

## 4.2.5 Effets de l'érosion en nappe

### 4.2.5.1 Au niveau du bassin versant

A ce niveau, les conséquences de l'érosion en nappe sont plutôt d'un point de vue topographique et structurel, et on peut observer :

- le nivellement de la surface du sol par rabotage des mottes et remplissage des creux, avec formation de pellicules de battance (épaisseur = 1 mm), de croûtes d'érosion et de sédimentation (plusieurs couches dépassant 1 à 30 mm) ;
- la squelettisation des horizons superficiels par pertes sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sables et graviers, plus claire que le sol initial ;
- le décapage de l'horizon humifère laissant apparaître des plages de l'horizon minéral de couleur plus claire de l'horizon minéral B et C.

### 4.2.5.2 Au niveau des ressources en eau

L'induration superficielle du sol par effet de battance ne facilite pas l'infiltration, ce qui entrave fortement la recharge des nappes aquifères. Les conséquences observées sont la diminution notable du débit des sources, et même leur assèchement dans quelques cas, qui n'arrive plus à irriguer les rizières traditionnelles dans le BV, ainsi que l'assèchement des puits dans les villages en aval du BV.

### 4.2.5.3 Au niveau du périmètre irrigué en aval

Même si l'érosion en nappe constitue plus de 90% de l'érosion rencontrée dans le bassin, celle-ci n'a aucun impact dommageable direct envers le fonctionnement et l'état des infrastructures hydro-agricoles en aval.



Photo 2: Demoiselle coiffée\_Erosion en nappe ; BV Horia (Source: auteur\_juillet2014)

### 4.3 Erosion linéaire en rigoles et ravines

#### 4.3.1 Description

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'individualise et creuse des formes de plus en plus profondes.

#### 4.3.2 Causes et Processus

La cause de l'érosion linéaire est à chercher dans l'énergie du ruissellement, laquelle dépend à la fois du volume ruisselé et de la vitesse de celui-ci.

On peut expliquer la naissance du ruissellement par diverses théories, telles :

- i. **la théorie de Horton (1945)** : Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol

Si on compare l'infiltration à l'intensité de la pluie, on constate que l'intensité d'infiltration décroît au cours du temps, d'une part parce que le potentiel capillaire diminue à mesure que l'eau pénètre à l'intérieur du sol et d'autre part, par dégradation de l'état de la structure à la surface du sol par effet de battance. Par contre, l'intensité de la pluie passe généralement par un (ou plusieurs) maximum et le volume de la pluie situé au-dessus de la courbe d'infiltration peut être considéré comme le ruissellement. On constate dans l'exemple choisi, pour une séquence d'intensité voisine que le volume du ruissellement peut varier considérablement en fonction de la période où apparaît le maximum d'intensité dans l'averse. Plus tôt apparaît ce maximum, plus réduit sera le ruissellement puisque la capacité d'infiltration diminue au cours du temps. Cependant, les hydrologues ont montré qu'il était rare d'obtenir une bonne corrélation entre le volume ruisselé sur un bassin versant et l'intensité des pluies.

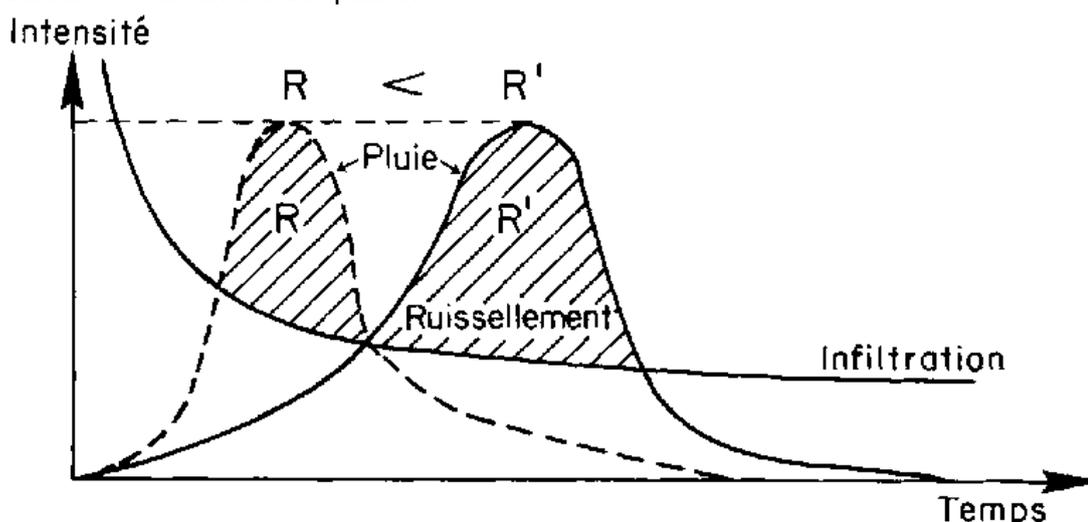


Figure 9: Théorie de Horton sur la naissance du ruissellement

- ii. **la théorie de la saturation du milieu** : Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé.

Si au cours d'une pluie simulée on constate d'abord le démarrage du ruissellement après une pluie d'imbibition, le ruissellement va augmenter jusqu'à atteindre un niveau stabilisé correspondant à la capacité d'infiltration stabilisée du sol. Mais si la pluie persévère (plus de 100 mm), il peut arriver que l'on observe une nouvelle croissance du ruissellement et un nouveau plateau d'infiltration stabilisée. Il s'agit simplement de la saturation de l'horizon labouré; elle provoque le débordement de cette capacité de stockage que représente la macroporosité de l'horizon labouré. On peut constater soit que l'intensité de ruissellement correspond exactement à celle de la pluie simulée si l'horizon de profondeur est totalement imperméable ou qu'il reste une certaine capacité d'infiltration résiduelle correspondant à celle du fond de labour. Lorsqu'un milieu est totalement saturé, toute goutte d'eau tombant dans ce milieu ruisselle, quelle que soit l'intensité de la pluie.

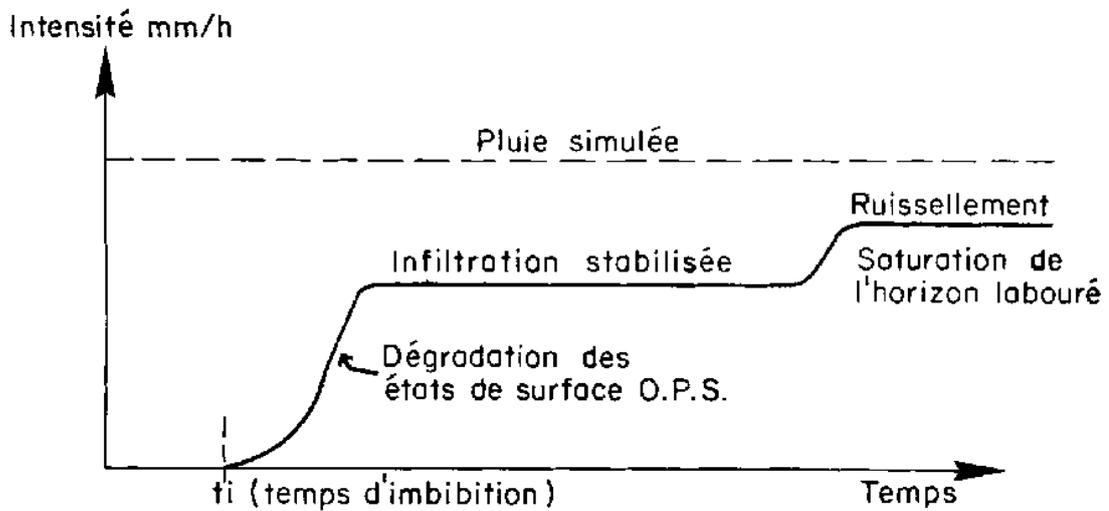


Figure 10: Théorie de la saturation du milieu

- iii. **la théorie de la contribution partielle de la surface** : Dans la nature, le ruissellement ne se développe pas sur toute la surface d'une parcelle ou d'un bassin mais seulement sur une partie. Par exemple sur des surfaces nues, tassées, fermées par une croûte de battance, ou au fond d'une vallée.

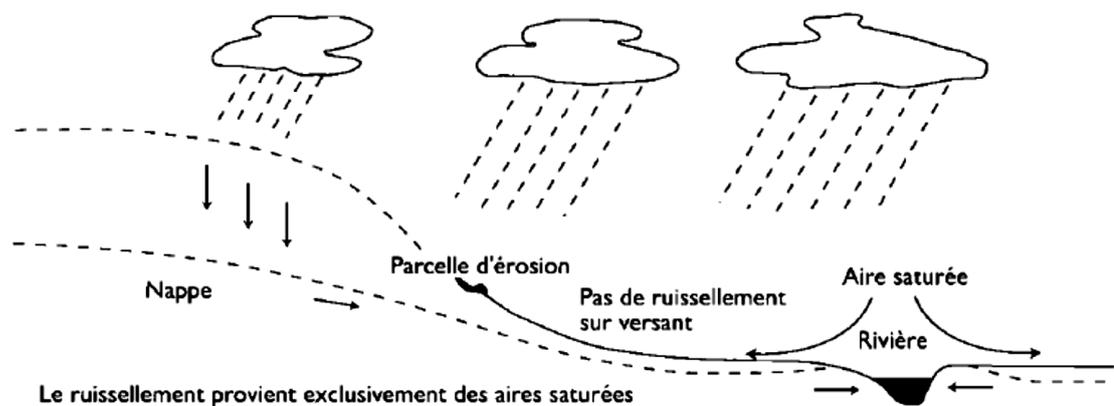


Figure 11: Théorie de la contribution localisée du ruissellement

Lorsque les pluies sont abondantes et les pentes fortes et longues, alors le ruissellement en nappe se hiérarchise, se concentre en filets entre les touffes végétales, prend de la vitesse et développe une énergie propre capable de creuser des canaux plus ou moins linéaire d'une certaine profondeur (griffe ou rigole) à la surface du sol.

Ce sont les forces de cisaillement de l'eau chargée de sables et graviers qui arrachent des agrégats, des mottes et des cailloux au fond et sur les flancs des rigoles. La résistance d'un profil de sol au ruissellement sera donc différente de « l'érodibilité » d'un sol à la battance des gouttes d'eau.

#### 4.3.3 Formes et Localisation

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales.

On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres.

Et enfin, de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales. La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion linéaire.

Tableau 10: Classification des ravines selon leur profondeur (Source: U.S. Soil Conservation Service)

FORMES	TRACE	LONGUEUR	LARGEUR	PROFONDEUR
<b>Griffe</b>	sinueux	< 1 m	< 10 m	5-6 cm
<b>Rigole</b>	sinueux	Dizaine de mètre	5-70 cm	10-30 cm
<b>Ravine</b>	peu sinueux	Centaine de mètre	50-100 cm	30-50 cm
<b>Petit ravin</b>	peu sinueux	Centaine de mètre	50-100 cm	50-200 cm

L'érosion en ravins à parois verticales peut prendre naissance dans des zones à faible pente sur sol compact et très induré en surface. Le fond du ravin garde une légère pente et dès le départ est encombré de sables.

Cette forme d'érosion laisse la place plus en aval à la forme développée des sakasaka.

#### 4.3.4 Facteurs modifiants l'érosion linéaire

L'érosion linéaire dépend de la masse de ruissellement (M) et du carré de sa vitesse (V<sup>2</sup>) au niveau des parcelles et de la masse, de la force d'attraction (G) et de la différence d'altitude depuis le haut jusqu'au bas du bassin versant (H) ;

$$\text{Energie linéaire} = \frac{1}{2}MV^2 \text{ à la parcelle} = \frac{1}{2}MGH \text{ sur bassin versant}$$

Le volume du ruissellement dépend de l'intensité et du volume des pluies, de l'humidité du sol avant la pluie, de la surface du bassin drainé par une rigole ou ravine, de l'état (fermé, ouvert, tassé, couvert) de la surface du sol, des activités de la faune, de la pente et de la rugosité du sol et du coefficient de ruissellement de chaque zone de ce bassin.

La vitesse du ruissellement dépend de la pente et de la rugosité du canal, de l'épaisseur de la lame ruisselée et de la hauteur de chute de l'eau dans la ravine.

On ne peut modifier l'intensité des pluies, mais on connaît les versants qui reçoivent les vents humides et les adrets généralement plus secs et moins bien protégés par la végétation.

#### *4.3.4.1 Le couvert végétal*

Le couvert végétal protège la surface de la battance, prolonge ainsi la période de forte infiltration et réduit le volume ruisselé. De même, la litière entretient les activités perforatrices de la faune et absorbe une grosse partie de l'énergie du ruissellement. Enfin, les racines superficielles, les adventices et les tiges des graminées augmentent la rugosité et ralentissent le flux. La végétation et la litière peuvent aussi absorber une partie des pluies (1 à 10 min), mais ce n'est qu'une faible part des grosses averses qui vont provoquer un fort ruissellement et les transports de terre érodée.

#### *4.3.4.2 Le sol*

Le sol intervient à différents niveaux. L'humidité du sol augmente le ruissellement et réduit sa résistance à l'abrasion. La rugosité de sa surface réduit la vitesse du ruissellement et augmente le volume d'eau stocké avant le début du ruissellement. La texture du sol peut intervenir. On pense généralement que les sols sableux sont plus perméables que les sols argilo-limoneux, sauf si ceux-ci sont bien structurés. La stabilité de la structure a une incidence sur la résistance à la battance, donc sur la fermeture de la porosité de la surface et sur la pluie d'imbibition. Les cailloux peuvent avoir deux influences opposées. Les cailloux posés sur des surfaces ouvertes vont les protéger de la battance et prolonger l'infiltration. Si, par contre, les cailloux sont inclus dans la masse ou dans la croûte de surface, ils vont augmenter le ruissellement. Si les sols sont tassés, ils seront moins perméables mais plus résistants à l'énergie des pluies et du ruissellement.

#### *4.3.4.3 La pente*

Dans le domaine des pentes faibles (2%), l'inclinaison des pentes augmente le volume ruisselé, mais sur forte pente on observe un meilleur drainage interne et la formation plus lente des pellicules de battance, lesquelles sont détruites au fur et à mesure de leur formation par l'énergie du ruissellement (Heusch, 1970; Roose, 1973, 1977, 1994; Valentin Et Al. ; Laos, 2004).

La longueur de pente devrait aussi intervenir car le refus à l'infiltration devrait s'accumuler tout au long du versant. Cependant, il a été constaté dans de nombreux cas qu'il y a interaction entre l'effet de la longueur de la pente, la rugosité et la porosité des sols le long du versant (Wischmeier, 1966; Roose, 1994).

#### *4.3.4.4 L'érodibilité des terres*

En 1935, Hjulström a étudié l'érodibilité des matériaux terreux en fonction de leur texture et de la vitesse des écoulements dans des canaux. Il a pu montrer qu'il existait trois zones: la zone supérieure d'érosion, passant par un minimum vers 100 microns, la zone inférieure de sédimentation, et entre les deux, une zone de transport. L'érosion démarre pour une vitesse minimum de 25 cm par seconde lorsque la texture du matériau des berges est d'environ 100 microns, c'est à dire la taille des sables fins pour lesquels le poids est plus faible que celui des

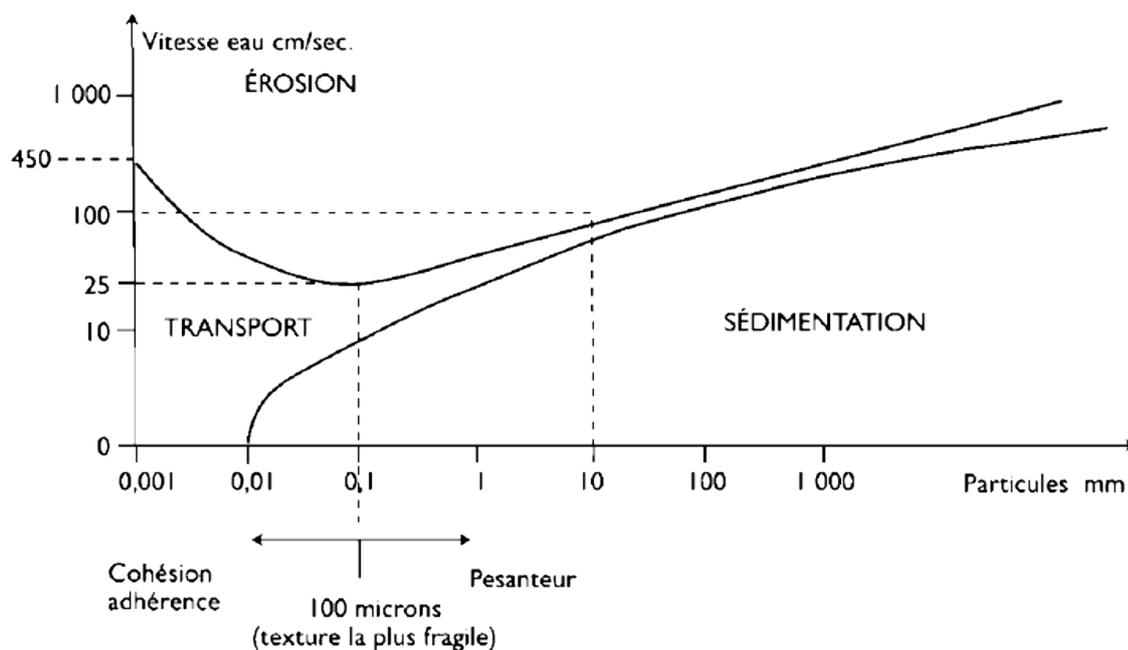


Figure 12: Diagramme de Hjulström sur l'érodibilité des terres

sables grossiers et les cailloux et la cohésion est plus faible que celle des limons et des argiles. La vitesse minimum de l'eau provoquant l'érosion est de l'ordre de 25 cm/seconde. On constate donc que les matériaux les plus fragiles, ici des sables fins, sont légèrement plus grossiers que dans le cadre de l'érosion en nappe, pour lequel les matériaux les plus fragiles sont compris entre 10 et 100 microns (Wischmeier, Johnson et Cross, 1971). Voilà pourquoi le ruissellement en nappe qui se déplace à moins de 25 cm/sec n'entraîne le déplacement que des particules fines et des particules légères détachées par la battance et laisse sur place les sables grossiers. Par contre, lorsque le ruissellement est concentré, l'érosion n'est plus sélective, la vitesse augmente, l'énergie du fluide également, qui creuse des rigoles. Lorsque la pente augmente, l'énergie du ruissellement augmente et devient supérieure à l'énergie de l'érosion en nappe. La forme d'énergie évolue vers la formation de rigoles et de ravines, c'est à dire un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles sur la largeur concernée par les chemins d'eau

#### 4.3.5 Effets négatives et Conséquences

##### 4.3.5.1 Au niveau du BV

Cette forme d'érosion est peu visible sur photos aériennes ou sur cartographies, ce n'est que sur terrain qu'on a pu constater les conséquences de celle-ci. Essentiellement, ces conséquences sont de l'ordre topographique et structurel, et on peut citer le décapage de façon non sélective du sol, ainsi que l'accélération de la fonte de l'horizon humifère.

On a aussi pu remarquer que cette forme d'érosion est entraînée essentiellement par la création de piste sur ces sols fragiles du versant. Ces pistes, lorsqu'elles sont dans le sens de la pente, deviennent rapidement des ravines, et sont alors déviées vers une piste parallèle qui est attaquée à son tour. Mais ces phénomènes sont heureusement limités, compte tenu de la faible circulation constatée sur ces BV.

La formation de ces rigoles et ravines constituent aussi une gêne au niveau de la circulation du bétail (avec l'élevage extensif pratiqué dans la région) et de la population, créant par la suite de nouvelles pistes et donc des érosions nouvelles.

#### 4.3.5.2 *Au niveau des ressources en eaux*

Les érosions linéaires en rigoles et ravines n'ont pas de conséquences notables sur les ressources en eaux du BV. Mais, les grandes ravines peuvent, cependant, rabattre la nappe phréatique et provoquer le dessèchement du bas fond.

#### 4.3.5.3 *Au niveau du périmètre irrigué*

Cette forme d'érosion est limitée, comme on l'a fait remarquer plus haut, et se localise principalement dans la partie amont du BV. Donc, les impacts directs, et même indirects, sur les ouvrages du réseau aval sont estimés très faibles.

Toutefois, un cas isolé et récent est à signaler, car à causer de dégâts directs considérables aux ouvrages du réseau. Une petite ravine s'est formée au droit du coursier n°1 à Ambario sapant ce dernier et le laissant en porte à faux sur une dizaine de mètres.



Photo 4 (gauche): Coursier n°1 en porte-à-faux\_effet du ravinement en rive droite (Source: auteur\_juillet2014)

Photo 3 (droite): Ravinement en rive droite du coursier n°1 (Source: auteur\_juillet2014)

## 4.4 Erosion en Sakasaka

### 4.4.1 Description

Les Sakasaka sont des formes d'érosion spectaculaire résultant du développement linéaire des ravines vers l'aval sur les sols fragiles caractéristique de notre bassin versant.

Ils se présentent comme des torrents intermittents à régime d'oueds et écoulement rarement permanent. Les crues sont brutales et peuvent être importants, mais de durée limitée suivis d'un tarissement quasi-total.

Pour la morphologie, les sakasaka présentent des lits plus ou moins larges (allant jusqu'à une vingtaine de mètres en général, mais on a pu rencontrer 2 sakasaka d'une centaine de mètres de large pour le Beheoky !!) encombrés de sable blanc lavés, et de parois abruptes plus ou moins profondes atteignant parfois une dizaine de mètres, de couleur rouge ou beige ou blanchâtre selon la nature de la roche mère originelle.

La pente longitudinale varie de 2 à 5% en général dans l'ensemble du bassin, mais même faible, sur une longue distance, augmente la force des eaux de ruissellement et permet le transport des sables.

Etant donné la brutalité des crues, il n'est pas étonnant de voir les berges de ces sakasaka sapées à la base.

### 4.4.2 Manifestations et Effets dommageables des Sakasaka

Malgré la géologie particulière du BV, on a constaté que la géométrie générale des sakasaka n'a quasiment pas changé si l'on compare les cartographies aériennes des études de 1968, 1994 et 2007. La forme et la longueur des différents sakasaka sont pratiquement les mêmes qu'il y a 50 ans.

On en déduit alors que les différents transports de sables constatés proviennent d'un approfondissement du lit ou d'attaques latérales ponctuelles des berges, mais non d'une extension des ravines en tête des sakasaka.

Cependant, une attention particulière est à porter à l'évolution des sakasaka d'Ambinda, de Makapapa et de l'Horia qui sont à l'origine des principaux dépôts de sables intervenus dans le canal, ainsi que la destruction même des ouvrages du réseau (siphon, canal principal), et donc l'arrêt de l'irrigation du périmètre.

Le dépôt de sable dans le canal principal occasionné par le sakasaka d'Ambinda est estimé à environ 4000 m<sup>3</sup>. Ceci est dû, sans doute, au changement de lit constaté de celui-ci : initialement, ce sakasaka traversait le canal par le siphon n°3 mais a changé de lit à l'intérieur de son delta et est venu aboutir au droit du pont bêche n°3 dont la dimension était bien insuffisante pour le contenir. Le résultat a été la quasi-disparition du canal principal sur plus d'une centaine de mètres, ainsi que l'ensevelissement du siphon sous un bon mètre de sable par rapport à la tête de sakasaka. Ce changement de lit de l'Ambinda a causé des dommages considérables au niveau du coursier n°1.

En fait, le problème vient ici du fait que le cours n'a quasiment pas de débouché en aval du canal, que ce soit d'ailleurs en aval du siphon ou du pont bêche. Cette absence de débouché

a entraîné une diminution des vitesses d'écoulement qui a abouti à un tel dépôt que le cours de l'Ambinda s'est retrouvé dans une situation perchée, donc instable, au centre de son delta. Et donc, chaque crue importante (notamment ceux en période cyclonique) abouti à un changement de lit à l'origine des problèmes constatés (bouchage du canal principal, ensablement des parcelles en aval direct du canal).

Le problème sur le sakasaka de Makapapa est identique à celui d'Ambinda : un dépôt excessif de sable provoquant le perchage de son cours. Le sakasaka déborde alors en contournant le pont bêche n°5 destiné à le contenir, encombrant ainsi le canal a en aval de ce dernier sur une soixantaine de mètre, soit de l'ordre de 700 à 800 m<sup>3</sup> de sable.

Pour le cas du sakasaka Horia, on constate nettement l'approfondissement de son lit au niveau du siphon n°5 : les fondations du muret de protection en rive et ceux des murs de protection des têtes de siphon deviennent apparentes.

Etant donné que ce phénomène se constate exactement à l'aval du confluent des cours de l'Horia (le cours principal + un cours secondaire qui a pris de l'importance ces dernières années), on pourrait admettre l'hypothèse que cet approfondissement de lit est dû à l'effet de l'accroissement brusque du débit d'écoulement à ce niveau, entraînant par la suite l'aggravation de l'érosion du lit par le mécanisme de transport solide. Ceci conjugué au rétrécissement de la section d'écoulement au niveau du siphon engendrant l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

En aval du siphon, l'obstruction du débouché du sakasaka a entraîné la déviation de celui-ci à son droit amenant l'ensablement d'environ 4 ha de parcelle rizicole.

Plus loin, un cours secondaire du sakasaka de l'Horia a endommagé considérablement le canal principal au niveau du pont bêche n°7 en le contournant en son amont, entaillant la berge sur une dizaine de mètres et encombrant fortement de sable le canal. Ceci est dû notamment à l'approfondissement de la piste d'entretien qui longe le droit du canal mettant le pont bêche servant à acheminer ces eaux sauvages en situation perchée, donc non-fonctionnel.



Photo 5: Contournement des eaux sauvages de l'Horia au niveau du pont bêche n°7



Photo 6: Sakasaka Horia traversant le siphon n°5

#### 4.5 Conclusion partielle

Malgré que l'érosion en nappe constitue plus de 90% du phénomène d'érosion hydrique rencontrée dans le BV, on remarque nettement que c'est l'érosion en sakasaka qui cause le plus de dommage sur les ouvrages du réseau.

La fréquence et l'importance de ces attaques du canal et de ses ouvrages de franchissement sont liées à la violence des crues, fonction directe de l'état du BV considéré ainsi que l'état morphologique du cours des sakasaka. Ainsi, toute action d'aménagement du BV qui permettrait de réduire l'importance de ces crues (en favorisant l'infiltration par exemple) conjuguée à un aménagement efficace de la traversée du cours des sakasaka (creusement d'un chenal aval vers la rivière Taheza, rétablissement des endiguements et fossés de ceinture, élargissement du pont bêche...), aura donc une importance vitale pour le devenir de ce périmètre.

## Chapitre 5: **ETUDE QUANTITATIVE DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN**

Nous examinerons ici, d'un point de vue quantitatif, le phénomène complexe de l'érosion hydrique du BV.

Pour l'érosion en nappe, l'approche adoptée consiste en deux points :

- d'une part, à quantifier l'érosion par la méthode de Wischmeier (modèle USLE),
- et d'autre part, à rechercher un modèle régressif pouvant expliquer la relation *perte en terre – ruissellement* pour le BV à partir de données issus d'expérimentations in-situ.

En ce qui concerne l'érosion en sakasaka, l'approche adoptée consiste :

- d'une part, à quantifier le transport solide total du sakasaka par des formules expérimentales,
- et d'autre part, à définir une méthode d'analyse de l'évolution et du transport solide des sakasaka par une approche topographique in-situ.

### **5.1 ESTIMATION DE L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS A L'AIDE DE L'EQUATION UNIVERSELLE DE PERTE DE SOL DE WISCHMEIER (modèle USLE)**

#### **5.1.1 Présentation du modèle**

Une estimation de la perte en terre due à l'érosion hydrique sur notre bassin versant sera faite à l'aide du modèle RUSLE de l'équation universelle de perte en terre de Wischmeier. C'est un modèle relativement simple à mettre en œuvre et a l'avantage de prendre en compte tous les facteurs connus intervenants dans le processus d'érosion.

Historiquement, l'USLE est un modèle empirique élaboré en 1960 par Wischmeier, statisticien au sein du service américain de conservation du sol (*U.S. Soil Conservation Service*), et mis à jour avec Smith en 1978. Elle a été obtenue par l'analyse et la modélisation des dizaines de milliers de données provenant des parcelles expérimentales d'érosion implantés sur le sol américain dans les années 50 (plus de 100.000 parcelles/années dans 49 endroits aux USA ont été suivis pendant plusieurs années).

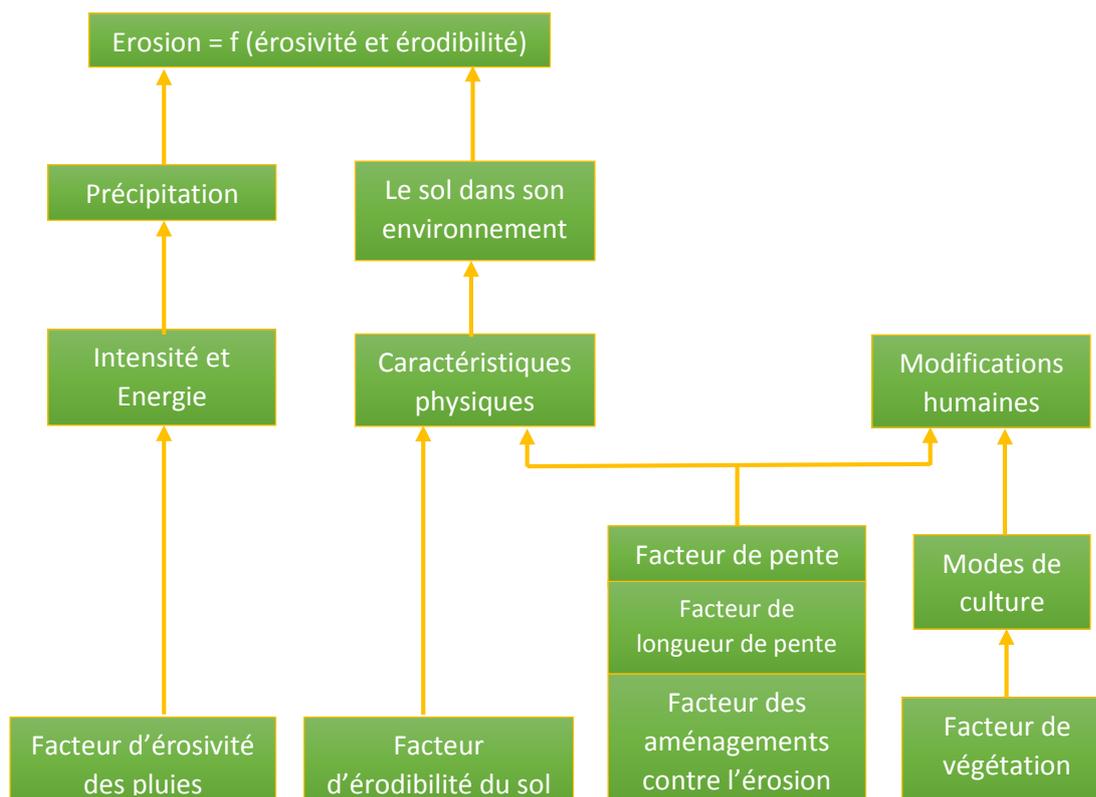


Figure 13: L'érosion fonction de l'érosivité des pluies et de l'érodibilité du sol

Ce modèle de prévision présente l'érosion comme une fonction multiplicative de l'érosivité de la pluie (le facteur R) et de la résistance du milieu (les facteurs K, LS, C et P) et est constitué de cinq sous-modèles :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

**A** représente la perte en sol [t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>]

**R** est l'indice d'érosivité de la pluie [MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>]

**K**, l'indice d'érodibilité des sols [t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>]

**LS**, le facteur topographique [adimensionnel]

**C**, le facteur couvert végétal [adimensionnel]

**P**, un facteur qui tient compte des pratiques purement antiérosives [adimensionnel]

Tableau 11: Correspondance des facteurs liés à l'érosion hydrique et ceux de l'équation RUSLE

Facteur d'érosion hydrique	Représentant dans RUSLE	Notation	Unités
<b>La précipitation</b>	Facteur d'érosivité de la pluie	R	MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>
<b>Le sol</b>	Facteur d'érodibilité du sol	K	t.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
<b>La topographie</b>	Facteur de longueur et d'inclinaison de la pente	LS	Adimensionnel
<b>L'occupation du sol</b>	Facteur de végétation	C	Adimensionnel
<b>Les pratiques de conservation des sols</b>	Facteur de conservation	P	Adimensionnel