

### V.2.1.2 Solution d'attaque

- Commencer l'attaque en introduisant peu à peu 50ml de HCl 50% dans le creuset puis rincer à fond le creuset et son couvercle avec la même solution de HCl 50%, tout en récupérant la solution d'attaque et de lavage dans la capsule en porcelaine.
- Après le dégagement gazeux, rincer de nouveau le creuset avec un peu d'eau distillée chaude et placer la capsule sur un bain de sable (Fig.20).
- Evaporer à sec de manière à obtenir une poudre finement divisée.
- Enlever et laisser refroidir la capsule puis humecter uniformément la masse avec 50ml de HCl 10% et chauffer au bain de sable pendant 15 mn.

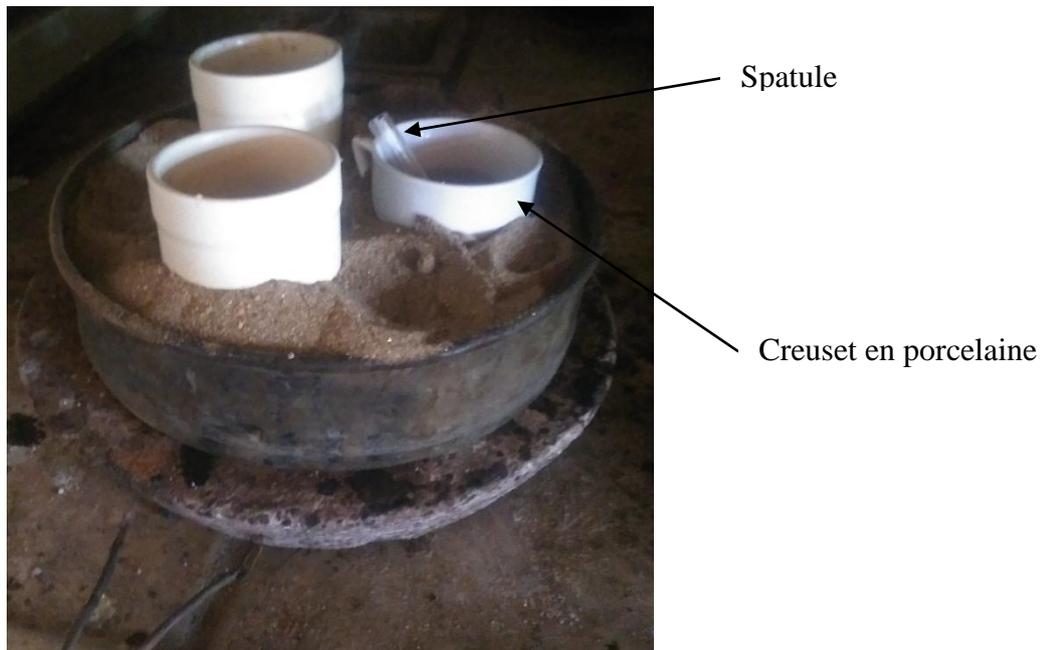


Figure.20 Creusets sur du bain de sable

### V.2.1.3 Filtration

- Filtrer par décantation sur papier filtre moyen en recevant le filtrat dans une fiole jaugée de 500ml (Photo.6).
- Laver le précipité sur le filtre avec de l'eau distillée bouillante, jusqu'à la disparition de la réaction avec  $\text{AgNO}_3$ .
- Laisser refroidir le filtrat dans un bain d'eau froide puis ajouter au tait de jauge avec de l'eau distillée.



Figure.21 Filtrats

### Détermination de la silice

- Peser le creuset en platine, soit M.
- Mettre le papier filtre et son contenu dans ce creuset.
- Laisser sécher graduellement (sur plaque chauffante).
- Calciner à 1000 +/- 25°C dans un four pendant 45 mn.
- Laisser refroidir dans un dessiccateur.
- Peser et vérifier la constance de la masse, soit M'.

### Expression des résultats

$$\% \text{SiO}_2 = (M' - M) * 100$$

M : masse de creuset vide

M' : masse du creuset et son contenu après calcination.

Le tableau 7 montre la masse du creuset à vide et la masse du creuset ajouté au contenu après calcination des échantillons des sols.

**Tableau 7:** Pourcentage en SiO<sub>2</sub> des échantillons de sols

	M'	M	% SiO <sub>2</sub>
E <sub>1</sub> (L)	48,7245	48,3055	41,5%
E <sub>2</sub> (M)	49,1824	48,7453	43,71%
E <sub>3</sub> (T)	17,0167	16,5944	42,23%

### Détermination en oxyde de Fer

Soit la solution A, la solution obtenue après les étapes suivantes :

- Pipeter 100ml de filtrat et verser dans un bécher de 600ml, puis ajouter 200ml d'eau distillée.
- Agiter avec un agitateur magnétique (Fig.22a).
- Ajouter 6 gouttes de bleu de bromophénol (jaune).
- Ajouter quelques gouttes de  $\text{NH}_4\text{OH}$  50% jusqu'à l'ombre d'un bleu foncé\*.
- Verser rapidement 20ml de  $\text{HCl}$  0,1N + 15ml de solution tampon.
- Ajouter 15 à 20 gouttes d'acide salicylique (violet-noir).
- Chauffer à 40-50°C pendant 1mn30s (ne pas dépasser 50°C).
- Titrer avec EDTA jusqu'au virage jaune-paille ;
- Faire la lecture du volume de l'EDTA versé, sur la burette graduée (Fig.22b).



Figure.22a Bécher sur un agitateur



Figure.22b Burette

\*Remarque : Le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est déterminé dans un pH entre 1,5 et 2. Comme le  $\text{NH}_4\text{OH}$  est basique, il ne faut pas traîner lors de son ajout pour avoir la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Pour 1g d'échantillon, l'expression des résultats est donnée par la formule :

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = v * f_{\text{EDTA}} / \text{Fe}_2\text{O}_3$$

v : volume de l'EDTA versé pour le dosage de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

$f_{EDTA}/Fe_2O_3$  : facteur de l'EDTA pour  $Fe_2O_3 = 0,9971$

Comme l'échantillon est de 0,5, la formule devient :  $\% Fe_2O_3 = V * f_{EDTA}/Fe_2O_3 * 2$

### Détermination de la teneur en alumine

A la solution A, ajouter :

- quelques gouttes de  $CH_3CO_2NH_4$  (coloration bleue)
- 5ml de  $CH_3CO_2H$
- 3 gouttes de complexomate de cuivre
- 10 gouttes de PAN (rose violacée)
- Porter à ébullition la solution, tout en agitant.
- Titrer avec de l'EDTA jusqu'à la coloration jaune paille.
- Lire le volume V d'EDTA versé.

Pour 1g d'échantillon, l'expression des résultats est donnée par la formule :

$$\% Al_2O_3 = V * f_{EDTA}/Al_2O_3$$

V : volume de l'EDTA versé pour le dosage d' $Al_2O_3$

$f_{EDTA}/Al_2O_3$  : facteur de l'EDTA pour  $Al_2O_3 = 0,6366$

Comme l'échantillon est de 0,5, la formule devient :  $\% Al_2O_3 = V * f_{EDTA}/Al_2O_3 * 2$

Le tableau 8 montre la lecture du volume de l'EDTA versé pour le dosage de  $Fe_2O_3$  et le dosage d' $Al_2O_3$ .

**Tableau 8:** Pourcentage en  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$  en des échantillons de sols

	E <sub>1</sub> (L)	E <sub>2</sub> (M)	E <sub>3</sub> (T)
V( $Fe_2O_3$ ) en ml	2,6	2,4	3,8
% $Fe_2O_3$	5,18	4,79	7,58
V ( $Al_2O_3$ ) en ml	7,3	5,7	4,2
% $Al_2O_3$	9,29	7,26	5,60

### V.2.2 Détermination du pH et de la Salinité

#### ➤ Détermination du pH

Le pH de la solution qui entoure les particules de terre à l'état naturel est sujet à des variations en fonction des changements dans les rapports terre/solution motivés par le climat, la culture et d'autres facteurs.

Le potentiel hydrogène (pH) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes ( $H^+$ ) en solution. Il mesure donc son acidité ou sa basicité. Le pH est le paramètre servant à définir si un milieu est acide ou basique. Il est la mesure du nombre d'ions d'hydrogène ( $H^+$ ) présents dans le sol. La mesure est effectuée au moyen d'un pH-mètre à lecture directe.

Le mode opératoire est le suivant :

Peser 20g de sols sec tamisés à 2mm dans un bécher de 100ml. Puis, ajouter 50ml d'eau distillée. Agiter solution et lui laisser agir pendant 2heures. Ensuite, étalonner le pH-mètre avec les solutions tampons. Enfin, mesurer la solution à l'aide de pH-mètre (Fig.23).



Figure.23 Filtrats Papier pH

### ➤ Salinité [13]

La salinité constitue le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau d'irrigation. La salinité globale d'une eau est sa concentration totale en sels solubles. Elle est évaluée par la mesure de la conductivité électrique (CE). Cette méthode est jugée efficace pour la quantification de la salinité des sols. La conductivité est l'inverse de la résistivité électrique. Son unité a longtemps été exprimée en mmhos.

### Agitation/lixiviation

Matériels utilisés : agitateur + bêcher (Fig.22a)

Mesurer 2 g d'échantillon. Puis, l'agiter dans 100 ml d'eau distillée pour une durée d'environ douze heures et le laisser se décâner pendant quelques heures (3 à 4 heures).

### Filtration

Matériels utilisés : bêcher, entonnoir et papier filtre

Le papier est emballé pour que le filtre de façon à ce que ce soit sans fuite. Puis le mettre dans l'entonnoir et le placer tout au-dessus du bêcher. Lorsque ces matériels sont prêts, verser doucement la solution du sol agitée dans l'eau distillée vers le papier filtre. La durée de filtration est estimée d'environ 2 à 3 heures.

### Détermination de la salinité

Premièrement, allumer l'appareil (conductimètre) en le mettant dans la position de la salinité (S). Une fois allumé, mettre dans le tube à essai la solution de sol saturée (Fig.24a), et lorsque le tube à essai sera rempli, le chiffre initialement zéro (000) va changer selon le degré de salinité de la solution en question (Fig.24b).



Figure.24a Conductimètre dans le tube à essai



Figure.24b Lecture de la conductivité

## ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES

### V.1 Matériels d'études

#### V.1.1 Les logiciels utilisés

Les logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont :

- Arcswat pour la délimitation du bassin versant ;
- ArcGIS Desktop 10.0 pour la numérisation des critères et leurs classifications ;
- IDRISI Selva 17.0 pour le calcul de la pondération des critères et la sortie de la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Alaotra ;
- ENVI4.5 pour les traitements des images satellitaires.

##### V.1.1.1 Présentation de ArcSWAT [3]

SWAT « Soil and Water Assessment Tool » est un outil d'évaluation d'un bassin versant fluvial. Il a été développé par le Dr Jeff Arnold pour le service de recherche agricole (ARS) du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA). SWAT peut analyser le BV dans toute sa globalité ou en le subdivisant en sous-bassins versants contenant des portions homogènes appelées Unités de Réponse Hydrologiques (HRU).

Il permet de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique, les sédiments et des produits chimiques sur les rendements de l'agriculture de grands bassins versants fluviaux, en mettant en exergue la nature des sols, l'utilisation du sol et la gestion sur de longues périodes de temps.

Le couplage avec le logiciel SIG (ArcMAP) permet de gérer des données de type raster et vecteur. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation.

##### V.1.1.2 L'Arcgis

L'Arcgis est constitué des interfaces suivantes: ArcMAP, ArcCatalog et ArcToolbox. ArcCatalog est un gestionnaire. Il permet de parcourir, d'organiser, de visualiser rapidement les jeux de données, d'effectuer la gestion des fichiers et de les décrire à l'aide de métadonnées. Alors que, ArcMAP permet d'effectuer les analyses thématiques (création de cartes) et faire des

analyses spatiales. Quant à ArcToolbox, il permet de réaliser des transferts de format et de projection.

Pour le traitement de la base de données cartographique utilisée dans ce travail, ArcMAP a été grandement valorisé. Aussi, les données cartographiques intégrées dans SWAT ont été converties en format raster puis projetées à l'aide d'ArcToolbox. Tous les nouveaux shapefiles (fichiers) utilisés pour des traitements sur ArcMap ont été créés à partir d'ArcCatalog qui joue dans ce cas le rôle de module complémentaire à ArcMAP.

#### V.1.1.3 L'Idrisi Selva

Le logiciel IDRISI a été conçu et développé par l'université de Clark aux Etats-Unis. Il comporte plusieurs fonctions identiques aux autres logiciels de SIG. Ce qui nous intéresse le plus c'est les modules « Weigth » et l'analyse multicritère. Ces deux-là nous permettrons de pondérer les classes des critères et d'établir la carte répondant à l'évaluation multicritère.

#### V.1.1.4 Le logiciel ENVI

L'ENVI (Environment for Visualizing Images) est un logiciel professionnel de la société « EXELIS » permettant la visualisation, le traitement, l'analyse, et la présentation de nombreux types d'images numériques, dont les images satellites. En particulier, Envi permet de travailler sur différents types de données (multispectrale, hyperspectrale, radar), d'intégrer des données de type matriciel (image) et vectoriel et est compatible avec des données de type SIG. Il permet entre autres de contraster les images, de les corriger géométriquement, de les classer, de réaliser des analyses à l'aide de données d'élévations, etc. [14]

ENVI est un logiciel complet de traitement d'images de télédétection, optiques et radar. Toutes les méthodes de traitement d'images de corrections géométriques et radiométriques, de classification et de mise en page cartographique sont présentes. D'autres outils relatifs à la visualisation et à la modélisation de données topographiques sont aussi disponibles. Le logiciel ENVI est conçu en langage IDL (Interactive Data Language) et offre donc des moyens de programmation évoluée. ENVI permet d'extraire rapidement l'information pertinente des images géospatiales. L'ensemble de ses outils et modules spécialisés permettent de lire, explorer, analyser les données et de partager l'information. Avec une interface Windows, il est facile d'utilisation. [15]

Le logiciel ENVI offre des fonctionnalités des systèmes de traitements interactifs de données numériques géocodées (données satellitaires, images numérisées, cartes digitalisées,...). Avec ses options, Envi propose un environnement de traitement, d'archivage et de consultation d'images sur PC et de nombreuses fonctions de transformation pour SIG. Des programmes de liaison Import-Export permettent l'intégration des données avec d'autres logiciels fondamentaux de SIG, CAO, DAO

## V.1.2 L'Analyse multicritère

### V.1.2.1 Définitions

**Décision:** Le choix pris parmi les alternatives. Ces dernières peuvent représenter des moyens d'actions, des hypothèses, différentes classifications,...

**Critère:** Le principe de base à mesurer et à évaluer pour la prise de décision.

**Facteur:** Critère mis en valeur ou lui en réduit et qui provient d'une convenance d'une alternative spécifique pour une activité considérée.

Les facteurs sont des variables continues qui renforcent ou entravent l'adéquation d'une décision (mesurée de façon continue)

Exemple : plus proche d'une route, loin des frontières [16]

**Contrainte:** Elle sert à limiter les alternatives considérées. Les contraintes sont des variables binaires qui limitent spatialement la décision

Exemple : pas dans les zones protégées [16]

**Poids :** Estimation de l'importance relative de chacun des facteurs par rapport aux autres

**L'échelle de décision :** La procédure d'identifier les critères et de les associer pour en arriver à une évaluation particulière tout en comparant et en agissant sur les évaluations.

**Choix d'une fonction :** Elle fournit le moyen mathématique de comparer les alternatives. Puisque la fonction vient de l'optimisation des caractéristiques mesurables, elle nécessite que chaque alternative soit évaluée en retour.

**Evaluation :** c'est la méthode qui fait appel à une échelle de décision

**Evaluation multicritère :** C'est généralement l'application d'une des méthodes suivante : La première est le recours à la forme booléenne pour les contraintes. Et la fonction linéaire de la somme pondérée des critères choisis pour être évaluées ou mesurées.

### V.1.2.2 L'analyse multicritère

L'analyse multicritère est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Cette méthode est essentiellement destinée à la compréhension et à la résolution de problèmes de décision. Les critères sont l'élément de base décisionnel. Ils peuvent être évalués ou mesurés. Ils se composent de deux types de variables : les facteurs et les contraintes.

En quelques lignes, l'objectif de l'AMC est de fournir des cartes d'aide à la décision pour chaque état de la variable. Pour cet usage de l'espace, la finalité sera une carte d'aptitude ou de probabilité que l'on peut qualifier de carte décisionnelle. L'AMC se déroule donc en plusieurs étapes dont les principales sont la catégorisation des couches "critères" en facteurs et

contraintes, la standardisation des facteurs par recours à des fonctions d'appartenance (dans notre cas, la fonction linéaire.), à la pondération des facteurs (par la matrice de Saaty) et leur agrégation pour obtenir la carte d'aptitude [17].

Les contraintes peuvent s'appliquer à tous les états de la variable modélisée (occupation du sol) ou être spécifiques à certains états. Elles agissent de manière booléenne sur la possibilité de la réalisation des états dans l'espace : "vrai" ou "faux". Les pixels codés "faux" auront la probabilité d'état zéro.

Les facteurs, quant à eux, regroupent les variables environnementales agissant de manière nuancée sur la probabilité de réalisation d'un état de la variable étudiée. Pour chaque facteur, la probabilité par état varie entre 0 et 255 dans la matrice des pixels.

### V.1.2.3 L'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process) [18]

Afin d'élaborer la carte de la vulnérabilité à l'érosion, nous avons adopté la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process). Cette méthode, créée par SAATY, est une méthode d'analyse multicritère qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération.

La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée, nous évaluons l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate. Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chaque classe et le vecteur propre lui correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. La valeur propre (poids) est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode.

### V.1.3 La télédétection

#### V.1.3.1 Définitions [14]

##### **Télédétection :**

Au sens large, la télédétection est la mesure ou l'acquisition d'informations sur l'environnement d'un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. On fait souvent appel à des

instruments tels qu'appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc.

**Télédétection passive:** Enregistrement du rayonnement naturel, fourni par la lumière ou la chaleur, qu'il soit émis, réfléchi ou réfracté (ex : photographies aériennes du paysage éclairé par la lumière du soleil ainsi que certaines images satellitaires comme (SPOT, LANDSAT, IKONOS,...))

**Télédétection active :** Enregistrement du rayonnement que réfléchit l'objet ou le paysage « illuminé » par l'opérateur (ex : images radar)

#### V.1.3.1 Les principes en télédétection

Le rayonnement émis par une source d'énergie ou d'illumination (A) parcourt une certaine distance et interagit avec l'atmosphère (B) avant d'atteindre la cible (C). L'énergie interagit avec la surface de la cible, en fonction des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

Le rayonnement est réfléchi ou diffusé vers le capteur (D), qui l'enregistre et peut ensuite transmettre l'énergie par des moyens électroniques à une station de réception (E) où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques). Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image (F) est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible. La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier (G) (Fig.25).

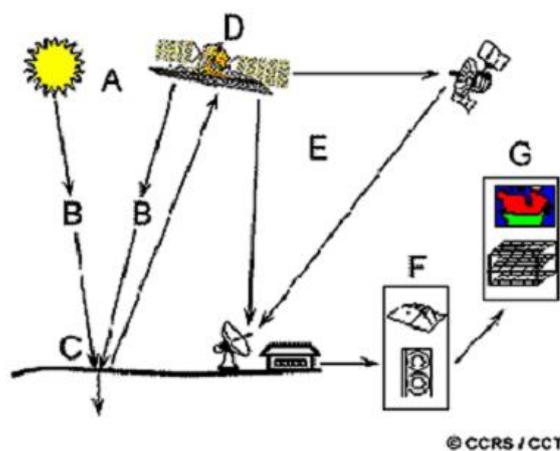


Figure.25 Principe de la télédétection : Source [15]

## V.2 Méthodologie

Avant l'identification des critères, nous allons d'abord exposer la méthodologie pour délimiter le bassin versant par Arcswat. Ce dernier sera la limite de la zone d'étude.

### VI.2.1 La délimitation du bassin versant dans l'Arcswat

De nos jours, les logiciels fournis par l'évolution de la science technique simplifie l'étude technique et rend le résultat plus rapide. Swat est un modèle d'évaluation d'un bassin versant jusqu'à l'échelle fluviale. Il est intégré dans Arcgis afin de produire une base de données quantitative munie d'une référence spatiale.

#### V.2.1.1 Modèle Numérique d'élévation

Un MNT ou Modèle Numérique de Terrain est une représentation en 3 dimensions d'une surface obtenues grâce aux données d'altitudes (MNE) qui ne prend pas en compte les éléments physiques présents sur le terrain. Et c'est à partir du modèle numérique d'élévation (MNE) que SWAT peut déterminer le sens de l'écoulement des eaux. Notre donnée d'altitude est issue de l'SRTM à 90 m de résolution.

#### V.2.1.2 Direction des flux et accumulation des flux

A l'aide d'un modèle numérique d'élévation, Swat reconnaît le point d'écoulement qui se trouve dans l'altitude la plus basse qui contient de l'eau. Puis il arrive à déterminer une direction de drainage bien définie. Connaissant la direction de flux, Swat calcule le flux accumulé dans chaque pente.

#### V.2.1.3 Identification de l'exutoire

Le parcours des flux qui s'écoulent vers un orifice de drainage commun forme la surface du bassin. Et c'est en identifiant l'exutoire que l'on arrive à délimiter cette surface. Pour certains bassins versants, il existe plusieurs exutoires. Ainsi, le modèle observe les exutoires selon les différents sens des écoulements. Si nous connaissons où se situe l'exutoire, il suffit de le sélectionner. Dans un autre cas, insérer les coordonnées de l'exutoire peut se faire également. Le bassin versant de l'Alaotra a comme exutoire la Maningory.

#### V.2.1.4 Délimitation du bassin versant

Une fois l'exutoire déterminé, Swat trace le bassin versant. Ces étapes sont illustrées dans l'annexe 4.