

## Caractéristiques géométriques

Les études bibliographiques sont utiles pour la compréhension de certains phénomènes. La connaissance de quelques notions sur le bassin versant va aider à comprendre l'importance de ses complexes physiques (géologie, hydrologie, géométrie, etc.).

Des notions géochimiques aident à la compréhension de la salinisation des sols ainsi que les paramètres qui caractérisent les sols salins. L'étude de la salinité des sols est primordiale pour une bonne interprétation des résultats d'analyse.

Enfin, il est incontournable de connaître l'érosion affectant la zone ainsi que d'avoir quelques notions sur l'ensablement.

### I.1 Bassin versant [06] [08]

#### I.1.1 Définition

Le bassin versant (BV) est défini comme la surface parcourue par un cours d'eau et ses affluents. Le cours d'eau prend généralement naissance dans une zone à reliefs et draine la surface topographique. Les écoulements convergent vers la section la plus basse du cours d'eau qu'on appelle exutoire.

En d'autre terme, on peut définir le bassin versant comme une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

La surface d'un bassin versant est délimitée par la ligne de partage des eaux. C'est cette ligne qui le sépare des bassins versants avoisinants (figure 1).

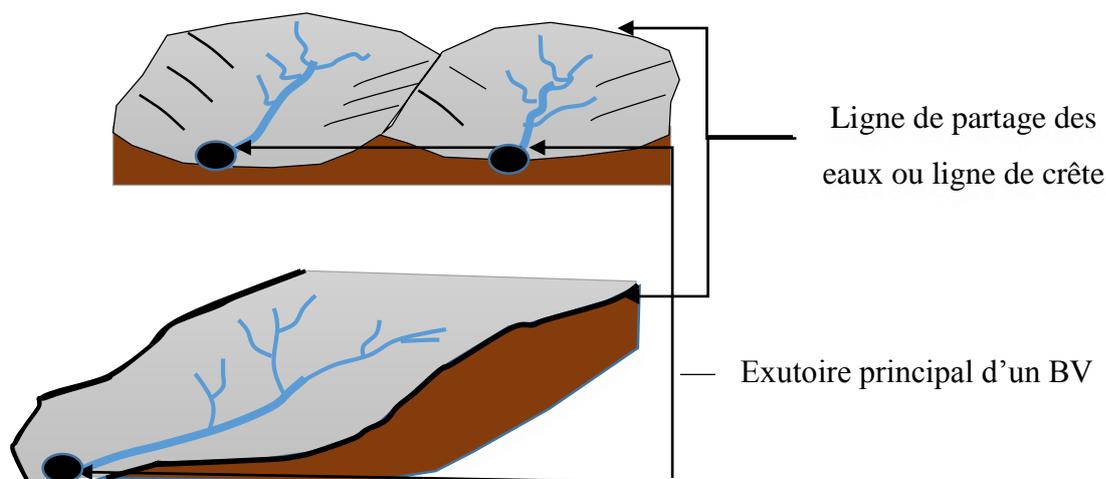
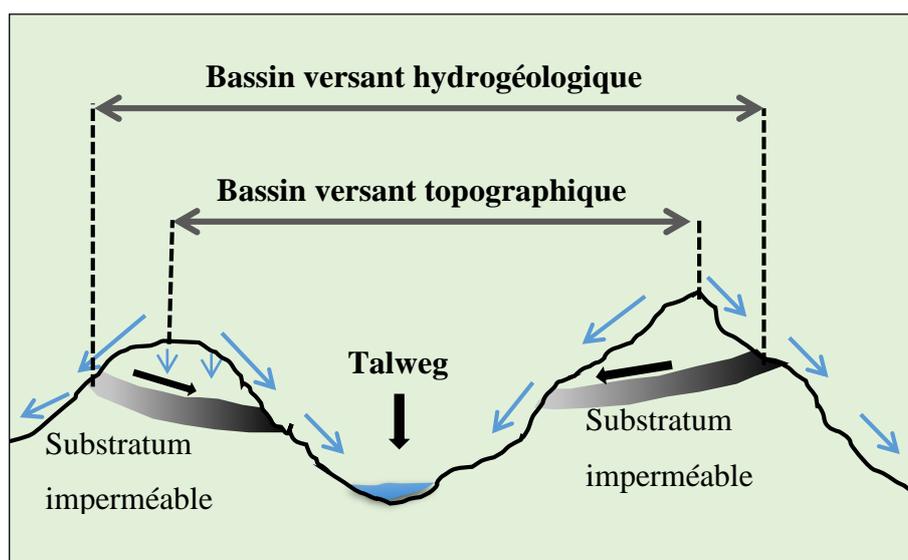


Figure 1: Bassin Versant

Le bassin est délimité par la ligne de crête. Mais selon la nature du sol recouvrant le substratum imperméable, la délimitation peut être différente. Lorsqu'il s'agit d'un sol perméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas à la ligne de partage des eaux souterraines. Un bassin versant qui est limité par la ligne de crête s'appelle un bassin versant topographique qui est différent du bassin versant hydrogéologique qui est le bassin versant réel délimité en fonction du substratum imperméable (figure 2).



**Figure 2:** Bassin Versant hydrogéologique et Bassin Versant topographique

### I.1.2 Fonctionnement

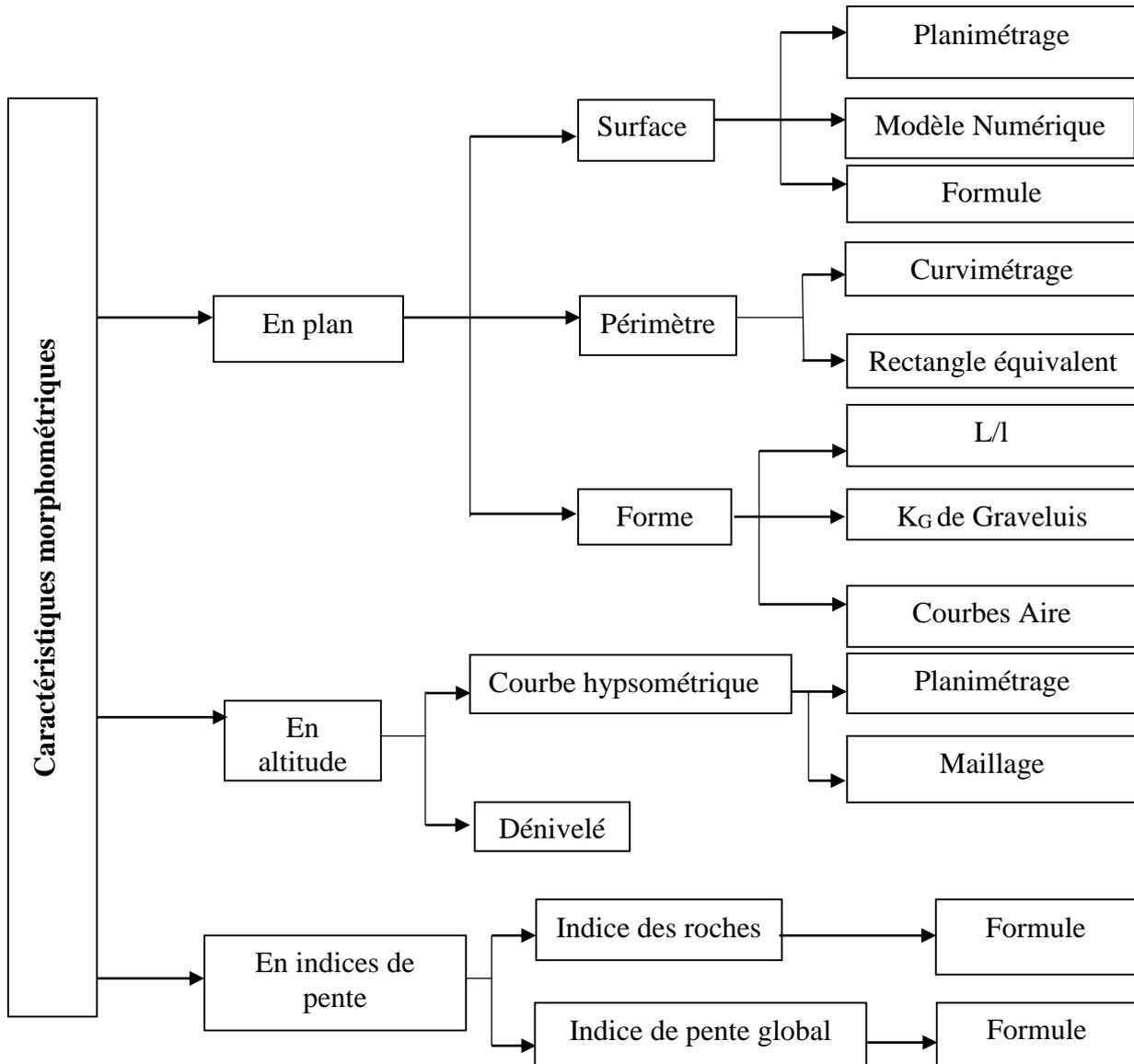
Le fonctionnement du BV est donc lié à la nature du sol et du sous-sol. Pour des terrains perméables et fissurés, il y a une domination de l'infiltration. Par contre, lorsque les terrains sont imperméables, les ruissellements dominent le BV.

En général, un bassin possède un exutoire unique, mais peut avoir plus d'un exutoire lorsqu'ils sont pourvus d'un lac possédant plusieurs sorties (surtout lorsque les eaux sont hautes).

Un bassin peut aussi n'avoir aucun exutoire lorsqu'il y a accumulation de l'eau dans un lac, évapotranspiration et échanges souterrains.

Ces caractéristiques appelées aussi des caractéristiques morphométriques sont nécessaires pour la détermination et l'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant comme le débit de la rivière, lame d'eau précipité, etc.

L'organigramme suivant montre les différentes méthodes utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques d'un BV, c'est-à-dire la surface ou superficie du BV, le périmètre, la forme, la pente, etc.



**Figure 3:** Méthode pour déterminer les caractéristiques d'un Bassin Versant

Source : [08]

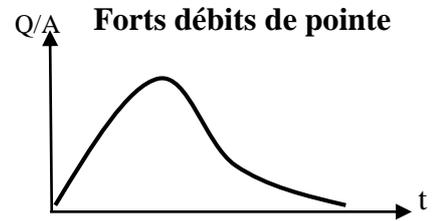
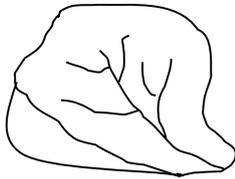
### I.1.3.1 Surface

La surface d'un bassin versant constitue l'aire de la réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Son unité de mesure est le kilomètre carré (km<sup>2</sup>). Pour sa détermination, on peut utiliser trois méthodes dont la planimétrie, les méthodes numériques et aussi par l'intermédiaire de formules.

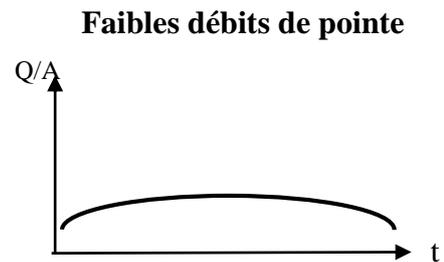
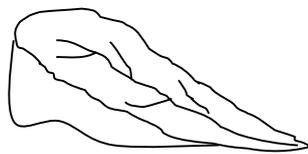
### I.1.3.2 Forme

La forme d'un bassin versant joue un grand rôle pour l'allure de l'Hydrogramme à l'exutoire du bassin (figure 3).

**Bassin en forme d'éventail**



**Bassin en forme allongé**



**Figure 4:** Hydrogramme de crue selon la forme d'un Bassin Versant

Source : [06]

Q : débit

A : surface du bassin

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'Hydrogramme résultant d'une pluie donnée. Cette caractéristique est donnée par l'indice de Graveluis qui a proposé en 1914 le coefficient de compacité défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface dont la formule est la suivante :

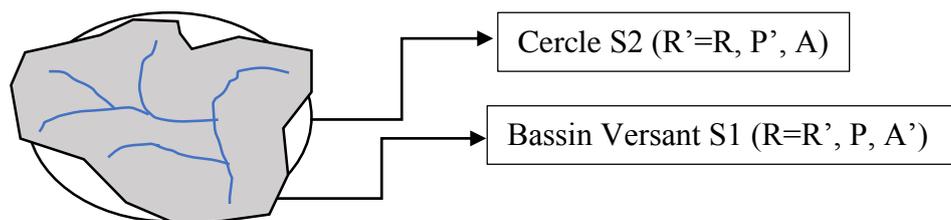
$$K_G = \frac{P}{P'} = \frac{P}{2\pi R'} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

**P** : périmètre du bassin versant S1

**A** : surface du bassin versant S1

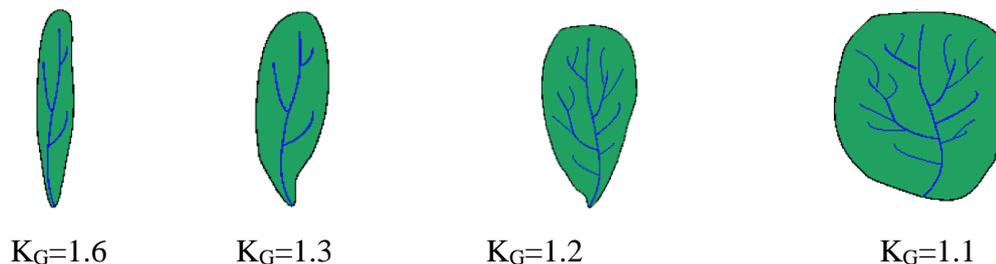
**P'** : périmètre du cercle S2 ayant la même surface que S1

**R'** : rayon du cercle S2 ayant la même surface que S1



**Figure 5:** Détermination de la forme d'un Bassin Versant

Le coefficient  $K_G$  de Graveluis est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée, et proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire.



**Figure 6:** Différentes formes d'un Bassin Versant selon l'indice de Graveluis

Source : [08]

### I.1.3.3 Topographie du Bassin Versant (relief)

Le relief représente la répartition de la surface du bassin en fonction de son altitude. Il peut être déterminé en utilisant deux méthodes :

- Polygones des fréquences altimétriques
- Courbe hypsométrique

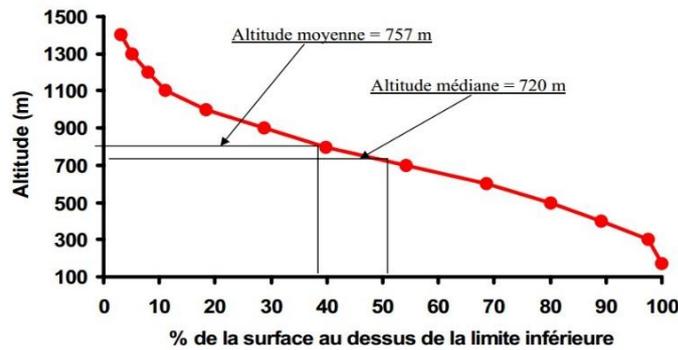
Les éléments à considérer pour la topographie d'un bassin versant sont les altitudes caractéristiques qui sont les altitudes maximales, minimales et moyennes.

La courbe hypsométrique exprime la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie au-delà d'une certaine altitude (tableau 2 et figure 6). La courbe permet de connaître l'altitude moyenne à partir de l'axe des ordonnées et l'altitude médiane qui est obtenu à partir de l'axe des abscisses qui présente le pourcentage de la surface au-dessus de la limite inférieur.

**Tableau 1 :** Répartition par tranche d'altitude de la surface du bassin du Loukkos, Maroc

Tranches d'altitudes	Surface km 2	Pourcentage	% de la surface au-dessus de la limite inférieure de la tranche d'altitude
170 - 300	500	2.41	100
300 - 400	1750	8.43	97.6
400- 500	1900	9.16	89.16
500 - 600	2400	11.57	80.00
600 - 700	3000	14.46	68.6
700 - 800	2970	14.31	54.1
800 - 900	2270	10.94	39.8
900 -1000	2180	10.51	28.8
1000 -1100	1500	7.23	18.3
1100 -1200	640	3.08	11.1
1200 -1300	610	2.94	8
1300 -1400	410	1.94	5
1400 -1800	610	2.99	3

Source : [06]



**Figure 7:** Exemple d'une courbe hypsométrique (Loukkos, Maroc)

**Source :** [06]

Concernant sa détermination, on peut utiliser la planimétrie des surfaces comprises entre certaines tranches d'altitudes.

Les altitudes minimale ( $h_{\min}$ ) et maximale ( $h_{\max}$ ) sont obtenues directement en utilisant des cartes topographiques. Pour la détermination de l'altitude moyenne, voici la formule qu'on peut utiliser :

$$\bar{h} = \sum \frac{A_i * h_i}{A} \quad (2)$$

$\bar{h}$  : Altitude moyenne du bassin (m)

$A_i$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau ( $\text{km}^2$ )

$h_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau

$A$  : Superficie totale du bassin versant ( $\text{km}^2$ )

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

La pente moyenne du bassin versant donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration, et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. La méthode d'évaluation peut s'effectuer par la lecture d'une carte topographique suivie de l'application des formules suivantes :

$$I_m = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{P/2} \quad (3)$$

$I_m$  : pente moyenne [m/km ; 0/00]

$P$  : périmètre du bassin

$$i_m = \frac{D * L}{A} \quad (4)$$

$D$  : équidistance entre deux Courbes de Niveaux [m]

$L$  : longueur totale des Courbes des Niveaux [m]

$A$  : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ]

On peut aussi évaluer la pente à partir des données numériques représentant la topographie des bassins versants en utilisant le Modèle Numérique d'Altitude.

#### **I.1.4 Réseaux hydrographiques**

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. C'est l'une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Ce réseau peut prendre une multitude de formes et la différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux dont la géologie, le climat, la topographie et le facteur anthropique.

##### **I.1.4.1 Géologie**

Par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à des roches ignées (magmatiques et métamorphiques). La structure de la roche, sa forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.

##### **I.1.4.2 Climat**

Le climat joue un rôle important pour l'hydrologie d'un bassin versant. Le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

##### **I.1.4.3 Topographie (érosion, sédimentation)**

La pente du terrain détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

##### **I.1.4.4 Anthropique (drainage, barrages, endiguement)**

Les êtres humains participent à l'évolution du réseau hydrographique d'un bassin versant. En effet, le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

## I.2 Salinisation des sols [09] [10]

### I.2.1 Généralités

Les problèmes de salinisation des sols peuvent devenir très importants et induire de très fortes diminutions de production au champ jusqu'à des abandons, en général, définitifs de périmètres. Tout agriculteur en système irrigué des zones chaudes doit veiller tout particulièrement à ce phénomène.

Selon Al-Khaier (2003): « afin de prendre des mesures de redressement et développer un système d'irrigation durable, il est important de savoir quand et comment les phénomènes de la salinité et/ou de la sodicité se manifestent ». Les gestionnaires, les scientifiques et les ingénieurs ont besoin d'information sur l'étendue, l'ampleur et la distribution spatiale de la salinité et de la sodicité pour mettre au point une action de redressement appropriée.

Les techniques conventionnelles pour identifier et surveiller la salinité des terres agricoles sont basées sur la mesure des niveaux d'eau dans les forages, des mesures géophysiques, des mesures des propriétés électriques de sol et l'identification visuelle.

Selon Richards (1954), les sols salins ont une CE de plus de 4 mmhos/cm à 25°C et un pH de moins de 8,2.

Par définition, la salinisation des sols est un processus d'accumulation des sels à la surface du sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et les sols; il s'en suit une diminution des rendements et, à termes, une stérilisation du sol. En d'autre terme, il s'agit de la concentration de sels neutres dans le profil de sol, en quantité suffisante pour affecter ses aptitudes agronomiques (augmentation de la pression osmotique provoquant un stress hydrique de la plante).

### I.2.2 Caractérisation géochimique des sols salés

#### ➤ Sols salins

Lorsque les sols reçoivent un excès de sels solubles, il y a échange entre l'ion sodium  $\text{Na}^+$ , l'ion calcium  $\text{Ca}^{++}$  et l'ion magnésium  $\text{Mg}^{++}$  fixés sur les minéraux argileux. Le taux de  $\text{Na}^+$  échangeable tend vers une certaine valeur limite qui est en relation avec l'équilibre cationique de l'eau.

$$\text{ESP} = \% \text{Na échangeable} = \frac{100 (-0.013 + 0.015 \text{ SAR})}{1 + (-0.013 + 0.015 \text{ SAR})} \quad (5)$$

SAR désigne le taux d'absorption du sodium caractéristique de l'eau, obtenue par la formule suivante :

$$SAR = \frac{C^{\circ} Na}{\sqrt{\frac{C^{\circ} Ca + C^{\circ} Mg}{2}}} \quad (6)$$

$C^{\circ}$  : concentration

Les sols sont dits salins lorsque la conductivité électrique est supérieure 4mmhos/cm,  $ESP < 15\%$  et que le pH est inférieur à 8.5. Généralement, le taux de  $Na^{+}$  est moins de 50% si les  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  sont très variables. Les principaux anions sont des  $Cl^{-}$ ,  $SO_4^{--}$  et rarement  $NO_3^{-}$  ou  $HNO_3$ . Le Gypse ( $SO_4Ca, 2H_2O$ ), les carbonates de Calcium et Magnésium ont des sels à faible solubilité.

#### ➤ Sols salins-alcalins

Il s'agit des sols qui ont une  $CE > 4mmhos/cm$ , avec  $ESP > 15$  et qui ont une double propriété : sol à la salinisation et à l'alcalisation. Ces sols ont les mêmes propriétés que les sols salins.

Les sols alcalins (basiques) sont des sols non salés à alcali.

### I.2.3 Causes de la salinisation des sols

La forte utilisation des ressources en eau de surface et souterraine sont les causes principales de la salinité et de la dégradation du sol dans les régions arides et semi-arides (Postel, 1999). Entre autres, l'impact des changements climatiques et du réchauffement de la planète a des répercussions graves sur l'agriculture dans ces régions en ce qui a trait au cycle de l'eau.

La salinité se mesure par la conductivité électrique en siemens **S**, sachant que :

**1 dS/m = 1 mmhos/cm = 1mS/cm = 0.1 S/m = 1000  $\mu$ S/cm**, unité de résistance électrique.

La conductivité de l'eau peut être rapidement convertie en mg de sel par litre par la formule :

**1dS/m = 1mS/cm = 640 mg/l de sels.**

La classification la plus couramment utilisée est celle fournie par le « US salinity laboratory ». Les sols sont classifiés en fonction de leur salinité selon la conductivité électrique d'un échantillon de sol saturé en eau. 5 catégories de salinité sont distinguées: 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 et  $> 16$  mmhos/cm. Les rendements de riz commencent à baisser à partir de 3 mmhos/cm. Pour l'eau d'irrigation, une autre classification donne des limites pour les usages agricoles et humains.

## **I.2.4 Mécanismes de salinisation**

On définit en général deux types de salinisation, la salinisation primaire et la salinisation secondaire.

### **I.2.4.1 La salinisation primaire**

Elle résulte de la présence initiale de sels dans le sol ou dans la nappe phréatique. On appelle salinité primaire la salinité naturelle causée par la chimie de la roche mère. Les apports d'eau importante due à l'irrigation du riz peuvent élever le niveau de la nappe phréatique et l'amener près de la surface du sol.

Pendant la période de culture du riz, le problème ne se manifeste pas trop car la percolation des eaux d'irrigation nettoie le sol en surface. Mais, entre deux cultures de riz, lorsque le sol est asséché, il se crée alors un flux d'eau chargée en sels vers la surface du sol à travers des remontées capillaires. Après évaporation de l'eau en surface, les sels se concentrent à la surface du sol. Plus la nappe phréatique est chargée en sels, plus le phénomène est important et rapide.

Dans des sols argileux comme ceux de la basse vallée du fleuve, on considère que ce phénomène de capillarité peut aller jusqu'à plus de 1 m de profondeur. Si la nappe saline est à moins de 1 m de profondeur, les sols se salineront.

Si la nappe phréatique salée affleure à la surface du sol, le processus de salinisation sera extrêmement rapide et impossible à éviter.

### **I.2.4.2 La salinisation secondaire**

Elle résulte, des apports de l'eau d'irrigation. La salinité secondaire est le plus souvent le résultat de systèmes d'irrigations mal adaptés aux circonstances environnementales locales.

Une culture de riz consomme sur la durée d'un cycle environ 2 m d'eau ou 20 000 m<sup>3</sup>/ha. Même si l'eau peut avoir une faible teneur en sels et donc être considérée comme bonne pour l'irrigation, étant donné les besoins en eau des cultures, les apports de sels à la parcelle sont loin d'être négligeables.

Si les parcelles ne sont pas régulièrement et correctement drainées, des sels s'accumulent dans le sol dont la concentration s'accroît progressivement. L'irrigation peut aussi provoquer l'apparition de nappe perchée à faible profondeur (environ 1 m et moins) dans le cas des sols les plus argileux ou s'accumulent les reliquats des eaux d'irrigation qui ne se sont pas évapo-transpirées. Ces nappes sont donc très chargées en sels qui, entre deux cultures, peuvent remonter à la surface du sol par capillarité. Cette nappe perchée peut aussi être rejoint par la nappe phréatique en cours de

culture. Enfin cette nappe perchée, même si la perméabilité des sols est très faible se déplace des zones élevées vers les zones basses. Les zones les plus basses sont en général les premières atteintes par l'apparition de poches de salinité allant en s'accroissant.

### **I.3. Notion sur l'ensablement**

#### **I.3.1 Ensablement [22]**

Selon la définition des matériaux granulaires en géologie, le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier). Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail.

On parle d'ensablement lorsque les grains de sable sont transportés par des mécanismes physiques (vent et/ou eaux) et s'accumulent sur le littoral, au bord des cours d'eau et sur des terres cultivées ou incultes. En se déplaçant, les accumulations de sable (dunes) ensevelissent les villages, routes, oasis, cultures, jardins maraîchers, canaux d'irrigation et barrages, entraînant ainsi des dégâts matériels et socio-économiques très importants. Des programmes de lutte contre cet ensablement doivent alors être mis en œuvre pour endiguer la gravité de cette situation.

Pour établir ces programmes, il est essentiel de connaître les facteurs et de comprendre les processus qui favorisent la formation et le déplacement des masses sableuses, à savoir le vent et le sol.

Les sources de sable peuvent être différentes :

- Le sable autochtone: les sources de sable peuvent être locales
- Le sable allochtone: l'origine du sable est lointaine
- Le sable auto-allochtone : l'origine du sable est mixte c'est-à-dire locale et lointaine

#### **I.3.2 Erosion à Marovoay [15] [18]**

D'une façon générale, en géomorphologie, on peut définir une érosion le processus de dégradation et de transformation du relief qui est causé par tout agent externe autre que la tectonique. L'érosion des Bassins Versants représente un risque important pour l'agriculture. Selon le Programme de Lutte Anti Erosive (PLAE), la dégradation des sols provoque, non seulement la réduction de la superficie exploitable sur tanety mais cause aussi, d'une manière

assez spectaculaire dans beaucoup de région de Madagascar, un ensablement important des rizières et des réseaux hydro-agricoles [15].

Donc, si on parle de l'érosion affectant le District de Marovoay, il s'agit de savoir tous les facteurs entraînant les modifications géomorphologiques du relief.

Plusieurs peuvent être les facteurs de l'érosion :

- le climat
- le relief
- la physique (dureté) et la chimie (solubilité par exemple) de la formation érodée
- l'absence ou non de couverture végétale et la nature des végétaux
- l'histoire tectonique (fracturation par exemple)
- l'action de l'homme (pratiques agricoles, urbanisation).

Généralement, les causes de l'érosion du BVM sont les suivantes :

- la déforestation
- les pratiques agropastorales (feux de brousses, gestions des ressources boisées, cultures sur pente, etc.)
- la condition climatique de la région qui favorise l'ensablement durant la saison de pluie s'il n'arrive pas à maintenir la végétation durant la saison sèche.

De ce fait, les sols sont donc facilement envahis par l'érosion et subissent diverses conséquences. Sur tanety, il y a la raréfaction de la couverture végétale dans les périmètres rizicoles. Des parcelles de culture situées en bordure des tanety sont ensablées ou menacées d'ensablement. Dans les villes, dans les fonds de vallons et surtout dans le Parc d'Ankarafantsika, il y a la perte des végétations arborées [18].

### **I.3.2.1 Le Lavaka**

Par définition, un Lavaka est un terme venant de Madagascar qui veut dire un ravin à flanc escarpé des pays tropicaux.

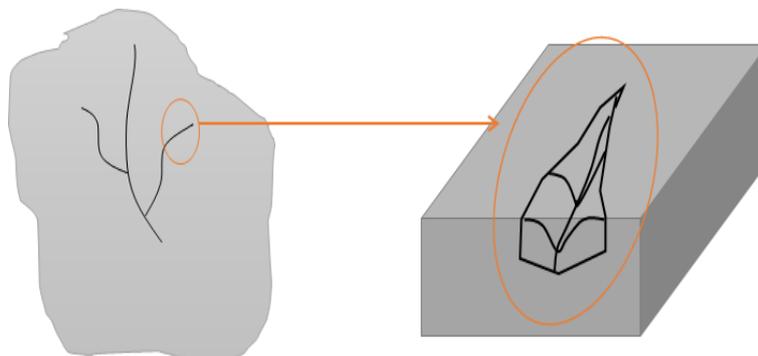
Selon PLAE, le type de Lavaka le plus commun se présente sous la forme d'un entonnoir vide, avec la partie large se situant sur le haut de la colline et la partie effilée sur le bas se rétrécissant jusqu'à 1/1000 de leur grosseur maximale. Comme le cas des Lavaka qu'on rencontre sur le Sous Bassin Versant de Mantsamandevy en Rive gauche de la Betsiboka, ils atteignent jusqu'à 300 mètres de long, 75 mètres de large et 20 mètres de profondeur.

Le degré d'érosion occasionnée et les sédiments transportés depuis les Lavaka s'avèrent considérable estimés à environ 2900 tonnes par hectare par an selon le PLAE. Mais aucun chiffre

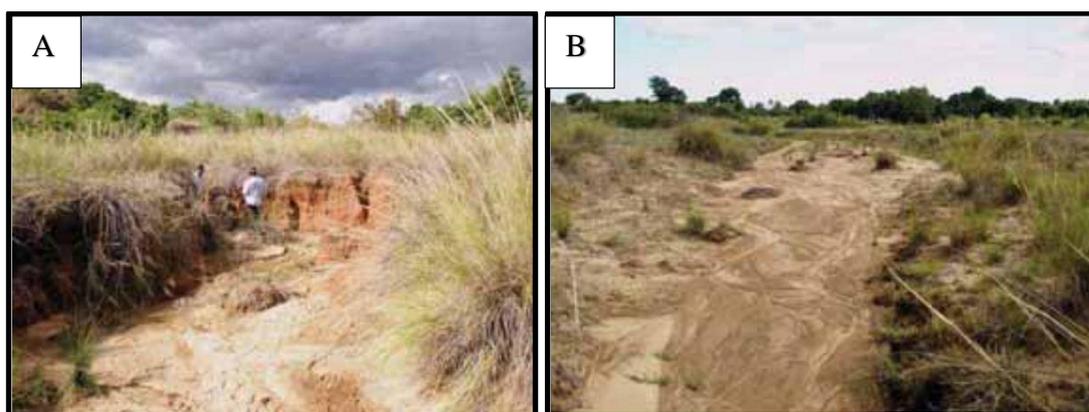
officiel n'existe sur les dégâts affectant les plantes, les clôtures, et même les barrages de gabions qui peuvent être littéralement emportés par le phénomène de formation de Lavaka. Pour la stabilisation d'un Lavaka il est donc évident de se préparer à des coûts et à des risques considérables.

### I.3.2.2 Le ravinement

Un ravinement est un creusement irrégulier de la surface topographique, typiquement par de nombreux petits talwegs à flancs raides (rigoles, ravines) entaillant des matériaux meubles. Ce type d'érosion est donc causé par l'intensité des gouttes de pluies tombées qui accentue la vitesse de l'eau et donc entraînant le ruissellement. Si l'érosion en griffe n'est pas effacée, les griffes causées par une concentration du ruissellement se développent en ravine qui peut avoir une taille assez importante, de 0.5 m à 5 m (photo 1).



**Figure 8:** Erosion par ravinement



**Photo 1:** Erosion affectant Marovoay

**A :** Ravine dans le site de PLAE à Tsarahonenana ; **B :** Une ravine sur le site de Morarano

Tout type d'érosion est présent dans le BV de Marovoay. Il y a l'érosion sous forme d'ablation aréolaire ou linéaire qui est remarqué par plusieurs symptômes sur terrain. Il y a aussi l'érosion sous forme d'accumulation (Tableau 2).

**Tableau 2: Les différentes formes d'érosion de Marovoay**

Forme	Type d'érosion	Dénomination	Symptômes sur terrain	Dimensions
Ablation	Aréolaire	- Micro buttes - Micro marche d'escalier	- lavage et décapage des surfaces - abaissement du niveau du sol - squelettisation du sol - Plage de couleur claire - Déchaussement de racine - Ecoulement de faible épaisseur, lent, non hiérarchisé, variable dans le temps et dans l'espace	
	Linéaire	- Griffes - Rigoles	- petites incisions : ravineaux - chenaux anastomosés temporaires - ébauche d'organisation de l'écoulement	mm à cm
		Ravines	Incisions de plus en plus en grandes et profondes	Y:0.5m à 1.50m W : 5 à 10m L : 10 à 20m
		Ravins		Y : 2m à 10m W : 10 à 20m L : 200 à 1000m
Lavaka	Forme ovoïde à creusement linéaire, latéral et Vertical	Dam à km		
Accumulation			- accumulations sableuses - les rivières de sable - ensablement des canaux et des parcelles	

Source : [16]