

**ORSTOM  
Laboratoire d'Hydrologie  
MONTPELLIER**

**UFR Espaces & Cultures  
Université de NICE  
SOPHIA-ANTIPOLIS**

## **RAPPORT DE STAGE**

# **UTILISATION D'UN SIG EN AMONT D'UN MODELE HYDROLOGIQUE**

Je tiens à remercier particulièrement M.M. JACCON et DELCLAUX pour leur aide ainsi que tout le personnel du laboratoire d'Hydrologie.

## **LE STAGE**

Pour préparer le diplôme de Maîtrise de Sciences et Techniques Infographiques en Aménagement à l'Université de NICE-SOPHIA ANTIPOLIS, j'ai effectué un stage de quatre mois, du 17 Février au 15 Juin 1992, au laboratoire d'Hydrologie du centre ORSTOM de Montpellier.

J'ai suivi dans un premier temps l'application par un étudiant de DEA, du modèle de G. GIRARD (MODLAC) à un bassin versant de 1800 km<sup>2</sup> de la région de TANANARIVE à MADAGASCAR et, en parallèle, j'ai découvert les possibilités d'un SIG développé par l'ORSTOM: SAVANE.

En m'appuyant sur MODLAC et SAVANE, j'ai mis au point une méthodologie qui se veut générale pour associer SIG et modèles hydrologiques pour faciliter la mise en oeuvre des modèles.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>1 LES MODELES HYDROLOGIQUES ET LES DONNEES QU'ILS UTILISENT</b>	<b>4</b>
1 1 LA DISCRETISATION	5
1 2 LES DONNEES	6
<b>2 METHODES ET MODELISATION PAR MAILLES</b>	<b>7</b>
2 1 PROCEDES DE DISCRETISATION	7
2 2 LES DONNEES GEOGRAPHIQUES	13
2 2 1 L'altitude	13
2 2 2 La physiographie	13
2 2 3 Schématisation du sens de drainage	13
2 3 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES	16
<b>3 LES SIG, CONCEPTS ET APPLICATIONS AUX MODELES HYDROLOGIQUES</b>	<b>19</b>
3 1 LES CONCEPTS	19
3 1 1 Les données géographiques, la notion de couches	19
3 1 2 La base, les outils	20
3 2 APPLICATION AUX MODELES HYDROLOGIQUES	22
3 2 1 La discrétisation	22
3 2 2 Les données hydroclimatiques	22
3 3 CONCLUSION	23
<b>4 UTILISATION D'UN SIG POUR LA DISCRETISATION</b>	<b>25</b>
4 1 LA METHODOLOGIE	25
4 1 1 Les outils	25
4 1 2 La discrétisation	25
4 1 3 Les données hydroclimatiques	27
4 2 APPLICATION PRATIQUE	28
4 2 1 Le potentiel	28
4 2 2 La géométrie par la pratique	29
4 2 3 Les données hydroclimatiques	31
4 3 CONCLUSION	32
<b>5 VERS UNE DISCRETISATION AUTOMATIQUE</b>	<b>33</b>
5 1 L'INTERFACAGE	33
5 2 LE MAILLAGE AUTOMATIQUE	34
5 2 1 Caractéristiques du maillage	34
5 2 2 Le principe	34
5 2 3 Des moyens, des outils	36
5 2 4 Le maillage automatique, les solutions	42
5 3 CONCLUSION	45
<b>6 CONCLUSION GENERALE</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>48</b>

# INTRODUCTION

L'étude hydrologique d'un aménagement, que ce soit pour sa conception, sa gestion ou l'étude de son impact exige très souvent une approche par modélisation.

Les modèles hydrologiques sont aujourd'hui couramment utilisés comme instruments de recherche. Mais, les nombreux modèles existants nécessitent souvent un compromis entre souplesse et possibilité de mise en oeuvre.

D'un emploi peu convivial, l'élaboration, l'utilisation, l'analyse d'un modèle constituent une tâche ingrate voire fastidieuse.

L'association SIG/Modèles hydrologiques devrait faciliter la mise en oeuvre notamment dans l'acquisition et la préparation des données, faciliter aussi l'organisation et l'intégration des résultats en guidant l'utilisateur dans ses choix et en traitant automatiquement les tâches qui peuvent l'être.

Ce mémoire est divisé en quatre parties:

## Les modèles hydrologiques

On dresse un inventaire des modèles hydrologiques existants. Pour aborder les fonctionnalités des modèles, nous fixerons un domaine d'étude: les modèles discrétisés à mailles.

Dans le domaine fixé, nous décrirons les différents types de paramètres du modèle: les données géographiques, les données hydroclimatiques et les caractéristiques des mailles.

## Le SIG

Nous rappellerons les concepts fondamentaux des SIG puis nous confronterons les possibilités d'un SIG avec les besoins des modèles hydrologiques que nous avons défini.

Nous ferons une première évaluation de l'association SIG/Modèles hydrologiques.

## Utilisation méthodologique d'un SIG pour les modèles hydrologiques

Cette partie donnera la méthodologie à mettre en oeuvre pour traiter les modèles avec un SIG puis, à partir d'un échantillon représentatif, nous donnerons des exemples concrets avec un SIG particulier: SAVANE.

## Extension de l'étude

Nous décrirons ici une approche SIG/Modèle plus globale pour répondre au processus d'automatisation qui ne peut s'effectuer sous un SIG comme le découpage automatique d'un bassin versant.

# 1 LES MODELES HYDROLOGIQUES ET LES DONNEES QU'ILS UTILISENT

Les hydrologues classent les modèles hydrologiques en différentes catégories. Nous ne retiendrons que deux d'entre-elles.

## Conceptuel/Empirique

Le modèle conceptuel nécessite une bonne description du bassin versant, les paramètres du modèle auront, en général, une signification physique bien précise (pente, coefficient de ruissellement, ...). Ce type de modèle nécessite un nombre important de paramètres dont il est difficile, voire impossible, de disposer en totalité mais ces modèles ont une très bonne approche physique de la réalité.

Par opposition, les modèles de type 'boîte noire' ou empirique ne nécessitent ni la description fonctionnelle très élaborée du bassin versant, ni l'attribution d'une signification physique aux paramètres du modèle. La mise en oeuvre de ce type de modèle est donc, a priori, simple. Les modèles de ce type sont, par leur nature, moins bien adaptés à l'étude de variantes ou d'impacts des aménagements.

## Globaux/Distribués

Les modèles globaux considèrent le bassin versant comme un tout indivisible, la répartition géographique des divers composants du bassin n'est pas pris en compte explicitement. Ce type de modèle est surtout utilisé pour les analyses fréquentielles des débits de bassins ne devant pas subir d'aménagements importants.

Au contraire, dans un modèle régionalisé ou distribué, il est tenu compte de la situation relative des différents composants du modèle. A l'heure actuelle, cette approche est réalisée principalement par les modèles conceptuels maillés. Il en résulte une grande souplesse d'analyse des différentes variantes d'aménagement, obtenue cependant au prix d'une schématisation très poussée de la forme du bassin et du réseau hydrographique. Il est par ailleurs nécessaire de disposer d'une quantité importante de données caractéristiques de chacune des mailles.

Dans la pratique, le choix d'un modèle hydrologique est toujours un compromis qui doit prendre en compte l'objectif visé, les données disponibles et les possibilités de mise en oeuvre à un coût raisonnable.

Nous axerons principalement notre étude sur les modèles conceptuels car ils répondent au mieux aux besoins de l'ORSTOM c'est à dire des modèles qui permettent une représentation réaliste du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant pourvu d'aménagements hydrauliques.

L'utilisation d'un SIG peut s'envisager pour organiser des données en entrée et en sortie mais aussi pour gérer l'utilisation à part entière d'un modèle hydrologique. Nous limiterons dans cette étude, l'association SIG/Modèle à la préparation des données en entrée car c'est de loin la partie la plus laborieuse dans la mise en oeuvre d'un modèle et celle où l'utilisation d'un SIG semble la plus pertinente.

## 1 1 LA DISCRETISATION

L'analyse d'un modèle maillé fait apparaître les éléments suivants:

- la maille elle-même, assortie à tous les paramètres représentatifs pour la simulation (pente, orientation, couverture au sol, ...),
- une loi de comportement hydrologique de la maille, décrivant la réaction de la maille aux sollicitations extérieures:
  - une partie fonction de production d'eau qui répartit par mailles les précipitations entre l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration et le stockage dans les différentes couches du sol,
  - une partie fonction de transfert qui propage le volume d'eau disponible sur une maille jusqu'à l'exutoire tout en le cumulant avec les apports des autres mailles (notions de zones isochrones liées aux temps de transfert)
- une situation topologique précisant quelles sont les mailles adjacentes à prendre en compte pour l'analyse de la maille elle-même.

Les modèles conceptuels actuellement les plus fréquents sont à mailles carrées, nous allons nous servir de cette forme de mailles mais, notre analyse pourrait s'appliquer à un modèle à mailles de forme différente.

## 1 2 LES DONNEES

On peut classer les informations nécessaires aux modèles maillés en deux catégories:

**LES DONNEES 'GEOGRAPHIQUES'** qui englobent les données spatialisées comme:

- la morphologie: les données de base proviennent des modèles numériques de terrain ou de cartes topographiques. Le traitement de ces données permet d'extraire les altitudes, les pentes, le réseau hydrographique et la délimitation des bassins versants,

- la géomorphologie: les cartes géologiques et pédologiques renseignent sur la nature et la structure interne des couches du sol. La connaissance de ces paramètres permet d'avoir une première évaluation de la perméabilité, du drainage horizontal (écoulements sub-superficiels) et vertical (infiltration),

- la végétation: le couvert végétal et l'occupation du sol sont des facteurs fondamentaux du processus d'évapotranspiration et de l'écoulement superficiel.

**LES DONNEES 'HYDROCLIMATIQUES'** couvrent toutes les données de pluie, de débit, d'évapotranspiration, de niveaux piézométriques. Ces variables sont suivies dans le temps de manière continue et dans l'espace, en répartissant sur une surface donnée les phénomènes mesurés ponctuellement.

Les variables mesurées constituent d'une part les entrées du modèle (précipitation, facteurs climatiques pour le calcul de l'ETP, niveau piézométrique, ...) et d'autre part des variables de calage (niveaux d'eau et débits).

La spatialisation de certaines variables comme la pluie dépend de la distribution spatiale des appareils de mesure, de leur fiabilité, de la qualité et la disponibilité des données.

La pluie constitue l'entrée principale des modèles, d'où la nécessité de connaître avec précision la répartition spatiale du champ pluviométrique à partir de mesures ponctuelles.

Une estimation précise de la pluie constitue la donnée de base d'un modèle pluie/débit. Dans ces modèles, les erreurs sur l'estimation des entrées s'amplifient dans les simulations des sorties (débit).

## **2 METHODES ET MODELISATION PAR MAILLES**

La présentation du modèle qui va suivre s'inspire du modèle MODLAC de G. GIRARD (G. GIRARD, le modèle couplé) mais elle ne fait qu'en suivre les grandes lignes. Cette approche se veut globale. En abordant tous les aspects spécifiques des modèles discrétisés à mailles, on donnera des solutions globales qui seront facilement adaptables au modèle de ce type utilisé.

### **2 1 PROCEDES DE DISCRETISATION**

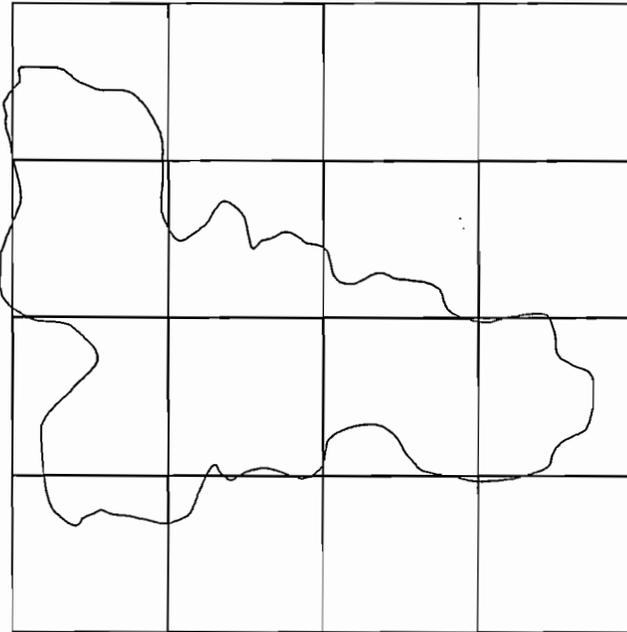
#### **DEFINITION DE LA GEOMETRIE DU BASSIN VERSANT, LE MONTAGE DU MAILLAGE**

##### **Le quadrillage primaire**

Le domaine d'étude (bassin hydrographique tracé sur une carte topographique) est inscrit dans un maillage régulier dit initial ou schéma-type, composé de mailles primaires (appelés aussi mailles du schéma-type).

Le quadrillage initial est placé sur la carte topographique. De cette manière, celui-ci coïncide avec le carroyage de la projection utilisée (Figure 2.1). Les mailles sont référencées sur une projection géographique, ce qui permettra le calage sur une photographie aérienne ou une image satellitaire.

La localisation des mailles dans le quadrillage initial est indispensable pour le fonctionnement du modèle. Une numérotation des mailles s'impose. G. GIRARD commence par la maille située en haut à gauche et en allant de gauche à droite puis, de ligne en ligne, du haut du maillage vers le bas.



Le bassin versant et le maillage Figure 2.1

### Les mailles de surface

Le quadrillage initial est trop grossier pour représenter correctement la complexité spatiale des bassins versants. Il est donc découpé en mailles plus fines: le maillage secondaire.

Ainsi, la numérotation du schéma-type va servir de base à la localisation des mailles secondaires qui seront effectivement utilisées pour discrétiser le domaine d'étude. Ces mailles secondaires ont différentes tailles et s'imbriquent dans les mailles initiales selon certaines règles.

Pour G. GIRARD, les mailles de côté 8a sont appelées 'grandes mailles', celles de côté 4a 'mailles moyennes', celles de côté 2a 'petites mailles'. Une maille schéma-type est une grande maille.

Comme pour la numérotation des mailles schéma-type, la numérotation des mailles de surface est nécessaire pour distinguer les mailles secondaires entre elles à l'intérieur d'une maille schéma-type (Figure 2.2, 2.3).

Dans MODLAC, cette numérotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre en commençant par la maille située en haut à gauche<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Si nous utilisons cette numérotation afin de rester conforme au modèle de G. GIRARD, nous verrons qu'il est plus simple de respecter à l'intérieur d'une maille schéma-type la même numérotation que celle utilisée par le maillage schéma-type lui-même pour n'avoir qu'une seule logique de numérotation.

### Repérage de la position d'une maille

· 000 indique que la maille ainsi numérotée est une grande maille, elle a la même maille que la maille schéma-type,

· 100, 200, 300 ou 400 indique une maille de taille moyenne à l'intérieur d'une maille schéma-type,

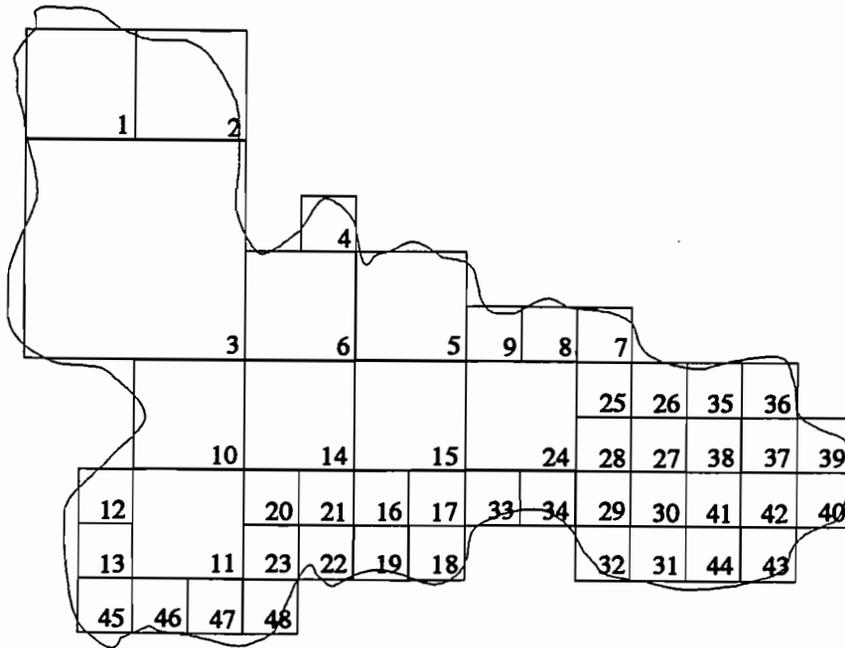
· 10, 20, 30 ou 40 indique une maille de taille petite à l'intérieur d'une maille moyenne.

Par analogie, pour une maille schéma-type M, on peut dire que le chiffre des centaines indique la position de la maille M dans le découpage de la grande maille, le chiffre des dizaines indique la position de la maille M dans le découpage de la maille moyenne.

100	200	
400	310	320
	340	330

Figure 2.2

La maille 330 est située:  
en position 3 de la grande maille,  
en position 3 de la maille moyenne.



N° des mailles

Figure 2.3

### Choix des mailles pour la discrétisation, l'emboîtement des mailles

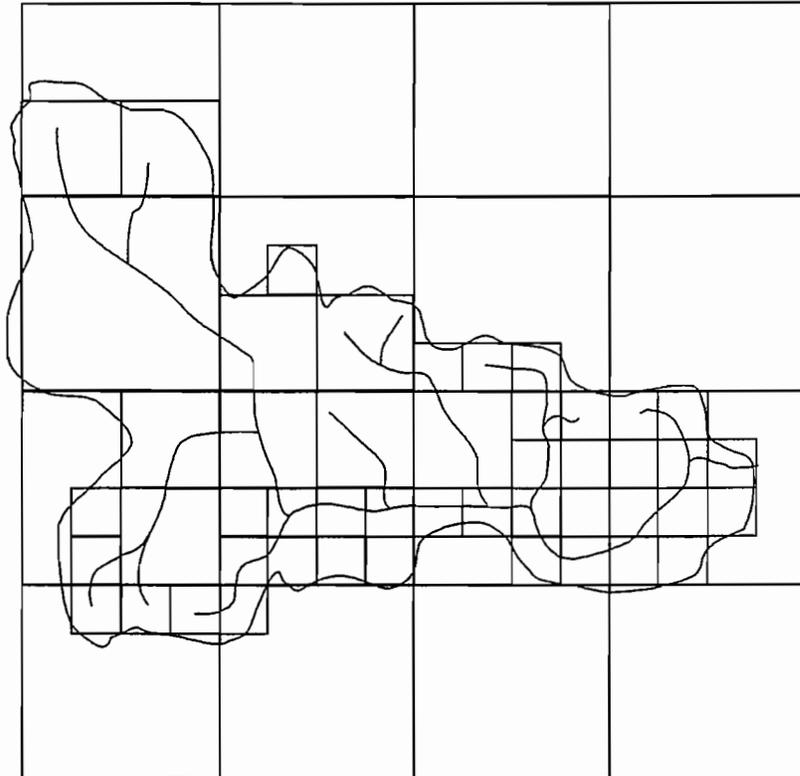
Le découpage des mailles s'effectue en fonction de la densité d'information que l'on peut recueillir dans une maille schéma-type. Ainsi, il est inutile de découper une grande maille si elle est homogène ou si l'information y est insuffisante. Par contre, le découpage peut se faire jusqu'à la petite maille pour bien respecter la diversité spatiale et localiser autant d'informations que possible dans une maille schéma-type.

Le découpage sera d'autant plus fin qu'il y aura d'informations à localiser.

Il faut noter que l'on peut supprimer une maille secondaire si elle n'apporte aucune information nouvelle à condition que les superficies des bassins versants après élimination de la maille soient toujours respectées (Figure 2.4).

On découpe ou on élimine des mailles pour:

- respecter la physiographie (§ 2 2 2),
- respecter au mieux la localisation et la superficie globale des bassins et sous-bassins versants,
- respecter la localisation et le nombre des retenues.



**Le maillage initial, le maillage de surface sur le bassin et son réseau hydrographique Figure 2.4**

**Le découpage dans MODLAC s'effectue suivant les règles de voisinage suivantes:**

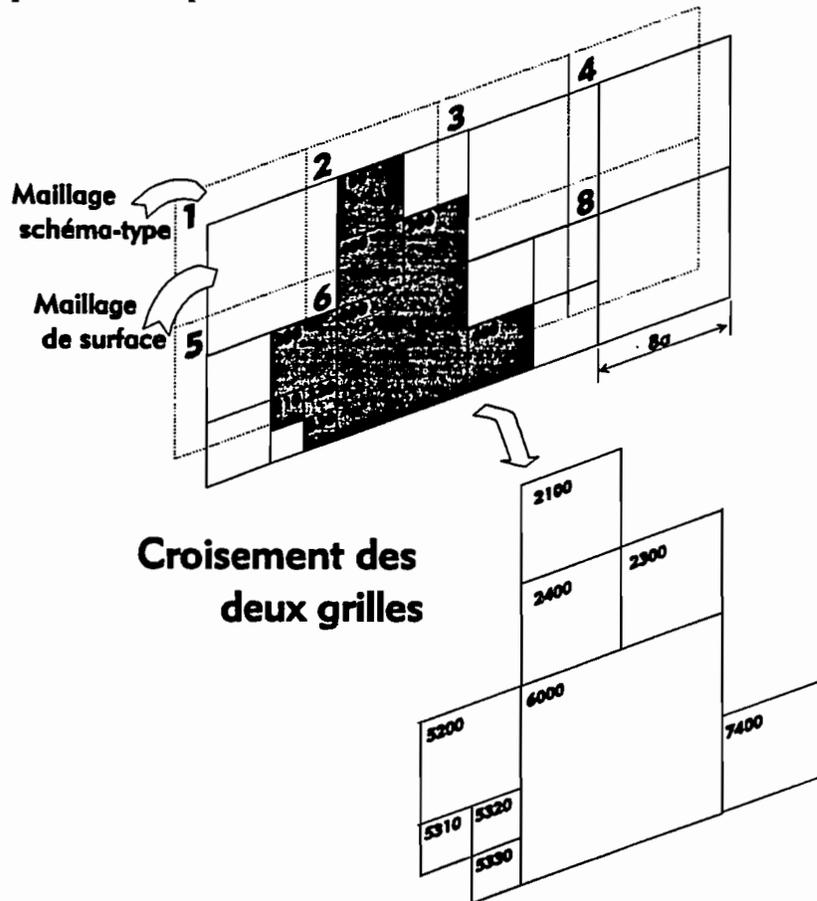
- soit deux mailles voisines ont la même dimension,
- soit l'une des deux mailles voisines est deux fois plus petite que l'autre,
- soit l'une des deux mailles voisines est deux fois plus grande que l'autre.

**Enfin, il faut savoir qu'un modèle possède un nombre fini de mailles pour des raisons de capacité mémoire du matériel informatique utilisé.**

## Les relations entre les numérotations mailles schéma-type et mailles de surface.

Le modèle MODLAC exige une numérotation séparée des mailles schéma-type et des mailles de surface. Pour regrouper ces deux numérotations spécifiques, on ajoute derrière le numéro de la maille schéma-type le numéro de la maille de surface. Ainsi toutes les mailles, quelles que soient leurs tailles, seront référencées par une même numérotation (Figure 2.5).

Cette nouvelle numérotation, si elle caractérise spatialement et morphologiquement les mailles, est lourde à gérer; pour manipuler plus simplement les mailles, G. GIRARD les a indexées séquentiellement par un chiffre: le numéro d'ordre.



### Indexation des mailles

1	2100	2	2300	3	2400	4	5200	5	5310
6	5320	7	5330	8	6000	9	7400		

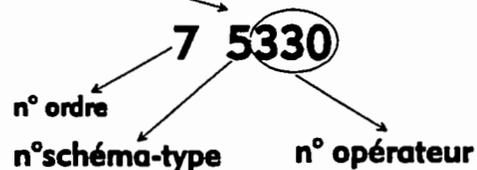


Figure 2.5 LA NUMEROTATION SHEMA-TYPE, LA NUMEROTATION DES MAILLES DE SURFACE.

## 2 2 LES DONNEES GEOGRAPHIQUES

### 2 2 1 L'ALTITUDE

Le calcul la fonction de transfert d'une maille vers une autre (§ 1 1), chaque maille sera caractérisée par une altitude. G. GIRARD utilise l'altitude minimum.

### 2 2 2 LA PHYSIOGRAPHIE

La physiographie est caractérisée par la nature géologique et l'occupation des sols (§ 1 1).

Avec le modèle de G. GIRARD, la prise en compte de ces deux facteurs est faite à ce niveau par l'identification de différentes classes: sol perméable ou imperméable, sol recouvert de cultures ou forêts, ... A chacune des ces mailles est associée une fonction de production qui, à ce stade, est identifiée par un simple chiffre. Le nombre de fonctions de production n'est pas limité mais il est rarement nécessaire d'en définir plus d'une dizaine.

### 2 2 3 SCHEMATISATION DU SENS DE DRAINAGE

Une fois la discrétisation achevée, il convient d'indiquer, le sens de drainage de l'écoulement issu et/ou transitant par chacune des mailles.

#### Itinéraire de drainage

La direction de drainage de la maille sera choisie parmi huit cheminements possibles. Il faut noter que, pour une maille donnée, on ne pourra avoir qu'un seul sens de drainage (Figure 2.6, 2.7).

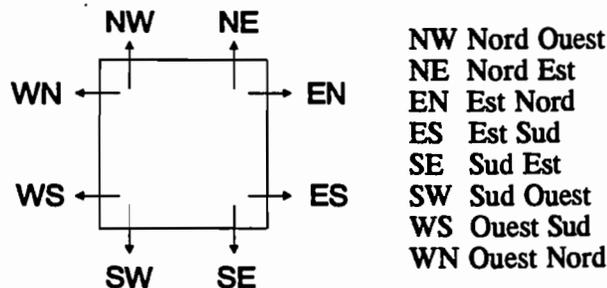


Figure 2.6

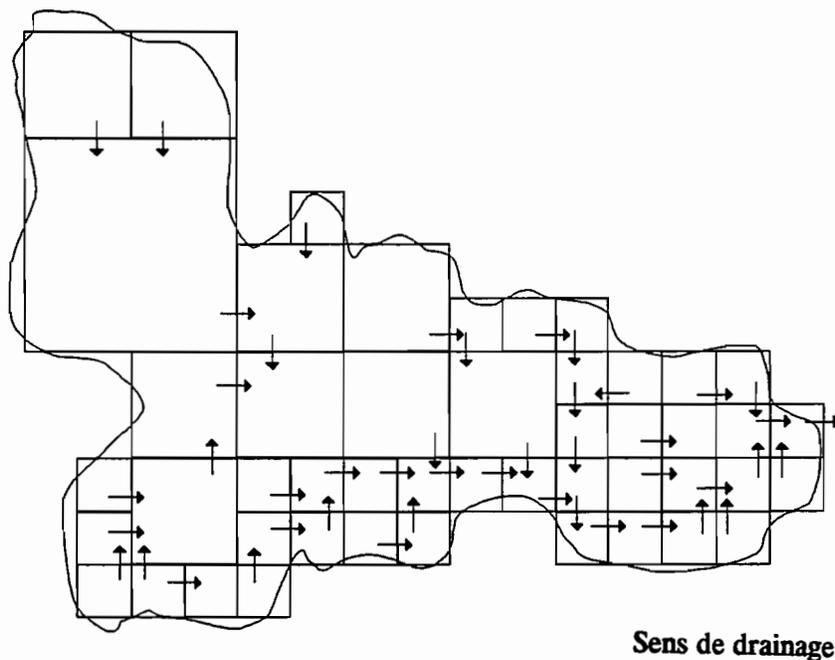


Figure 2.7

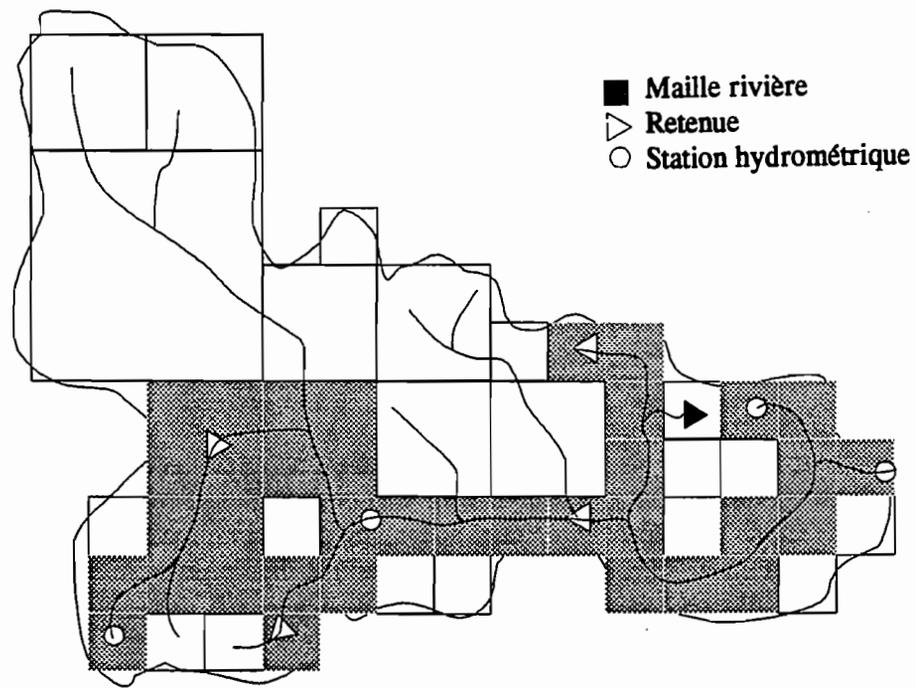
### Les mailles rivières

Une maille sera déclarée en maille rivière si elle possède une des caractéristiques exposée ci-dessous:

- toute maille contenant une station hydrométrique ancienne, présente ou future, est considérée comme une maille rivière,
- toute maille contenant une retenue d'eau est considérée comme une maille rivière, que cette retenue soit actuelle, détruite ou à construire.

Il faut représenter l'ensemble des aménagements existants depuis le début de la simulation jusqu'à la fin de l'étude, cela afin que le modèle soit à même d'en tenir compte à partir de la date où chaque aménagement entre en activité.

A partir du moment où les mailles rivières sont définies, il suffit de joindre ces mailles en suivant le sens de drainage jusqu'à l'exutoire. Toutes les mailles comprises entre deux mailles rivières définies précédemment seront elles aussi déclarées en mailles rivières (Figure 2.8).



**Mailles rivières,  
stations, retenues.**

Figure 2.8

Lorsque l'altitude, le sens de drainage et la fonction de production d'eau sont précisés pour chacune des mailles, le modèle va vérifier la cohérence de ces données. Par exemple, il va contrôler si le sens de drainage entre les mailles est bien compatible avec leurs altitudes respectives.

Cette partie du modèle permet, par une série de tests, de contrôler les informations fournies et ainsi, d'éviter de travailler sur des données explicitement fausses.

## 2 3 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

### Organisation des données

Les informations hydroclimatiques proviennent essentiellement de stations de mesure. Elles sont continues dans le temps. Dans MODLAC, le pas de temps varie suivant la dimension du bassin versant considéré et la disponibilité de l'information. Le pas de temps peut aller d'une heure (pour les bassins versants de quelques km<sup>2</sup>) à la décade (pour les bassins de plus de 10000 km<sup>2</sup>).

Il faut spatialiser la pluie et l'ETP qui sont mesurées à des points d'observation particuliers, sur l'ensemble du domaine d'application. Pour chaque type de mesure, on délimite des aires d'influence avec une méthode d'interpolation comme, par exemple la méthode de THIESSEN. Puis, les aires d'influence des points de mesure sont distribuées sur le maillage du bassin versant à étudier (Figure 2.9).

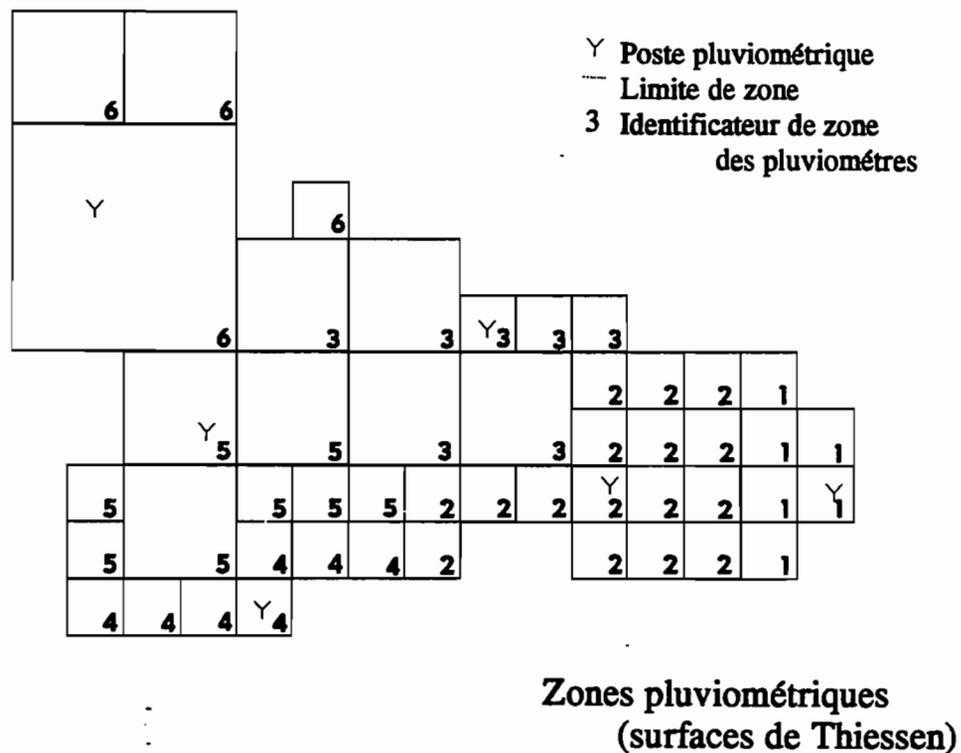


Figure 2.9

La méthode de THIESSEN est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance, du pluviomètre correspondant que de tout autre pluviomètre. La méthode ne tient donc compte que de la distribution spatiale en plan des stations.

## Structure des données

Pour chaque type de données (pluie et ETP), MODLAC utilise:

- la liste des stations de mesure (pour une station: identificateur, nom, coordonnées, périodes de fonctionnement, ...),
- pour chaque maille, le numéro de la station qui la caractérise,
- la liste par poste des données elles-mêmes.

Les données hydroclimatiques sont de deux types:

- variables d'entrée du modèle: mesures pluviométriques, piézométriques, hydrométriques, limnimétriques journalières, données évapométriques mensuelles, caractéristiques des retenues sur le bassin,
- variables de calage: mesures de débits journaliers.

Nous venons de voir qu'un modèle hydrologique (MODLAC dans notre analyse) utilise de nombreuses données aussi bien pour la partie discrétisation que pour le traitement des données descriptives.

- La discrétisation (numérotation des mailles schéma-type, mailles de surface, règles de voisinage et de découpage).
- Les caractéristiques des mailles (altitude, physiographie, sens de drainage par mailles)
- Les données hydroclimatiques (spatialisation et structure des données).

C'est toute cette information très variée dans sa nature et sa densité qui doit être organisée par la mise en oeuvre d'un modèle hydrologique. Nous allons étudier maintenant comment un SIG peut aider à l'organiser.



## 3 LES SIG, CONCEPTS ET APPLICATIONS AUX MODELES HYDROLOGIQUES

Les systèmes d'information géographique (SIG) utilisent des moyens informatiques pour stocker, partager, consulter et manipuler les objets représentés sur les cartes ou sur les plans (bâtiments, parcelles, rivières, forêts, ...) ainsi que les informations qui leur sont directement ou indirectement attachées (nom, adresse du propriétaire, débit, ...).

### 3 1 LES CONCEPTS

#### 3 1 1 LES DONNEES GEOGRAPHIQUES, LA NOTION DE COUCHES

Chaque information, ou chaque groupe d'informations au sens large du terme, est représentée par une couche thématique. Une couche est constituée d'une série d'objets distribués spatialement dans un espace contigu. Les objets sont localisés par un système de projection (UTM, LAMBERT, ...).

Un objet peut être représenté par un point (pour une station météo), une ligne (pour un cours d'eau) ou une surface (pour l'aire d'influence d'un pluviomètre).

On peut en plus, mais ce n'est pas obligatoire, définir pour une couche une structure de type 'base de données'. Si c'est le cas, tous les objets d'une couche posséderont des données descriptives (que l'on nomme attribut) fournies par la base de données.

Comme la base de données est constituée d'objets définis spatialement, on parlera de base de données géographiques.

Prenons un exemple: dans notre cas, nous avons la couche 'Retenue' (barrages) qui sera constituée d'une série d'objets de type 'points'.

La couche 'Retenue' possédera les attributs:

- numéro de station,
- nom de station,
- numéro de maille propre.

Pour résumer, un objet est décrit par:

- sa position,
- ses relations avec d'autres objets,
- ses attributs.

### 3 1 2 LA BASE, LES OUTILS

#### La base

L'acquisition des données se fait par la création d'une base de données. Les couches d'information et leurs attributs seront organisés par thèmes à l'intérieur de la base de données.

On trouvera dans la base deux grands types de couches:

- les informations 'brutes': les données sans pré-traitements, le traitement de ces couches donnera le second type de couche;

- les informations 'particulières au modèle': construites à partir des couches brutes, elles auront une structure similaire aux données du modèle hydrologique utilisé.

L'intégration des données dans un SIG se déroule en plusieurs étapes:

- la numérisation par digitalisation de cartes du couvert végétal, des limites de bassin, ... et la saisie des données descriptives correspondantes;

- les données de télédétection, les images satellites sont considérées comme des couches;

- l'organisation et la gestion des fichiers relatifs aux couches d'information.

La digitalisation permet de récupérer la position et la forme des objets disposés sur une carte. Elle consiste à déplacer un curseur sur un plan posé sur une table à digitaliser. La table est réceptrice des signaux émis par le curseur. Elle peut localiser ces signaux sur le plan de la table avec une précision du dixième de millimètre (P. ROUET, Les données dans les SIG ).

## Les outils

Etablissons un inventaire des outils que l'on doit trouver dans un SIG:

- l'agrégation: consiste à fusionner les objets de type 'aire' voisins, d'une même couche, ayant une propriété commune, la même valeur pour un attribut par exemple;
- le croisement de cartes (ou de couches) : on combine de différentes méthodes plusieurs couches SIG, le résultat de cet agencement est présenté dans une nouvelle couche;

La projection d'une couche sur une autre est un croisement de cartes particulier: les objets et les attributs de la première couche seront discrétisés sur les objets de la seconde.

- traitement et classification des images satellites;
- gestion directe des attributs par une base de données géographiques (SGBD);
- analyse statistique: un bon SIG doit fournir des traitements statistiques de base sur les données descriptives comme la moyenne, l'écart-type, ...
- création, utilisation d'un MNT avec des traitements spécifiques comme la recherche du sens de drainage, la délimitation automatique des bassins versants;
- analyse de voisinage: met en oeuvre les relations spatiales existantes entre des objets plus ou moins éloignés comme l'analyse de proximité, de contiguïté, de convexité (E. DIDON, SIG les concepts);
- l'interpolation par délimitation des frontières, en clair la possibilité à partir de données ponctuelles d'établir leurs aires d'influence comme la méthode des polygones de THIESSEN;
- gestion des réseaux orientés: c'est l'outil par excellence pour représenter un réseau hydrographique car la notion de sens de drainage et de hiérarchie entre les branches du réseau est explicite.

Lorsque le SIG est équipé d'une gestion de réseau orienté, les objets de type 'réseau' (et par extension les objets de type 'aire') posséderont des attributs particuliers caractérisant leurs propriétés topologiques comme le sens du réseau (sens de circulation d'une voie) le coefficient de pente ou la densité moyenne de trafic. Ces attributs donneront lieu à des traitements particuliers comme par exemple la recherche de l'itinéraire le plus court d'un point à un autre.

## 3 2 APPLICATION AUX MODELES HYDROLOGIQUES

### 3 2 1 LA DISCRETISATION

Un SIG ne possède pas d'outil spécifique pour la représentation des maillages imbriqués. Pour mener à bien les traitements qui vont suivre, une représentation des mailles est nécessaire: le maillage sera représenté par une couche SIG spécifique dont les objets seront les mailles.

La couche sera de type 'aire' et les objets la constituant de forme carrée proportionnelle à la taille des mailles.

Comme le maillage est prédéfini, cette couche sera numérisée, nous verrons par la suite que ce n'est pas la seule solution.

#### Les caractéristiques des mailles

Le modèle interprète les données (spatiales) à partir de leur discrétisation sur un maillage. L'idéal serait de parvenir à automatiser cette discrétisation.

### 3 2 2 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

Deux approches sont possibles pour représenter les séries:

La première consiste à utiliser autant de couches qu'il y a de séries chronologiques. Chaque couche sera composée d'objets de type 'points'. Ces points représentent le poste de mesure des séries.

A ces objets sont associés des attributs numériques où seront stockées les séries de données. Mais il est difficile de traiter les séries chronologiques dans un SIG car les données sont trop variées dans leurs natures et leurs densités pour être manipulées malgré la puissance et la panoplie des outils SGBD (§ 2 3).

Une autre approche consisterait à représenter spatialement les informations, non pas en donnant une couche pour une série chronologique, mais une couche par pas de temps pour une même série.

Par exemple pour une période de quatre ans d'une série de données journalières, il y aurait autant de couches que de jours soit 1461 couches.

En pratique, aucune des deux approches n'est utilisable lorsque l'information est très abondante car il y a trop d'attributs numériques dans le premier cas et trop de couches dans le second.

Elle pourrait, par contre, convertir les données moyennes sur une longue durée (année, décennie) ou des séries représentées par leurs paramètres statistiques (moyenne, variance, dispersion), utilisées dans d'autres applications.

On ne traitera pas les séries chronologiques telles qu'elles sous un SIG. Leur gestion doit être faite par des outils spécialisés dans ces traitements. Dans notre étude, nous avons utilisé HYDROM (ORSTOM) pour les gérer les débits et, PLUVIOM (ORSTOM), pour traiter les pluies.

### **3 3 CONCLUSION**

Bien que l'information en entrée d'un modèle hydrologique soit très variée, elle obéit toujours à une structure similaire, dans son principe, aux couches SIG. On y retrouve des informations de type 'aire', 'réseau' et 'point'.

Un SIG se prête bien à l'automatisation de toutes les opérations de distribution spatiale, par combinaison de couches, en imitant le cheminement de l'opérateur.

Il permet de préparer les informations liées aux séries chronologiques pour la spatialisation des stations de mesure mais, à l'heure actuelle, aucun SIG ne répond aux contraintes imposées par le traitement des séries chronologiques de données journalières.



## 4 UTILISATION D'UN SIG POUR LA DISCRETISATION

### 4 1 LA METHODOLOGIE

#### 4 1 1 LES OUTILS

Etablissons un inventaire des traitements que nous allons utiliser:

- le croisement de cartes,
- traitement et classification des images satellites,
- gestion directe des attributs par une base de données géographiques,
- création, utilisation d'un MNT,
- l'interpolation par délimitation des frontières,
- gestion des réseaux orientés.

#### 4 1 2 LA DISCRETISATION

La discrétisation des couches sur un maillage:

Toutes les opérations de discrétisation automatique sur un maillage sont identiques. Nous allons utiliser la projection d'une couche sur une autre, la couche projetée étant une couche thématique et la couche réceptrice étant une représentation du maillage.

Prenons un exemple, discrétisons l'occupation du sol sur le maillage.

La couche de l'occupation du sol peut provenir soit d'une image satellite soit d'une digitalisation à partir d'une carte. Quelle que soit la source, le traitement est identique: la projection de la couche 'occupation du sol' sur le maillage fournit une nouvelle couche. Les objets de la couche créée sont les mailles de la couche réceptrice, cette couche possédant un nouvel attribut qui est l'occupation du sol (Figure 4.1.2).

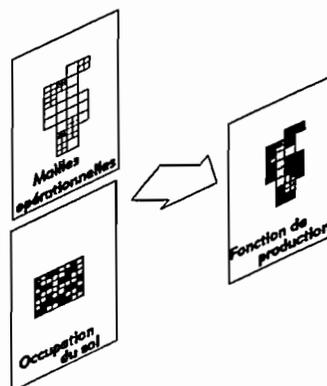


Figure 4.1.2

Abordons plusieurs cas particuliers:

### L'altitude par mailles

Le modèle a besoin de connaître l'altitude pour chacune des mailles. Pour cela, on projette le MNT sur le maillage puis à l'intérieur de chaque maille, on recherche l'altitude minimum (§ 1 1, figure 4.1.3).

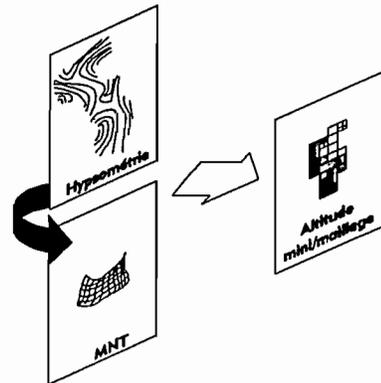


Figure 4.1.3

### Le sens de drainage

La recherche du sens de drainage s'obtient en classant, dans un premier temps, l'altitude moyenne par maille. Puis on cherche le sens de drainage entre les mailles. Cette opération est automatique dans le SIG (Figure 4.1.4).

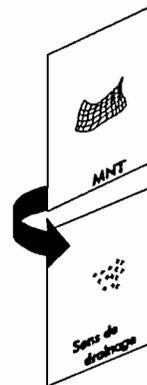


Figure 4.1.4

### Les mailles rivières

Nous avons défini une maille rivière comme étant localisée sur la branche du réseau hydrographique compris entre la retenue la plus en amont jusqu'à l'exutoire du bassin (§2 2 3). La recherche des mailles rivières avec une gestion de réseau orienté s'effectue en parcourant le réseau à partir de l'exutoire puis en le remontant jusqu'à la dernière retenue. Toutes les mailles ainsi parcourues seront des mailles rivières (Figure 4.1.5).

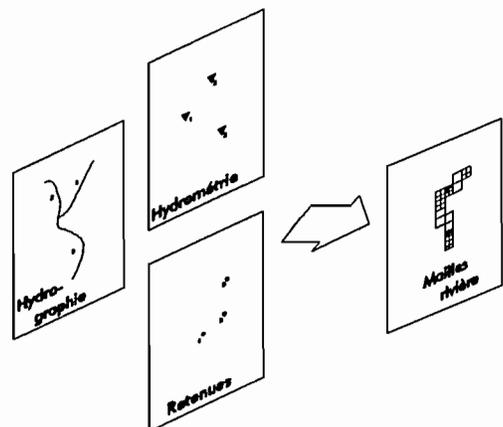


Figure 4.1.5

Pour toutes les opérations de discrétisation la seule difficulté réside dans la préparation de la couche émettrice pour que cette couche, une fois projetée sur le maillage corresponde bien à la couche à obtenir.

Ainsi, dans le premier exemple, il serait absurde de projeter l'occupation des sols tel quel sur le maillage, car les modèles ont besoin non pas de la couche brute mais de la couche homogénéisée pour obéir à la conceptualisation du modèle (§ 1 1).

#### 4 1 3 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

Dans le domaine des données hydroclimatiques, le seul traitement effectué ici sera la détermination automatique des aires d'influence des différentes stations (les pluviomètres et les stations climatologiques).

La première étape est la recherche des aires d'influence de tous les objets de type 'point'. Cette étape s'effectue automatiquement par une fonction du SIG, qui donne une nouvelle couche constituée des aires d'influence des stations. Chaque aire possède un attribut correspondant au numéro de station qu'il représente.

La projection de la couche des aires d'influence sur le maillage nous fournit une nouvelle couche constituée du maillage avec comme attribut le numéro de la station (Figure 4.1.6).

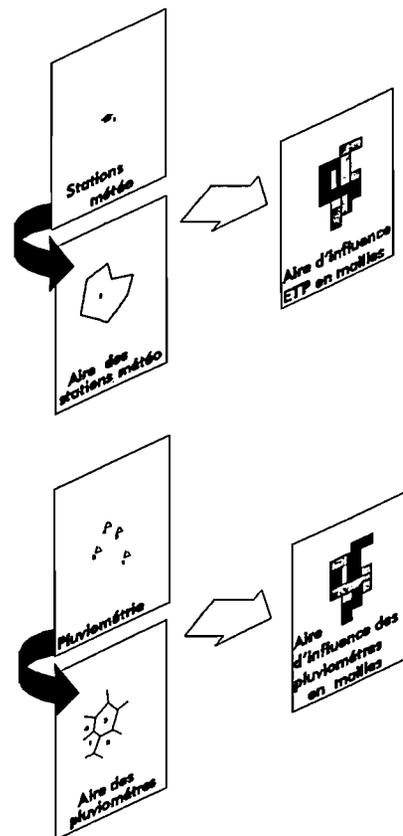


Figure 4.1.6

## 4 2 APPLICATION PRATIQUE

Le but de ce paragraphe est, à partir d'un échantillon de couches SIG représentatives, de donner des exemples concrets pour l'élaboration de couches utilisables par un modèle.

Pour l'illustrer, j'ai utilisé un SIG développé par l'ORSTOM: SAVANE.

### 4 2 1 LE POTENTIEL

SAVANE est un SIG développé par l'ORSTOM depuis une dizaine d'années. S'il a toutes les fonctionnalités d'un bon SIG, il possède aussi quelques spécificités:

- la base de données, une fois créée, est indépendante de la partie 'analyse spatiale'. Il n'y a pas de relation entre ces deux entités. Ce concept s'il est intéressant dans le sens où la base ne peut être altérée accidentellement, est aussi très limitatif selon l'utilisation prévue. Dans notre étude, nous avons besoin de conserver les couches créées dans le SIG et SAVANE ne permet pas de les conserver telles quelles;

- la digitalisation des couches est restrictive, car elle ne peut s'effectuer qu'avec une table A0. Le centre ORSTOM de Montpellier n'en étant pas équipé, je n'ai pu traiter le cas réel du bassin de l'IKOPA à MADAGASCAR. J'ai donc utilisé une base déjà existante mais, de part sa particularité, aucune couche ne peut vraiment ressembler à un carroyage. La couche (de type 'aire') que j'ai utilisée pour représenter le maillage est très différente du maillage utilisé dans MODLAC mais l'application reste valable.

Nous verrons au cours de ce chapitre les autres spécificités de SAVANE.

#### Quelques outils propres à SAVANE

QUEST (option RESTRICTION PAR SELECTION) permet de sélectionner des objets particuliers à l'intérieur d'une couche, SAVANE élimine de la couche, les objets qui n'ont pas été retenus.

MASQUE (option CREATION PAR OBJET): La création d'un masque par objet va préparer une couche ou une partie des objets d'une couche à des traitements spécifiques comme COCA (% de surface).

CLASS (option ATTRIBUT) permet de regrouper les valeurs d'un attribut, SAVANE crée un nouvel attribut dans la même couche qui contiendra la classification souhaitée.

COCA (option APPARTENANCE) SAVANE distribue spatialement les attributs des objets de la couche émettrice sur une couche réceptrice. La couche émetteur sera de type aire.

COCA (option % DE SURFACE) SAVANE calcule la surface occupée par un objet dans une couche de type aire. L'objet projeté sera soit une couche à part entière ou un objet isolé par la fonction MASQUE.

## Les mailles rivières

SAVANE sait gérer les réseaux orientés comme nous l'avons décrit mais ne nous propose pas d'outils spécifiques à sa gestion.

En fait sous SAVANE, on utilise pour cela les attributs propres aux réseaux orientés comme des attributs classiques.

Lors de la saisie de la couche du réseau hydrographique, on a pris soin de dissocier les portions de réseau comprises entre deux retenues ou les portions comprises entre une retenue et l'exutoire du bassin ou d'un sous-bassin.

La fonction QUEST (RESTRICTION PAR SELECTION) va modifier la couche en ne gardant que les portions spécifiées du réseau (figure 2.1).

Il suffirait maintenant de projeter cette nouvelle couche sur le maillage avec la fonction COCA (APPARTENANCE). Mais, SAVANE ne permet pas de faire cette opération avec une couche de type 'réseau'.

La seule solution pour projeter le réseau hydrographique est de créer un masque qui contiendra le réseau à mailler avec la fonction MASQUE (CREATION PAR OBJET) puis, de chercher le pourcentage de surface de ce masque dans le maillage avec COCA option % DE SURFACE (figure 2.3).

Par analogie avec la fonction COCA (APPARTENANCE), on va chercher le pourcentage de surface du masque dans chaque maille. Pour une maille, si le pourcentage de surface est différent de la valeur zéro, le masque (c'est à dire le réseau hydrographique) intersecte bien la maille en question. Donc, si le pourcentage de surface d'une maille est non nul, cette maille doit être déclarée en maille rivière.

La couche réceptrice, après ce traitement, possède un nouvel attribut contenant le pourcentage de surface du réseau.

Les mailles ayant un pourcentage de surface supérieur à zéro seront déclarées mailles rivières (CLASS option ATTRIBUT).

## 4 2 2 LA GEOMETRIE PAR LA PRATIQUE:

L'outil permettant de projeter des couches comme nous l'avons décrit précédemment n'existe pas sous SAVANE mais nous l'avons composé par adjonction séquentielle de deux outils: les fonctions CLASS (PAR ATTRIBUT) et COCA (APPARTENANCE).

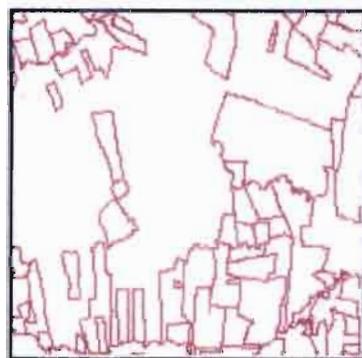
Nous avons vu que la discrétisation sur un maillage avait toujours le même principe en projetant une couche sur une représentation du maillage.

### Les fonctions de production

L'une des fonctions de production précédemment définies est affectée à chaque aire d'occupation du sol. Les zones voisines possédant la même fonction sont regroupées en une seule aire: c'est la phase initiale d'homogénéisation.

Cette homogénéisation est faite automatiquement en utilisant la fonction CLASS option ATTRIBUT (figure 1.2).

Ensuite, la couche homogénéisée est projetée sur le maillage. La projection s'effectue avec la fonction COCA option APPARTENANCE (figure 1.3).



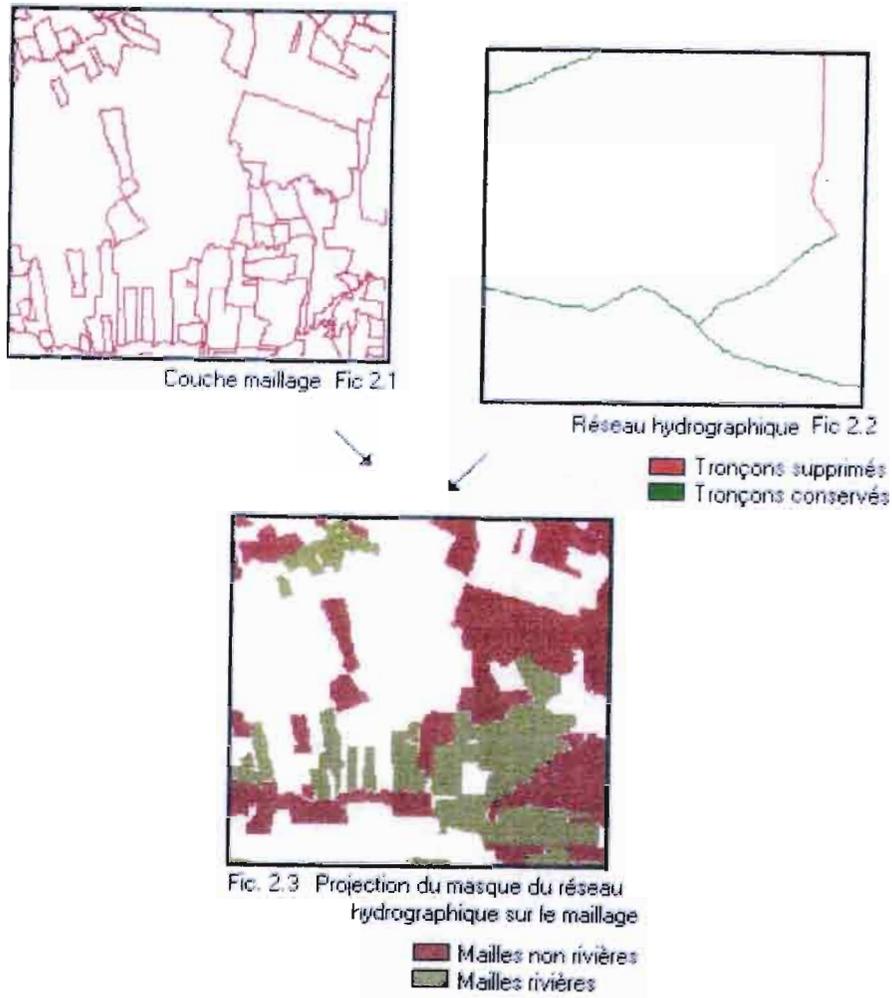
Couche Maillage Fic 1.1



Fic 1.2 Couche fonction de production homogénéisée



Fic 1.3 Projection de la couche fonction de production sur le maillage.



En raison d'une part de l'absence des données altimétriques (pas de MNT) et du temps imparti pour nos travaux, les tests équivalents pour la détermination automatique par le SIG de l'altitude et du sens de drainage n'ont pu être réalisés. Mais ils ne devraient pas poser de problèmes particuliers avec SAVANE.

#### 4 2 3 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

Nous ne pouvons pas traiter cette partie car il n'existe pas dans SAVANE de fonction de délimitation des aires d'influence.

## 4 3 CONCLUSION

La version actuelle de SAVANE ne possède pas explicitement un outil nous permettant de faire la projection de couches comme nous l'avons défini mais les fonctionnalités de cet outil ont pu être retrouvées par une combinaison de deux fonctions particulières.

Il a été impossible par contre, de combler les lacunes actuelles de SAVANE au niveau de la délimitation des aires d'influence des stations de mesure.

Les couches créées par croisements doivent être conservées telles quelles mais, la base de données de SAVANE étant figée (§ 4 2 1), il n'est pas possible de stocker ces couches.

Pour SAVANE, il faudrait prévoir l'acquisition d'une table A0 pour une utilisation finalement plus que réduite, son acquisition ne se justifie pas.

Le SIG SAVANE, en fonction des besoins que nous avons énumérés ne paraît donc pas adapté.



## 5 VERS UNE DISCRETISATION AUTOMATIQUE

### 5.1 L'INTERFACAGE:

Les modèles hydrologiques ne peuvent pas lire directement des informations structurées en couches, en provenance de SIG. Pour que le modèle utilise les couches qui lui sont destinées, c'est à dire celles obtenues par projection comme indiqué dans la partie précédente, il faut prévoir une passerelle entre le SIG et le modèle. Cette passerelle doit lire les couches préparées et les convertir pour que le modèle puisse les utiliser directement.

Le module de conversion, en plus de son travail de préparation de couches SIG, prendra en charge les données descriptives qui n'ont pu être traitées directement par le SIG en récupérant les fichiers créés par d'autres logiciels (par exemple PLUVIOM et .HYDROM).

Dans un premier temps, le SIG se charge de préparer les informations pour les besoins du modèle.

Une fois cette opération effectuée, le module de conversion transforme les données issues des couches du SIG et de logiciels spécifiques afin de donner à cette information le format propre au modèle (figure 5.1).

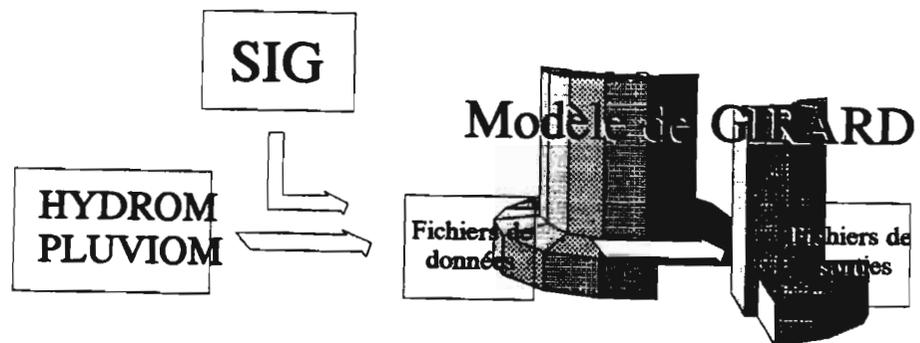


Figure 5.1

## 5 2 LE MAILLAGE AUTOMATIQUE

Tels quels les SIG répondent au processus d'automatisation qu'on attendait d'eux (§ 4 1). Une étape supplémentaire devrait pouvoir être prise en compte par les SIG : le maillage automatique. Nous en donnons ci-après les modalités d'exécution.

### 5 2 1 CARACTERISTIQUES DU MAILLAGE

Le maillage pour les modèles discrétisés se caractérise d'abord par un carroyage régulier de l'espace (maillage schéma-type § 2). Parmi les modèles, certains utilisent plusieurs tailles de mailles qui s'imbriquent dans le maillage schéma-type. Certains doivent en plus respecter des règles précises de découpage entre des mailles voisines (§ 2 1).

Deux caractéristiques sont communes à l'ensemble des modèles

- le nombre de mailles total ne doit pas dépasser une limite imposée,
- chaque modèle possède un mode de numérotation des mailles.

Pour aborder le maillage automatique nous utiliserons un modèle qui réunira toutes les caractéristiques énumérées soit:

- Trois tailles de mailles : la grande maille qui correspond à la taille d'une maille schéma type, la moyenne maille deux fois plus petite et la petite maille deux fois plus petite que la moyenne maille.
- Les mailles respectent entres-elles la notion de voisinage.

### 5 2 2 LE PRINCIPE

L'élaboration proprement dit d'un maillage peut différer d'un modèle à un autre mais on y retrouve toujours le même principe: le modélisateur détermine le maillage à partir de cartes de relief, d'occupation des sols, du tracé du réseau hydrographique, de la localisation des retenues, ...

Les couches représentatives nécessaires à l'élaboration du maillage sont les suivantes:

- le relief homogénéisé (information de type 'aire'),
- l'occupation du sol homogénéisée (de type 'aire'),
- le réseau hydrographique (de type 'réseaux'),
- les limites du bassin (de type 'aire'),
- les limites des sous-bassins (de type 'aire'),
- la localisation des retenues et des stations hydrométriques (de type 'points').

Les différentes étapes pour l'élaboration du maillage sont:

- à partir de la taille du bassin à étudier, on fixe un carroyage régulier: le maillage schéma-type qui sera calé sur le système de projection cartographique utilisé (UTM, LAMBERT, ...),

- le maillage est découpé si nécessaire en moyennes puis en petites mailles pour caractériser les limites du bassin et des sous bassins,

- en fonction de l'homogénéité ou la non-homogénéité du relief et de l'occupation du sol, le maillage va être découpé comme précédemment pour spatialiser ces caractéristiques,

- en fonction du réseau hydrographique, un découpage peut être aussi nécessaire pour respecter le tracé du cours d'eau,

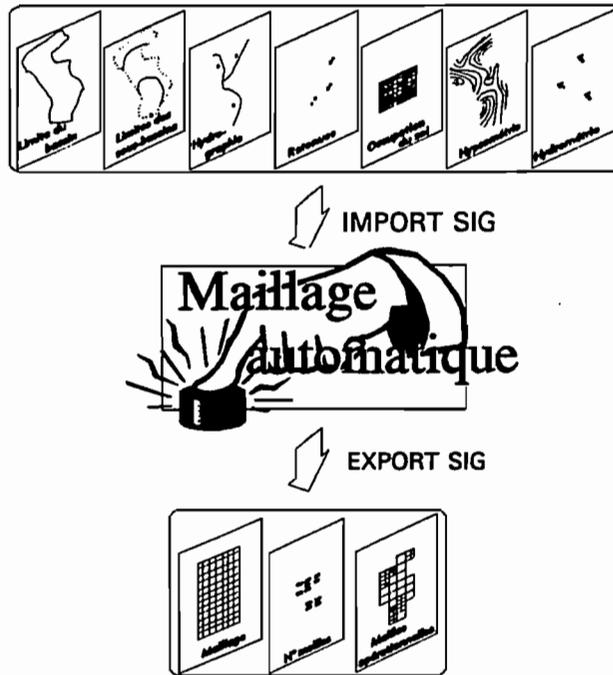
- pour ne pas avoir plusieurs stations hydrographiques ou plusieurs retenues sur une même maille, il faut découper les mailles contenant plusieurs retenues ou stations pour n'avoir qu'une station ou retenue par maille.

A l'heure actuelle aucun SIG ne sait traiter directement un maillage.

Notre but est donc de prévoir un module indépendant qui sera chargé d'effectuer le maillage automatique.

Il récupérera toutes les informations (couches SIG) qui seront nécessaires à la mise en place du maillage puis reproduira du mieux possible le cheminement du découpage.

Une fois le maillage terminé, il injectera dans le SIG le maillage sous forme d'une couche de type 'aire' et fournira au modèle les caractéristiques secondaires comme la numérotation des mailles (Figure 5.2).



Le principe du MAILLAGE AUTOMATIQUE

Figure 5.2.

### 5 2 3 DES MOYENS, DES OUTILS

Le module de maillage automatique doit être capable d'interpréter les couches SIG puis de les traiter en appliquant les règles de voisinage.

Pour ce faire il va falloir définir des outils qui permettront d'interpréter les couches SIG, le maillage et le voisinage:

L'interprétation des couches SIG sera effectuée en les rasterisant c'est à dire en les transformant en grilles (ou matrices).

Les grilles seront représentées sous forme de graphe et plus particulièrement d'un graphe s'inspirant de la structure Quad-Tree qui nous permettra de traiter le voisinage.

## La rasterisation

L'opération de rasterisation, dans les limites de notre étude, consiste à transformer une couche SIG (point, réseau, aire) en une grille régulière dont les cellules (ou pixels) contiennent les valeurs des objets de la couche (Figure 5.3).

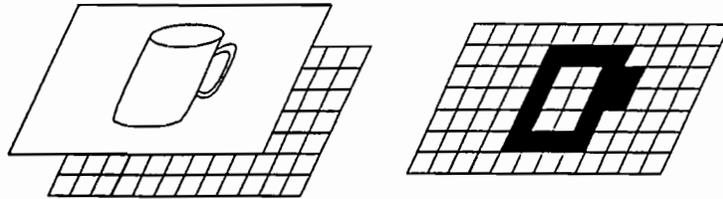


Figure 5.3

Pour ce faire on va projeter la couche SIG sur une grille selon son type:

· type points ou réseaux: les cellules de la grille prendront une valeur non nulle si la projection des objets (réseau ou point) intersectent les cellules (Figure 5.4);

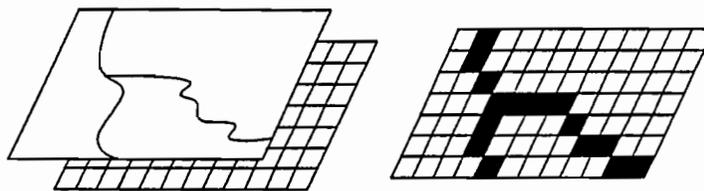


Figure 5.4

· type aires:  
deux cas sont possibles:

- chaque cellule contiendra une valeur correspondant à l'attribut de l'aire intersectée,

- si on veut mettre en évidence non pas la description des aires mais uniquement leurs limites, on traitera cette couche comme étant de type réseau (Figure 5.5).

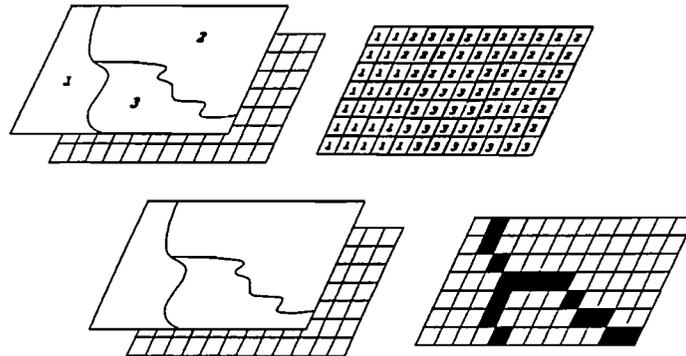


Figure 5.5

## Le graphe

### Principe

La méthode Quad Tree est à l'origine une méthode de compactage d'images:

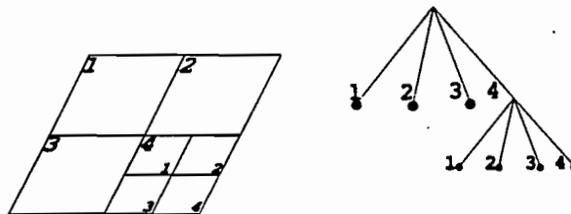
La région est découpée régulièrement en quadrants (ou carrés), chaque quadrant étant divisé à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à ce que tous les pixels du quadrant aient la même valeur.

La représentation du Quad Tree s'effectue par un graphe dont chaque quadrant est un noeud (réf. Algorithmes et structures de données ...).

La division du quadrant est symbolisée par une structure de quatre arcs: les quatre parties du quadrant, les quadrants sont numérotés de gauche à droite en commençant par le quadrant en haut à gauche.

Chaque arc est connecté à un noeud, ce noeud peut être lui-même connecté à une structure de quatre arcs ou, un noeud terminal s'il n'a pas de descendant.

Si le noeud est terminal, il contiendra une valeur appelée le poids (Figure 5.6).



• Noeud terminal

Figure 5.6

Si on assimile les noeuds du graphe à des mailles, ce principe est intéressant car le maillage possède une structure similaire à l'emboîtement de quadrants. On retrouve la structure Quad-Tree à l'intérieur d'une maille schéma-type

Le Quad Tree soulève deux problèmes:

D'une part un maillage possède en plus une taille de maille finie (trois tailles différentes dans notre étude), et d'autre part, un maillage dans son ensemble n'est pas toujours carré et on s'éloigne de l'imbrication de carré du Quad Tree.

Pour rapprocher le Quad Tree du maillage, on va 'seuiller' les noeuds (correspondant aux mailles).

Le seuil supérieur symbolisera la grande maille.

Le seuil inférieur désignera la petite maille.

En seuillant le graphe, nous éviterons d'avoir des mailles plus petites et plus grandes que la taille fixée.

Soit  $i$  le niveau du noeud correspondant à la grande maille, le descendant direct sera le noeud correspondant à la moyenne maille au niveau  $i+1$  et le noeud correspondant à la petite maille de niveau  $i+2$  (Figure 5.7).

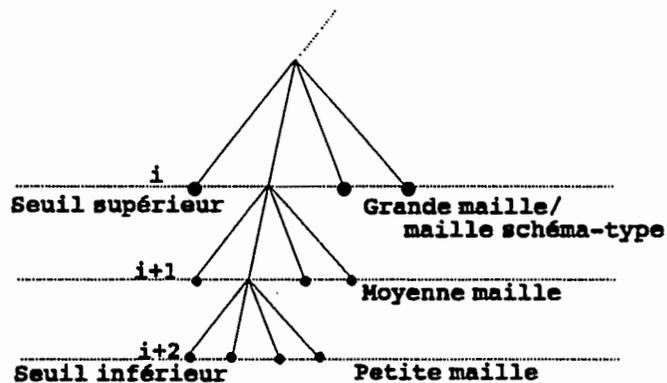


Figure 5.7

Cet outil mis en forme va nous permettre de faire automatiquement des opérations sur les mailles.

Pour le regroupement (ou optimisation), si les quatre noeuds terminaux connectés (par leurs arcs respectifs) à un même noeud possèdent le même poids, on supprime les quatre arcs et les quatre noeuds. On attribuera au noeud mis à jour le poids des noeuds supprimés.

Pour l'opération de découpage on fait l'inverse en ajoutant une structure de quatre arcs et noeuds à un noeud qui été terminal.

Le poids de l'ancien noeud terminal sera affecté aux quatre noeuds terminaux (Figure 5.8).

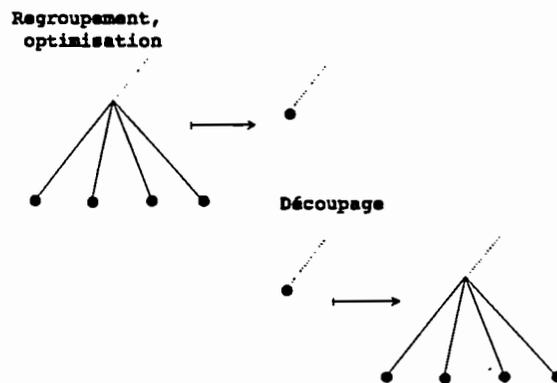


Figure 5.8

### Le voisinage

Les règles de voisinage du modèle nous autorisent à avoir soit une maille directement plus grande que sa voisine (maille petite - maille moyenne), soit directement plus petite ( maille grosse - moyenne maille) ou de même taille.

En ramenant ces règles à la description par graphe, cela revient à comparer la différence de niveau entre deux noeuds terminaux.

A l'intérieur d'une maille schéma-type, les règles de voisinage sont très simples à vérifier car la structure interne de la maille schéma-type est similaire à celle d'un graphe Quad Tree.

En se plaçant dans le graphe au seuil supérieur (c'est à dire à la taille de maille correspondant à la maille schéma-type), on cherche ses noeuds terminaux. Puis, on compare ces derniers entre eux.

Pour que la maille schéma-type soit conforme, les noeuds terminaux doivent soit être au même niveau ou avoir seulement une différence d'un niveau.

Si le Quad Tree nous permet de vérifier le contenu des mailles schéma-type, il reste à vérifier que les mailles schéma-type sont bien compatibles entre elles.

Un graphe se lit linéairement et la notion de maille voisine n'y est pas explicite.

Une maille donnée sera comparée à ses quatre voisines les plus proches c'est à dire celle du haut, celle de droite, celle du bas et celle de gauche.

Si les mailles à vérifier sont découpées, on procédera à la comparaison des mailles moyennes et petites à proximité de la limite des deux mailles schéma-type. Donc, pour la recherche sur le graphe, il suffira de chercher l'état de découpage proche de la limite des deux mailles.

Pour une maille:

- la maille schéma-type n'est pas découpée,
- la maille est découpée uniquement une fois (moyenne maille),
- la maille est découpée deux fois (petite maille).

On change si nécessaire la structure de la maille schéma type comparée avec les techniques de regroupement ou découpage:

MAILLE FIXEE/ MAILLE VOISINE	Grande maille, Schéma-type	Maille moyenne	Petite maille
Grande maille, Schéma-type	X	X	Regroupe
Maille moyenne	X	X	X
Petite maille	Découpe	X	X

Enfin si une maille voisine est découpée ou regroupée, il est important de répercuter cette modification sur les autres mailles.

## 5 2 4 LE MAILLAGE AUTOMATIQUE, LES SOLUTIONS

En fonction de la qualité du maillage à obtenir automatiquement et en tenant compte des règles décrites plus haut, on peut aborder le problème de deux manières différentes:

- le traitement en série,
- le traitement en parallèle.

### Le traitement en série

· les six couches représentatives (le relief homogénéisé, l'occupation du sol homogénéisée, le réseau hydrographique, les limites du bassin, les limites des sous-bassins, la localisation des retenues et des stations hydrométriques) sont successivement rastérisées<sup>2</sup> puis optimisées<sup>3</sup>. La rastérisation ne tiendra compte que des contours des aires (§5 2).

· la grille du bassin et de ses contours est superposée successivement aux cinq autres grilles en découpant localement si nécessaire les grandes et moyennes mailles. Ce découpage s'effectue en projetant sur la grille du bassin les frontières des aires, les tracés des réseaux et les points provenant des cinq autres couches SIG;

· vérification des règles de voisinage par redécoupage.

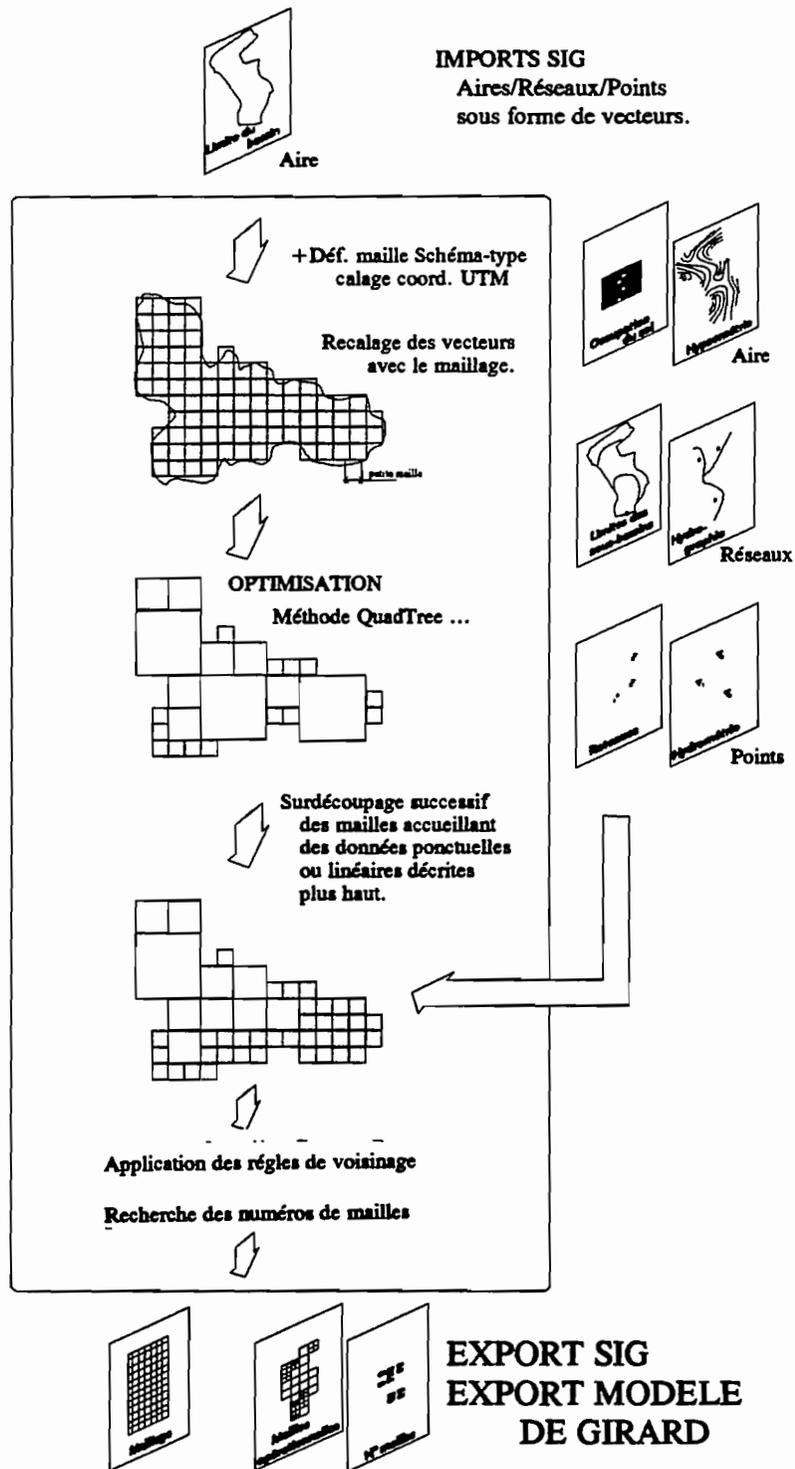
Le maillage proprement dit est alors terminé, il ne reste plus qu'à réaliser des tâches annexes comme la numérotation des mailles d'après le principe du modèle.

---

<sup>2</sup> La taille des cellules correspondra à la taille de la petite maille (§ 5 2)

<sup>3</sup> Cette opération est l'opposée de la discrétisation d'un bassin effectué 'manuellement': ici on regroupe les mailles au lieu de faire l'inverse c'est à dire de découper successivement les mailles schéma-type.

# PRINCIPE DU MAILLAGE AUTOMATIQUE



Le traitement en série du maillage Figure 5.9

## Le traitement en parallèle

Le traitement que nous avons vu s'effectue en série: discrétisation en mailles des limites du bassin puis découpage de ce bassin par les autres couches représentatives. Cette méthode donne le même poids à toutes les couches alors que certaines sont plus significatives que d'autres.

En fait, il serait plus juste de faire une approche du maillage non plus en série (séquentiellement) mais en parallèle et de définir le maillage en fonction de l'ensemble des couches SIG en établissant un scénario de regroupement de mailles qui serait relatif et non systématique:

- rastérisation des six couches comme dans l'approche en série pour le bassin versant et ses limites sans optimisation à ce stade mais en identifiant au niveau de chaque noeud la nature de l'information correspondante (forêt, retenue, ...);
- regroupement des six graphes en un seul, aux noeuds du graphe résultant, on trouve un ensemble de six attributs correspondants à chacune des couches (le codage permet de conserver pour l'instant les particularités de toutes les grilles);
- optimisation par le scénario de regroupement en fonction du codage à six chiffres.

Si cette approche, dans son principe, se rapproche plus du processus 'manuel' d'élaboration du maillage, elle a l'inconvénient, par rapport au traitement en série, d'être difficile à mettre en oeuvre. Elle demande une approche très poussée dans le développement du scénario de regroupement en fonction du codage des couches (prise en compte de nombreuses possibilités, notions de priorités entre les couches, ...).

## 5 3 CONCLUSION

Le maillage automatique ne répond pas à toutes les demandes de l'utilisateur car, bien qu'il obéisse à des règles précises, un même bassin peut être représenté par différents maillages qui mettront en valeur tel ou tel aspect de la distribution spatiale caractéristique de ce que l'opérateur veut étudier en particulier.

Le maillage automatique n'a qu'une approche globale de la discrétisation. Un compromis intéressant serait de compléter la seconde méthode de maillage automatique avec un système expert indexé au codage des couches.

En précisant le pourquoi du maillage, il serait capable de fournir des maillages qui correspondraient mieux à l'étude désirée.

Une seconde solution consisterait à proposer un maillage semi-automatique et de laisser le choix à l'opérateur de regrouper ou découper le maillage en fonction du découpage pré-établi.

## 6 CONCLUSION GENERALE

Le SIG s'avère être un outil d'une utilité certaine pour la mise en oeuvre de modèles hydrologiques distribués, il répond:

- au concept d'organisation: le SIG permet de centraliser les informations et d'y avoir accès facilement. Il est donc très efficace pour préparer l'analyse de bassins selon un ou plusieurs thèmes et pour élaborer des scénarios d'évolution.

- au concept d'automatisation: en fournissant automatiquement les informations spécifiques au modèle.

Il répond globalement aux problèmes d'organisation de l'information que nous avons soulevés.

Il est satisfaisant pour le traitement des données géographiques (discrétisation et caractéristiques des mailles). Par contre, les SIG à l'heure actuelle sont inadaptés pour le traitement des données hydroclimatiques sauf pour l'affectation d'aires d'influence aux stations de mesure.

Dans une approche plus globale, cette lacune peut être comblée par un module dit de conversion qui procéderait à l'interface entre le SIG, les outils spécifiques au traitement des séries hydroclimatiques et le modèle utilisé.

Le module en question peut aussi s'occuper du maillage automatique des bassins versants.

A partir de cette première expérience dans l'association SIG/Modèle, il est prévu:

· d'aborder la préparation des données des modèles aussi en sortie et en utilisation à part entière du modèle,

· d'utiliser un autre SIG que SAVANE se prêtant plus aux besoins de la modélisation,

· de développer la partie maillage automatique.

Pour poursuivre cette étude, l'ORSTOM m'accorde une allocation de recherche de trois mois.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### Les modèles hydrologiques

- R. MOUSSA, variables spatio-temporelle et modélisation hydrologique (thèse).  
B. ADEBNEGO, P. MEYLAN, A. MUSY, Modélisation hydrologique orientée objet, *New Direction for Surface Water Modeling*, M.L. KAVVAS.

### LACMOD

- G. GIRARD, LACMOD Manuel d'utilisation et d'exploitation du modèle MODLAC, *ARMINE-ORSTOM*.  
G. GIRARD, E. LEDOUX, J.P. VILLENEUVE, le modèle couplé, *Cahiers ORSTOM Vol. XVIII, n°4*.  
G. GIRARD, Modelo SIMMQE, *MME DNAEE*

### LES SIG

- GIS Three dimensional applications in Geographic Information Systems J. RAPER, *Taylor and Francis*.  
Acte de la 2<sup>ème</sup> conférence SIG-GIS CARTAO 91, *Hermes*.  
P. ROUET, Les données dans les SIG, *Hermes traité des nouvelles technologies*.  
E. DIDON, SIG concepts, fonctions, applications, *CEMAGREF/ENGREF*.

### SAVANE

- M. SOURIS, SAVANE documentation de l'utilisateur, *documentation technique, ORSTOM*.