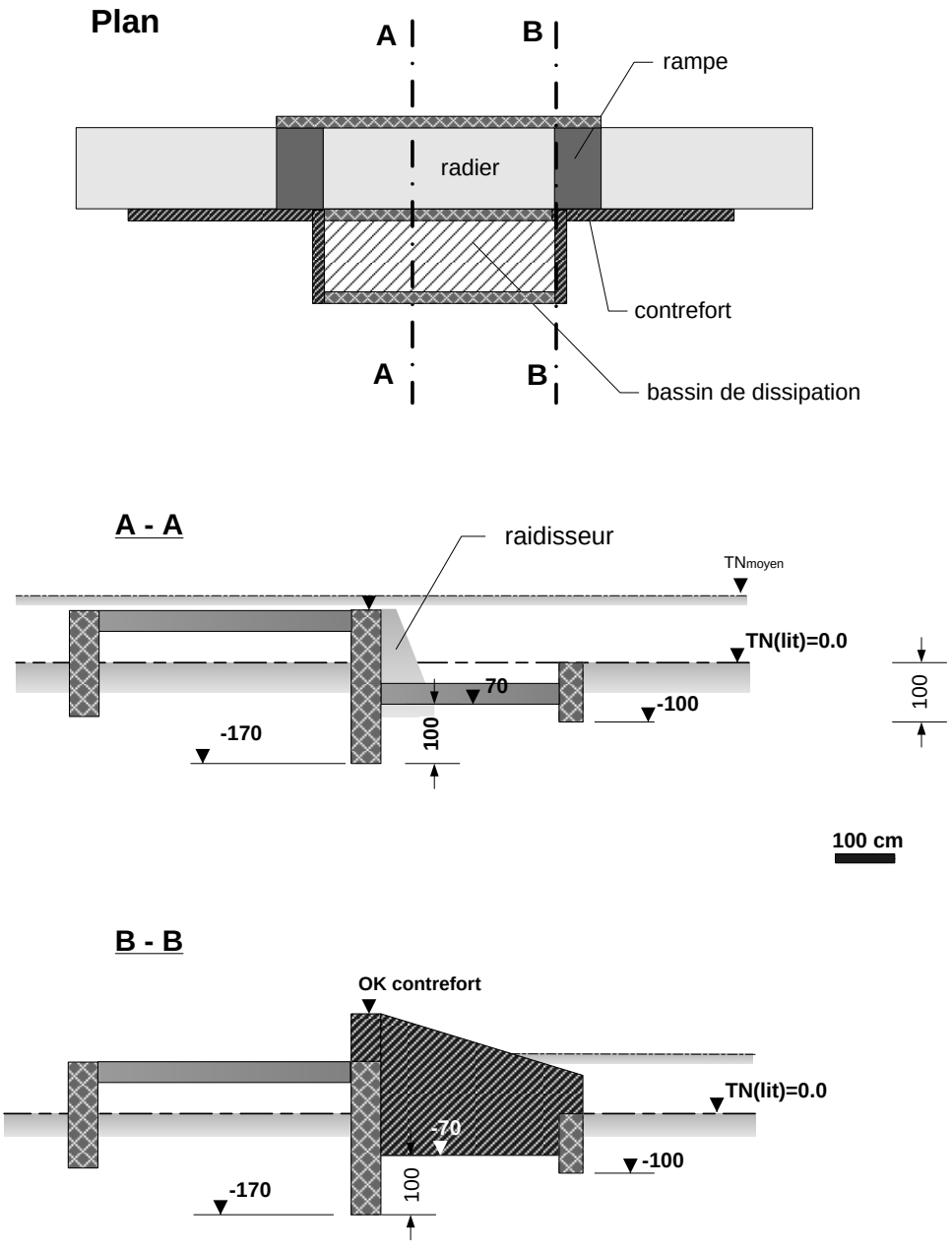
Figure 13 : *Structure d'une chaussée maçonnée. En fait il s'agit d'une construction entre une maçonnerie en pierres et un béton cyclopéen. La couche de base est une couche en pierres libres sur cette couche 5 à 7 cm de béton maigre est coulée. Dans le béton la deuxième couche de pierres/moellons est placé à une densité haute et jointé avec du béton. La couche de béton entre les enrochements donne une bonne cohésion entre les couches de pierre. Il est à veiller que les têtes de pierres sont bien visibles en surface.*



2.2 Seuil-radiers

Un seuil-radier est un ouvrage surélevé qui réunit les fonctions d'un radier et d'un seuil. La partie amont, c'est à dire le radier, est à concevoir selon les principes d'un radier.
L'aval du seuil-radier est un seuil, avec, en général, un bassin de dissipation en maçonnerie. Donc, la partie seuil d'un seuil-radier requiert la même conception qu'un seuil ordinaire. Les contreforts et les murets longitudinaux sont des éléments essentiels voir figure 14. Ils protègent les berges en aval du seuil contre l'érosion et définissent le déversoir qui est à protéger à l'aide d'un bassin de dissipation. Normalement les contreforts commencent en début de la rampe du radier. Des informations plus amples se trouvent dans le module 4 : aménagement à l'aide de seuils d'épandages.
La figure 14 montre le principe du bassin de dissipation et des contreforts d'un seuil simple.

Figure 14 : *principe d'un seuil radier avec un bassin de dissipation simple*

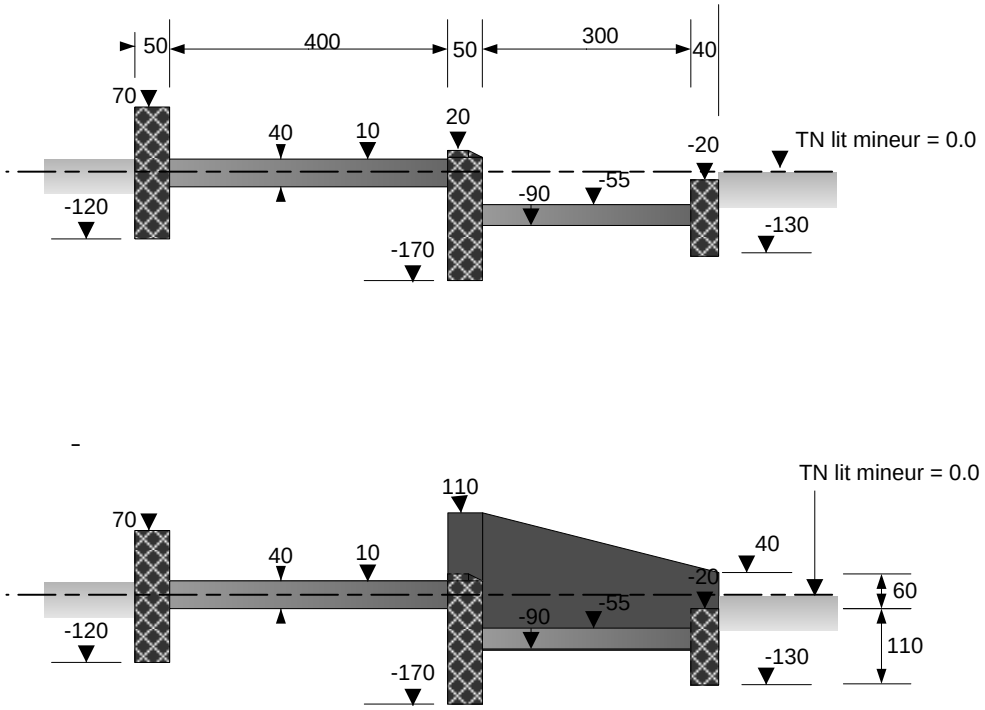


La figure 15 montre deux exemples de coupes en travers de seul-radiers. La figure 16 montre des photos de seuil-radiers différentes.

Version provisoire

Figure 15a : *exemple de seuil-radier avec un bassin de dissipation simple : Coups en travers au niveau du bassin et au niveau du muret longitudinal/contrefort*

Coupes en travers :



Rampe gauche et contreforts :
(La rampe droite est symétrique à la rampe gauche.)

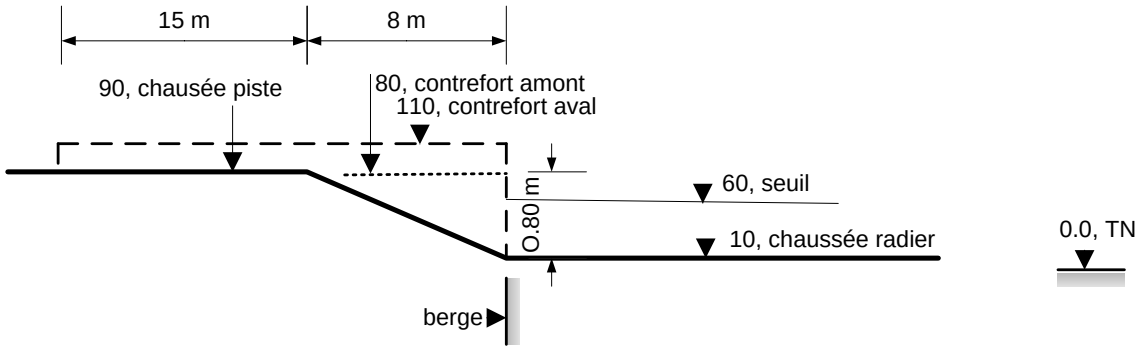
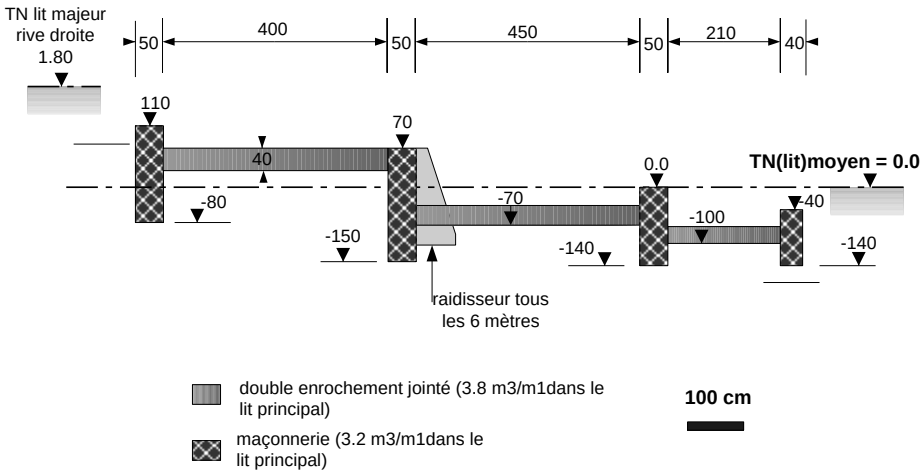


Figure 15b : *exemple de seuil-radier avec un bassin de dissipation double : Coups en travers au niveau du bassin et au niveau du muret longitudinal/contrefort*

Version provisoire

Coupes en travers:



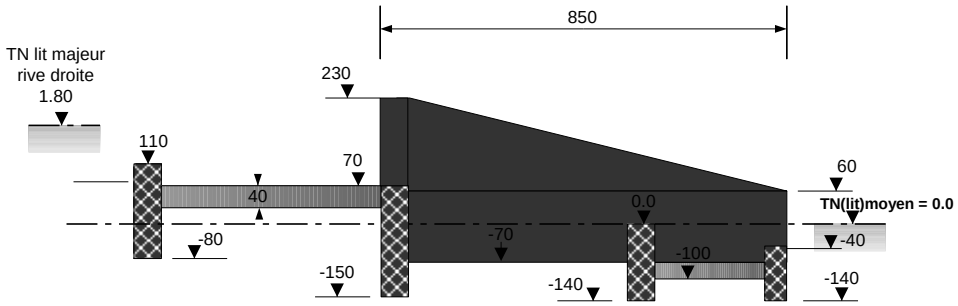


Figure 16 : *exemples seuil-radiers, d'en haut vers la bas : photos 1 et 2) seuil-radier avec triple bassin de dissipation et seuil de protection à 300 m en aval, photo 3) seuil- radier de 450 m de long, photo 4) seuil-radier haut avec double bassin de protection, photo 5) petit seuil-radier avec un bassin de dissipation simple.*

1

2

3

4

5

Radiers dans cours d'eau ou ravins d'érosion profonds et étroites :

La construction d'ouvrages de franchissement dans des cours d'eau ou ravins d'érosion étroits et profonds n'est souvent pas évidente :

1. Un radier est difficile à concevoir, parce qu'il sera profond et court. De plus, déjà avec une petite crue sa traversé est impossible.
2. Un seuil-radier est donc souhaitable, Cependant, il augmente l'épandage des crues. Du fait que le débit après le seuil-radier est petit, le retour des eaux d'épandages qui rejoignent l'ancien lit, vont couler sur la berge relativement haute et vont l'éroder. Cette érosion régressive est un rsique de contournement pour l'ouvrage.
3. Un dalot submersible conserve l'érosion.

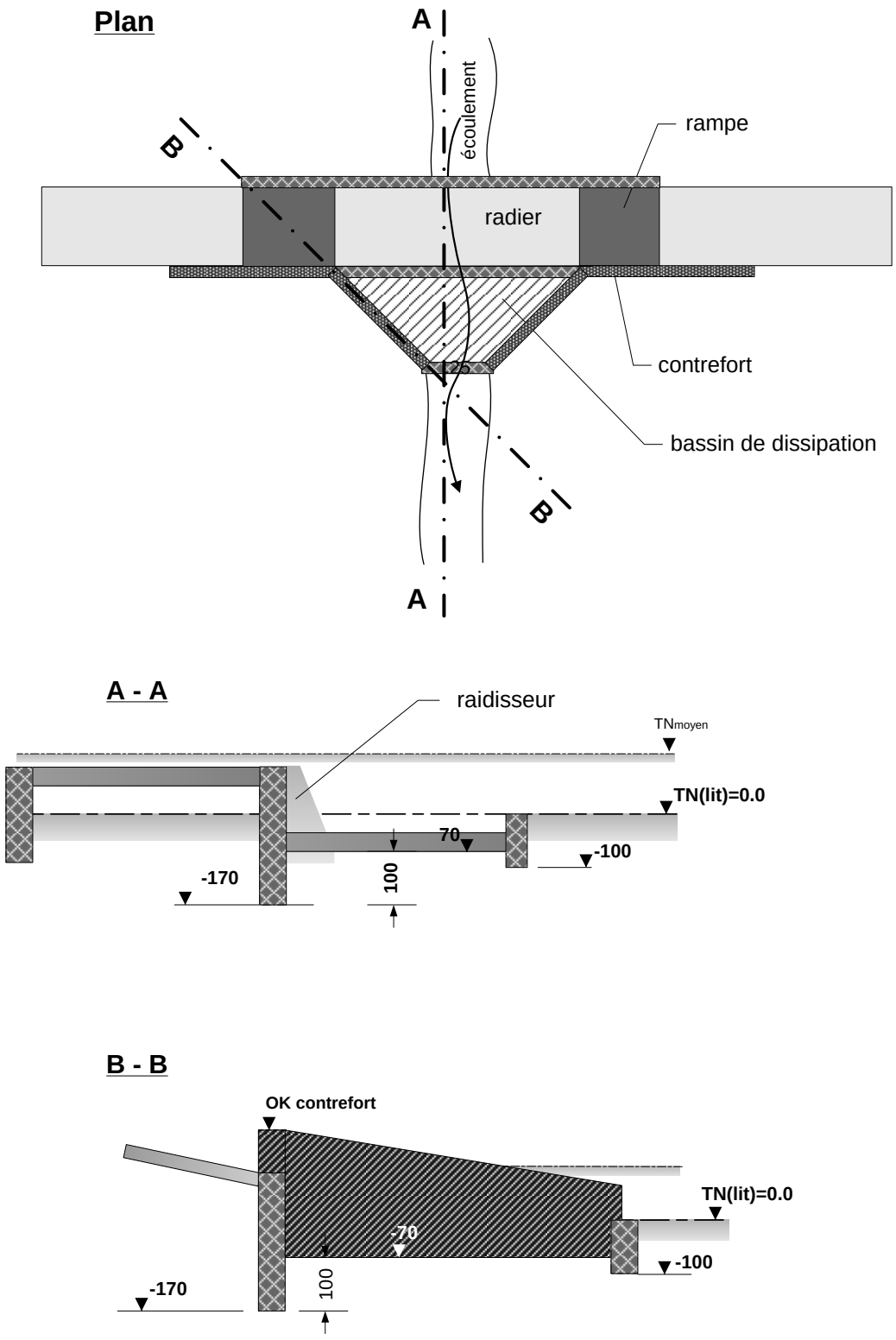
Pour le cas 2, du seuil-radier, il y a en principe deux solutions :

- Le premier consiste à un traitement du ravin ou du cours d'eau à l'aide de seuils et d'autres mesures antiérosives (voir module 3, mesures antiérosives et module 4, aménagement à l'aide de seuils d'épandages).

- Le deuxième consiste à une construction qui augmente le débit dans le ravin en aval de l'ouvrage : Le seuil-radier est 2 à 3 fois plus large que le ravin et le bassin de dissipation est conçu en forme trapézoïdale.
La situation et les coupes d'une telle construction sont montrées dans la figure 17. Ce principe de construction permet d'avoir une épaisseur de la lame d'eau en aval de l'ouvrage qui est 2-3 fois plus important que la lame d'eau sur le radier.
A noter, qu'il s'agit d'une solution réservée aux cours d'eau étroits.

Ce type de seuil radier sert d'exemples. L'ouvrage est simple et facile à construire. Avec l'expérience, d'autres types d'ouvrages qui collectent encore plus d'eau, sont possibles. Cependant, au début il est recommandé de choisir des solutions simples. Dans ce sens, la solution avec un seuil de protection à une distance de 100 à 300 m en aval est aussi à évaluer.

Figure 17 : *Exemple de seuil-radier avec bassin de dissipation en forme de trapèze. Cette construction augmente le débit en aval de l'ouvrage et diminue ainsi le risque d'érosion par les eaux d'épandages qui rejoignent leur lit.*



2.3 Dalot, buses

La construction de buses et dalots est à limiter à des cas particuliers, notamment si l'interruption du passage des véhicules est d'une durée inacceptable ou trop fréquente. Une telle construction nécessite d'être justifiée. Il y a plusieurs arguments pour cela :

- Un dalot ou une buse conserve l'érosion dans le meilleur de cas. Souvent ces mesures accélèrent l'érosion (voir figure 18). Un radier et plus encore, un seuil-radier est une mesure active contre l'érosion.
- Le dimensionnement des dalots est au Sahel très difficile. Un ouvrage sous-dimensionné est menacé par la destruction.
- Les coûts sont importants et les compétences techniques nécessaires dépassent celles pour les autres ouvrages.

Au cas où la construction s'avère nécessaire, un dalot ou buse submersible est recommandé (dalot ou buse avec radier, selon la photo dans la figure 19). Afin de lutter contre l'érosion en amont de l'ouvrage, il est possible, de fermer environ un tiers de l'ouverture du dalot en amont. Ceci n'est pas possible pour les buses. Leur section hydraulique relativement faible est déjà menacée d'être bouchée par des branches et troncs d'arbres. Donc, il n'est pas question de diminuer la section davantage.

Figure 18 : *Exemples de buses/dalots qui provoquant de l'érosion : photo en haut, par la concentrent l'eau ; photo en bas par la stabilisation du fond les ravins d'érosion à un niveau profond. Dans le premier cas, un radier ou un seuil-radier 3 à 6 fois plus long que la partie busée, aurait permis de diminuer la force érosive des écoulements. Dans le deuxième cas, un petit radier à la place du dalot aurait permit de corriger en partie l'érosion, qui est en train de détruire la piste.*

.

Figure 19: *Bon exemple de dalot submersible (ou radier busé), adapté au cours d'eau ayant des écoulements importants durant plusieurs semaines par année.*

2.4 Evaluation du type d'ouvrage approprié

Le choix du type d'ouvrages est important, du point de vue économique et niveau de service. Pourtant, on observe souvent, que les bureaux d'études optent pour un type, sans évaluer les alternatives qu'offrent d'autres conceptions.
Il est recommandé d'évaluer les différents types d'ouvrage directement sur le terrain durant l'étude. Ceci est, d'une part, une aide importante au bureau d'étude et, d'autre part, cela donne la possibilité au maitre d'ouvrage (ou maître d'ouvrage délégué) de vérifier les réflexions du bureau.
Le premier tableau, la figure 20, contient les caractéristiques du site, celles des ouvrages potentiels, leurs effets et une estimation relative des coûts. Le deuxieme tableau, la figure 21 sert à la sélection du type d'ouvrage adapté au contexte.

Figure 20 : *tableau avec les caractéristiques du site et des ouvrages potentiels avec leurs effets*

variante	**érosion**		**épandages des crues**			**durée de non praticabilité**		**coûts**		**observations**
	etat Initial	Effet de l'ouvrage	état initial	avec l'ouvrage	effets sur l'aménag.	crues moyennes	crues importantes	ouvrage	mesures complémen	
radier	xxx	x	x	x	x	xxx	xxxx	x x	xx	
seuil-radier bas	xxx	xx	x	xx	xx	xx	xxx	x x x	x	
seuil-radier haut	xxx	xxx	x	xxx	xxx	x	xx	x x x x	xx	
dalot submersible. radier busé	xxx	x	x	x	x	x	x	x x x x	xx	

x = faible ou nul, xx = moyen, xxx = important, xxxx = très important
La durée ou l'ouvrage est non praticable durant les crues est un facteur du niveau de service. Si possible, cette durée est à estimée en heures.

Figure 21 : *tableau pour la sélection du type d'ouvrages.*

variante	**ouvrage favorisé selon les critères**				**ouvrage optimal**	
	coûts, niveau de service		**érosion, aménagement**			
	minimal	**optimal**	**minimal**	**optimal**	**minimal**	**optimal**
radier	**x**					
seuil-radier bas		**x**	**x**		**xx**	
seuil-radier haut				**x**		**xx**
dalot submersible. radier busé						

2.5 Exemples de conception de radiers et de seuil-radiers

Même si la décision pour le type d'ouvrages est prise, des réflexions selon les suivants critères restent importantes ou nécessaire :

- Niveau de service et économie :
  - Un radier surélevé et long, avec une chaussée non liée peut replacer un radier avec chaussée liée.
  - un radier à deux niveaux peut avoir une chaussée liée sur la partie basse et une chaussée non liée sur la partie haute.
  - L'épandage d'eau diminue le débit par ml. Donc, un radier plus long est praticable durant une crue relativement important.
- Effet sur l'érosion, l'environnement et l'agriculture :
  - L'épandage des eaux est un élément très important de la lutte contre l'érosion ; il permet de diminuer la vitesse d'écoulement et d'augmenter l'infiltration. Donc un radier long est un élément actif de la lutte contre l'érosion. Cet effet se manifeste si bien en aval comme en amont de l'ouvrage.
  - Le niveau du radier ou d'un seuil-radier par rapport au TN détermine l'effet en amont sur la rétention, l'épandage et l'infiltration d'eau.

Ces réflexions sont illustrées ci-dessous à l'aide de trois exemples :
L'exemple 1 (figure 22) présente un bas-fond relativement large avec un lit mineur peu profond. Dans l'exemple 2 (figure 23) il s'agit d'un bas-fond peu large avec un lit mineur peu profond. Pour chaque exemple, trois variantes sont présentées. La discussion des trois variantes est similaire pour les deux exemples :

- La variante 1 est la solution plutôt classique. Techniquement une solution bonne et économique. Cependant, déjà des crues faibles empêchent la traversée.

- La variante 2 dispose d'un effet important sur la rétention d'eau. Le radier est praticable durant des crues importantes. Cependant, il est dans l'eau après une crue et les écoulements en aval peuvent crée des ravins d'érosion latéraux à partir du lit mineur.
- La variante 3 corrige les effets négatifs de la variante 2. Cependant, l'effet de rétention d'eau diminue légèrement.

Figure 22 : *exemple 1 de bas fond avec 3 variantes de radier*

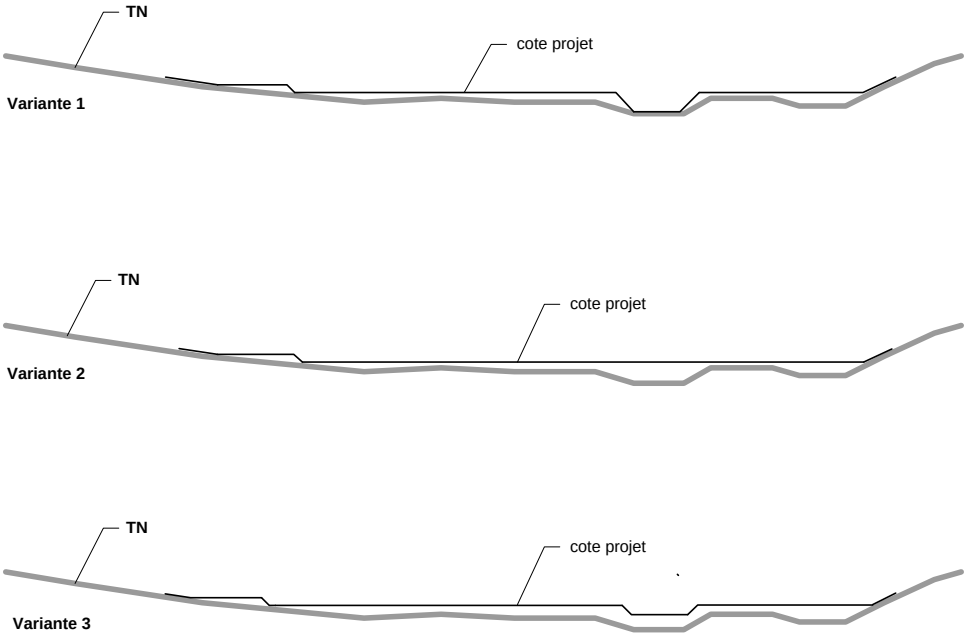
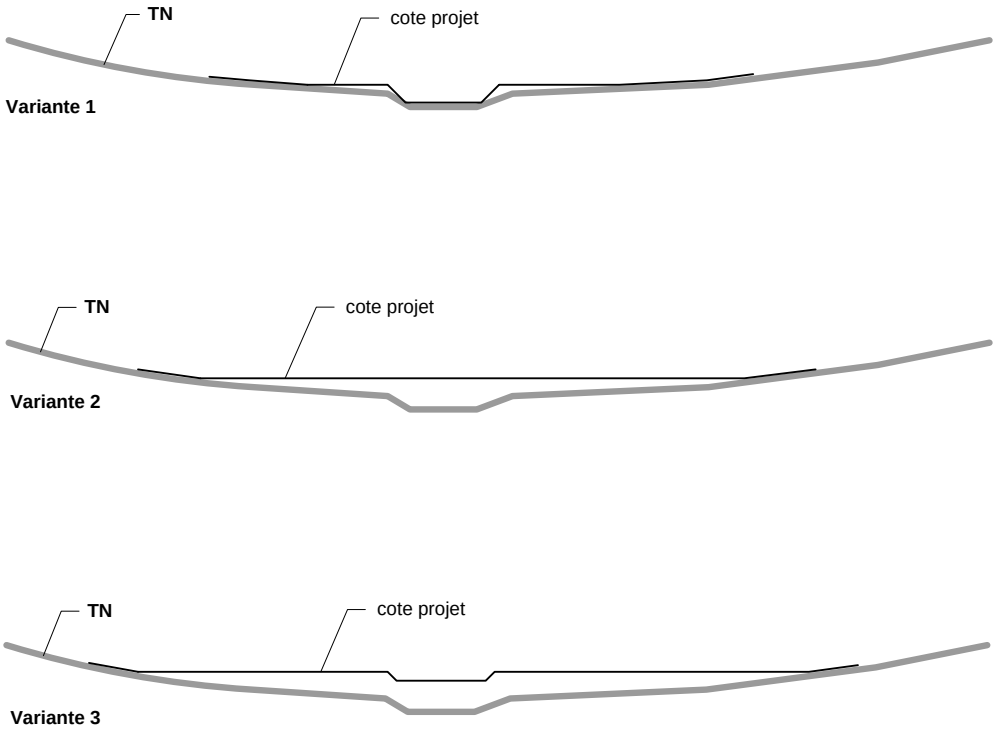


Figure 23 : *exemple 2 de bas fond avec 3 variantes de radier*



L'exemple 3 (figure 24) présente un bas-fond avec un lit mineur profond :

- La variante 1 est la solution classique. Techniquement une solution correcte et économique. Cependant, déjà des crues faibles empêchent la traversée.
- La variante 2 est un seuil-radier.

Les avantages par rapport à la variante 1 sont :

- L'effet contre l'érosion en amont,
- Les rampes sont moins profondes.

Les désavantages sont:

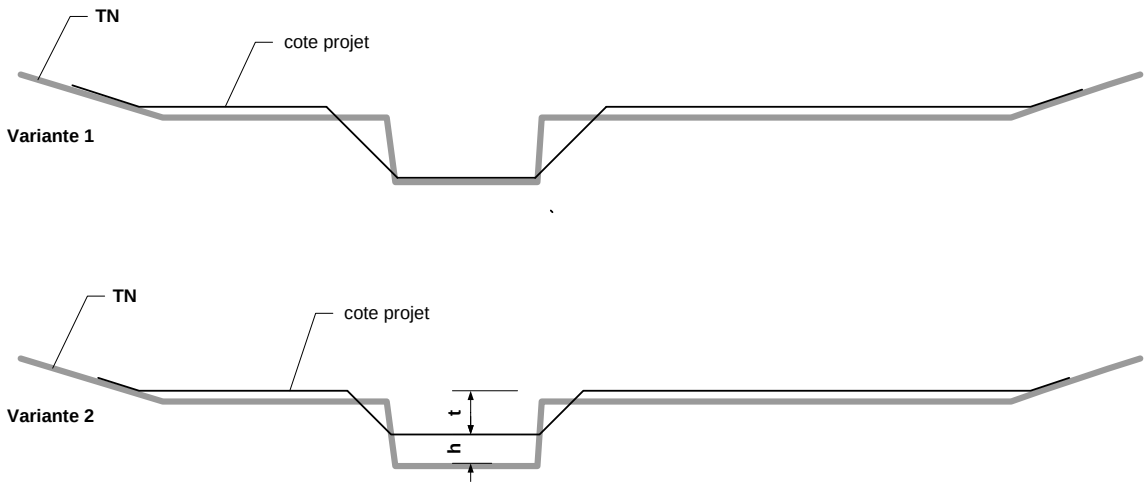
- Même pour des crues faibles, le radier n'est pas praticable, comme dans le cas de la variante 1.
- Pour éviter l'érosion en aval par l'eau d'épandage qui rejoint le lit mineur, il est nécessaire que l'hauteur du seuil (h) soit clairement inférieure à la profondeur du radier (t).

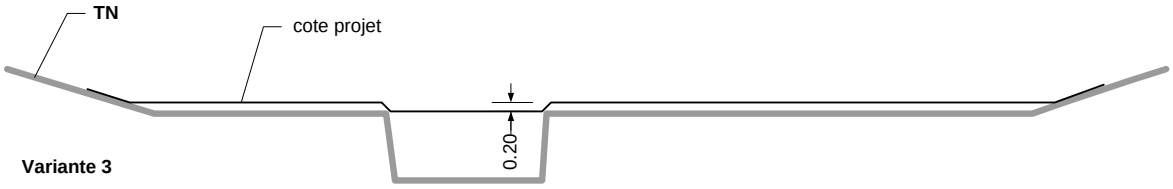
- La variant 3 permet à résoudre les contraintes des variantes 1 et 2. Le radier est praticable aussi durant des crues relativement importantes.

Cependant, sans mesures d'accompagnements, des ravins d'érosion régressive se développent très rapidement en aval du radier. Ces ravins vont contourner le radier pour créer un nouveau lit mineur. Afin d'éviter ce risque, les solutions suivantes sont possibles:

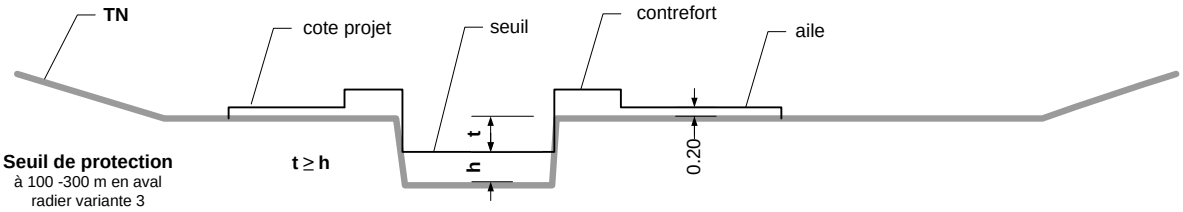
- La construction d'un seuil de protection en aval.
- L'intégration du radier dans un système d'aménagement de bas-fond, avec des seuils d'épandages en aval.
- La construction d'un basin de dissipation avec fonction d'entonnoir (voir figure 14) dans le cas de cours d'eau étroite. Dans le cas de cours d'eau relativement large, une construction avec un effet similaire comme l'entonnoir nécessite des expériences adéquates. Autrement, une telle construction n'est pas recommandée.

Figure 24 : *exemple 3 de bas fond avec 3 variantes de radier*





Variante 3



Seuil de protection
à 100 -300 m en aval
radier variante 3

t ≥ h

3. Principes d'entretien

En rédaction

4. Mesures antiérosives

4.1 Objectifs

L'objectif des mesures discutées est le traitement de zones peu et moyennement dégradées, c'est à dire, l'érosion en nappe et l'érosion en ravins à une profondeur jusqu'à environ 50-80 cm. Les mesures antiérosives empêchent ou réduisent l'érosion pluviale et partiellement aussi l'érosion éolienne. Elles contribuent également à la réhabilitation des ressources naturelles, eau, sol et végétation.
Le traitement de ravins plus profond qu'environ 50-80 cm nécessite en générale des mesures relativement complexes, c'est-à-dire, des seuils en maçonnerie avec basins de dissipation. Dans ce cas se sont les études et la conception de la série de seuils qui devient plus difficile, moins la construction même (voir recommandation seuils d'épandages).

Les recommandations s'adressent à un public non forcement spécialisé en matière de lutte contre l'érosion. Elles doivent aider d'acquérir des compétences nécessaires afin d'utiliser des techniques simples de manière correct et d'être capable de former les premier concernés, les paysans, soit pour traiter leurs champs, soit en tant que rémunérés d'entreprise ou de projets pour la réalisation de mesures antiérosives. Il n'est pas par hasard, que, en générale, les paysans comprennent la conception de ces mesures le plus rapidement de tous les concernés. Ce sont plutôt les connaissances de l'environnement qui sont important et moins les connaissances techniques et compétences intellectuelles. La compréhension du fonctionnement des mesures est la clé pour l'utilisation correcte des mesures antiérosives. Pour ces raisons, les recommandations basent sur la compréhension théorique et demandent des observations sur le terrain, afin d'acquérir la pratique nécessaire et de garder une vue critique sur le fonctionnement des divers mesures.

L'approche et les quelques techniques présentées permettent de traiter des grandes surfaces de manière efficace et économique en relativement peut de temps. Une présentation exhaustive de techniques n'est pas voulue. Ceux qui s'intéressent à cela, doivent s'orienter dans la littérature existante. Nous recommandons la publication de WOCAT, « Where the land is greener », une très belle présentation de techniques dans leur contexte. Cependant, à notre avis, l'application de ses mesures nécessite une expérience importante dans la matière. Dans ce sens, les recommandations présentes peuvent être considéré de complémentaire.

4.2 Principes de la lutte contre l'érosion de la gestion[7] des eaux et des sols

4.2.1 Lutte contre l'érosion

Les principes de la lutte contre l'érosion sont :

1. l'épandage d'eau ; ceci :
    a. diminue la vitesse des écoulements et
    b. augmentent l'infiltration.
2. L'infiltration d'eau ; ceci :
    a. diminue la vitesse des écoulements,
    b. favorise la régénération la végétation naturelle,
    c. la végétation peut multiplier le volume d'infiltration par rapport au sol nu,

[7] Souvent on parle de mesures CES/DRS. Cependant, la gestion des eaux et des sols décrit plus clairement et plus simplement les objectifs aux usagers non spécialisés. Cela marque également la distance par rapport aux mesures (trop) standardisées. L'adaptation et la flexibilité sont recherchées à ce sujet.

d. la végétation contribue à la régénération des sols, ce qui augmente sa résistance contre l'érosion.
e. la végétation freine les écoulements et stabilisent les mesures mécaniques.

4.2.2 Gestion des eaux

Les principes de toutes les mesures de gestion de l'eau sont :
1. la collecte des eaux de ruissellements et
2. l'infiltration dans une zone bien définie.

Les effets et avantages sont :
1. La diminution du ruissellement et donc, de l'érosion.
2. L'infiltration dans la zone d'infiltration est plus importante que les eaux de pluies locales. Ces eaux sont stockées sous forme d'eau libre souterraine (nappe phréatique) et d'eau capillaire. Elles sont bien protégées contre l'évaporation et la pollution. Au Sahel, c'est surtout l'eau capillaire qui est primordiale pour les cultures pluviales, une partie des cultures (non arrosées) de contre-saison et la végétation naturelle.
3. Cette gestion de l'eau est souvent aussi une bonne gestion des sols avec un effet de protection contre l'érosion et la régénération des sols.

Le tableau de la figure 25 contient une liste de mesures avec les zones de collectes impluvium) et la zone d'infiltration.

Figure 25 : *tableau avec mesures de gestion des eaux avec leurs zones de collecte et d'infiltration*

type de mesure	zone de collecte	zone d'infiltration
seuils d'épandages	partie du bassin versant	zone d'épandages en amont et en aval du seuil dans le bas fond
diguettes, digues filtrantes	ruissellement en amont de la mesure	zone en amont et en aval à proximité de l'ouvrage
demi-lunes, banquettes	impluvium en amont de la mesure	demi-lunes resp. banquettes
zai ou tassas, tranchés de plantations	zone en amont de la mesure	zai et tranchés

Cette petite comparaison de mesures montre que les principes sont pour toutes les mesures les mêmes. Cependant, les échelles sont très variables. Il n'ya pas de critères objectives de juger la valeur d'une mesure hors contexte. Chaque contexte a ses mesures appropriées. L'exemple des demi-lunes et des banquettes démontrent aussi que la définition géométrique des mesures est dangereuse. Le rapport optimal entre impluvium et zone d'infiltration dépend de la zone climatique.

4.3. Techniques

Les recommandations traitent tout d'abord les techniques les plus efficaces et relativement faciles à apprendre :

- diguettes en pierre,
- protection biologique sélectionnée,
- digues filtrantes, digues en pierres sèches ou pierres sèches combinées avec petits seuils en maçonnerie.

Ces mesures peuvent être combinées avec d'autres mesures de gestion des eaux et des sols, comme :

- zai (Burkina Faso) ou tassas (Niger),
- demi-lunes (avec réserves, car les zones vraiment appropriées aux demi-lunes sont rares)
- banquettes,
- tranchés de plantations,
- branchage, dépôts de tiges de mille.

Ces techniques sont appropriées à une approche HIMO. Les mesures simples sont assez rapidement maîtrisables par les paysans, si bien dans la construction comme dans la conception d'une série de mesures.
Des ouvrages en terre nécessitent une certaine prudence. Cependant, leur intégration n'est pas exclue.

La concentration sur peu de type de mesures et des mesures efficaces est recommandée surtout aux entreprises et projets peu expérimentés au sujet de la lutte contre l'érosion. Avec des ouvrages en pierres sèches et des petits seuils en maçonnerie il est possible de traiter de manière efficace 90 % des cas. Les techniques des zai ou tassa et la plantation d'arbres permettent de manière simple un bon aménagement. Le branchage traditionnel et le couchage de tiges de mil sont intéressants parce qu'ils apportent de matière organique et ils attirent les termites qui perforent le sol, multipliant ainsi l'infiltration.
Par contre, il est à noter (observations au Niger) que pour les demi-lunes, 9 sur 10 et pour les banquettes 1 sur 2 ne fonctionnent pas de manière satisfaisante. Ces mesures ne sont pas adaptées à tous les sites.

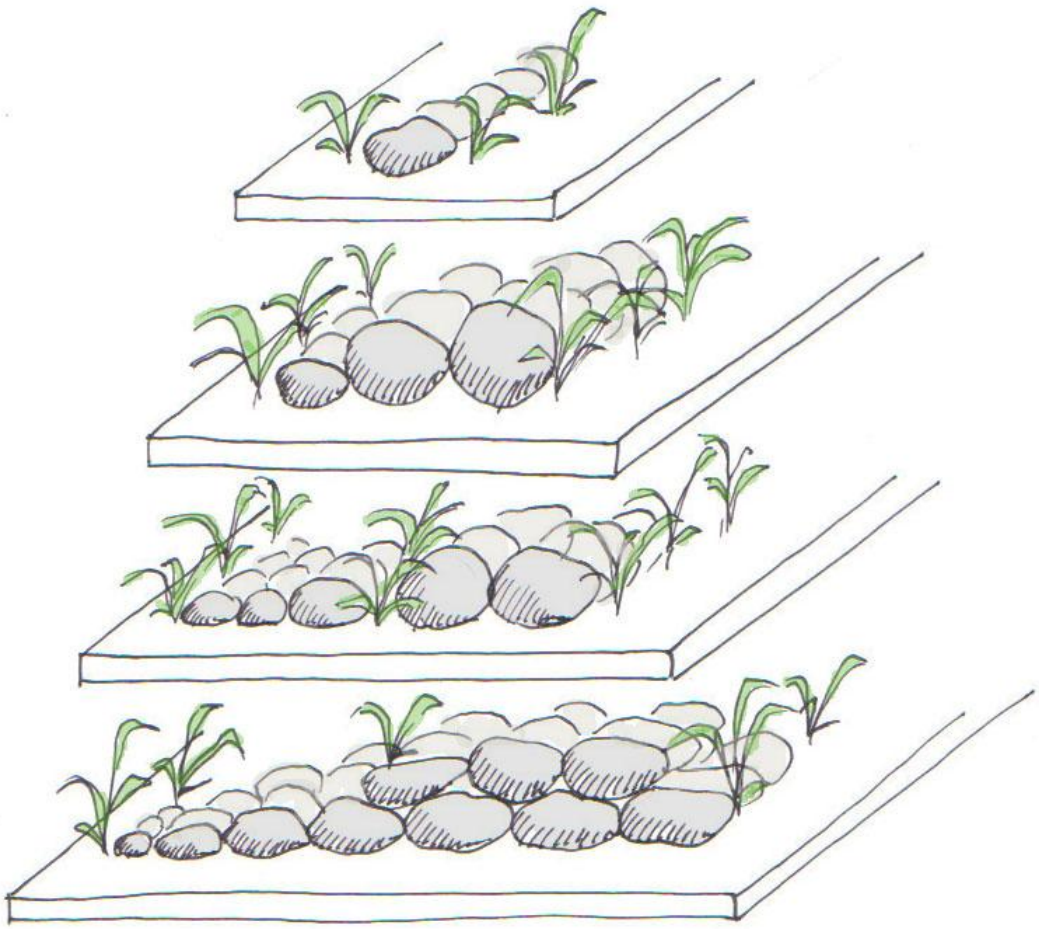
4.3.1 Diguettes

Pour la réalisation de diguettes, nos expériences montrent, qu'il est trop restreint, de donner des schémas avec des dimensions précises et des distances entre des diverses mesures. Il est nécessaire, que les manœuvres des entreprises et les paysans qui réalisent ces mesures l'apprennent sur le terrain (voir chapitre 4, Formation). Les points essentiels sont :

1. Il est important de comprendre le fonctionnement de ces mesures : L'objectif est de freiner les écoulements et non de retenir une quantité d'eau importante. Les écoulements sont ralentis, d'une part grâce à l'épandage des eaux et d'autre part grâce à l'effet de barrage de la diguette. Donc, il faut des ouvrages :
    a. de faible hauteur, mais larges,
    b. avec un minimum de vides entre les pierres et entre pierres et le terrain naturel (voir figure 2),
    c. dans les chemins de concentrations d'eau de ruissellement, la diguette devient faiblement plus haute, cependant remarquablement plus large.
2. La distance entre deux diguettes diminue ou la largeur de la diguette augmente :
    a. plus le terrain est raide,
    b. plus le sol est sableux-limoneux,
    c. plus les écoulements sont importants.

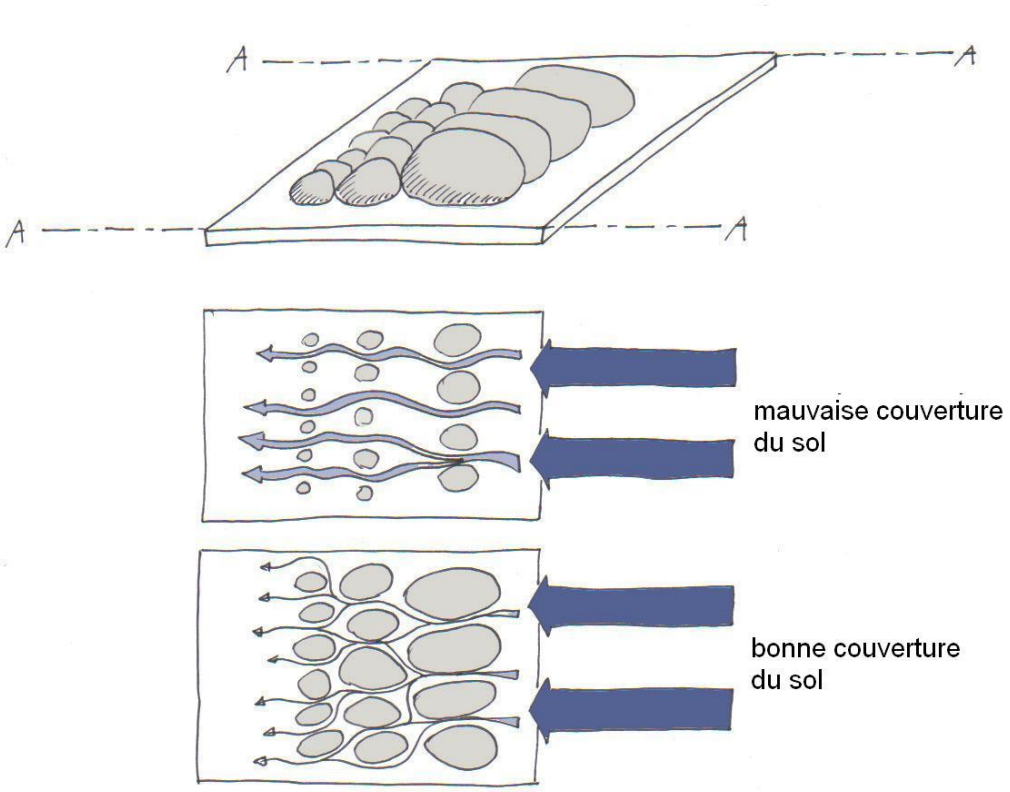
La figure 26 montre des schémas de différents types de ces constructions suivant les caractéristiques des sols et la pente du terrain.

Figure 26:
Exemples schématiques de diguettes en pierres sèches selon différents types de sols et de pentes.



La figure 27 montre l'importance du rapport entre sol libre et sols en contact avec les pierres, sur les écoulements et l'érosion à l'intérieur de la diguette.

Figure 27:
Illustration du taux de contacts pierres –sol sur le ruissellement à l'intérieur de la diguette et donc, sur l'érosion.



Afin d'obtenir une bonne protection, il ne suffit pas de connaître seulement les techniques. Une bonne observation et compréhensions de la zone entière à traiter est importante. De manière schématique, il y a trois nivaux à distinguer (figure 28):

1. la technique et ses propriétés,
2. l'adaptation de la technique aux conditions locales.
3. la conception d'un système de protection d'une zone cohérente.

Les constructions isolées sont les plus menacées et celles qui subissent le plus fréquemment des dégâts. Si ces 3 niveaux sont respectés, les dégâts sont limités.
L'expérience nous a montré, que les paysans, ayant une bonne connaissance de leur terroir, apprennent cette approche en générale plus rapidement que les techniciens.

L'implantation des diguettes se fait par l'œil :

- perpendiculaire aux écoulements,
- avec une ligne redressée, ignorant les petites dépressions et bosses.

Des méthodes d'implantations alternatives sont :

- Le tuyau à eau : C'est recommandé dans beaucoup de recommandation. Les désavantages sont la lenteur au travail et la tentation d'implanté des lignes trop ondulées.
- Le niveau optique : C'est une bonne solution dans une zone étendus et difficile, d'implanter une diguette sur trois avec le niveau et les autres à l'aide de l'œil.

Figure 28:

Les photos illustrent (de haute en bas) les trois niveaux de réflexion à respecter dans la conception et la réalisation de mesures de protection ou de réhabilitation:

1) *la technique,*
2) *son adaptation à l'environnement et aux ouvrages voisins et*
3) *l'intégration d'ensemble des ouvrages d'une zone. Les mesures influençant la dynamique du système, une vue isolée et limitée à l'ouvrage est dangereuse; celle-ci doit être globale.*

4.3.2 Protection biologique

On distingue entre la protection mécanique (pierres, terre, bois mort, …) et la protection biologique. Les deux se complètent fortement. Dans des sols sableux, des mesures mécaniques ne sont jamais durables si elles ne sont pas protégées et soutenues par la végétation.

Grâce à l'épandage des eaux, les mesures antiérosives ralentissent les eaux de ruissellements et favorisent l'infiltration. Ceci réduit considérablement les dégradations et contribue au rétablissement du couvert végétal (et les ressources naturelles en générale). Les effets sur les ressources végétation, sol et eau son interactifs. Le premier effet des mesures mécaniques réduit l'érosion et augmente l'infiltration ce qui permet l'installation d'une végétation (figure 29). Celle-ci améliore la structure du sol, casse la croûte de dégradation et attire des termites. Suite à ces changements, il est possible, qu'une année plus tard jusqu'à dix fois plus d'eau peut s'infiltrer sur la même surface et pour la même durée d'infiltration.

Dans le cadre de la construction de pistes et même dans l'aménagement du terroir, il est souvent justifié de réaliser surtout des mesures mécaniques. Grâce aux ouvrages relativement stables, correctement implantés, avec des distances adéquats entre les diverses mesures, la régénération naturelle de la végétation est en générale importante. Donc, la réalisation correcte de diguettes est à considérer de mesure biologique propre. Cependant, la sensibilisation et l'information de la population sont importantes. Car, le bon fonctionnement de la protection biologique est surtout le problème de la gestion future des ressources naturelles.

D'autres mesures biologiques simples et efficaces sont :

- la plantation d'andropogon ou de vétiver à la place des diguettes en pierres,
- le semi direct d'arbres en amont des diguettes,
- la plantation d'euphorbes contre l'érosion éolienne.

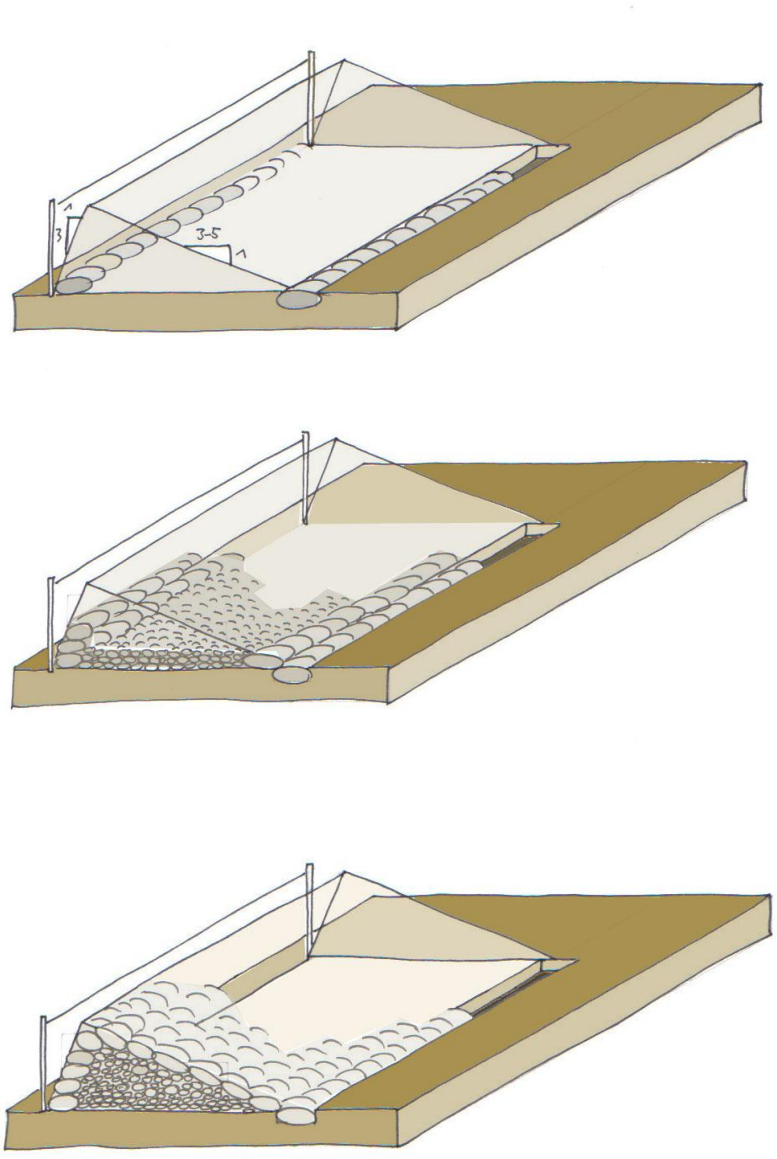
Figure 29 :
Exemples de protection biologique spontanée liée aux mesures techniques : La diguette (en haut, gauche), la piste (en haut, droit) ou la digue filtrante (en bas) stabilise le sol, augmente l'infiltration et favorise ainsi la réhabilitation naturelle de la végétation. Celle-ci stabilise l'ouvrage.

Figure 4: suite

4.3.3 Digues filtrantes, digues en pierres sèches ou pierres sèches combinées avec maçonnerie

Les digues filtrantes ont des fonctions similaires comme des diguettes : l'épandage l'eau et le ralentissement des écoulements. L'effet de rétention temporaire est nettement plus important que pour les diguettes. Il n'est pas souhaité que les digues filtrantes soient submergées durant les crues moyennes et grandes. Cependant, ce n'est pas exclu pour des crues exceptionnelles.
La crête de la digue filtrante doit être horizontale. Pour ces raisons il est nécessaire de construire l'ouvrage à l'aide d'une corde (ficelle) de référence. La figure 30 montre les étapes de construction. La pente de la digue filtrante est constante pour un ouvrage, donc, la largeur varie en fonction de la hauteur. Pour cette raison, une ficelle au niveau du pied gène, la construction. Celle-ci est à monter au niveau de la crête, de façon qu'elle ne touche jamais la construction (voir figure 30). La pente varie entre 1 à 3 jusqu'à 1 à 5, selon le type de sol.
De manière générale, les constructions sans écran étanche et sans mesures de renforcement de la base de l'ouvrage, sont à construire large et bas. Trop hautes, la pression d'eau devient trop importante et peut dédommager et détruire les ouvrages par des contournements, le déplacement de pierres ou l'érosion. Trop étroites, elles sont menacées par l'érosion.
L'ouvrage est à construire perpendiculairement à la direction de l'eau.
Dans les sols relativement stables une fondation générale n'offre pas d'avantages, donc elle n'est pas nécessaire. Par contre, un fossé pour la dernière pierre au pied est très efficace, afin d'éviter l'érosion au pied de l'ouvrage et de servir de contrefort pour celui-ci.
Des pierres de tailles petites et moyens sont à placées à la base et à l'intérieur de l'ouvrage, les grosses en surface.
La construction de digues filtrantes dans des sols sableux-limoneux, donc, des sols très susceptible à l'érosion, est déconseillée. Elles ne sont que difficilement à stabilise et à entretenir.

Figure 30 : *étapes de construction de digues filtrantes. Une ficelle horizontale au niveau de la crête est indispensable. Par contre une ficelle au niveau du pied est gênante. La largeur à la base varie en fonction de l'hauteur. La rangé de grosses pierres enfoncées au pied et une bonne couverture du sol à l'intérieur de la digue, aident à éviter l'érosion.*

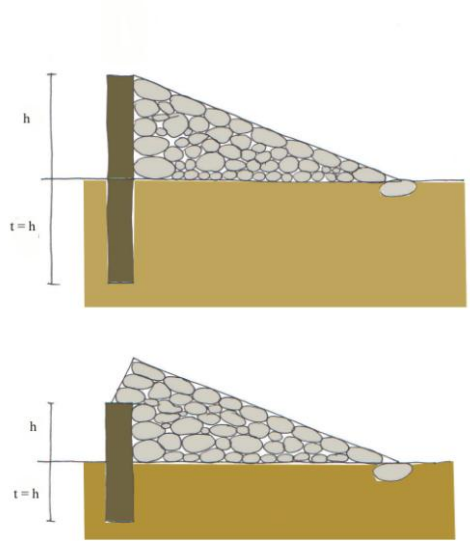


Au cas :

- de débits importants,
- afin de retenir l'eau plus longtemps et l'épandre de manière plus important,
- de sols sableux-limoneux,

un muret peut être construit en amont de la digue filtrante (voir figure 31). Dans ce cas, le muret sert plutôt de seuil et la digue filtrante de protection contre l'érosion. Le remplacement des pierres sèches par un petit bassin de dissipation en maçonnerie peut être une alternative plus sûre et parfois aussi plus économique. Des bassins de dissipation avec contre-seuils sont très efficaces. Leur largeur peut être choisie plus faible par rapport à celle d'une protection en pierre sèches.

Figure 31 : *Alternatives aux digues filtrantes : a) digue filtrant avec muret en maçonnerie en amont, b) muret en maçonnerie avec protection en pierres sèches en aval, c) muret avec petit bassin de dissipation.*



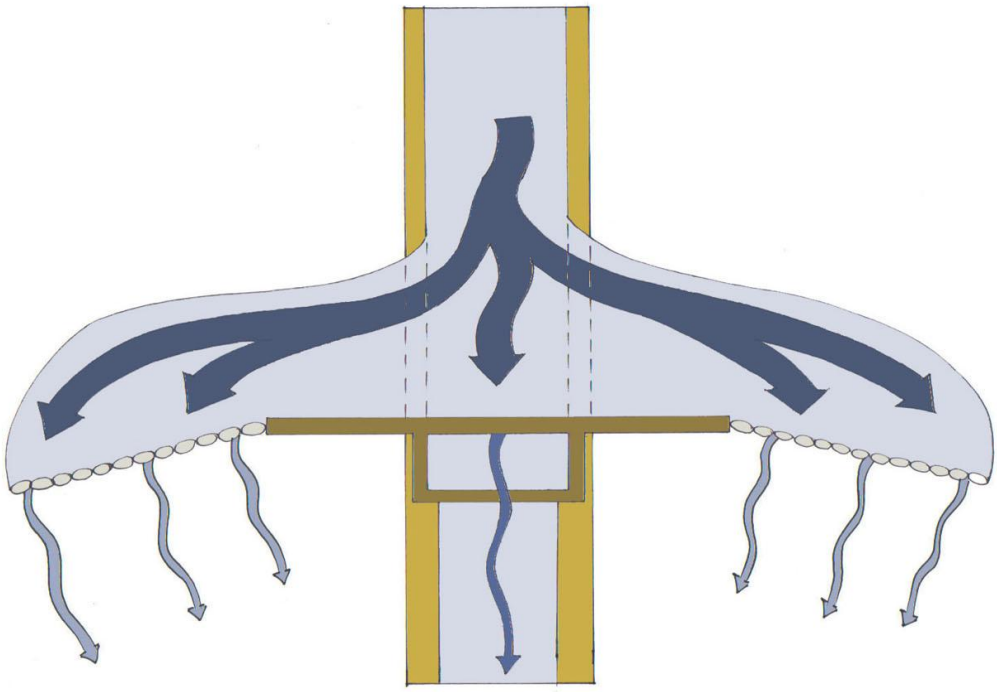
A noter que les ouvrages en pierres sèches ne résistent pas aux écoulements violents. Le jugement du contexte environnemental : la stabilité des sols, les débits et la vitesse des écoulements, n'est pas toujours évident. Au cas de doutes, des ouvrages en maçonnerie ou la combinaison maçonnerie/pierres sèches sont plus efficaces. (La technique des gabions est recommandée dans des sols relativement stables, p.ex., des sols latéritiques, mais non dans des sols limoneux-sableux. Cependant, du point de vue économique, les gabions sont normalement plus couteux que la maçonnerie.)

4.3.4 Seuils en maçonnerie

Les contraintes des digues filtrantes et les petits seuils en pierres sèches dans les sols sableux-limoneux sont les mêmes qui menacent les seuils en gabions: érosion interne, érosion de contact et effet de renard (rupture hydraulique du sol). Cependant, dans des ravins d'érosion le contournement des constructions est de loin le plus fréquent.
Dans les sols sableux à limoneux, les constructions de plus de 40 cm de haut sont presque systématiquement contournées. Même les filtres en graviers n'y offrent pas de protection efficace.
Dans ces conditions les ouvrages en pierres sèches deviennent trop difficiles à construire et à entretenir. Il est nécessaire de traiter les ravins d'érosion, à partir d'une profondeur de 50 cm environ, à l'aide de petits seuils ou murets en maçonnerie.

Souvent ces ravins sont récents et la correction des dégâts d'érosion est souhaitable. Dans ce cas, la combinaison des seuils en maçonnerie avec des mesures en pierres sèches est indiquée. Les seuils en maçonnerie servent au traitement des ravins d'érosion et les ailes des seuils peuvent être construites en pierres sèches (voir figure 32).

Figure 32 : *traitement de ravins d'érosion à l'aide de petit seuil en maçonnerie avec des ailes en pierres sèches.*



4.3.5 Autres techniques

Ces mesures citées ci-dessus sont appropriées aux projets peu expérimentés ou aux approches avec des entreprises. Ces mesures suffisent au traitement durable de zones à faible et moyenne degradation et erosion. Les diguettes et petits ouvrages en pierre seches peuvent etre utilisé presque partout dans des zones à degradation faible et moyenne. Des mesures en maçonnerie sont indispensables dans des zones à degradation avancées.

D'autres mesures sont à intégrer à fur et à mesure et selon l'expérience des responsables. Le transfert des techniques peut être une possibilité. Pourtant, l'adaptation des différentes techniques au contexte particulier est plus intéressante et plus efficace. Dans ce sens, il est recommandé, d'encourager les responsables à expérimenter.
Le tableau de la figure 33 montre des mesures possibles selon le type de sol, à titre d'exemple. Il s'agit de la synthèse d'une discussion suite à un cycle de formation en mesures antiérosives. Un des objectifs principaux de ces mesures a été de protéger des pistes rurales contre l'érosion.

Figure 33 : *tableau de mesures CES/DRS recommandées selon le type de sol et la géounité (formation CES/DRS, PDRI, LuxDevelopment, Dosso, Niger, synthèse de la discussion, août 2002)*

Nature du sol **Géounité**	**Sols durs**	**Sols sableux**		**Ravins/koris profonds le traitement à l'aide de mesures simples seulement est insuffisant**
		peu d'érosion en ravins	**Erosion en ravins peu profonds**	
Plateaux, Versants, Glacis	Tranchés Fosse/diguette Diguette en pierres Diguettes en petits cailloux	Paillage/tiges de mil Bandes d'andropogon Diguettes en pierres	Diguettes en pierres (dist. 20 à 50 m) Diguettes en pierres (dist. 50 à 100 m), tassas (sais) Système agroforestier	Ceintures de digues filtrantes, diguettes, seuils, selon la topographie Protection biologique en aval de la ceinture
Sols dunaires Pente relativement faible Pente raide (dune)	--- ---	Comme plateau/versants Euphorbes Végétation naturelle, pas de cultures	Comme plateau/versants Euphorbes, Végétation naturelle, pas de cultures	Comme plateau/versants Stabilisation du pied de la dune
Bas fonds		Diguettes en pierres Bandes d'andropogon	Diguettes en pierres Bandes d'andropogon Digues filtrantes	Seuils d'épandages (un seuil est composé de plusieurs ouvrages)

4.4 Formation

La formation en mesures antiérosives simples se distingue par rapport à la formation sur d'autres mesures techniques, pour plusieurs raisons :

- Les surfaces à traiter sont énormes ; ce sont des milliers de ha. Il s'agit d'une activité qui durera des décennies et qui occupe une grande partie de la population, donc :
  - conception, réalisation et entretien doivent être faits par la population,
  - Au niveau d'un bassin versant important, il faut des dizaines ou même des centaines de personnes qui sont capable à concevoir des systèmes de protection et de diriger une équipe de construction.
  - des projets pistes ou d'aménagement à des durés limités doivent former la population et déléguer ces travaux à elle.
- Le niveau technique exigé est relativement simple. C'est plutôt la connaissance de l'environnement et la compréhension de sa dynamique qui sont plus important. A ces sujets, la population locale dispose des avantages par rapport aux techniciens. Ceci facilite la délégation de responsabilités techniques vers la population. Les techniciens, d'autre part, ont suffisamment d'activité, pour lesquelles une formation et l'expérience technique est de rigueur.
- L'expérience pratique est primordiale et l'élément clé dans la lutte contre l'érosion à l'aide de mesures simples

Une bonne protection contre l'érosion à l'aide de mesures simples exige une bonne connaissance de l'environnement et une bonne observation de celle-ci. Les mesures doivent être adaptées à l'environnement. Une systématisation et schématisation trop importante des mesures empêche plutôt l'adaptation. C'est la raison pour laquelle seulement une formation

sur le terrain, accompagnant le travail, permet une formation efficace et rapide, si bien au niveau technicien comme au niveau paysans

De manière générale ont peut distinguer quatre niveaux/modules de formation, selon le tableau schématique ci-dessous (figure 34) :

- durant la planification,
- durant les réalisations,
- après le fonctionnement des mesures,
- formation autodidacte.

Figure 34 : *quatre niveaux/modules de formation en mesures antiérosives simples*

Module	Activités	Objectifs	Participants
1	Introduction théorique, reconnaissance du terrain, discussion de mesures appropriées sur le terrain	Identification des mesures et estimation des avants métrés, afin d'estimer les coûts et d'avoir les données nécessaires à la planification des travaux	Ingénieurs et techniciens
2	formation accompagnant le travail	Appui/formation aux techniciens et au paysans/chef d'équipes, formation de formateurs	Ingénieurs/techniciens, population (responsables de l'entretien, chef d'équipes/ formateurs)
3	Suivi et évaluation des réalisations après la saison des pluies : 1) le comportement des mesures : • la technique • l'adaptation à l'environnement • la conception de l'ensemble des mesures, 2) l'impact des mesures	Formation à tous les niveaux selon les critères de l'évaluation. Echange d'expériences à travers d'une discussion critique des mesures.	A. Ingénieurs/techniciens et sélection de chef d'équipes/ formateurs. B. Formateurs avec chef d'équipes et paysans/ouvriers
4	recherche d'améliorations, comparaison de différentes approches dans des contextes similaires, réalisation de sites testes	perfectionnement, acquisition d'expériences particulières	ingénieurs, techniciens, chef d'équipes-formateurs

Dans ce système de formation il est indispensable de disposer de paysan-formateur, capable à former leurs collègues. Ces formateurs seront engagés par les projets ou entreprises, afin de former les populations/ouvriers non expérimentés. Cette approche de formation permet aussi aux entreprises de construction de pistes ou de seuils une performance correcte au sujet de mesures antiérosives.