

MOHAMED SALAH BEL HADJ KACEM

Modélisation numérique de l'hydrologie pour l'aide à la gestion des bassins versants, par l'utilisation conjointe des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis *un nouvel outil pour le développement durable «SAGESS »*

Thèse  
présentée  
à la faculté des études supérieures  
de l'Université Laval  
pour l'obtention  
du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

Département des sciences géomatiques  
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE  
UNIVERSITÉ LAVAL

AVRIL 1999

© Mohamed Salah Bel Hadj Kacem, 1999



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.




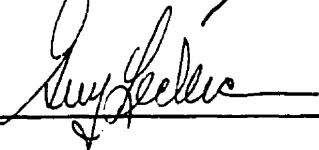

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-39334-8

**Canada**

Ce 16 jour du mois de décembre 1998, les personnes soussignées, en leur qualité de membres du jury de la thèse de Monsieur Mohamed Salah BEL HADJ KACEM, ont assisté à la soutenance de cette thèse.

NOMS	UNIVERSITÉ	SIGNATURE
Jean-Jacques Chevallier	Laval	
Jean-Loup Robert	Laval	
Christopher Gold	Laval	
Guy Leclerc	Ecole polytechnique - Montréal	
François Golay	Ecole polytechnique fédérale- Suisse	

  
Michel Dessureau SIGNATURE DU PRÉSIDENT DE LA SOUTENANCE

## Résumé (court)

Les processus hydrologiques sont soumis à la variabilité spatiale des caractéristiques physiques d'un bassin versant, de son couvert végétal, du climat, ainsi qu'aux changements induits par l'intervention d'humains sur le territoire. Devant les besoins accrus des acteurs de la gestion du territoire, les cartes ne répondent plus aux exigences scientifiques des concepteurs, des décideurs, etc. Il apparaît naturel de considérer que l'intégration des modèles numériques et des SIG pouvait être bénéfique conjointement pour les SIG ainsi que pour les modèles de simulation numérique.

Le but de ce travail de recherche consiste, à l'élaboration d'une nouvelle méthode de simulation numérique du ruissellement des eaux de surface, en faisant appel d'une part aux systèmes d'information géographique, et d'autre part à l'utilisation d'un modèle numérique par éléments finis.


## Abstract

All hydrological processes are affected by the spatial variability of the physical parameters of the watershed, and also by human intervention on the landscape. The water outflow from a watershed strictly depends on the spatial and temporal variabilities of the physical parameters of the watershed. It is now apparent that the integration of mathematical models into GIS's can benefit both GIS and three-dimension environmental models : a true modeling capability can help the modeling community bridge the gap between planners, scientists, decision-makers and end-users.


The main goal of this research is to design a practical tool to simulate run-off water surface using Geographic Information Systems and the simulation of the hydrological behavior by the Finite Element Method.



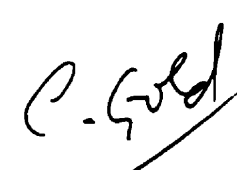
Mohamed Salah Bel Hadj Kacem  
Candidat au Ph.D., Ing (ENST)



Jean-Jacques Chevallier  
Professeur titulaire  
Directeur de thèse



Jean-Loup Robert  
Professeur titulaire  
co-directeur de thèse



Christopher Gold  
Professeur titulaire  
co-directeur de thèse

## Résumé

La complexité du fonctionnement de nos sociétés implique la mise en place d'approches globales tant sur le plan de la gestion des tâches que de la planification. Il existe aujourd'hui de nombreux outils, tant méthodologiques que techniques, permettant d'appréhender la complexité du réel dans ses multiples dimensions. Sur un plan plus technique, les outils géomatiques ouvrent des nouvelles perspectives dans les domaines de la gestion et de la planification des ressources.

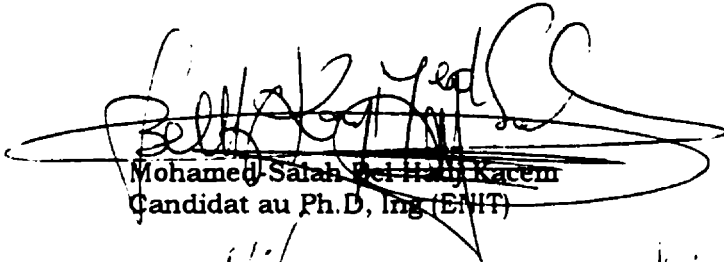
Ces moyens doivent non seulement gérer des données à référence spatiale d'origine et de nature diverse, mais aussi les analyser afin d'obtenir une information pertinente, permettant d'éclairer les décideurs dans leur prise de décision. La gestion des ressources hydriques n'échappe pas à cette tendance. En effet, les outils de gestion apportent une aide particulièrement précieuse aux décideurs. Ils permettent de synthétiser un nombre important d'informations et d'effectuer entre autres l'évaluation des risques potentiels d'inondation, d'érosion, de contamination, etc., ainsi que l'élaboration de variantes d'aménagements.

De nombreux modèles de gestion ont été développés concernant plus particulièrement l'utilisation des ressources hydriques. Ces modèles sont basés sur une approche mathématique détaillée faisant appel à de nombreux paramètres (parfois difficiles à acquérir), ou sur des relations empiriques et globales limitant fortement leur flexibilité et leur applicabilité à différentes situations. Souvent développés pour répondre à des besoins très spécifiques, ces derniers utilisent des constantes empiriques qui ne représentent pas une réalité physique et mesurable ; il est alors nécessaire de les ajuster pour chaque nouveau contexte d'application, et de redéfinir également la géométrie du territoire.


La méthode des éléments finis est l'un des outils les plus efficaces de la simulation numérique car elle s'accommode facilement d'une numérisation irrégulière et ce pour tous les domaines de la mécanique des milieux continus. Elle adopte l'approche suivante : le domaine à étudier est découpé en formes géométriques simples appelées "éléments" sur lesquels on calcule la contribution de chacun à la simulation. Cette méthode conduit à des traitements souples et efficaces qui donnent une vue synoptique des phénomènes complexes.

traitements souples et efficaces qui donnent une vue synoptique des phénomènes complexes.

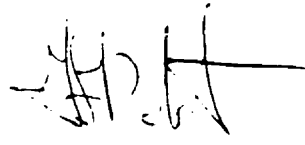
Cette recherche vise à explorer et valider le couplage entre les systèmes d'information géographique et la modélisation numérique par éléments finis. Le prototype a été développé dans le contexte d'une démarche décisionnelle type de gestion de bassins hydrographiques. En effet, le "couplage" des systèmes d'information géographique et la simulation numérique par éléments finis permet une analyse originale et complète de territoires complexes tels que les bassins versants. Cette approche, combinant ces deux techniques de pointe, est novatrice sur le plan méthodologique. Un modèle de simulation hydrologique aux éléments finis 2D a été développé et validé avec une réalité - terrain, permettant d'assurer la continuité numérique, depuis la saisie des données sur le territoire jusqu'à l'interprétation humaine.



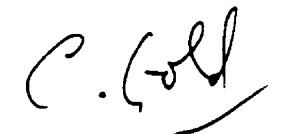
Mohamed Sarah Bel Hadj Kacem  
Candidat au Ph.D, Ing (ENIT)



Jean-Jacques Chevallier  
Professeur titulaire  
Directeur de thèse



Jean-Loup Robert  
Professeur titulaire  
co-directeur de thèse



Christopher Gold  
Professeur titulaire  
co-directeur de thèse

# **Dédicace**

À ma mère Saïda, mon père Mohsen

À mes sœurs Fatma et Hinda, mon frère Slim.

À mon épouse Mouna, à ma chère regrettée belle mère Habiba.

## Remerciements

L'originalité est une composante nécessaire dans une recherche doctorale, mais aussi un objectif particulièrement difficile à atteindre dans les remerciements. En effet, entreprendre un doctorat après douze années de carrière professionnelle n'est pas trivial. Une thèse de doctorat représente la conjonction des efforts de nombreuses personnes et j'aimerais citer les principales personnes qui ont contribué au succès de mon travail.

Le professeur Jean-Jacques Chevallier a été un directeur patient qui m'a soutenu durant toute ma thèse par ses conseils judicieux. Le soutien continu qu'il m'a apporté, que ce soit d'ordre scientifique ou moral, m'a été très précieux et m'a permis de mener ce travail à terme. Il a su m'insuffler le goût du savoir, mais également le plaisir de la recherche et l'émerveillement continu.

Je suis profondément reconnaissant au professeur Jean Loup Robert, agissant comme codirecteur de cette thèse, de m'avoir inculqué d'une manière heuristique l'aspect numérique des éléments finis. Il m'a profondément inspiré, tant par sa rigueur scientifique que par son pragmatisme de travail. Son aide a été cruciale pour mener à terme cette recherche.

Je tiens à exprimer chaleureusement et sincèrement ma gratitude au professeur Christopher Gold, codirecteur, pour les discussions fructueuses relatives à l'aspect algorithmique et structure des données, et pour son soutien et ses encouragements. Son appui m'a été très important durant l'étape critique et décisive de cette recherche.

Pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner cette thèse, je remercie vivement le professeur François Golay de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Je voudrais aussi adresser ma profonde gratitude au professeur Guy Leclerc, de l'École Polytechnique de Montréal, pour avoir agi comme conseiller durant mon cheminement pour ses remarques fructueuses et très constructives et pour avoir accepté l'examen de cette thèse.

L'aspect financier pour une recherche doctorale constitue un axe principal de rotation. Je tiens à souligner principalement l'apport financier de la Chaire industrielle en géomatique appliquée à la foresterie. Ma profonde reconnaissance à Monsieur Tijani Ben Lassoued Président, du BETBEL de Tunisie, pour son support financier durant la seconde moitié du



parcours de cette thèse. Je remercie également le CRDI, le fond de la francophonie AUPEL-UREF, le Fond FCAR.

Cette recherche a été réalisée dans deux centres de recherche, soit le centre de recherche en géomatique (CRG) et le groupe Interdisciplinaire de recherche en éléments finis (GIREF). Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux personnes suivantes : Jean-Marie Bilodeau, François Anton. Je remercie Jean-Jacques Maine du GIREF et Florence Bézier du département de génie civil.

Je voudrais exprimer également ma reconnaissance à Monsieur Mohamed Mahdi Mlika, Ministre de l'environnement et de l'aménagement du territoire pour ses conseils fructueux et sa vision stratégique, Monsieur Ameer Horchani, Secrétaire d'État des ressources hydrauliques au ministère de l'agriculture, pour ses prestigieux conseils. Également, ma reconnaissance va à Monsieur Mongi Safra, Secrétaire d'État de la Recherche Scientifique. Mes vifs remerciements vont à Monsieur Montassar Ouali, Secrétaire d'État de l'informatique, pour ses conseils et ses encouragements continus. Je remercie aussi Monsieur Salah Hannachi, ex-Directeur de l'Institut des Études Stratégiques et Ambassadeur de Tunisie au Japon.

Je tiens à remercier les professeurs suivants, qui m'ont recommandé favorablement pour mes recherches doctorales au Canada, Khelifa Maalel, Directeur de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), Mohamed Rached Boussema, Directeur du LTSIRS à l'ENIT, Taïb Hadri, Directeur de l'École Polytechnique de Tunisie, Abderrazak Daaloul, de L'Institut National Agronomique de Tunis, Abdellaziz Mougou, Président de l'Institut de Recherche des Sciences Agronomiques, Ali Bousnina, Recteur de l'Université de Tunis II.

Je remercie également mes amis, qui m'ont encouragé durant mon cheminement, Monsieur Mohamed Habib Haddad, Président du Conseil de l'Ordre des Ingénieurs de Tunis et Gouverneur de Kasserine, Monsieur Abdelaziz M'Chala, Noomane Ghodbane, professeur à la Faculté des Sciences de Tunis et Directeur de la coopération internationale au Ministère de l'enseignement supérieur, Monsieur Abdelkadeur Hamdane, Directeur Général de génie rural au ministère de l'agriculture.

Finalement je remercie de tout mon cœur toute ma famille, particulièrement ma mère Saïda, mon père Abdelhamid, mes sœurs Fatma et Hinda, mon frère Slim.

# Table des matières

<b>Résumé (court)</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Remerciements</b>	<b>6</b>
<b>Table des matières</b>	<b>8</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>13</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>14</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Mise en contexte</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Problématique</b>	<b>16</b>
1.2.1 Limitation de l'hydrologie analytique	16
1.2.2 Modélisation hydrologique à l'aide des SIG	17
1.2.3 Modélisation des écoulements par éléments finis	18
1.2.4 Intégration des SIG et des méthodes numériques	19
<b>1.3 But et objectifs de la recherche</b>	<b>20</b>
1.3.1 But de la recherche	20
1.3.2 Les objectifs généraux	20
1.3.3 Les objectifs spécifiques	21
1.3.4 Limites fixées à la recherche	21
<b>1.4 Originalités scientifiques</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Méthodologie</b>	<b>22</b>
<b>1.6 Structure de la thèse</b>	<b>23</b>
<b>2 L'aide à la décision pour l'aménagement du territoire</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Introduction</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Le paradigme du développement durable</b>	<b>25</b>
2.2.1 Définition du développement durable	26
2.2.2 Les caractéristiques du développement durable	28
2.2.3 Le développement durable et les technologies de l'information	29
<b>2.3 Pyramide de gestion</b>	<b>29</b>
2.3.1 La planification stratégique	30
2.3.2 La planification tactique	30
2.3.3 La planification opérationnelle	30
<b>2.4 Concept d'aide la décision</b>	<b>31</b>
2.4.1 Définition de l'aide à la décision	31
2.4.2 Processus décisionnel standard	32
2.4.3 Aide à la décision en milieu rural : Projet SAGATELE	33
<b>2.5 Description du processus décisionnel abordé</b>	<b>36</b>
<b>2.6 Problématique des eaux de surface</b>	<b>39</b>
2.6.1 Perspective mondiale	39

2.6.2	Stratégie tunisienne	39
2.6.3	La gestion durable des eaux de surface	42
<b>2.7</b>	<b>Conclusion et synthèse du chapitre</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>Système d'information géographique et modélisation du territoire</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Systèmes d'information géographique</b>	<b>44</b>
3.2.1	Définitions des SIG	44
3.2.2	Données spatiales et descriptives	45
3.2.3	Modélisation du relief en géomatique	46
3.2.3.1	Les tessellations irrégulières du type « TIN »	46
3.2.3.2	Triangulation de Delaunay	48
<b>3.3</b>	<b>Analyse spatio-temporelle dans les SIG</b>	<b>49</b>
3.3.1	Analyse spatiale	49
3.3.2	Analyse temporelle	49
<b>3.4</b>	<b>Modélisation du territoire et simulation</b>	<b>50</b>
3.4.1	Modélisation mathématique	51
3.4.2	Simulation	52
<b>3.5</b>	<b>Conclusion et synthèse du chapitre</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>La modélisation en hydrologie analytique</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>Les modèles hydrologiques</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Les paramètres d'entrée</b>	<b>55</b>
4.3.1	La pente	56
4.3.2	Le type du sol	57
4.3.3	La végétation	58
4.3.4	L'utilisation du sol	58
4.3.5	La superficie	58
4.3.6	La forme du bassin versant	59
4.3.7	Le réseau hydrographique	59
4.3.8	La pluviométrie	60
<b>4.4</b>	<b>Les paramètres de sortie</b>	<b>60</b>
4.4.1	Le coefficient de ruissellement	60
4.4.2	Hydrogramme des crues	61
4.4.2.1	Hydrogramme standard.	62
4.4.2.2	Hydrogramme unitaire	62
4.4.2.3	Analyse de l'approche de l'hydrogramme unitaire	63
<b>4.5</b>	<b>La modélisation mathématique en hydrologie</b>	<b>65</b>
4.5.1	Les étapes d'élaboration d'un modèle hydrologique	66
4.5.2	Modèles analytiques	67
4.5.2.1	Modèle Stanford IV	67
4.5.2.2	Modèle HEC-4	67
4.5.2.3	Méthode de «l'US Soil Conservation Service» (SCS)	68
4.5.3	Les modèles distribués	69
4.5.3.1	Modèle CEQUEAU	70
4.5.3.2	Modèle HydroTEL	70
4.5.3.3	Limitations des modèles distribués	71
<b>4.6</b>	<b>Conclusion et synthèse du chapitre</b>	<b>72</b>

<b>5</b>	<b>Couplage SIG-MEF pour la modélisation hydrologique : «le nouveau paradigme»</b>	<b>74</b>
5.1	Introduction	74
5.2	Variation spatio-temporelle des paramètres hydrologiques	74
5.3	Limitations des modèles analytiques	74
5.4	Structures géométriques des SIG et des éléments finis	75
5.4.1	Les structures géométriques des SIG	75
5.4.2	Les structures géométriques de base en modélisation numérique	76
5.4.2.1	La méthode des différences finies	76
5.4.2.2	La méthode des éléments finis	78
5.5	Couplage SIG-MEF : vers une synergie numérique	78
5.5.1	Problèmes d'intégration des SIG et de la modélisation hydrologique	79
5.5.2	Solution proposée couplage SIG-MEF	79
5.5.3	Présentation du nouveau paradigme	81
5.5.3.1	Énoncé du nouveau paradigme	81
5.5.4	Introduction de la continuité numérique	81
5.5.4.1	Défi de la génération automatique du maillage par éléments finis	81
5.5.4.2	Représentation du relief à l'aide du MNT	83
5.5.4.3	Notion de matrice de transfert des attributs	84
5.5.4.4	Intégration d'un modèle d'un modèle d'infiltration «locale»	85
5.6	Conclusion et analyse du chapitre	86
<b>6</b>	<b>Développement mathématique et par éléments finis du modèle de simulation hydrologique</b>	<b>87</b>
6.1	Introduction	87
6.2	Description de la modélisation par éléments finis	87
6.2.1	Évolution de la méthode des éléments finis	89
6.2.2	Légitimation de la simulation par éléments finis	89
6.3	Démarche de modélisation par éléments finis	90
6.3.1	Systèmes discrets et systèmes continus	91
6.3.2	Méthode des résidus pondérés	92
6.3.3	Transformations des formes intégrales	93
6.3.4	Approximation par éléments finis.	93
6.3.4.1	Approximation nodale	93
6.3.4.2	Approximation par sous-domaines	93
6.3.5	Définition de l'espace de discrétisation en éléments finis	94
6.4	Formulation du modèle hydrologique	95
6.4.1	Modèle mathématique	95
6.4.2	Modèle d'écoulement 2D	96
6.4.3	Les conditions aux limites	99
6.4.4	Formulation par éléments finis	100
6.4.4.1	Intégration par partie «forme faible »	101
6.4.4.2	Approximation sur un élément de référence	101
6.4.4.3	Résolution par la méthode de Newton-Raphson	102
6.5	Conclusion et analyse du chapitre	102

<b>7</b>	<b>Application et validation du modèle</b>	<b>104</b>
<b>7.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>104</b>
<b>7.2</b>	<b>Les essais de validation du modèle</b>	<b>105</b>
7.2.1	Les résultats d'essais numériques	105
7.2.2	Essais de validation du modèle	105
7.2.3	Étude de sensibilité du modèle	106
7.2.3.1	Sensibilité du modèle au frottement	106
7.2.3.2	Sensibilité aux termes d'inertie	109
<b>7.3</b>	<b>Validation numérique et applications</b>	<b>109</b>
7.3.1	Secteur - pilote et source des données utilisées	109
7.3.2	Description de la géométrie	109
7.3.3	Hydrogrammes simulés	114
7.3.4	Apport de la spatialisation de l'infiltration	114
7.3.5	Influence de l'intensité pluviométrique	116
7.3.6	Simulation des événements pluviaux en série	116
<b>7.4</b>	<b>Les applications du prototype</b>	<b>118</b>
7.4.1	Outils de base pour la simulation environnementale	118
7.4.2	Simulation et suivi des inondations	119
7.4.3	La simulation hydrologique : outils d'aide à la planification	123
7.4.4	Évaluation de l'impact des aménagements	126
<b>7.5</b>	<b>Incidence sur les besoins en modélisation du relief</b>	<b>130</b>
7.5.1	Raffinement du maillage	130
7.5.2	Adaptation du maillage	131
7.5.3	Simulation des retenues des barrages collinaires	133
7.5.4	Localisation des sites des ouvrages hydrauliques	136
7.5.5	Évaluation du raffinement et de l'adaptation du maillage pour la simulation des retenues hydrauliques	137
<b>7.6</b>	<b>Analyse critique des outils de modélisation du relief</b>	<b>138</b>
7.6.1	Les aspects techniques	138
7.6.2	Les aspects décisionnels	139
<b>7.7</b>	<b>Conclusion et analyse du chapitre</b>	<b>140</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>142</b>
<b>8.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>142</b>
<b>8.2</b>	<b>Rappel des objectifs et des originalités</b>	<b>142</b>
<b>8.3</b>	<b>Synthèse des résultats obtenus</b>	<b>143</b>
8.3.1	Aide à la décision	143
8.3.2	Hydrologie numérique	144
8.3.3	Les contributions et originalités	145
<b>8.4</b>	<b>Les difficultés rencontrées</b>	<b>146</b>
<b>8.5</b>	<b>Perspectives de recherche et de développement</b>	<b>147</b>
8.5.1	Perspectives à court terme	147
8.5.2	Perspectives à moyen terme	148
8.5.3	Perspectives à long terme	148
<b>9</b>	<b>Références bibliographiques</b>	<b>150</b>

<b>10</b>	<b>Annexes</b>	<b>182</b>
<b>10.1</b>	<b>Formulation par éléments finis</b>	<b>182</b>
10.1.1	Forme forte	182
10.1.2	Intégration par partie «forme faible »	182
10.1.3	Forme faible de l'expression de la profondeur d'eau «h»	183
10.1.4	Transformation des dérivées	183
10.1.5	Transformation des intégrales	183
10.1.6	Intégration numérique	184
10.1.7	Discrétisation de la forme intégrale	184
10.1.8	Calcul de la matrice tangente élémentaire	186
<b>10.2</b>	<b>Transfert des données du « TIN » vers « MEF »</b>	<b>189</b>
<b>10.3</b>	<b>Modèle hydrologique par éléments finis</b>	<b>193</b>
<b>10.4</b>	<b>Extraction de la frontière du bassin versant</b>	<b>205</b>
<b>10.5</b>	<b>Extraction des variables nodales</b>	<b>208</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 Les quatre domaines de la recherche	22
Figure 1.2 Structure de la thèse	24
Figure 2.1 Pyramide de décision (Davis et Olson 1985)	30
Figure 2.2 Processus décisionnel (Martel 1981; Bel Hadj Kacem et al. 1998)	33
Figure 2.3 Détermination des priorités d'aménagement (Chevallier et al. 1993-b)	35
Figure 2.4 Conception des plans d'aménagement (Chevallier et al. 1993-b)	35
Figure 2.5 Le processus décisionnel proposé pour la gestion du bassin versant	37
Figure 2.6 Stratégie tunisienne de mobilisation des eaux de	42
Figure 3.1 Structure de triangulation de Delaunay (Gold 1994-a)	48
Figure 4.1 Principe des modèles hydrologiques standards	56
Figure 4.2 Hydrogramme standard à décrue exponentielle (Llamas 1993)	63
Figure 4.3 Hydrogramme «Soil Conservation Service» (Llamas 1993)	64
Figure 4.4 Représentation schématique de d'hydrogramme unitaire (Boughton 1987)	64
Figure 4.5 Évolution spatio-temporelle des aménagements sur un bassin versant	72
Figure 5.1 Structure matricielle «raster»	76
Figure 5.2 Structure vectorielle «TIN»	76
Figure 5.3 Principe de la méthode des différences finies (Robert 1993)	77
Figure 5.4 Maillage par différences finies	77
Figure 5.5 Maillage par éléments finis	77
Figure 5.6 Principe du prototype proposé	80
Figure 5.7 Modélisation hydrologique à l'aide du nouveau «paradigme»	83
Figure 5.8 Notion de matrice de transfert : attributs descriptifs en valeur numérique	84
Figure 5.9 Modèle d'infiltration de Horton (1967)	86
Figure 6.1 Application de la modélisation par éléments finis en aéronautique	88
Figure 6.2 Démarche de modélisation par éléments finis (Dhatt et Touzot 1981)	90
Figure 6.3 Classification des systèmes physiques (Dhatt & Touzot 1981)	91
Figure 6.4 Convention du niveau de référence	96
Figure 6.5 Approximation sur un élément de référence	101
Figure 7.1 Situation du bassin versant pilote	111
Figure 7.2 Modèle numérique de terrain : maillage régulier (200 m)	112
Figure 7.3 Modèle numérique de terrain : maillage régulier (100 m)	112
Figure 7.4 Modèle numérique de terrain : maillage adapté (200 m)	113
Figure 7.5 Modèle numérique de terrain : adapté (100 m)	113

Figure 7.6 Influence de l'infiltration sur le débit de crue	115
Figure 7.7 Hydrogramme sous diverses intensités (sans infiltration)	117
Figure 7.8 Simulations des pluies en série	117
Figure 7.9 Champ des vitesses (t = 60 s)	120
Figure 7.10 Champ des vitesses (t = 1200 s)	120
Figure 7.11 Champ des vitesses (t = 2400 s)	121
Figure 7.12 Hauteur d'eau sur le bassin (t = 60 s)	122
Figure 7.13 Hauteur d'eau sur le bassin (t = 1200 s)	122
Figure 7.14 Hauteur d'eau sur le bassin (t = 2400 s)	123
Figure 7.15 Représentation thématique du champ des vitesses selon X	124
Figure 7.16 Champ des vitesses selon Y	125
Figure 7.17 Intensité du champ des vitesses	125
Figure 7.18 Champ des vitesses (représentation vectorielle), état 1 : sans aménagements	127
Figure 7.19 Champ des vitesses, état 1 : sans aménagements	128
Figure 7.20 Champ des vitesses : aménagement de type banquettes de rétention	128
Figure 7.21 Champ des vitesses (représentation vectorielle) : état 2 avec aménagements	129
Figure 7.22 Champ des vitesses sous forme thématique : état 2 : avec aménagements	129
Figure 7.23 Maillage régulier 200 m	131
Figure 7.24 Maillage régulier 100 m	131
Figure 7.25 Maillage adapté 200 m	132
Figure 7.26 Maillage adapté 100 m	132
Figure 7.27 Simulation d'une retenue collinaire à l'aide d'un maillage régulier (h = 20 m)	134
Figure 7.28 Simulation d'une retenue collinaire à l'aide d'un maillage adapté (h = 20 m)	134
Figure 7.29 Simulation d'un barrage collinaire à l'aide d'un maillage régulier (h = 50 m)	135
Figure 7.30 Simulation d'un barrage collinaire à l'aide d'un maillage adapté (h = 50 m)	135
Figure 7.31 Localisation des ouvrages hydrauliques	137
Figure 7.32 Maillage irrégulier avant nettoyage	139
Figure 7.33 Maillage irrégulier après nettoyage	139

## **Liste des tableaux**

Tableau 7.1 Essais de sensibilité du modèle aux frottements	108
Tableau 7.2 Données physiques de base (Pouliot, 1994).	110
Tableau 7.3 État récapitulatif des tests de simulation	110
Tableau 7.4 Besoins en modélisation du relief pour les divers nœuds décisionnels	140



# **1 Introduction générale**

## **1.1 Mise en contexte**

L'ampleur des bouleversements qui caractérisent notre époque marquera sans doute l'histoire de l'humanité d'une façon aussi déterminante que la révolution industrielle au siècle dernier. En effet, plusieurs facteurs, comme la mondialisation des communications, la globalisation des échanges économiques et la diffusion des technologies de l'information, se sont conjugués dans un laps de temps très court en une synergie de facteurs qui bouleversent toutes les dimensions de la vie sociale, économique, politique et scientifique. Cette accélération des rythmes économiques et sociaux, liés à la distribution des activités, pose des défis pour les aménagistes qui doivent planifier des interventions et proposer des réglementations, dans un univers dont la complexité s'accroît avec la juxtaposition rapide de multiples interventions sectorielles.

Les équilibres naturels, économiques ou sociaux semblent partout être ébranlés. Et malheureusement les paramètres qui conditionnent ces mêmes équilibres se multiplient à l'infini, emportés par un courant de mondialisation fruit du progrès mais également, dans bien des cas, cause de fragilité et de misère. C'est pourquoi la gestion et l'exploitation des ressources hydriques doivent se faire en prenant compte de l'ensemble des facteurs, autant physiques que socio-économiques, conditionnant leur pérennité. Le processus de prise de décision devient sans cesse plus complexe, ce qui crée un besoin pour des outils d'analyses mieux adaptés.

La gestion des ressources naturelles et le développement durable sont sans conteste l'un des domaines d'application privilégiés des technologies géomatiques. Dans le cas particulier de la conservation des eaux et du sol, et par le fait même l'application des politiques de gestion relatives à ces ressources constitue un défi de taille pour les pays semi-arides, qui font face actuellement à de graves problèmes de désertification, d'érosion et de salinisation.

Les applications en planification et en aménagement posent des problèmes spécifiques aux concepteurs des systèmes d'information géographique (SIG). La principale utilité de ces

applications réside dans leur possibilité d'analyser les conséquences d'un choix hypothétique et d'y apporter les ajustements nécessaires. En effet, les décideurs ont besoin d'assistance afin d'être en mesure de répondre à des questions telles que : *«quel sera l'impact de la construction d'un barrage en un endroit donné, sur la population, sur l'environnement et sur les sources d'énergie, que ce soit au niveau local, régional ou national?»*. La variabilité spatiale des données, la diversité des milieux et la complexité des mécanismes physiques liés par exemple à des écoulements en surface, impliquent d'appréhender une multitude de paramètres souvent difficiles à mesurer.

Les problématiques des ressources hydriques s'inscrivent dans le cadre plus général décrit précédemment et leur perception, elle aussi, a évolué. Il fut un temps où les problèmes de gestion et d'exploitation des ressources hydriques se traduiraient essentiellement par les termes tels que maîtrise des eaux, corrections, dérivations, retenues, etc. Ce vocabulaire issu de l'ingénierie demeure d'actualité. Cependant, il doit aujourd'hui s'accompagner de nouveaux termes, tels que : **environnement, équilibre, conservation, préservation, développement durable**, etc. Cette mutation nous semble à présent naturelle. Pourtant, il faut avouer que la prise de conscience de la nécessité d'une approche globale s'est faite au prix d'erreurs considérables qui, souvent malheureusement, ont coûté et coûtent encore fort cher tant à la société qu'à l'environnement.

## 1.2 Problématique

### 1.2.1 Limitation de l'hydrologie analytique

Les méthodes classiques de détermination des écoulements sur les petits bassins versants se heurtent à une difficulté d'appréciation de l'aptitude au ruissellement (Abednego 1989 ; Banton *et al.* 1996 ; Bennis 1993 ; Bernier 1990). En effet, ces méthodes considèrent que : (1) le bassin versant est considéré d'une façon globale, (2) la détermination des paramètres d'écoulements du bassin<sup>1</sup> est relativement subjective et intuitive ; dès lors, la précision globale peut être médiocre, souvent la valeur attribuée réellement à ces paramètres dépend grandement de l'expérience de l'ingénieur (Burlando et Rosso 1996 ; Dooge 1968 ; Dunne et Black 1970-b ; Cheibani 1994 ; Soliz 1994).

---

<sup>1</sup> Les paramètres d'écoulements du bassin : (pente, perméabilité, coefficient du ruissellement, etc.)

Dans le domaine de l'hydrologie de surface, de nombreux modèles de simulation ont été développés pour la gestion des ressources hydriques (Binley et Beven 1993 ; Cheibani 1994 ; Fleming 1975 ; Fortin *et al.* 1995 ; Ganoulis 1996 ; Vieux et Farjallah 1996 ; Zollweg 1994). Ces modèles sont basés sur une approche mathématique détaillée faisant appel à de nombreux paramètres souvent difficiles à acquérir, ou sur des relations empiriques et globales limitant fortement leur flexibilité et leur applicabilité à différentes situations.

Développés pour répondre à des besoins très spécifiques, les modèles hydrologiques de type analytique utilisent des constantes empiriques qui ne représentent pas une réalité physique et mesurable (Banton *et al.* 1996 ; Bennett 1994 ; Bennis 1993 ; Faultier et March 1993 ; Lloyd 1978). Il est nécessaire alors de les ajuster pour chaque nouveau contexte d'application. Lors de leur développement, de nombreux compromis sont faits quant à leur représentativité de la réalité. La qualité des modèles hydrologiques réside à la fois dans leur simplicité et dans l'équilibre du compromis réalisé entre la simplification et la crédibilité de la représentation adoptée (Bernier 1990, Beven et Binley 1993 ; Bathurst et O'Connell 1993 ; Koide et Wheeler 1993 ; Yang et Parent 1996). Il apparaît donc nécessaire de concevoir une approche permettant d'allier les qualités des modèles complexes (représentativité et crédibilité) avec celles des outils plus simplifiés (facilité d'utilisation et de paramétrisation).

### **1.2.2 Modélisation hydrologique à l'aide des SIG**

Les processus hydrologiques variant dans l'espace et dans le temps en fonction de la variabilité spatio-temporelle des entrées météorologiques, de l'occupation du sol, de la variabilité spatiale de la topographie et de la pédologie, ainsi qu'aux changements induits par l'intervention humaine sur le territoire (Abednego 1989 ; Kirkby 1988 ; Lane 1982 ; Lane et Wallage 1976 ; Lek *et al.* 1996 ; Lichty et Karlinger 1990). Par conséquent, le volume d'eau recueilli par un bassin versant est étroitement tributaire de la variabilité spatiale et temporelle de ses caractéristiques physiographiques (Lek *et al.* 1996 ; Loukas et Quick 1996 ; Luker *et al.* 1993).

Les systèmes d'information géographique ont connu un développement particulièrement rapide au cours des dernières décennies et sont maintenant largement utilisés pour l'étude et la gestion des données spatialisées (Battad 1993 ; Beven et Moore 1993 ; Cahill et Smith 1993 ; Chuhadaroglu 1992 ; Chu et Marble 1995 ; Dangermond 1987, De Floriani 1994-b ; Deanna 1997 ; De Oliveira *et al.* 1997 ; Lee 1994). En particulier, les SIG sont de plus en plus utilisés dans la gestion des ressources et particulièrement dans la modélisation hydrologique. Ils offrent un potentiel élevé pour la gestion de la distribution spatiale des

données relatives au territoire (Djokic et Maidment 1993 ; Faultier et March 1993 ; Geertman et Ritsema Van Eck 1995 ; Hinaman 1993 ; Hutchinson 1993 ; Jenson 1993 ; Jeton et Smith 1993). Par leur potentiel d'acquisition, de stockage, de mise à jour, et de traitement des données ; les SIG présentent un avantage majeur, offrant une grande flexibilité pour la description locale du territoire nécessaire pour la modélisation hydrologique et hydraulique (Batty et Xie 1994 ; Jianping et Lathrop 1995 ; Julien *et al.* 1996 ; Hutchinson 1993 ; Loukas et Giuck 1993, 1996 ; Luker *et al.* 1993).

### **1.2.3 Modélisation des écoulements par éléments finis**

La méthode des éléments finis est un des outils les plus efficaces de la simulation numérique (Batoz et Dhatt 1990 ; Donéa 1992 ; Dhatt et Touzot 1981 ; Reddy 1986 ; Robert 1983 ; Ziekiewicz et Taylor 1989). C'est une technique de discrétisation, qui s'applique à tous les problèmes de mécanique des milieux continus (Robert et Chandry 1990 ; Ghanmi 1995, Frenette 1996 ; Bel Hadj Kacem et Robert 1997-a. ; Bel Hadj Kacem *et al.* 1998-b ; Richards *et al.* 1993). Le domaine dans le quel on désire effectuer la simulation est découpé en "éléments". L'application des conditions d'équilibre et des lois de comportement de la mécanique permet de construire des équations approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en un ensemble bien choisi de points, appelés les nœuds de la discrétisation.

Suite aux progrès réalisés dans le domaine de l'informatique au cours de deux dernières décennies (Armstrong et Richard 1995), la simulation numérique par éléments finis a atteint aujourd'hui un état appréciable de maturité (Barna et Yosibah 1996 ; Drolet 1997). En effet, dans le domaine des ressources en eau, il est possible de mettre en œuvre des modèles numériques de ce type pour simuler adéquatement le comportement physique de certains processus. La méthode des éléments finis s'est peu à peu imposée comme étant une des méthodes numériques les plus puissantes connue à ce jour. Désormais, elle est considérée comme un standard pour la simulation numérique (Batoz et Dhatt 1990 ; Barna 1996 ; Ghanmi 1995 ; Frenette 1996 ; Khelifa 1992 ; Khelifa *et al.* 1993 ; Bel Hadj Kacem *et al.* 1998-a).

La simulation des processus environnementaux (inondations, glissements de terrains, propagation de la pollution dans les estuaires, etc.), quel que soit son objectif, exige la prise en compte simultané de nombreux phénomènes physiques (ruissellement, infiltration, transport, sédimentation, etc.). La variabilité spatiale des données, la diversité des milieux et la complexité des mécanismes physiques liés par exemple à des écoulements sous

terrains ou en surface, impliquent d'appréhender une multitude de paramètres souvent difficiles à mesurer (Bel Hadj Kacem *et al.* 1996, Bel Hadj Kacem *et al.* 1998-c ; Bennet 1994; Kleinstreuer 1978). Si certains phénomènes peuvent être simulés à l'aide de techniques classiques (modèles mathématiques, méthodes statistiques, etc.), d'autres exigent le recours à des connaissances de spécialistes (Robert 1983 ; Barna et Yosobah 1996 ; Ghanmi 1995 ; Frenette 1996).

Parmi les atouts de la méthode des éléments finis, elle permet aux planificateurs de simuler les conditions réelles et de prévoir différents scénarios en fonction de ces conditions (Chu et Marble 1995 ; Cung 1987). Combinée aux SIG, elle intègre plusieurs méthodes d'analyse et de mesure. Cette méthode permet de mieux comprendre les processus hydrologiques d'un bassin hydrographique, et ainsi de prendre de meilleures décisions pour la conservation à long terme.

#### **1.2.4 Intégration des SIG et des méthodes numériques**

Depuis quelques années, le couplage des SIG avec différents types de modèles (physiques, numériques, stochastiques, etc.) a reçu une attention particulière de la part de la communauté internationale œuvrant dans le domaine des SIG (1993), aboutissant à la tenue de la première conférence internationale de l'intégration des SIG et de la modélisation environnementale (Dangermond 1987 ; Goodchild 1993 ; Jankowski 1990 ; Kemp 1992-a et 1992-b, Knick *et al.* 1997 ; Nyerges 1992, Raper 1989 ; Raper et Kelk 1993). Avec l'avènement des méthodes numériques (différence finis, volume finis, éléments finis), le nombre de paramètres physiques à inclure dans un modèle, ainsi que leur variation spatio-temporelle ne constituent plus une entrave pour réaliser des simulations efficaces et représentatives de la réalité sur le territoire (Bel Hadj Kacem *et al.* 1998, Richards et 1993). Cependant, «Le principal facteur qui entrave l'émergence de la modélisation numérique par éléments finis pour les problèmes tridimensionnels, est la saisie automatique de la géométrie» (Dhatt et Touzot 1981).

Les systèmes d'information géographique permettent d'intégrer, d'analyser et de gérer de grandes quantités de données spatiales, sont très utilisés dans la gestion des ressources naturelles (Moore 1988, Moore *et al.* 1993-a ; Moore *et al.* 1993-b, O'Callaghan et Garner 1993 ; Openshaw 1990). Mais cette technologie n'est pas assez complète pour en faire un outil de prise de décision suffisamment perfectionnée (Ozemoy et Sichertman 1981 ; Aangeenbrug 1991 ; Birkin *et al.* 1996 ; Chevallier 1992, Chevallier 1993-a). En fait, le SIG «sait» présenter les données liées à une problématique ou à un thème spécifique, mais il ne

«sait pas» quelle décision doit prendre l'utilisateur (Chevallier 1993-b, Chevallier 1994-a). Il ne lui offre donc pas de fonctionnalités spéciales pour l'aider à prendre sa décision : ce n'est pas son objectif. (Chevallier 1994, 1994-b, Chevallier *et al.* 1997).

Il apparaît que l'intégration des modèles numériques et des SIG pourra être bénéfique aussi bien pour les SIG que les modèles de simulation. En effet, le potentiel de modélisation numérique permet de simuler différents scénarios permettant aux SIG d'atteindre leur objectif ultime d'être considérés comme des véritables outils d'aide à la décision (Bel-Hadj Kacem *et al.* 1998).

### **1.3 But et objectifs de la recherche**

#### **1.3.1 But de la recherche**

Le but de cette recherche consiste en l'élaboration d'une nouvelle méthode de simulation numérique du ruissellement des eaux de surface, en faisant appel d'une part aux systèmes d'information géographique, et d'autre part à l'utilisation d'un modèle numérique par éléments finis, ce qui permettra la simulation du comportement hydrologique d'un bassin versant, suite à un événement pluvial (Bel-Hadj Kacem *et al.* 1998).

#### **1.3.2 Les objectifs généraux**

Les objectifs de la recherche sont reliés aux différents domaines traités dans un contexte décisionnel :

- *Structurer* le processus décisionnel pour la planification et la gestion des ressources hydriques au niveau du bassin versant.
- *Évaluer* le potentiel de l'utilisation de la méthode des éléments finis pour appuyer le processus proposé.
- *Utiliser* les SIG comme outil de modélisation du bassin versant, permettant d'extraire automatiquement la géométrie du relief et les attributs descriptifs.
- *Élaborer* une analyse critique des modèles hydrologiques traditionnels dans le but de dégager leurs limitations.
- *Concevoir* une stratégie de couplage des SIG et la méthode des éléments finis.
- *Développer* un modèle de simulation hydrologique par éléments finis.

### 1.3.3 Les objectifs spécifiques

La présente recherche possède les objectifs spécifiques suivants : le développement d'un outil qui servira au départ à la «*conception décisionnelle*» des sites des barrages résolvant ainsi un problème crucial pour les pays arides, en deuxième phase l'outil peut servir comme moyen de gestion et de prédiction contre les catastrophes telles **l'identification**, le **suivi**, et la **gestion** des zones inondables. Les objectifs spécifiques rattachés à cette recherche sont :

- *Étudier* l'effet de l'inertie au niveau de la formulation mathématique du modèle éléments finis.
- *Évaluer* l'apport des techniques d'adaptation et du raffinement du maillage pour le choix des sites potentiels de retenues collinaires.
- *Jauger* l'impact des scénarios d'aménagements sur le régime hydrologique du bassin versant du modèle de simulation numérique.
- *Identifier* les fonctionnalités à ajouter aux SIG actuels nécessaires pour satisfaire les besoins de la modélisation numérique par éléments finis.

### 1.3.4 Limites fixées à la recherche

Notre recherche se trouve à la confluence de quatre domaines (figure 1.1), qui sont déjà très vastes et encore confrontés à un certain nombre de problèmes théoriques. Ainsi, pour éviter de nous disperser, nous avons limité notre champ d'étude :

- Aux aspects généraux relatifs de l'aide à la décision pour l'aménagement du territoire,
- À la modélisation du territoire (bassin versant) à l'aide des SIG,
- Au couplage des SIG et de la méthode des éléments finis en vue de développer les systèmes d'aide à la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant.

## 1.4 Originalités scientifiques

La présente recherche présente les originalités scientifiques suivantes :

- Le couplage de la méthode des éléments finis et des systèmes d'information géographique pour la modélisation hydrologique des bassins versants.

- L'extraction automatique des paramètres physiques à partir du SIG, nécessaires pour alimenter le modèle mathématique par éléments finis.

## 1.5 Méthodologie

Cette recherche vise à rapprocher les quatre champs d'étude complexes que beaucoup de choses séparent (figure 1.1). Bien que notre travail de recherche nous ait conduits à les étudier en profondeur, il a été hors de portée de cet écrit de couvrir «à fond» chacun de ces quatre domaines de mes compétences. Pour contourner cette difficulté, nous avons procédé à une présentation de l'aide à la décision, des SIG, des modèles hydrologiques, et de la méthode des éléments finis qui soit synthétique, rigoureuse et accessible à tous les lecteurs ayant déjà réfléchi à la problématique des ressources en eau à l'échelle du bassin versant. Enfin, pour transmettre le «message», nous avons eu recours volontairement à des *redondances* dans l'écriture dans le but d'amener le lecteur à suivre aisément l'enchaînement.

La méthode proposée est basée sur le constat suivant : la gestion des ressources naturelles, en particulier celles des eaux de surface à l'échelle du bassin versant, peut et devrait mieux tirer profit de l'utilisation conjointe des SIG et des éléments finis.

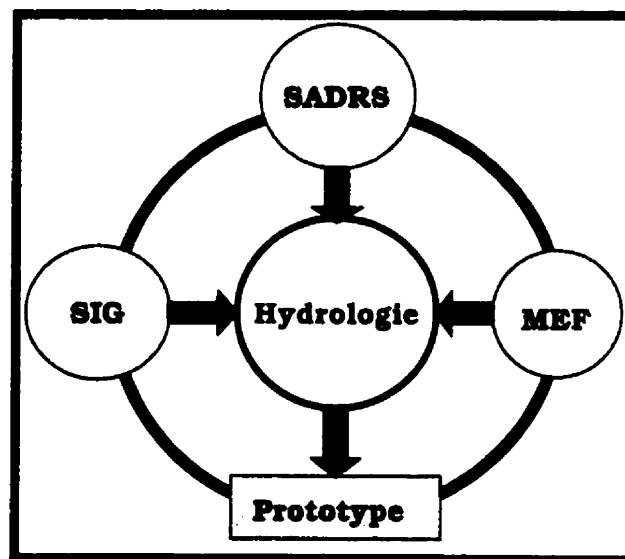


Figure 1.1 Les quatre domaines de la recherche

La méthodologie adoptée est basée sur des concepts pragmatiques et heuristiques. En effet, nous avons diagnostiqué une **analogie** entre les structures géométriques de type triangulées



utilisées dans les SIG pour la modélisation du relief et, la méthode des éléments finis qui utilise différentes formes géométriques pour la modélisation numérique des équations aux dérivées partielles et, en particulier la forme géométrique triangulaire. La forme triangulaire a suscité notre intérêt pour explorer le couplage deux disciplines en vue de la modélisation hydrologique des eaux de surface à l'échelle du bassin versant. En effet, nous verrons dans le chapitre 5 en détail que toute la mécanique sous-jacente au couplage SIG-MEF est fondée sur les fonctionnalités et les concepts de base offerts par les SIG, tel les techniques de superposition connues souvent sous le terme «overlay». La structure géométrique de base triangle aura un triple rôle : (1) au niveau du SIG : la modélisation du relief à l'aide du module TIN, (2) l'extraction au niveau nodale des attributs descriptifs, (3) au niveau modélisation numérique par éléments finis, la discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles.

## **1.6 Structure de la thèse**

Après ce premier chapitre de mise en situation et d'orientation, le présent rapport se compose de deux grandes parties (figure 1.2).

La première partie est consacrée aux concepts et théories relatives aux quatre domaines auxquels touche cette recherche. On retrouve les principaux éléments suivants :

- Les concepts fondamentaux de l'aide à la décision et l'aménagement du territoire (chapitre 2) ;
- Les caractéristiques des SIG et la modélisation du relief avec un regard critique quant aux limites relatives à la modélisation temporelle (chapitre 3) ;
- La modélisation hydrologique : ce chapitre décrit les fondements de l'hydrologie analytique, en faisant ressortir les paramètres les plus pertinents pour alimenter les modèles de simulations. Une description sommaire de quelques modèles hydrologiques les plus populaires sera présentée et accompagnée d'une analyse critique (chapitre 4) ;
- La présentation de la technique du couplage des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis. Dans ce chapitre, le nouveau paradigme sera énoncé (chapitre 5).

La deuxième partie expose le développement du modèle hydrologique aux éléments finis

ainsi que les résultats obtenus. On peut distinguer les deux chapitres suivants :

- La description de la méthode des éléments finis sera présentée d'une manière succincte, ainsi que le modèle de simulation hydrologique (chapitre 6) ;
- La validation du modèle développé sera présentée, l'analyse des résultats comportera des niveaux d'interprétation correspondants aux différents domaines concurrents pour cette recherche (chapitre 7).

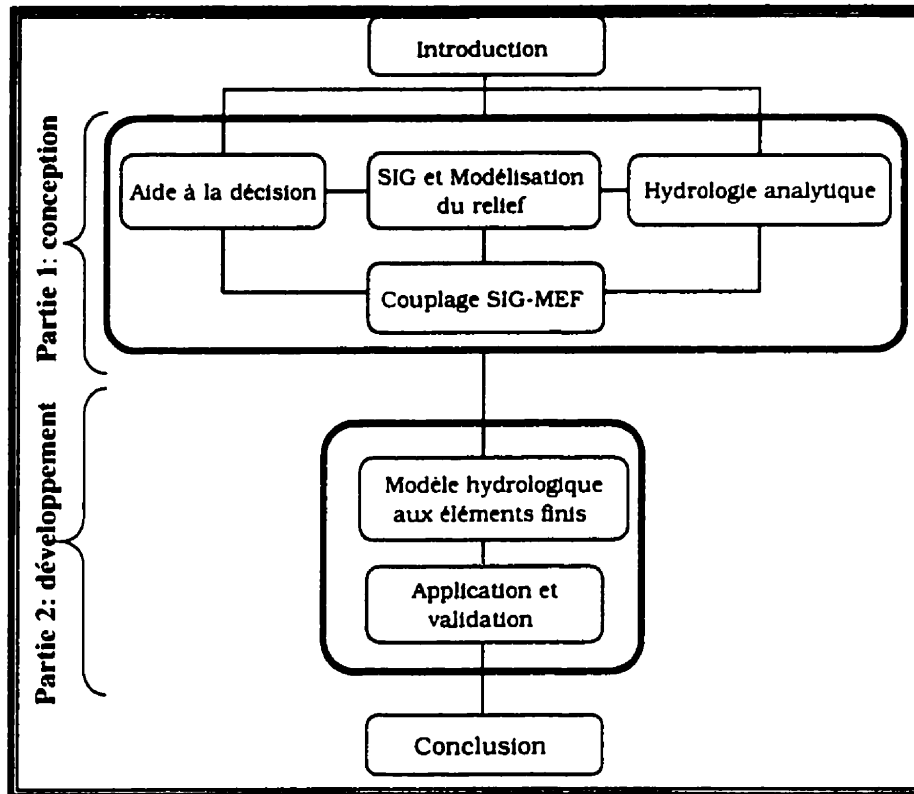


Figure 1.2 Structure de la thèse

## 2 L'aide à la décision pour l'aménagement du territoire

### 2.1 Introduction

La gestion des ressources naturelles et le développement durable sont sans conteste l'un des domaines d'application privilégiés des technologies géomatiques (Chevallier *et al.* 1993-b ; Chevallier et Gagnon 1994-b ; Gagnon et Coleman 1990 ; Goodland 1988 ; Hallett *et al.* 1996). L'analyse des situations problématiques et la mise au point de plans d'aménagement intégré ne sauraient se passer d'informations fiables, à jour et bien adapter aux domaines concernés. Par ailleurs, recherche et développement proposent sans relâche de nouveaux moyens de **simulation**, **modèles mathématiques**, ou encore **techniques de visualisation** de l'information. Cependant, les données et moyens informatiques les plus évolués ne constituent pas un but en eux-mêmes (Chevallier *et al.* 1997) ; on ne peut réellement exploiter tout leur potentiel que s'ils sont mis au service d'un processus décisionnel structuré.

Le présent chapitre part de ces hypothèses, et montre comment l'utilisation de technologies géomatiques **peut** et **doit** influencer en profondeur le processus décisionnel, et les méthodes de travail des gestionnaires eux-mêmes. L'argument est illustré par un exemple dans le domaine de la gestion des ressources naturelles (conservation des eaux et des sols, mobilisation des eaux de ruissellement).

### 2.2 Le paradigme du développement durable

Le développement durable est un concept multidimensionnel touchant à nombre de domaines importants (l'environnement, le commerce, la viabilité culturelle, l'urbanisation, etc.). Il importe que toutes ces questions soient abordées lorsqu'on élabore une vision stratégique relative à une activité particulière. Selon Goodland (1988), le développement durable doit inclure cinq composantes : (1) la *durabilité environnementale*, (2) la *durabilité économique*, (3) la *durabilité politique*, (4) la *durabilité sociale* (5) la *durabilité culturelle*.

L'auteur considère que le développement durable en fonction de ces cinq critères choisis permet :

- *d'évaluer et d'élaborer* les propositions relatives aux programmes et aux politiques,
- *d'influencer* les politiques et les institutions favorables au développement durable,
- *d'appuyer* une sensibilisation accrue aux conditions nécessaires pour assurer une généralisation du développement durable.

Goodland (1988) estime que le maintien de l'intégrité écosystémique et de la diversité biologique est absolument indispensable à la durabilité du développement ; de même, la durabilité économique assure la promotion d'un développement économique à la fois efficace et équitable. La poursuite de l'objectif de durabilité dépasse également le cadre des frontières nationales. La mondialisation de l'économie a érodé la capacité de tous les pays de mettre en œuvre des politiques économiques indépendantes. L'envergure mondiale des principales menaces qui pèsent sur l'environnement a conduit à une coopération internationale sans précédent axée sur le règlement de problèmes communs, par exemple, celui de l'amincissement de la couche d'ozone.

Le développement durable étant davantage un *processus* qu'un *état* qu'on atteindrait une fois pour toutes, il suppose des *changements continuels*. La nécessité d'aborder les questions dans une approche intégrée plutôt que fragmentaire soulèvera des défis majeurs d'ordre méthodologique et institutionnel (Munn 1989). Par exemple, les barrières qui séparent les disciplines traditionnelles devront disparaître pour trouver des solutions intégrées à des problèmes complexes. Cela obligera les économistes, les écologistes, les sociologues, les socio-anthropologues et les politicologues, pour ne citer que ceux-là, à élaborer des stratégies analytiques communes, propres à intégrer les concepts et points de vue provenant des autres disciplines.

### **2.2.1 Définition du développement durable**

Les préoccupations au sujet du développement durable à l'échelle mondiale sont récentes ; elles ont pris naissance avec le concept de durabilité environnementale. Pendant la plus grande partie de l'histoire de l'humanité, la question d'une utilisation durable des ressources ne s'est pas posée : les incidences sur l'environnement étaient faibles ou localisées ; les populations se déplaçaient à mesure que les ressources s'épuisaient ; enfin, le progrès technologique était si lent qu'il était presque imperceptible (UICN 1988 ; UICN 1989 ; UICN 1990).

Le développement durable a attiré l'attention du monde entier et est devenu un enjeu politique majeur avec la publication, en 1987, de *«Notre avenir à tous»*, rapport de la *Commission mondiale sur l'environnement et le développement* (CMED), également connue sous le nom de *Commission Brundtland* (Brooks et David 1988). Il n'existe pas à l'heure actuelle de définition universellement acceptée du développement durable.

Selon *Notre avenir à tous*, le développement durable :

*«est un développement qui répond aux **besoins du présent** sans **compromettre la capacité des générations futures** de répondre aux leurs»* (Brooks et David 1990).

Cette affirmation propose une formulation du but ultime du développement durable. Il n'est donc pas surprenant que le concept de développement durable en soit venu à faire l'objet de nombreuses interprétations (Korten et David 1998). En effet, plusieurs conceptions du développement durable, différentes selon les intérêts en cause, sont en train de voir le jour. De toute évidence, certaines d'entre elles déforment la vision qui animait la CMED.

Il existe une nette différence sur le contenu du concept de développement durable entre les pays développés et les pays en développement. Dans les pays du Nord, les protagonistes du développement durable ont eu tendance à mettre davantage l'accent sur les aspects environnementaux et économiques (Daly et Cobb 1989). Le débat politique a principalement porté jusqu'ici sur la façon d'intégrer les coûts d'ordre environnemental dans la prise de décisions économiques, tout en protégeant les emplois et la compétitivité industrielle. Par contre, dans les pays du Sud, l'accent est mis sur la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme et la croissance économique, ce qui n'a rien de surprenant. Les considérations sociales, culturelles et politiques jouent aussi, dans la définition de la durabilité, un rôle plus important dans l'hémisphère Sud que dans les pays industrialisés.

Bien qu'on ne soit pas encore parvenu à se mettre d'accord sur une vision globale du développement durable, il est possible et utile d'explorer la portée du concept, les principes et éléments qu'il recouvre et les défis qu'il présente. Dans ce contexte, la démarche la plus éclairante consiste à considérer le développement durable comme un processus dynamique plutôt que comme une fin. Il a pour but d'amener le monde vers un avenir meilleur en infléchissant les types du développement ainsi que les stratégies, les méthodes et les attitudes à l'égard du développement. Pour l'ACDI<sup>2</sup>, *«le développement durable constitue un*

---

<sup>2</sup> ACDI : Agence Canadienne de Développement International

*cadre général souple, susceptible d'être modifié en fonction de l'évolution des situations et de l'accroissement des connaissances* ». (Brooks et David 1988).

### **2.2.2 Les caractéristiques du développement durable**

Dans l'état actuel de la réflexion sur le développement durable, les principales caractéristiques du concept sont les suivantes (Huston 1989) :

- ***Le développement durable exige une perspective à long terme.*** Le cadre temporel retenu par les décideurs, du secteur public autant que du secteur privé, est souvent été trop court. Le fait d'adopter une approche de développement durable suppose, par définition, une perspective à long terme. Cette observation s'applique avec une évidence particulière, mais pas du tout de façon exclusive, à la prise de décisions économiques. Les politiques et les programmes doivent également tenir compte des valeurs culturelles profondément enracinées qui évoluent lentement.
- ***Le développement durable utilise une approche intégrée.*** Un message important que véhicule le développement durable est qu'il existe un lien étroit entre les comportements humains et les processus naturels. C'est la nature qui conditionne ce que les sociétés sont en mesure de réaliser. Les êtres humains agissent sur la nature de manière à la fois bénéfique et nuisible. Ce n'est qu'en comprenant mieux les liens complexes existant entre les systèmes naturels et les systèmes sociaux, et en s'inspirant de cette compréhension pour élaborer des approches intégrées de développement, qu'on pourra construire un avenir durable. Les efforts déployés pour interpréter et appliquer le concept ont permis d'associer à une même entreprise des biologistes et des économistes, des dirigeants de pays riches et de pays pauvres et des représentants de niveau national et local. Cette intégration soulève, au point de vue institutionnel, des défis de taille.
- ***Le développement durable repose sur des approches participatives.*** Pour qu'un développement durable commence et encore plus pour qu'il soit accepté, il faut que les populations participent à la prise des décisions. Le développement durable doit se faire avec les connaissances et le soutien de la communauté, ce qui suppose une participation plus active du public aux décisions qui le concernent. La meilleure façon d'y parvenir consiste à démocratiser les sociétés et à permettre aux collectivités d'influer réellement sur l'utilisation des ressources dont elles sont tributaires.

### 2.2.3 Le développement durable et les technologies de l'information

Dans la ligne de réflexion ayant conduit la conférence de Rio<sup>3</sup>, on prend de plus en plus conscience de la fragilité des ressources naturelles et des écosystèmes, et du besoin impératif de mieux contrôler l'impact des activités humaines sur la nature (Chevallier et Gagnon 1994-b). Les termes de «*biodiversité*», de «*gestion intégrée des ressources naturelles*» et «*de développement durable*» font désormais partie du vocabulaire courant des intervenants sur le territoire.

Le terme *intégration* est utilisé à tort et à travers, sans que l'on sache très bien ce que cela implique. La satisfaction de tels objectifs impose de développer de nouvelles manières de *penser*, de *décider*, de *considérer* et de *décrire* le territoire et les problèmes qu'il pose aux décideurs de tout niveau (Chevallier et Daudelin 1996, Chevallier *et al.* 1997).

D'un point de vue plus pragmatique, on a parfois considéré que les technologies de l'information - l'informatique et la géomatique, en particulier - constituaient la solution pour résoudre les problèmes actuels de l'aménagement et de la gestion des ressources. Le paradigme auquel nous nous référons dans cette recherche est celui de la pyramide de décision (Davis *et al.* 1985), appliqué en particulier dans Bédard et Chevallier [1989].

## 2.3 Pyramide de gestion

La pyramide de gestion est un concept très largement accepté et utilisé dans la plupart des domaines. Elle est constituée de trois niveaux soit le niveau de gestion stratégique, le niveau de gestion tactique et le niveau de gestion opérationnel. À ceux-ci sont associés des horizons de planification qui correspondent respectivement aux échéanciers de long terme, de moyen terme et de court terme (figure 2.1).

Kreitner [1992] insiste sur l'importance de comprendre que les objectifs définis à chaque niveau constituent un enchaînement de moyens et de fins (means-ends chain). En partant

---

<sup>3</sup> Le sommet de la terre a eu lieu en juin 1992 à Rio de Janeiro au Brésil, organisé à l'initiative l'Organisation des Nations Unies (ONU) suivant l'initiative de certains pays industrialisés, afin de débattre des problèmes environnementaux qui n'obéissent pas aux frontières politiques, tels la destruction de la couche d'ozone, la désertification, les inondations, la pollution maritime, etc.

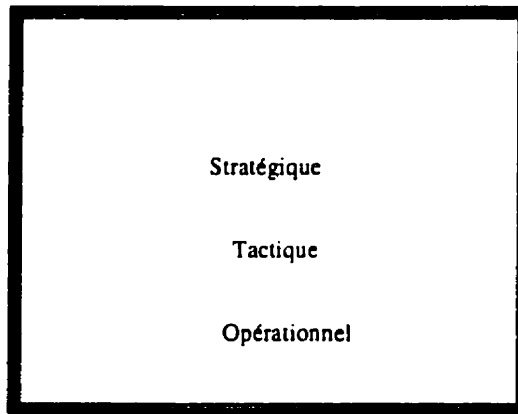


Figure 2.1 Pyramide de décision (Davis et Olson 1985)

d'un objectif général on élabore des moyens - les actions - eux aussi généraux, propres à atteindre l'objectif.

### **2.3.1 La planification stratégique**

Elle fixe les grandes orientations permettant aux décideurs de modifier et d'améliorer ou de conforter sa position face à une situation donnée. Elle correspond à une planification à long terme de l'aménagement du territoire, qui se traduit par des plans directeurs. Simultanément, les instruments de synthèse de l'état existant et outils prospectifs permettant de cerner des solutions d'aménagement par la négociation et le dialogue politique. Ces plans sont basés sur des informations synthétiques très générales. La formulation, qui décrit la tendance souhaitée est relativement grossière et peu précise. De même, la localisation spatiale utilisée est peu précise, générale et approximative.

### **2.3.2 La planification tactique**

Elle correspond à la planification normative détaillée, traduite dans les plans d'aménagement. Ces plans sont basés sur des informations plus spécifiques relatives au territoire et à son équipement. Dans les deux cas, la formulation est plus précise que celle de la planification stratégique. La localisation spatiale devient plus explicite.

### **2.3.3 La planification opérationnelle**

Elle consiste à formuler les objectifs à court terme et à déterminer les actions qui en découlent, sous une forme très précise et très ciblée. La localisation spatiale est précise est détaillée. Il s'agit d'une activité de routine, qui exige néanmoins l'interprétation à grande



échelle des plans d'aménagement, selon une démarche rigoureuse. Des informations très détaillées sur l'état d'équipement du territoire au niveau local sont donc nécessaires.

## 2.4 Concept d'aide la décision

Les développements actuels visent à élaborer des outils et méthodes aidant à maîtriser la complexité des problèmes abordés en gestion des ressources naturelles. Les systèmes de ce type sont généralement désignés par l'expression *systèmes d'aide à la décision* (Chevallier 1992, Chevallier 1993-a, Chevallier *et al.* 1993-b). Sur le territoire, il convient donc de transposer et d'adapter ces recherches, afin de disposer de systèmes d'aide à la décision à référence spatiale. Mais le défi semble très grand.

Le champ de l'aide à la décision a fait l'objet de recherches menées par plusieurs scientifiques de différents domaines (Anastassopoulos *et al.* 1998 ; Armstrong *et al.* 1992 ; Bel Hadj Kacem 1996-c ; Chevallier 1994-a ; Clarke 1990 ; Clark 1995 ; Tkach 1997) constituant un pôle attractif pour diverses études et applications. Parmi ces applications, nous retrouvons plusieurs cas relatifs à des problèmes à référence spatiale (Abel *et al.* 1994, Cowen et Ehler 1994, Roy *et al.* 1992, Simos 1989, Wright et Hoinkes 1996), (1) planification urbaine et régionale, (2) transports, (3) gestion des ressources naturelles, (4) gestion environnementale (Boussema *et al.* 1992 ; Chevallier *et al.* 1993-d ; Chevallier *et al.* 1994-c ; Roy *et al.* 1992).

### 2.4.1 Définition de l'aide à la décision

Roy et Bouyssou [1993] définissent l'aide à la décision comme étant :

*«l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourants à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part.»*

Cette définition recouvre deux aspects essentiels : d'une part, (1) la modélisation formalisée ou non notamment celle des préférences du décideur et, d'autre part (2) l'analyse de solutions et l'évaluation de leurs conséquences.

Selon Roy et Bouyssou [1993] :

*«Il est préférable de se faire une **opinion à partir d'informations approximatives** ayant un **caractère exhaustif** plutôt qu'à partir de **calculs exacts** ne prenant pas en compte **certains facteurs essentiels** ».*

#### **2.4.2 Processus décisionnel standard**

Le processus décisionnel est considéré comme un ensemble d'activités déclenché par un stimulus, et aboutissant à un engagement spécifique à l'action. Simon [1987] a proposé un modèle du processus décisionnel, défini en trois grandes phases : (1) l'*intelligence* pour identifier le problème (2) l'*analyse* pour générer les solutions possibles et définir les critères (3) le *choix* pour sélectionner une solution parmi celles possibles. Ce modèle est vraisemblablement le plus connu dans le domaine de l'aide à la décision, a inspiré plusieurs autres travaux qui lui ont ajouté des modifications, et notamment des extensions allant au-delà de l'étape du choix pour l'implantation et la mise en œuvre des résultats. D'autres auteurs comme (Martel 1988 ; Chevallier 1996) proposent un raffinement du processus décisionnel en cinq phases (figure 2.2) qui sont les suivantes :

- **Intelligence:** au sens étymologique du terme, l'intelligence, c'est la compréhension de quelque chose : la première étape consiste à considérer les différentes sources d'information et à les exploiter pour cerner la réelle question qu'il convient d'aborder, ses composantes, les degrés de liberté du décideur, etc. Les SIG classiques jouent un rôle essentiel par la visualisation du territoire à considérer, l'analyse des données (logique ou spatiale), la représentation cartographique des résultats d'analyse (Aangeenbrug 1991 ; Aronoff 1989-a ; Aronoff 1989-b).
- **Analyse:** cette notion recouvre ici, non pas l'analyse du territoire (qui fait partie de la phase d'intelligence), mais l'analyse des solutions possibles au problème posé : on élabore des variantes, envisage des scénarios, identifie les critères de choix, simule, etc. Dans la mesure où les actions envisagées et leur impact peuvent être représentés spatialement, un SIG peut aussi être très utile pour imaginer, représenter et gérer les solutions envisagées ; on trouvera dans (Richer 1992 ; Chevallier 1992) une description du potentiel, mais aussi des limites des logiciels SIG en la matière.
- **Choix** En matière de planification ou décision la partie la plus importante se situe au niveau du choix. À ce stade, le décideur évalue chacune des variantes envisagées

en regard des critères. De nombreuses méthodes ont été développées pour assister le décideur dans cette opération cruciale (Laaribi 1995 ; Tkach 1997).

- **Décision:** Elle prendra compte dans certains cas d'une multitude de facteurs peu ou mal formulés, facteurs affectifs, politiques, intuitifs, socio-économiques, etc. (Martel 1988).
- **Réalisation** La variante choisie par le décideur est alors réalisée. Un suivi des conséquences doit être assuré, pour permettre un ajustement éventuel, de même que la mise à jour des bases de données. Le suivi rend aussi possible l'amélioration des diverses méthodes et outils utilisés (algorithmes de simulations, outils de choix, etc.) tout au long du processus (Golay 1992 ; Larribi 1995 ; Gold 1994-a ; Gold 1994-b).

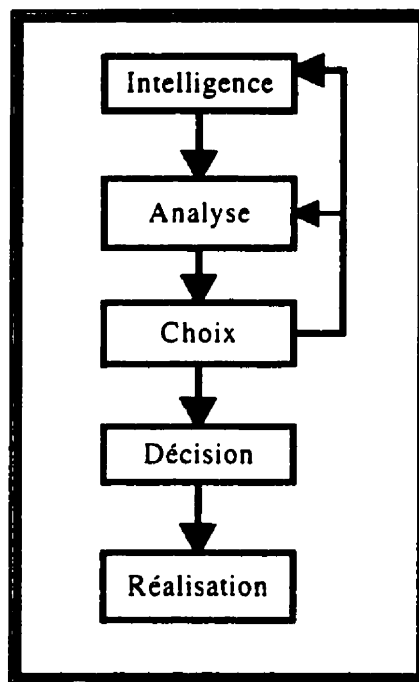


Figure 2.2 Processus décisionnel (Martel 1981; Bel Hadj Kacem et al. 1998)

#### 2.4.3 Aide à la décision en milieu rural : Projet SAGATELE

Pour doter les institutions tunisiennes concernées d'un outil permettant l'analyse, la gestion et la conception des scénarios d'aménagement de conservation des eaux et des sols nécessaires pour la sauvegarde du patrimoine national tunisien, le CRDI<sup>4</sup> a financé depuis 1992- 1994 un projet de recherche de trois ans dans le domaine de l'information spatiale et

<sup>4</sup>CRDI : Centre de Recherche et de Développement International

de l'aide à la décision pour l'aménagement rural. Le projet a abouti à un développement d'un outil d'aide à la décision pour l'aménagement de territoire portant l'acronyme SAGATELE<sup>5</sup> (Boussema *et al.* 1992 ; Chevallier *et al.* 1993-b, Chevallier *et al.* 1994-c ; Pouliot 1994). Depuis, d'autres contributions à ce projet ont été réalisées ou sont cours de réalisation, notamment : (1) l'interface à l'utilisateur pour la description des scénarios d'aménagement (Soldati 1995), (2) l'intégration des données socio-économiques (Lamary et Bel Hadj Kacem 1997 ; Ferland 1996).

Le prototype SAGATELE comporte deux niveaux de décision :

- **La première étape** consiste à fixer les priorités d'aménagement du bassin versant par la délimitation des zones jugées prioritaires faces aux problèmes de l'érosion. La détermination des priorités est basée sur une méthode dite paramétrique permettant d'hierarchiser les problèmes à l'origine de l'érosion. La figure 2.3 présente les facteurs sélectionnés pour déterminer les zones prioritaires d'intervention.
- **La seconde étape** consiste en l'établissement de plans d'aménagement des versants et des cours d'eau (figure 2.4). Ces deux types d'aménagement ont été volontairement distingués car ils impliquent des prises de décision et phénomènes différents. En effet, l'aménagement de versants s'effectue sur une zone prioritaire d'intervention délimitée lors de la première étape et oblige l'ingénieur à sélectionner la technique la plus appropriée suivant les caractéristiques physiques, sociales et économiques de la région. L'aménagement des cours d'eau, quant à lui, consiste à rechercher la meilleure combinaison qui servira à la recharge de nappe, à la création des points d'eau, etc.

Un aspect important de l'aide à la décision en gestion des ressources naturelles réside dans le recours à des modèles de simulations et des logiciels de planifications spécialisés. Dans

---

<sup>5</sup> SAGATELE : Système d'Aide à la Gestion et à l'Aménagement du Territoire pour la Lutte contre l'Érosion

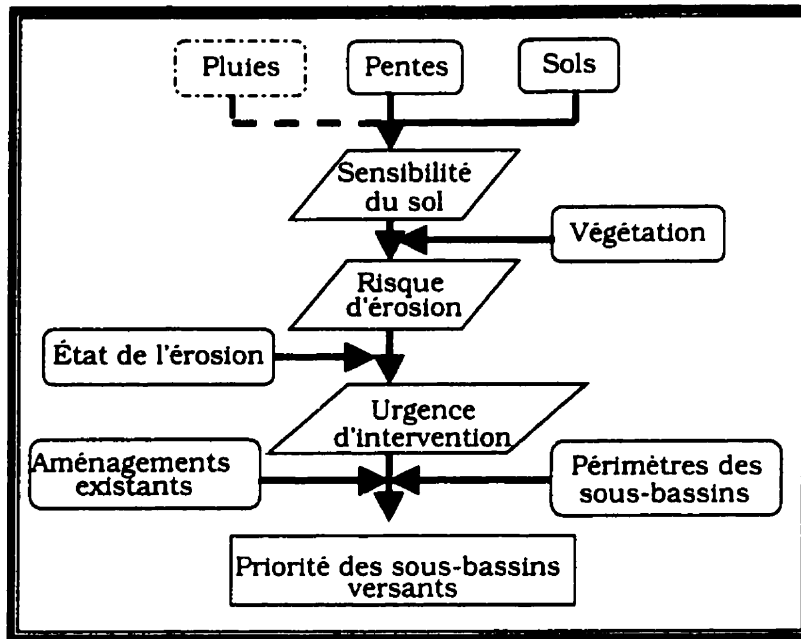


Figure 2.3 Détermination des priorités d'aménagement (Chevallier *et al.* 1993-b)

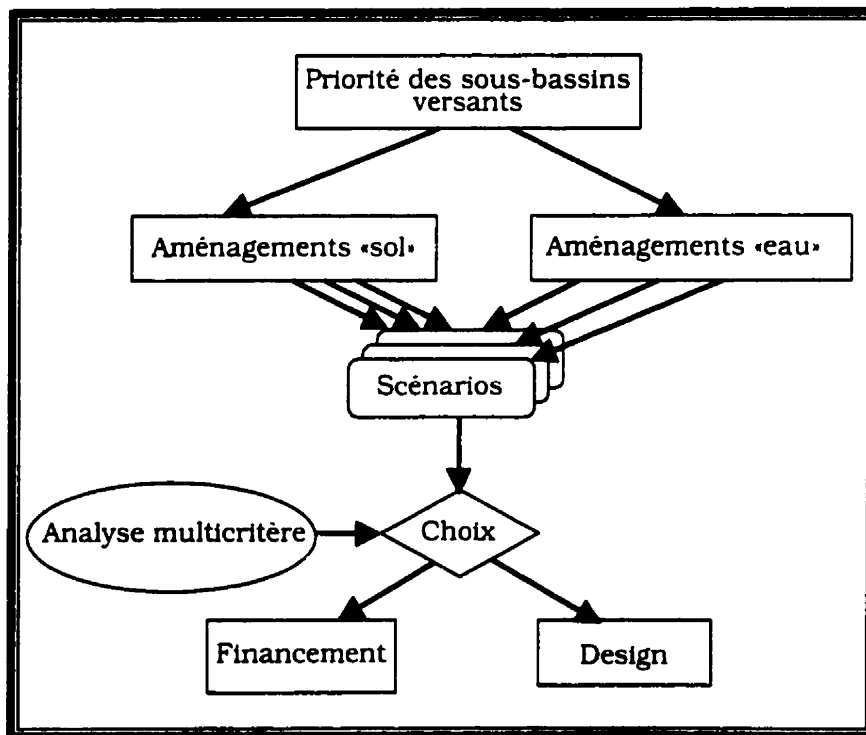


Figure 2.4 Conception des plans d'aménagement (Chevallier *et al.* 1993-b)

le cadre de SAGATELE, il n'a pas été possible de pousser cet aspect des choses, principalement en raison de l'absence dans l'équipe canadienne d'un spécialiste des modèles hydrologiques et d'érosion (Chevallier 1994-c).

## 2.5 Description du processus décisionnel abordé

Dans cette recherche, nous avons décortiqué le processus décisionnel relatif à la problématique des eaux de surface. Pour mieux situer notre cadre méthodologique, nous avons tenu compte des critères de décision relatifs aux trois niveaux de la pyramide de décision de (Davis et Olson 1985) visant à identifier les différents nœuds qui le composent ainsi que leurs enchaînements. À cet effet, nous avons identifié les six nœuds de décision (figure 2.5) :

- **Nœud 1 : «Sélection du sous-bassin versant»** à aménager en fonction de son potentiel hydraulique, ainsi que des aménagements de conservations des eaux et des sols. Les facteurs de décision au niveau de ce nœud sont d'ordre stratégique, car ils sont dictés par la politique générale du pays. Au niveau de la planification stratégique, le souci du décideur est la perception du potentiel hydraulique que pourrait apporter un bassin à fin qu'il puisse planifier la politique générale du pays.
- **Nœud 2 : «Choix du site»** La prise en compte des facteurs au niveau stratégique du deuxième nœud peut aboutir au choix du site d'un barrage. En effet, la présence d'un ouvrage d'une telle envergure sur un bassin versant conditionne explicitement tous les aménagements du sous-bassin versant en amont. En effet, pour prolonger au maximum la durée de vie d'un tel ouvrage, il est nécessaire de prévoir et concevoir judicieusement des scénarios d'aménagements de conservation des eaux et des sols ainsi que l'emplacement des ouvrages hydrauliques permettant la rétention totale ou partielle des sédiments et le laminage des crues torrentielles au besoin, etc.
- **Nœud 3 : «Identification des techniques appropriées»** pour l'aménagement des versants, en fonction des critères socio-économiques, et des critères de sensibilité à l'érosion. Au niveau de cette étape, l'outil développé doit aboutir à l'identification du choix, du type, et de l'emplacement des aménagements (banquettes, cordons, techniques douces, etc.).
- **Nœud 4 : «Reconnaissance du site des aménagements hydrauliques»** Contrairement au nœud 3, il s'agit de choisir des localisations relatives à des ouvrages de recharge, etc.). À ce niveau-là, la localisation spatiale de l'ouvrage projeté est globale). Cette recherche rentre dans le cadre de la problématique des aménagements des cours d'eau bien identifiés (barrages collinaires, lacs collinaires ressources eau dans les pays arides et semi-arides où l'eau joue un rôle

prépondérant) et elle propose d'apporter des solutions plausibles et efficaces afin d'éclairer la perception du décideur sur de sujets de nature cruciale et d'une grande

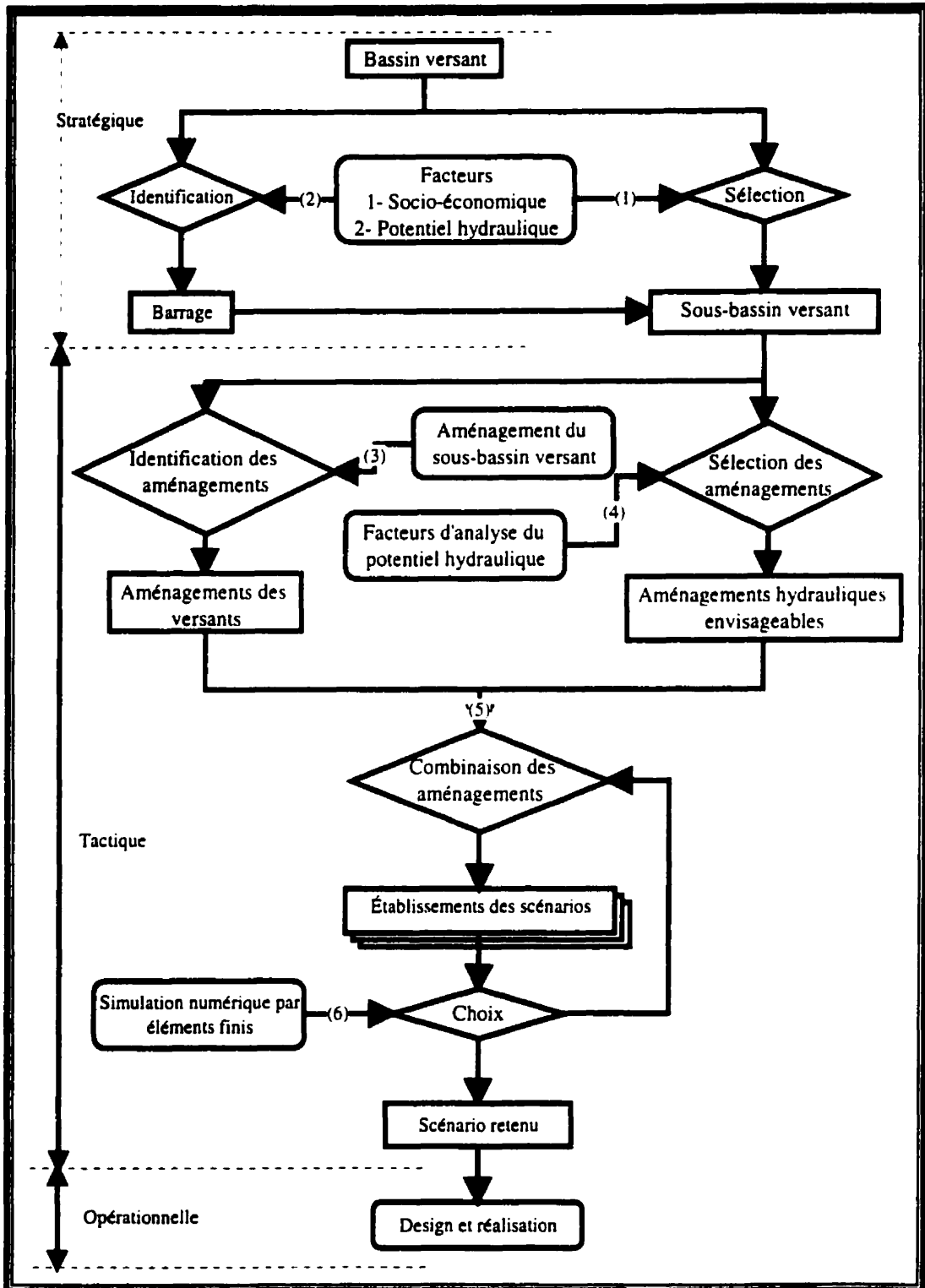


Figure 2.5 Le processus décisionnel proposé pour la gestion du bassin versant

grande complexité. Deux techniques seront tester à cet effet, pour tenter résoudre ce nœud décisionnel :

- **La technique de raffinement** de maillage offerte par le SIG qui consiste à utiliser des mailles de plus en plus fines pour mieux représenter le territoire.
- **L'adaptation de maillage**, très populaire en éléments finis, elle permet d'adapter le maillage aux singularités du relief, dans le but d'améliorer la qualité de la solution obtenue.

La méthode des éléments finis aboutit à un résultat approché d'un problème complexe qu'il serait difficile voire impossible de résoudre analytiquement, alors la technique d'adaptation du maillage permet d'adapter le maillage en le raffinant sur partie de la géométrie.

- **Nœud 5 : «Élaboration des scénarios»** la combinaison des aménagements à réaliser permet ainsi l'élaboration des scénarios. En effet, sur un sous-bassin versant déjà sélectionné, la lutte contre l'érosion du sol d'une part et la mobilisation des eaux de ruissellement d'autre part nécessitent impérativement la combinaison des aménagements de conservation des eaux et des sols et des ouvrages hydrauliques. L'impact des futurs aménagements «ou aménagements virtuels » et leurs rattachements géographiques constituent un véritable souci pour les planificateurs malgré la simplicité apparente du processus à appréhender. En effet, afin de quantifier l'impact d'un aménagement particulier (réseau de banquettes à rétention totale par exemple) sur le régime hydrologique du bassin versant, le planificateur doit disposer impérativement d'un éditeur de scénario à la fois convivial et plausible.
- **Nœud 6 : «Choix du scénario à réaliser »** c'est une combinaison de techniques de conservation des eaux et des sols et des aménagements hydrauliques qui ont été identifiés au à la sortie du nœud 4. Le scénario identifié à cette étape sera traité complètement en mode numérique, d'ou la notion de la continuité qui sera traité en détail au chapitre 5. Il convient ici de faire une remarque importante relativement à la validation des résultats. En effet, les besoins identifiés ce nœud décisionnel n'imposent pas d'obtenir des valeurs absolues aussi précises et crédibles que possibles, mais plutôt des valeurs *relatives* significatives : différences entre sites potentiels d'ouvrages de retenue, impact d'un aménagement sur la réduction de l'érosion. Il conviendra bien entendu d'étayer ultérieurement les résultats par des mesures de terrain, il n'en reste pas moins que des tests strictement numériques



permettent déjà de prendre conscience du très grand potentiel de l'outil développé, non pas comme moyen de **connaissance exacte** des phénomènes, mais comme outil d'aide au **choix de solutions de gestion**, ce qui est tout à fait différent.

## **2.6 Problématique des eaux de surface**

### **2.6.1 Perspective mondiale**

La planète va-t-elle mourir de soif ? Les cris d'alarme se multiplient. Le rapport de la banque mondiale publié en août 1995 montre que d'ici l'an 2025 la demande en eau de la population mondiale va augmenter de 650 % (Sadoux 1996). Le rapport indique que 50 % des habitants de la planète (seraient 4 milliards) devront affronter des pénuries sévères en eau. Les experts de la banque mondiale et des grandes institutions financières ont conseillé à ces pays de conjuguer mutuellement leur effort pour essayer de combattre ce fléau.

L'eau douce est distribuée de manière hétérogène sur le globe. Surabondante dans certaines situations, de nombreux signaux témoignent de sa rareté relative dans plusieurs autres régions. Cette rareté de l'eau pose de fortes contraintes au développement humain : en effet, un apport annuel régional de moins de 1000 m<sup>3</sup>/prs (1740 litres/pers/jour) est considéré comme une limite importante à la production alimentaire, au développement économique et à la protection des écosystèmes. Aujourd'hui, 26 pays et 232 millions de personnes tombent dans cette catégorie de région où la rareté de l'eau devient un problème critique de développement. Si l'Afrique et le Moyen-Orient sont particulièrement affectés par ce problème, certaines régions des États-Unis n'en sont pas épargnées non plus : par exemple, les précipitations dans les Hautes Plaines sont insuffisantes pour recharger les aquifères régionaux qui fournissent 30 % de l'eau utilisée aux États-Unis pour l'irrigation, ceci ayant comme conséquence une réduction de 33 % des surfaces cultivables au Texas.

### **2.6.2 Stratégie tunisienne**

La Tunisie fait partie des pays semi-arides de la rive sud méditerranéenne. Par le climat et la nature très fragile des sols, l'agriculture tunisienne, base principale de l'économie du pays, est constamment confrontée à un problème crucial: La conservation des eaux et du sol. D'une part, les pluies peu abondantes et irrégulières incitent au stockage de l'eau pour permettre de mieux la répartir et de prolonger son utilisation ; d'autre part, ces

précipitations sont fréquemment torrentielles, engendrant des crues brutales <sup>6</sup>, ce qui est de nature à provoquer une érosion très importante des sols agricoles, dont il convient de limiter la dégradation. Les conséquences sont évidemment néfastes : une perte substantielle des sols et notamment des terres arables, une perte considérable de quantités d'eau par manque d'infiltration, une diminution de la durée de vie des barrages à cause de leur envasement attribuable aux transports solides (Bel Hadj Kacem *et al.* 1996).

En Tunisie, l'agriculture constitue l'un des piliers de l'économie nationale et représente environ le tiers du produit national brut (Bacha 1995). De par son climat et la nature très fragile des sols, l'agriculture tunisienne doit faire face à des grands problèmes de conservation des eaux et des sols (Boussema *et al.* 1992 ; Chevallier 1994-c). Une telle agriculture doit s'exercer dans un climat semi-aride avec des précipitations très variables (1) au sud, elle est de 100 mm/an (2) au centre, elle est variée de 200 à 400 mm/an (3) au Nord, elle varie de 500 à 800 mm/an (Bel Hadj Kacem 1991 ; Bel Hadj Kacem *et al.* 1996-b)

Conséquences majeures de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie, les régimes hydrologiques des bassins versants observés sont très violents et sporadiques ; ceci a pour conséquence que la majeure partie des cours d'eau ont un régime fortement transitoire avec des débits variant de 0 à 17 000 m<sup>3</sup>/s. Ces conditions climatiques font que les sols tunisiens sont très vulnérables à l'érosion hydrique. Les sédiments emportés par les crues des cours d'eau tendent à ensabler très rapidement des ouvrages de retenues hydrauliques et à en limiter fortement la durée de vie efficace (Bel Hadj Kacem *et al.* 1996-b).

Pour les décideurs tunisiens, les ressources en eau et en sol constituent un enjeu crucial pour les perspectives à long terme du pays. Il s'agit d'un défi de taille dicté par la volonté de pérenniser l'œuvre de développement et par le nécessaire arbitrage entre le présent marqué par l'ampleur de l'érosion et un avenir où des besoins de plus en plus croissants en eau et sol risquent d'être insatisfaits, hypothéquant les chances du développement durable.

---

<sup>6</sup> La Tunisie a connu durant les dernières décennies des inondations spectaculaires qui ont occasionné beaucoup de dégâts, exemples l'érosion du sol, la destruction des ouvrages d'art, les pertes humaines, etc. Les inondations de l'année 1969 qui se sont abattues sur la Tunisie centrale ont atteint une fréquence dix millénaire. Les stations hygrométriques ont enregistré une hauteur d'eau de 1740 mm durant une semaine continue. À titre de comparaison, la pluviométrie moyenne annuelle de cette région est de l'ordre 200 mm. D'autres événements similaires se sont reproduits durant les années 1974 au Nord du pays, 1982 sur les zones côtières, 1985 sur la région du Cap-Bon, 1990 sur la ville de Tunis, le centre et le sud-ouest du pays.

En Tunisie, les eaux de ruissellement sont estimées annuellement à 34 milliards de m<sup>3</sup>. L'infrastructure hydraulique construite depuis trois décennies (1960-1990) a permis de mobiliser 51 % du potentiel total efficace (Bel Hadj Kacem 1991 ; Hizem 1995). La Tunisie aborde l'horizon 2000 avec un vaste et ambitieux programme décennal de mobilisation des eaux de ruissellement. Visant une meilleure mobilisation de ces ressources vitales d'une part, et la lutte contre leur dégradation d'autre part, ce programme occupe une place de choix stratégique dans les préoccupations, les ambitions et les orientations de la quatrième décennie de développement économique et social de la Tunisie. Afin de mobiliser intégralement puis rationaliser l'utilisation des eaux de ruissellement, la stratégie tunisienne a prévu deux programmes ambitieux :

- **Le premier programme** met en exergue la stratégie adoptée en matière de lutte contre l'érosion et planifie les actions à entreprendre sur deux décennies (1980-2000). Il permet la réalisation des travaux de conservation des eaux et des sols et de reboisement sur les bassins versants qui sont exposés à l'érosion hydrique. Il est érigé en projets couvrants tout le territoire tunisien. Ces travaux vont permettre de préparer les bassins versants sur les quels seront construits les ouvrages hydrauliques (barrages, barrages collinaires, lacs collinaires, ouvrage d'épandage des eaux de crues, etc.) dont la construction a débuté en 1990.
- **Le second programme** s'échelonne sur une décennie (1990-2000), il concerne la mobilisation totale des eaux de ruissellement, ceci par la construction de 21 barrages, 203 barrages collinaires, 1000 lacs collinaires, 4000 ouvrages de recharges de la nappe. La figure 2.6 résume la stratégie planifiée pour l'échéance l'an 2000, représentée en pointillais, nous avons introduit volontairement les infrastructures qui ont été construites depuis trois décennies, elles sont représentées en noir.

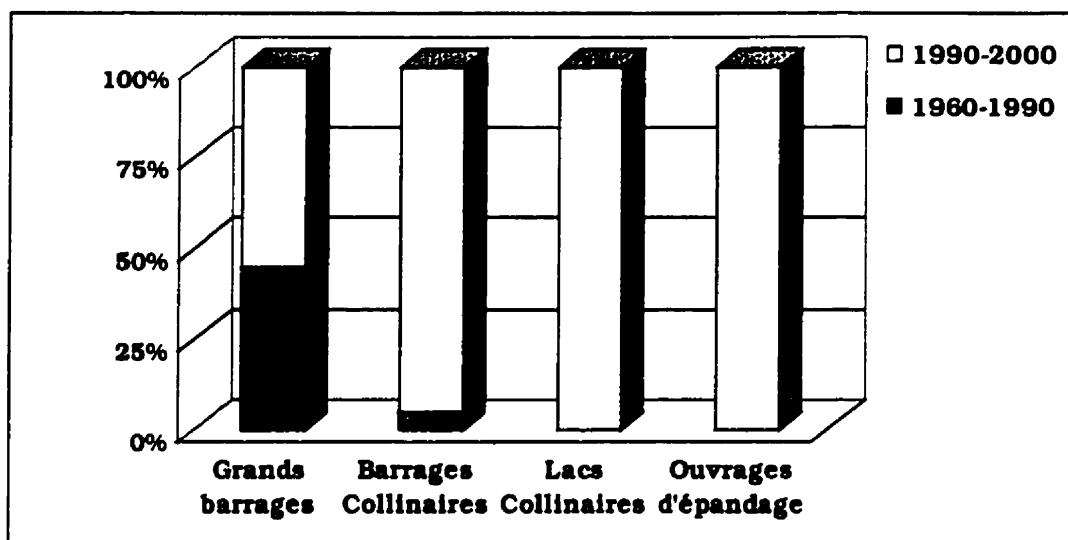


Figure 2.6 Stratégie tunisienne de mobilisation des eaux de

### 2.6.3 La gestion durable des eaux de surface

Les défis de la gestion durable de l'eau sont, d'une part, l'estimation économique de nouveaux projets de développement et, d'autre part, la détermination de leurs impacts sur les eaux touchées et les coûts associés au respect de l'intégrité de ces dernières. La complexité de la mise en pratique de ce concept tient tant du nombre de variables nécessaires à la description complète des bassins versants, qu'à l'interdépendance des usages multiples de l'eau et à la concertation entre les différents usagers, groupes de pressions, élus locaux, gestionnaires, décideurs, politiciens (Arnold 1989). À cet égard, l'actualité fournit régulièrement des exemples de débats où s'affrontent les impératifs économiques de divers projets. Dans le cas où les différents intervenants sembleraient être en accord, les résultats escomptés ne sont pas toujours tels qu'anticipés.

C'est ce paradoxe, que nous pouvons le qualifier de paradoxe écolo-économique. Il est à l'origine du concept de gestion durable de l'eau, c'est à dire d'une gestion interdépendances des usages multiples de l'eau qui favorise à la fois le développement économique et la préservation de l'intégrité écologique, de la diversité biologique et de l'équité sociale de tous les membres de la communauté et des ses générations futures.

## 2.7 Conclusion et synthèse du chapitre

Ce chapitre nous a permis, d'une part d'introduire, la notion de développement dans un contexte général et, d'autre part de structurer le processus décisionnel dans un contexte de

planification des ressources hydriques à l'échelle du bassin versant. Il apparait que chemin qui nous mènera à des outils décisionnels efficaces et utilisables dans la pratique est encore long et difficile. Il pose un très grand défi à tous les milieux concernés : aux décideurs, qui devront ré-analyser leurs méthodes.

Le nœud 6 du processus décisionnel sera traité «*numériquement*» et fera l'objet du couplage des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis qui sera présenté au chapitre 5.

Dans le prochain chapitre, nous verrons comment les systèmes d'information géographiques peuvent jouer un rôle pour véhiculer l'information pertinente permettant d'alimenter le processus décisionnel, et soutenir les décideurs dans sa prise de décision. De plus, les SIG vont permettre d'une part de modéliser *numériquement* le relief étape nécessaire pour la modélisation par élément finis, et d'extraire localement les attributs descriptifs nécessaires pour modéliser l'écoulement.

## **3 Système d'information géographique et modélisation du territoire**

### **3.1 Introduction**

Ce chapitre présente quelques points essentiels sur les systèmes d'information géographique et la modélisation du relief. Une brève définition des SIG sera fournie, plus spécifiquement dans le sens utilisé dans la présente étude, ainsi qu'une description de leurs caractéristiques. Compte tenu du contexte de la recherche, une attention particulière sera cependant accordée aux fonctionnalités de modélisation du relief. Le lecteur intéressé à plus de détails pourra se référer aux ouvrages et articles spécialisés dans ce domaine, dont : Aronoff [1989], Burrough [1986], Cowen [1988], Goodchild [1992], [1992], McGuire *et al.* [1995], et Rhind [1988].

### **3.2 Systèmes d'information géographique**

#### **3.2.1 Définitions des SIG**

Les premiers ouvrages scientifiques relatifs aux systèmes d'informations géographiques (SIG) sont apparus dans les années 80, même si l'expression SIG et ses fonctionnalités préexistaient. À titre d'exemple, nous présentons quelques exemples de définitions qui semblent significatives de tendances qui se trouvent confirmées par la suite.

*«(...) any manual or computer based set of procedures used to store and manipulate geographically referenced data » (Aronoff 1989-a).*

*«(...) a decision support system involving the integration of spatially referenced data in problem-solving environment » (Cowen 1988).*

La littérature francophone traitant spécifiquement les S.I.G date, pour l'essentiel, des années 90. Il faut indiquer que l'ambiguïté demeure dans la signification de l'expression SIG, comme en témoigne cette sélection de définition.

*«Le système d'information géographique est un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées » (Laurini 1993).*

*« Un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision » (Didier 1993).*

Avant que le sigle SIG/GIS ne soit généralisé, notamment parmi les cercles scientifiques, l'expression «système d'Information du Territoire » ou SIT (Land Information System, LIS, des anglo-saxons) avait déjà trouvé une reconnaissance officielle auprès de certains milieux professionnels. Comme le montre Chevallier [1983], la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) a proposé une définition du SIT dès les années 70, définition qu'elle a affinée progressivement :

*« Un système d'information du territoire constitue un instrument de décision dans les domaines juridiques et économiques, et aide pour la planification et le développement : il comprend, d'une part, une base de données se rapportant au sol sur un territoire donné, et d'autre part, les procédures et les techniques nécessaires à la mise à jour systématique, au traitement et à la diffusion des données ».*

Afin d'englober les différentes expressions relatives à des systèmes impliquant des procédures, des équipements et des ressources humaines, et portant sur des données sur le territoire, plusieurs chercheurs québécois, ont proposé d'introduire la notion de «Système d'Information à Référence Spatiale » (SIRS), tout en la distinguant de celle du SIG.

*«Un SIRS (...) n'est pas qu'un ensemble de logiciels, d'ordinateurs et de périphériques graphiques. Un SIRS c'est un ensemble de ressources humaines et matérielles cordonnées vers l'atteinte d'un objectif : Mieux connaître le territoire. Il s'agit en fait d'une structure organisationnelle permettant une meilleure acquisition et communication des données sur le territoire » (Gagnon 1990).*

### **3.2.2 Données spatiales et descriptives**

La plupart des SIG utilisent la représentation géométrique en deux dimensions. Les objets spatiaux sont représentés par des formes géométriques de base: les points, les lignes, et les polygones. Ainsi, il est possible de représenter une station de mesure hydrologique par un point et un bassin versant par un objet de type polygone (Srinivasan et Arnold 1994 ; Warrick et Short 1994 ; Xiandeng 1993). Le polygone associé à un bassin versant décrit sa

forme et sa position dans un système de coordonnées cartographique. Cet enrichissement de la description des entités permet, par l'exemple des bassins versants, d'analyser leur occupation ou leur géomorphologie. Les lignes sont souvent employées pour représenter des réseaux, tel le réseau routier ou réseau hydrographique (Pilon et McIntyre 1993 ; Puente 1996).

### **3.2.3 Modélisation du relief en géomatique**

La réalité peut être considérée comme un continuum informationnel évolutif, que seule une infinité d'informations pourrait décrire (Golay 1992). La «*modélisation*» est le processus de représentation d'un ensemble de phénomènes ou de concepts en un modèle pertinent pour une activité donnée (Bédard et Chevallier 1989).

La connaissance de la topographie d'un paysage, fournie comme un modèle numérique de terrain (MNT), est la base pour une série de procédures automatiques. Ces procédures permettent de dériver les structures de réseaux de drainage à une échelle d'information appropriée et de supporter la modélisation hydrologique (Birkin *et al.* 1987 ; Birkin *et al.* 1996 ; Gao *et al.* 1993 ; Zelt et Dudgeon 1993). Le modèle numérique de terrain reste la base et le point de départ de tout algorithme de simulation sur le terrain (Bel Hadj Kacem *et al.* 1998), exemples : (1) simulation de l'évolution d'un paysage forestier (Lebrun 1998 ; Taylhardat 1996) (2) recherche et sauvetage aérien (Geuzaine 1997), (3) propagation d'un feu de forêt (Guarnieri 1995), (4) simulation hydrologique (Kettal 1996).

Modéliser un terrain consiste surtout à mémoriser les altitudes  $z$  (Laurini 1993) des points  $(x, y)$ . Les MNT les plus connus sont : les gradients, les grilles orthogonales, les courbes de niveau, les tessellations et les triangles (Laurini 1993). Les MNT peuvent servir à stocker des phénomènes continus provenant d'une fonction  $z = f(x, y)$ .

Ce chapitre abordera, les différents types modèles numériques de terrain utilisés puis désignera le type modèle retenu pour les essais de simulation hydrologique.

#### **3.2.3.1 Les tessellations irrégulières du type « TIN<sup>7</sup> »**

Le modèle numérique de terrain doit rendre une valeur  $z$  à chaque requête de la forme  $f(x, y)$ . Le MNT est dit de dimension 2.5. La représentation des valeurs d'altitudes d'un terrain se fait d'une manière *discontinue*. Généralement une interpolation ou une extrapolation est



utilisée pour calculer les valeurs voisines : les altitudes d'un terrain sont considérées comme distribuées (Laurini et Milleret-Raffort 1993). Ainsi, pour représenter les terrains, ce on les subdivises en un certain nombre d'éléments géométriques. L'interpolation pourra être appliquée chacun de ces éléments. Ceux-ci forment ensemble une tessellation.

Les terrains sont représentés par deux types de tessallations : régulière et irrégulière. Les deux peuvent être constituées de triangles, de carrés, etc. Mais la différence est que dans la première tessellation, les mailles sont identiques et dans la seconde tessellation les mailles peuvent varier de tailles ou de formes.

L'intérêt général des « TIN » est le stockage des points importants et significatifs pour reproduire fidèlement la morphologie du relief. Cette représentation s'adapte plus facilement aux formes du terrain que les courbes de niveau (Pike et Acevedo 1991 ; Carver et Don 1994).

En modélisation hydrologique, le modèle TIN permet d'extraire les particularités du relief tel que les dépressions ou les sommets (Djokic et Maidment 1993 ; Heller 1984 ; Hickman 1995 ; Jepson 1993 ; Lee 1991). Theobald et Goodchild [1990] indiquent que l'utilisation du TIN pour la modélisation hydrologique présente certains avantages, tel que la *continuité numérique du modèle*, la représentation explicite des surfaces spécifiques, l'utilisation des fonctions linéaires pour l'interpolation, la variation de la densité d'échantillonnage des points en fonction du relief. De plus, le modèle TIN offre des avantages tels que l'ajout des nouveaux points ou l'élimination des points des réseaux des triangles.

Le maillage irrégulier présente un avantage par rapport au maillage régulier : il est possible d'adapter le maillage irrégulier à la distribution des données en mettant plus de mailles là où le terrain varie rapidement et moins aux endroits où le terrain est uniforme : la taille et le nombre (voir l'orientation) des mailles sont fonctions du terrain et ses variations, ce qui implique une modélisation et une manipulation des données plus flexibles et une distribution des données moins redondantes dans les zones uniformes du terrain. Les tessellations de triangles permettent aussi une mise à jour locale des données altimétriques sans avoir à refaire une interpolation comme cela serait pour le cas pour une structure de grille. Il y a lieu d'utiliser la notion d'adaptation de maillage qui sera introduite au chapitre 5.

---

<sup>7</sup> TIN : Triangulated Irregular Network

### 3.2.3.2 Triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay (Delaunay 1928) est une triangulation avec un critère de contrainte : chaque triangle doit vérifier le critère dit «cercle» : en traçant un cercle passant par les trois sommets du triangle, il ne doit pas exister un autre point de la triangulation à l'intérieur de ce cercle.

La triangulation de Delaunay d'un ensemble de points est généralement définie dans les termes d'une structure géométrique, le diagramme de Voronoï. De Floriani *et al.* (1985) définissent le diagramme de Voronoï comme suit « soit un ensemble de points appelé dans le plan  $V$  tel que :

$$V = \left\{ \frac{P_i}{P_j} = (x_i, x_j), j = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (3.1)$$

est un diagramme de Voronoï, parfois appelé tessellation de Thiessen, de  $V$ , notée  $V_D (D)$ , est une subdivision du plan en polygones, chacun associé avec un point  $p_i$  de  $V$  et défini comme un région fermée sur un seul point  $p_i$  seul et ne contenant aucun autre point  $p_j, j \neq i$ , appartenant à  $V$ .

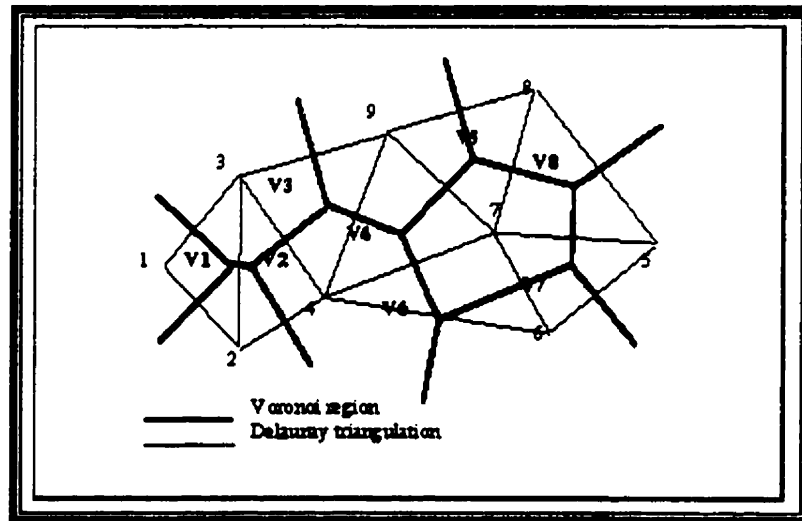


Figure 3.1 Structure de triangulation de Delaunay (Gold 1994-a)

### **3.3 Analyse spatio-temporelle dans les SIG**

#### **3.3.1 Analyse spatiale**

Parmi les définitions trouvées dans la littérature, on retiendra ici les deux suivantes :

*«L'analyse spatiale peut être définie, en gros, comme l'ensemble des méthodes analytiques qui requièrent l'accès autant aux attributs descriptifs des objets analysés qu'aux attributs associés à leur localisation.»* (Goodchild, 1987a) ;

*«C'est un processus cognitif et itératif qui utilise différents opérateurs, dont au moins un spatial, pour déduire les caractéristiques descriptives ou spatiales d'un phénomène isolé ou regroupé, réel ou simulé dans l'espace »* (Champoux, 1991).

Cependant, Goodchild [1987a] note qu'il y a peu d'unanimité sur la nature de telles analyses, sur le degré de fonctionnalité analytique nécessaire pour permettre d'identifier un système comme étant un SIG véritable, et sur ce qui constituerait la totalité des formes possibles de ces analyses.

#### **3.3.2 Analyse temporelle**

Les décisions prises quotidiennement dans les organisations responsables de la gestion du territoire et de ses ressources font généralement appel à la notion de temps en plus de la notion d'espace. L'information temporelle combinée à l'information spatiale aide à connaître et à visualiser l'évolution d'un phénomène géographique, à extrapoler l'état futur d'un lieu, à simuler différents scénarios d'intervention et analyser les causes ou les impacts de changements (Bédard 1993, Gagnon *et al.* 1992)

Partout, nous voyons des organisations mettre en place des bases de données à référence spatiale pour la gestion urbaine, l'aménagement forestier, la protection de l'environnement, etc. Or, une part importante de ces décisions prises par ces organisations repose sur une comparaison de l'état d'un même territoire à des époques différentes, aussi prévues que passées. Par exemple, on veut connaître l'état d'un territoire à une période antérieure, visualiser l'évolution d'un phénomène géographique, planifier la mise en valeur d'un site, simuler les différents scénarios d'intervention pour en analyser les impacts, etc. Très tôt, il devient évident que les bases de données à référence spatiale doivent également inclure des données relatives au temps.

Les SIG actuels sont statiques, car ils ne peuvent pas gérer facilement les changements des propriétés descriptives des entités et surtout qu'ils ne peuvent pas représenter dynamiquement les variations et les transformations de la référence spatiale. Il est possible d'y arriver en s'inspirant de différents modèles de bases de données élaborés entre autres par Snodgrass et Ahn [1985]. Ces modèles s'appuient principalement sur l'utilisation de "clichés" (snapshots) des états de la base de données.

Langran (1993) identifie la richesse de l'information comme l'un des deux facteurs caractérisant une décision, l'autre étant le degré de structuration des procédures de traitement. C'est principalement à l'intérieur de ce premier facteur que l'aspect temporel intervient. L'utilisation de l'information en tenant compte de ce qu'elle a été (états passés, historique) et de ce qu'elle est susceptible de devenir (par simulation ou par extrapolation) a pour conséquence de l'enrichir et donc d'améliorer sa contribution à un processus de décision bien orienté et bien structuré. De plus, si le logiciel SIG utilisé pouvait permettre de gérer et de visualiser de façon dynamique ou animée l'évolution des données dans l'espace et dans le temps, le message serait plus évident et plus facile à comprendre.

### **3.4 Modélisation du territoire et simulation**

Le domaine de la modélisation a connu un essor considérable depuis le début du siècle. Cet essor est attribuable à plusieurs facteurs. Le plus important est sans conteste développement fulgurant des sciences informatiques depuis une trentaine d'années qui s'est traduit par l'apparition de micro-ordinateurs et de stations de travail très puissantes (Armstrong et Richard 1995 ; Gottardi et Venutelli 1997). La complexité même des systèmes à l'étude a aussi été à l'origine du recours à la modélisation. Cette complexité a suscité l'intérêt de chercheurs à développer des outils, leur permettant de simuler et de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre.

L'homme est capable de prendre une certaine distance par rapport à la réalité. Il construit des modèles qui lui permettent de comprendre et d'agir plus efficacement sur le réel. Ces modèles peuvent être concrets (schémas, cartes, etc.) ou abstraits (règles d'organisation et de procédures suffisamment générales pour s'appliquer à plusieurs cas, et dans divers contextes). Notons encore, qu'un modèle n'est pas seulement indispensable au transfert des connaissances, il est aussi une simulation réel grâce à la quelle on peut élaborer, concevoir et tester des «solutions » dans des conditions de sécurité, puisque l'erreur n'est pas sanctionnée.

### 3.4.1 Modélisation mathématique

Il existe plusieurs types de classification selon le champ d'application. Golay (1992) suggère une classification qui distingue les modèles diachroniques<sup>8</sup> des modèles synchroniques<sup>9</sup>. Parmi les modèles jugés pertinents dans le cadre de cette recherche : (1) les modèles physiques, (2) les modèles de simulation, (3) les modèles numériques.

**Les modèles physiques** (modèle réduit) : la représentation physique d'une portion du territoire à une échelle réduite est un exemple de modèle physique. Dans ce type de modèle on reconstitue en laboratoire la forme exacte du système à fin se simuler certains processus (écoulement à la surface du bassin versant, infiltration en profondeur). Par exemple, le recours aux modèles physiques a longtemps été mis en hydraulique pour évaluer l'impact de phénomènes d'érosion sur les infrastructures hydrauliques. Ces modèles sont de plus en plus représentés par des modèles de simulation numériques (Robert 1983, Xu 1995)

**Les modèles de simulation** sont des modèles quantitatifs, ils peuvent être soit numériques, stochastiques, empiriques, comportementaux, etc. ; par exemple, le ruissellement tel que URBAN (Leclerc et Schaake 1973) constitue un modèle de comportement. Il permet d'obtenir un débit donné pour un réseau d'assainissement. Un modèle de simulation météorologique permettant de prévoir l'évolution du temps à moyen terme constitue un modèle diachronique.

**Les modèles numériques.** Dans de tels modèles, les systèmes à simuler sont généralement représentés par une série d'équations mathématiques, en milieu continu plus ou moins complexes. Pour pouvoir être exploitées numériquement, elles doivent être traduites, sous forme discrète, en divers langages informatiques (Robert 1983 ; Ghanmi 1995, Frenette 1996 ; Khelifa 1992 ; Bel Hadj Kacem *et al.* 1998-a).

---

<sup>8</sup> Les modèles diachroniques décrivent explicitement l'évolution de la réalité, que ce soit par des mesures de type "gradient" (débit de vidange d'un barrage réservoir, taux de natalité, etc.) ou par la connaissance des règles d'évolution équation de Horton décrivant l'infiltration Golay (1992).

<sup>9</sup> Les modèles synchroniques décrivent exclusivement des situations instantanées de la réalité, appelées états (Richer et Chevallier 1992). Chaque état peut être établi sur la base d'observations directes de la réalité, ou par connaissance de comportement instantané du modèle (courbe hauteur d'eau/débit en un point d'un cours d'eau par exemple).

Les phénomènes à modéliser sont représentés par des règles appelées lois de comportement et par des valeurs observées sous forme numérique. Les modèles numériques peuvent intégrer des phénomènes hétérogènes (physiques, statistiques, etc.). Des valeurs initiales sont affectées à certains paramètres de base d'observations. Le comportement du modèle constitue alors un reflet global du comportement réel » (Golay 1992).

Avec le développement spectaculaire qu'a connu le monde de l'informatique au cours de la dernière décennie, les modèles numériques ont presque totalement supplanté tous les autres types de modèles. Outre leurs qualités conceptuelles déjà mentionnées, l'adéquation des modèles numériques à la représentation et à la résolution par ordinateur des problèmes constitue une raison essentielle de cette évolution.

### 3.4.2 Simulation

Selon Le Moigne (1986), une simulation consiste à faire varier les **intrants** d'un système dont on connaît l'équation d'état pour en évaluer **les extrants**. Une simulation met donc en œuvre un modèle de comportement, représentant le déplacement du modèle sur sa trajectoire, soit un changement d'échelle de mesure des phénomènes. La notion de variation des intrants est très importante dans cette définition, car elle implique une double incertitude :

- **Une première incertitude** sur les intrants, qui peuvent n'être que des hypothèses, ou une fourchette de valeurs vraisemblables. Souvent, on recherche de manière *heuristique* les intrants correspondant «aux cas extrêmes» : on peut citer par exemple le choix de la **pluie critique** pour une simulation d'un débit de crue (Golay 1992).
- **Une seconde incertitude** est liée à la **sensibilité du comportement** simulé : quelles sont les conséquences d'une erreur d'estimation des intrants sur les résultats de la simulation? L'application répétée du processus simulé sur une fourchette de valeurs des intrants est souvent nécessaire pour évaluer ces conséquences.

## 3.5 Conclusion et synthèse du chapitre

Dans ce chapitre nous avons fait un bref survol des SIG, en rappelant quelques définitions qui seront utiles pour la suite du rapport. En effet, pour modéliser adéquatement un phénomène présentant une **variation spatio-temporelle** tel le ruissellement sur bassin versant, il est primordiale de disposer des outils et des méthodes permettant de répondre à cette exigences. Or les SIG disponibles actuellement ne permettent pas de gérer l'aspect

temporel, ceci constitue une entrave à leur évolution. En revanche, la méthode des éléments finis qui fera l'objet du chapitre 6, permet de tenir compte à la fois de l'évolution spatiale et temporelle du processus physique (ruissellement), constituant ainsi un atout majeur pour le couplage SIG-MEF.

La modélisation du relief à l'aide du SIG a été présentée en faisant ressortir un canevas de quelques modèles (TIN, GRID). Le modèle numérique de terrain du type *TIN* sera retenu pour être couplé avec le modèle par éléments finis ; les affinités des ces modèles et les justifications de ce choix seront abordées au chapitre 5.

## 4 La modélisation en hydrologie analytique

### 4.1 Introduction

En hydrologie analytique, de nombreux modèles de simulation ont été développés concernant plus particulièrement l'utilisation des ressources hydriques, la conservation des sols (Burlando et Rosso 1996 ; Cheibani 1994 ; Genest *et al.* 1996) et la gestion intégrée de plusieurs composantes. Ces modèles sont basés sur une approche mathématique détaillée faisant appel à de nombreux paramètres (parfois difficiles à acquérir) ou sur des relations empiriques et globales limitant fortement leur flexibilité et leur applicabilité à différentes situations (Kergreis et Claude 1991 ; Kirkby 1988 ; Lane et Wallage 1976, Lane 1982 ; Larouche *et al.* 1993 ; Llamas 1993 ; Yang et Parent 1996). Utilisés de pair avec des investigations de terrain et de laboratoire, ils permettent de réaliser rapidement l'étude environnementale. Ces modèles doivent être basés le plus possible sur la représentation des processus reconnus dans la littérature, représenter le plus efficacement possible la réalité et utiliser le minimum des paramètres (Maidment 1996, Moore *et al.* 1988 ; Moore *et al.* 1993-a, Moore *et al.* 1993-b).

Le but de ce chapitre est de faire le constat sur les possibilités actuelles des modèles hydrologiques «conventionnels». Nous commencerons par la définition des principaux paramètres qui conditionnent l'activité hydrodynamique du bassin versant d'une part, ainsi que leur influence sur la fiabilité de l'hydrogramme des crues. Ensuite, une classification de ces modèles sera présentée, avec une analyse critique entre les différents modèles qui ont été publiés.

La procédure à suivre consistera à sélectionner les méthodes utilisables à la lumière du problème à résoudre. Notre objectif n'est pas de décrire tous les modèles de simulation de débits existants, mais de faire quelques analyses critiques quant au choix et à l'application de ces modèles. Dans ce chapitre deux familles de modèle hydrologique seront présentées : (1) les modèles purement analytiques dans la mesure où ils n'intègrent ni la référence spatiale, ni la référence temporelle (Banton *et al.* 1996 ; Betson 1964), (2) les modèles distribués qui combinent les modèles de l'hydrologie analytique avec une base de données géographiques (Oliveira 1997-a ; Puente 1996 ; Vieux et Farjallah 1996 ; Wolf 1992 ; Xiong et Wang 1995 ; Yan et Smith 1994).



## 4.2 Les modèles hydrologiques

La prévision hydrologique est un des aspects les plus importants de l'hydrologie. Elle intervient nécessairement pour le contrôle des inondations, la régularisation des cours d'eau, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques etc., (Burlando et Rosso 1996) Compte tenu de l'utilisation toujours plus intense des ressources en eau, la prévision devient de plus en plus nécessaire pour la gestion de la ressource et le contrôle de la pollution. Pour répondre de façon adéquate à ces besoins, les hydrologues ont développé des outils appelés modèles hydrologiques. Ces modèles ont évolué très rapidement depuis quelques décennies avec l'avènement d'outils informatiques de plus en plus puissants.

Les paramètres physiques et morphologiques des bassins versants ont une influence quantitative sur les caractéristiques de l'écoulement à l'exutoire. Ces paramètres influencent la quantité de pluie nette<sup>10</sup> que l'on retrouve sous forme de ruissellement à l'exutoire des bassins (Dunne et Balck 1970-a ; Dunne et Balck 1970-b ; Ganoulis 1996 ; Jacomio et Fields 1997 ; Jepson 1993).

## 4.3 Les paramètres d'entrée

Les facteurs qui conditionnent le processus de ruissellement peuvent être décrits des termes globaux, ils peuvent être d'ordre climatique<sup>11</sup> ou physique (figure 4.1), leur intégration dans les modèles pluie-écoulement n'est possible qu'avec certaines restrictions ; à titre d'exemple, la pente du bassin versant, considérée comme le facteur topographique principal, sera prise en compte dans les modèles hydrologiques classiques à l'aide d'un facteur constant représentant une pente moyenne.

Selon Kincaid *et al.* [1963], les facteurs les plus significatifs peuvent être repartis en deux groupes : les facteurs dépendant des précipitations et les facteurs dépendant des bassins versants. Horton [1932], Kergreis et Claude [1991], McKibben [1992] ; proposent des définitions détaillées des paramètres suivants : la pente, le type de sol, la végétation, l'utilisation du sol, la superficie, la forme du bassin versant, le réseau hydrographique, la pluviométrie.

---

<sup>10</sup> Pluie nette : c'est la partie de pluie tombée sur un bassin qui génère le ruissellement après réduction des proportions infiltrées et évaporées.

<sup>11</sup> L'intensité, la durée, et la fréquence de la pluie, la vitesse du vent, durée critique de la pluie, etc. (Seyhan 1982)

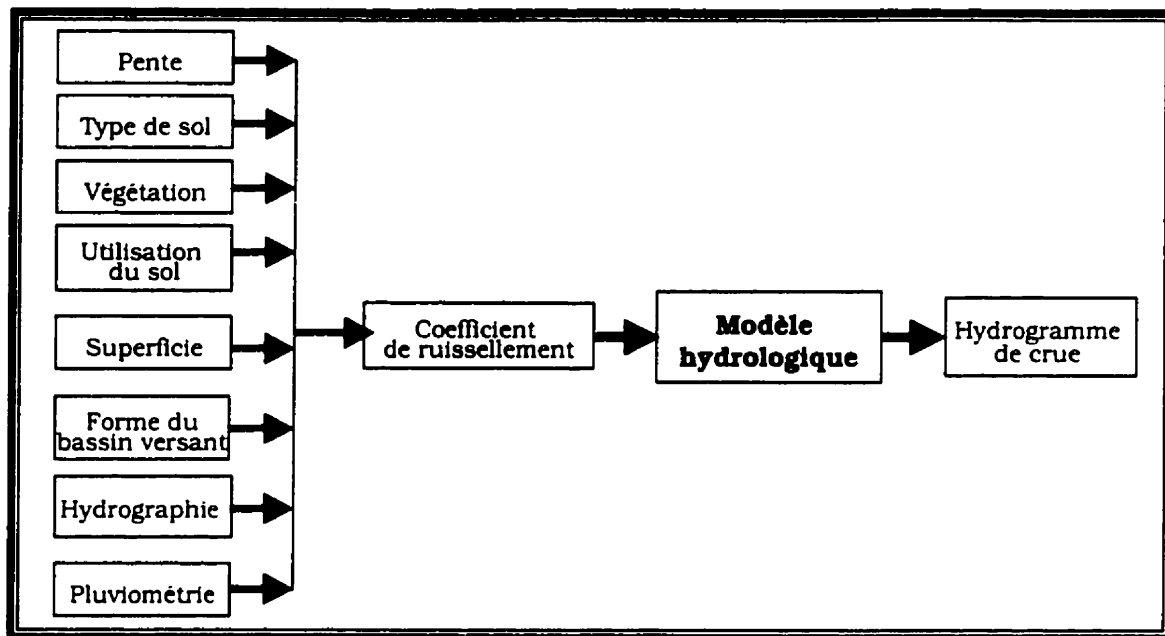


Figure 4.1 Principe des modèles hydrologiques standards

#### 4.3.1 La pente

Les paramètres relatifs au relief d'un bassin versant sont de grande importance pour le processus pluie- ruissellement. Ils sont liés étroitement à la pente (Tarboton 1993 ; Warrick et Short 1994 ; Wickham *et al.* 1997 ; Wong 1993). Dans les bassins versants très accidentés, les pluies en excès ruissellent rapidement, ce qui limite fortement la possibilité d'infiltration et de percolation. Ceci a pour conséquence des temps de montée<sup>12</sup> courts et des pointes de débits élevées. Par contre, dans les bassins à faible pente, des durées de crue et des taux d'infiltration élevés assurent un ruissellement modéré. Ainsi, la pente influence de manière complexe et importante : (1) l'infiltration, (2) le temps de montée de la crue<sup>13</sup>, (3) la durée de l'écoulement, (4) le temps de concentration, (5) le volume écoulé et la pointe la crue (Llamas 1993)..

<sup>12</sup> Temps de monté : l'hydrogramme présenté à la figure 4.3 comporte deux phases : la première c'est la partie de montée qui est observé du moment de déclenchement de l'épisode pluvial jusqu'à son arrêt; la seconde phase correspond à la décrue c'est à dire la diminution du débit de crue a la sortie du bassin versant.

<sup>13</sup> Dans les bassins une topographie très accidentée le temps de monté de la crue est plus mis en évidence que dans le s cas des bassins ou le relief présente une topographie plus douce.

### 4.3.2 Le type du sol

Les hydrologues estiment que les différences de caractéristiques des sols peuvent beaucoup influencer le processus pluie-débit et ils attachent de plus en plus d'importance aux paramètres pédologiques. Ainsi, Bryan *et al.* [1977] attribuent un plus grand rôle, aux propriétés de la surface du sol qu'aux caractéristiques des pluies pour le ruissellement des zones semi-arides. L'influence des caractéristiques pédologiques sur l'hydrologie du bassin versant est difficile à quantifier, en particulier à cause de leurs variations spatio-temporelles (Betson et Marius 1969). Les tentatives pour exprimer le comportement hydrologique des sols à partir d'un **seul paramètre** ont échoué à cause de la **complexité des processus** mis en œuvre (Horton 1932).

Le processus d'infiltration est caractérisé par le taux d'infiltration ; il dépend de trois composantes : (1) la vitesse de percolation, (2) la capacité de percolation et, (3) la proportion de l'eau qui se dirige vers le sous-sol. Ait Belaïd [1990], Chairat et Delleur [1993] mentionnent que le taux d'infiltration dépend non seulement des paramètres du sol comme les types de sols, leur structure, la texture, la hauteur, la durée et l'intensité de la pluie, mais le niveau de la nappe phréatique peut aussi jouer un rôle important. La rétention croît par ailleurs avec la densité de végétation (Abdnego 1989 ; Banton *et al.* 1996 ; Blanchard *et al.* 1981 ; Bissonette *et al.* 1994, Burrough 1993), les pratiques culturales et les aménagements anti-érosifs.

De nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer les effets de l'infiltration, étape fondamentale dans les transformations des hyétogrammes<sup>14</sup> en hydrogramme<sup>15</sup> (Kincaid *et al.* 1963 ; Llamas 1993 ; Linsley *et al.* 1958 ; McNoleg 1996 ; Piech *et al.* 1991). La plus simple est l'indice H (Roche 1967) qui est basé sur le taux d'infiltration constant. Seule la partie de la pluie excédant le taux d'infiltration est supposée contribuer au ruissellement. Ce procédé ne prend pas compte de la décroissance du taux d'infiltration en fonction de l'accroissement du taux de saturation du sol pendant l'épisode pluvieux.

---

<sup>14</sup> Hyétogrammes d'une averse : c'est la pluie unitaire tombée sur un bassin versant pendant une durée continue (Llamas 1993).

<sup>15</sup> Hydrogramme : c'est la courbe qui montre l'évolution du débit à la sortie du bassin versant suite un événement pluvial.

### 4.3.3 La végétation

L'influence de la végétation sur le ruissellement de surface n'est pas contestable. De nombreux auteurs (Kincaid *et al.* 1963 ; Osborn et Lane 1969 ; Nemeč et Rodier 1979, Chevallier 1983-b, Roddier 1985) ont montré que les pertes par interception croissent avec la densité de la végétation, qu'il en était de même pour le taux de rétention et l'infiltration.

Le paramètre couramment utilisé pour caractériser la densité de végétation est le degré de couverture, autrement dit le pourcentage de la zone étudiée couvert par la végétation. Kincaid *et al.* [1963] ont utilisé les dimensions des cimes où l'aire de la base comme indice représentatif des arbres et des arbustes dans un bassin versant.

### 4.3.4 L'utilisation du sol

Le potentiel hydrologique d'un bassin versant dépend étroitement des pratiques culturales et de la façon dont le sol est utilisé. Dans les régions semi-arides, l'utilisation du bassin est reliée étroitement aux activités humaines qui varient d'une saison à une autre. Albergel [1988] indique que les zones cultivées ont des taux d'infiltration plus élevés que les jachères<sup>16</sup> et les zones non labourées ; ces taux dépendent des cultures et des pratiques culturales. D'autres auteurs (Collinet et Valentin 1979) ont constaté une augmentation nette des taux d'infiltration pour les sols couverts de paille. En outre, il semble que, à cause de la mise en culture, l'augmentation de la capacité de rétention dans la couche supérieure du sol après la première pluie entraîne des écoulements de surface plus intenses.

### 4.3.5 La superficie

De tous les facteurs géomorphologiques, la superficie du bassin versant est le paramètre le plus important dans la détermination de la pointe de crue, du temps de montée, du temps de décrue et du potentiel de collecte de l'eau (Benson 1962, Gregory et Walling 1968, Alexander 1972). L'influence dominante de la superficie du bassin versant sur le ruissellement dû aux fortes pluies dans les régions semi-arides et aussi soulignée par Puech et Chabi\_Gonni [1984 b]. Dans certains cas limites, l'influence de la superficie du bassin versant n'est pas toujours aussi importante pour les petits bassins. Bien qu'il existe un rapport entre la superficie du bassin versant et l'écoulement, ce rapport ne peut en

---

<sup>16</sup> La partie du bassin sera réservée pour le pâturage par les animaux

aucun cas être mis en équation linéaire. Le coefficient de ruissellement et la pointe de crue diminuent à mesure que la superficie du bassin versant augmente.

#### **4.3.6 La forme du bassin versant**

De nombreux paramètres<sup>17</sup> ont été proposés pour caractériser le bassin versant afin d'établir ses relations avec le ruissellement (Llamas 1993). La forme d'un bassin versant est la configuration géométrique telle que projetée sur un plan horizontal. Cette forme affecte directement le temps de réponse du bassin, c'est à dire le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et conséquemment le type des hydrogrammes.

Ces approches se basent sur des observations telles que «les bassins versants allongés produisent des hydrogrammes allongés» et que «les bassins versants plus compacts donnent des hydrogrammes plus concentrés». Par conséquent la représentation sous forme schématique du bassin peut être l'origine de plusieurs sources d'erreurs. En effet, les modèles hydrologiques qui seront présentés plus loin emploient dans la plus part des cas ces paramètres (superficie, coefficient de compacité, pente moyenne, ect.), pour le calcul de débit des crues. Dans des telles circonstances, l'hydrologue se heurte à une situation complexe : d'une part l'obtention d'un résultat fiable (hydrogramme à la sortie du bassin, pointe de l'hydrogramme) est conditionné à l'amont par la prise en compte des caractéristiques réelles du territoire, d'autre part les modèles hydrologiques disponibles ne permettent pas de répondre affirmativement à cette exigence réaliste.

#### **4.3.7 Le réseau hydrographique**

Les caractéristiques des cours d'eau des petits bassins n'ont pas la même incidence sur le régime d'écoulement que pour les grands bassins versants. L'effet de rétention du cours d'eau ou la manière dont l'écoulement inonde les plaines est difficile à déterminer. La densité du réseau hydrographique est considérée comme proportionnelle à l'activité du régime hydrologique du bassin versant (Beaur 1980).

Horton [1932], Murphy *et al.* [1977] ont montré que la densité du réseau hydrographique est reliée étroitement au relief du bassin versant, sa géologie, sa forme, la durée du ruissellement en surface vers le cours d'eau et la perméabilité du sol. Des valeurs de densité

---

<sup>17</sup>Périmètre, coefficient de compacité, rectangle équivalent, coefficient de forme, etc. Les lecteurs intéressés peuvent trouver des définitions détaillées dans Llamas [1993].

du réseau hydrographique<sup>18</sup> situées entre 1,5 et 2 correspondants à des bassins versants à fortes pentes avec une infiltration relativement réduite. Les valeurs proches de zéro caractérisent des bassins versants à forte infiltration.

#### 4.3.8 La pluviométrie

La pluviométrie occupe une place importante dans le processus de précipitations - ruissellement. En hydrologie analytique la pluie de conception est caractérisée par : (1) l'intensité, (2) la durée et (3) la fréquence<sup>19</sup>.

- **Intensité** : L'intensité des précipitations influence directement l'hyétogramme de la pluie nette<sup>20</sup>. Dès que celle-ci dépasse la capacité d'infiltration du sol, le processus de ruissellement s'amorce. Une plus grande intensité de précipitations engendre donc une plus grande pluie nette, un ruissellement plus important et donc un plus grand débit maximal à l'exutoire.
- **Durée** : La durée des précipitations est un facteur important car elle influence directement la quantité d'eau recueillie par le bassin et par conséquent le débit à la sortie. La durée critique d'une pluie correspond à la valeur où le temps de concentration et la durée de la pluie ont la même valeur. Les pointes de crue les plus importantes sont atteintes à ce moment-là. La durée de la pluie entre souvent dans les modèles qui simulent les pointes de crue.
- **Fréquence** : c'est la probabilité qu'un événement pluvial puisse se reproduire dans les mêmes conditions, c'est à dire avec la même intensité et la même durée.

### 4.4 Les paramètres de sortie

#### 4.4.1 Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement d'un bassin versant est un facteur important pour une simulation hydrologique. En effet, il détermine la proportion de la pluie qui ruissellera. Ce facteur dépend à la fois de l'intensité de la pluie et de l'occupation du sol. Une végétation

---

<sup>18</sup> Densité du réseau hydrographique : c'est le rapport entre la longueur du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant (km/km<sup>2</sup>), elle est appelée aussi densité de drainage.

<sup>19</sup>Connue souvent par l'acronyme IDF = Intensité- Durée- Fréquence.

dense contribue à augmenter la capacité de rétention de la pluie, provoquant une diminution du ruissellement (Chevallier 1983-b ; Bel Hadj Kacem 1991 ; Deanna 1997). Du point de vue de la théorie statistique ce type de traitement est bien fondé : on lui reproche néanmoins l'absence d'un recours à la réalité physique du bassin (Yang 1996 ; Yamada *et al.* 1978). En effet, aucune donnée descriptive de la réalité physique du bassin n'intervient dans le développement de la relation pluie-débit. Si, durant les années d'observation, les conditions physiques du bassin sont invariantes et qu'aucune anomalie n'est constatée, alors la méthode statistique pourrait être satisfaisante. Mais, dans le cas où il y a eu des changements de conditions physiques durant les années d'observation, les modèles hydrologiques classiques ne permettent pas de tenir compte de la variation temporelle d'une manière continue, alors ils ne permettent pas la prise en compte de ces changements.

L'exploitation des technologies géomatiques, qui fera l'objet du prochain chapitre, pourra être une avenue prometteuse pour répondre impérativement de tels besoins. En effet, la détermination de l'occupation du sol par traitement numérique des images satellite permet de faciliter le calcul du coefficient de ruissellement du bassin versant et de mieux reproduire la vérité terrain.

#### **4.4.2 Hydrogramme des crues**

L'hydrogramme des crues peut-être décrit par diverses caractéristiques comme le débit de pointe, le volume total ruisselé ou le temps de réponse. La connaissance de la forme de l'hydrogramme de ruissellement, en particulier de sa pointe est essentielle pour dimensionner les structures hydrauliques. La diversité des formules proposées par la littérature (Bennis 1993 ; Burlando et Rosso 1996 ; Llamas 1993) pour l'estimation du débit de pointe reflète la grande variabilité du rôle des facteurs affectant le ruissellement. La méconnaissance des variables agissant sur le ruissellement a comme résultat: (1) l'inadéquation des modèles proposés qui découle de l'absence de variables fiables et des relations inappropriées entre les éléments du modèle et, (2) l'utilisation des variables interdépendantes qui sont de nature à fausser toute interprétation des résultats.

L'un des objectifs principaux de l'analyse hydrologique est de fournir l'hydrogramme le plus proche de la réalité. Parmi les principales théories qui permettent d'établir ces relations, on

---

<sup>20</sup>Pluie nette : c'est la quantité de pluie résiduelle qui induit le ruissellement à la surface de sol en soustrayant le pourcentage d'infiltration et d'évaporation.

peut citer : la théorie de l'hydrogramme unitaire instantané et la théorie de l'hydrogramme standard (Llamas 1993).

#### 4.4.2.1 Hydrogramme standard.

Dans les modèles hydrologiques à base statistique, la relation pluie - débit d'un bassin est décrite par des lois de probabilités utilisant les valeurs de mesures effectuées durant plusieurs années d'observation. Les séries de mesures sont souvent utilisées pour obtenir l'hydrogramme unitaire caractérisant le bassin au moyen de la méthode de convolution<sup>21</sup>.

La forme de l'hydrogramme standard est définie à l'aide de certains paramètres standards :

$T_b$  : temps de base, soit la durée totale du ruissellement,

$T_m$  : temps de montée,

$\alpha = Q_M/Q_m$  : rapport du débit maximal au débit moyen de l'hydrogramme.

L'hydrogramme représenté par la figure 4.2 suppose une pluie ayant une montée linéaire, tandis que la courbe de décrue a une forme exponentielle ou hyperbolique dont les paramètres sont calculés à partir des trois paramètres fondamentaux  $T_b$ ,  $T_m$ , et  $\alpha$ . Par ailleurs l'hydrogramme du «*Soil Conservation Service*» (figure 4.3) appelé souvent hydrogramme triangulaire, jadis était très utilisé dans les modèles d'hydrologie analytique, compte tenu de sa simplicité, où :

$T_m$  : temps de montée,

$T_r$  : durée de l'averse,

$T$  : temps de base,

$Q_p$  : débit de pointe.

#### 4.4.2.2 Hydrogramme unitaire

À cause de ses possibilités d'application et son adaptation rapide à différents cas, la méthode de l'hydrogramme unitaire est simple à utiliser pour simuler les processus d'écoulement. La mise au point de l'hydrogramme unitaire est attribuée à Sherman [1932], part de principe que l'observation des pluies de durées identiques engendre des

---

<sup>21</sup> Convolution : soit X et Y deux variables aléatoires indépendantes ayant une fonction de distribution F(x) et G(y) respectivement et comme fonction de densité de probabilité f(x) et g(y). Soit Z = X + Y une troisième variable



hydrogrammes comparables. • Le concept de l'hydrogramme unitaire est fondé sur le fait que les temps de base sont égaux pour toutes les crues dues à des pluies de même durée • (Llamas 1993) ; par conséquent, l'hydrogramme de crue correspondant à une pluie d'une durée donnée est obtenue en multipliant les valeurs de l'hydrogramme unitaire par la hauteur de la pluie (Linsley *et al.* 1940). Dans cette méthode, ainsi que le suggère Horton [1967], le ruissellement dépend de la hauteur de la pluie et du taux d'infiltration.

Les caractéristiques physiques qui affectent les caractéristiques de l'écoulement dans le bassin versant sont supposées rester constantes durant l'épisode pluvial. La méthode de l'hydrogramme unitaire permet de passer de la pluie efficace à l'hydrogramme. Le bassin versant est considéré comme une boîte noire où l'impulsion d'entrée, la pluie se transforme en ruissellement correspondant. La relation entre l'entrée (la pluie) et la sortie (l'écoulement) est fonction ordinaire de transfert (figure 4.3).

#### 4.4.2.3 Analyse de l'approche de l'hydrogramme unitaire

L'hydrogramme unitaire est utilisé pour obtenir l'hydrogramme engendré par n'importe quelle pluie. Les principes de la théorie de l'hydrogramme unitaire (Llamas 1993) sont les suivants :

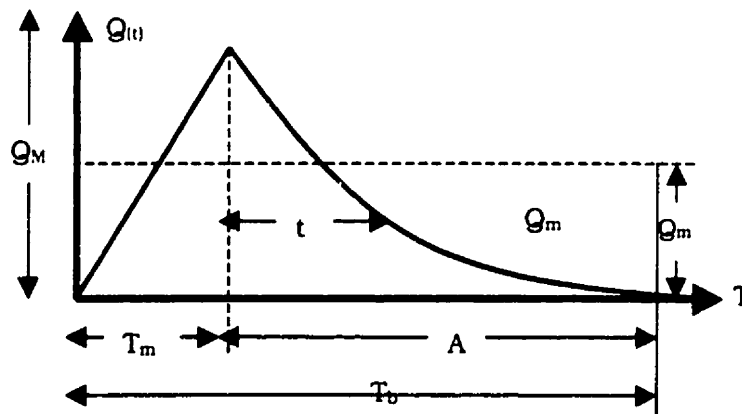


Figure 4.2 Hydrogramme standard à décroissance exponentielle (Llamas 1993)

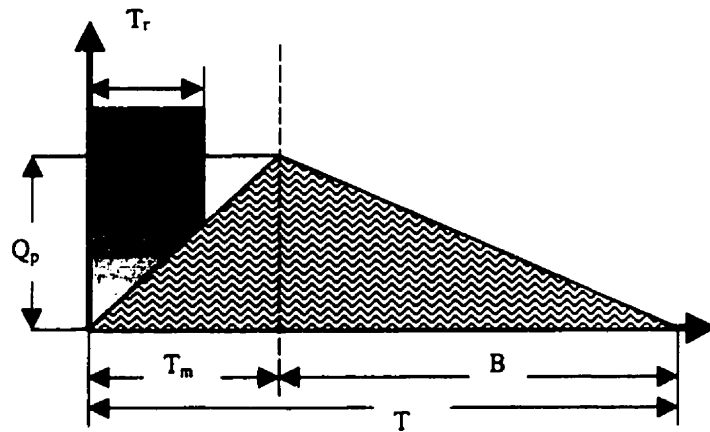


Figure 4.3 Hydrogramme «Soil Conservation Service » (Llamas 1993)

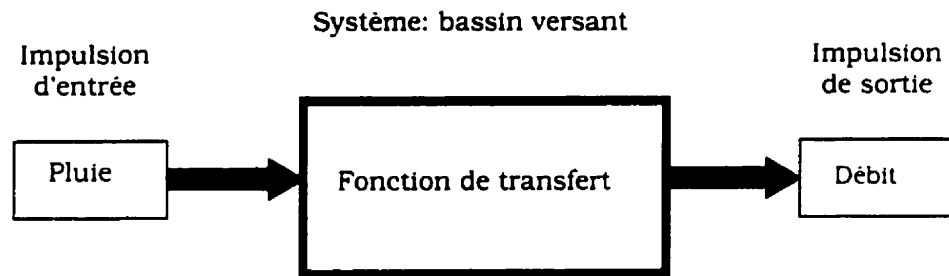


Figure 4.4 Représentation schématique de d'hydrogramme unitaire (Boughton 1987)

- **L'univocité** entre les précipitations et le débit pour des averses ayant les mêmes caractéristiques d'intensité et de durée ;
- **La linéarité** entre les averses unitaires de différentes intensités et les débits correspondants. La répartition spatio-temporelle de la pluie efficace est la même pour toutes les pluies de durées identiques ;
- **L'invariance** dans le temps, en effet pour deux pluies identiques en hauteur et en durée mais décaler dans le temps, les formes des hydrogrammes unitaires sont les mêmes.

Ces principes sont très restrictifs et peuvent rarement être satisfaits dans la réalité. En effet, les deux premières sont en particulier inapplicables pour des petits bassins où certains paramètres comme les conditions antérieures d'humidité du sol. L'état de la couverture

végétale, l'utilisation du territoire, etc. contribuent à développer des relations conditionnelles et non linéaires entre les précipitations et les débits générés.

En réalité, à cause du nombre considérable de facteurs externes qui influence le système de façon significative, ces relations ne peuvent souvent être analysées que grâce à des méthodes stochastiques où la linéarité renvoie uniquement à des conditions à moyen et à long terme. Quant aux deux dernières hypothèses, elles peuvent être acceptables pour de petits bassins ; il est évident que, lorsque les dimensions de ceux-ci augmentent, l'uniformité spatiale des averses devient de moins en moins probable.

L'emploi de l'hydrogramme unitaire est aujourd'hui assez rare en hydrologie analytique. Cette méthode est remplacée par d'autres modèles plus complexes mais plus réalistes et précis (Chuhadaroglu 1992). L'usage a été facilité par le recours à des systèmes automatisés utilisant des modèles hydrologiques à base mathématique adaptés aux outils informatiques actuels.

#### **4.5 La modélisation mathématique en hydrologie**

Pour l'hydrologue et le planificateur de ressources hydriques, la modélisation mathématique est devenue un outil essentiel grâce à des facteurs tels que les nouvelles performances des ordinateurs, les développements mathématiques (statistique et recherche opérationnelle), ainsi que l'enrichissement des données historiques (Llamas 1993). Toutefois, le modèle mathématique a vu grandir son importance comme instrument de synthèse, de prévision et de conception depuis que les aménagements hydrauliques. De ce fait, le traitement de données devient plus complexe à cause du nombre important de facteurs internes ou environnants et des liens souvent subtils entre les divers composants.

Les modèles mathématiques en hydrologie sont composés de deux familles : (1) les modèles stochastiques, (2) les modèles déterministes. Les modèles **stochastiques** portent le nom de modèle mathématique **inductif** ou **boîte noire** alors que les modèles **déterministes** sont dits à dominance **déductive** ou **boîte blanche** (Llamas 1993).

- **Les modèles de boîte noire** ne tiennent pas compte des lois qui gouvernent le processus en utilisant plutôt des relations de type cause à effet, d'une manière générale très empirique. L'avantage de modèles empiriques réside dans l'utilisation de fonctions linéaires qui facilitent grandement les calculs. Cependant, le comportement non-linéaire du bassin versant peut rendre inadéquats les modèles linéaires les plus sophistiqués. En hydrologie, la linéarité est une hypothèse

attrayante en raison des simplifications introduites dans le processus de calcul : malheureusement la plupart du temps cette hypothèse manque de réalité physique (Llamas 1993).

- **Les modèles de types déterministes** ou boîte blanche obéissent à des lois connues de la physique (Newton, équation de Navier-Stokes, etc.), et toute la structure du modèle est définie à priori. La réponse de ces modèles est quantitative et leur caractéristique est l'univocité parfaite entre les sollicitations (exemple intensité de pluie) du système (bassin versant) et la réponse (débit de crue à l'exutoire) Llamas [1993].

#### 4.5.1 Les étapes d'élaboration d'un modèle hydrologique

La construction d'un modèle mathématique doit suivre les étapes suivantes : l'identification, le calibrage, la validation, les limites d'application Llamas 1993).

- **L'identification** : C'est l'analyse de la structure du modèle, de ses éléments et des liens entre eux. À cette étape, on définit le nombre de variables et on pose les hypothèses simplificatrices du modèle en fonction des objectifs visés et de la précision recherchée pour les résultats.
- **Le calage** : Cette étape consiste à évaluer les paramètres du modèle à l'aide des essais- erreurs portants sur les données les réponses obtenues.
- **La validation** : Elle consiste à comparer la réponse théorique, obtenue par le passage d'une sollicitation expérimentale, avec les observations réelles dans les mêmes conditions.
- **Les limites d'application** : Tout modèle mathématique doit spécifier très clairement le cadre dans lequel il a été élaboré et les objectifs visés. Avec cette information, l'utilisateur futur pourra connaître le champ d'application réel et les limites physiques ou analytiques au-delà desquelles l'usage du modèle peut devenir hasardeux et inadéquat. Comme limites *physiques*, on peut citer, par exemple, les conditions climatiques extrêmes sous lesquelles le modèle a été validé : l'usage d'un modèle élaboré pour les régions tempérées peut comporter un très grand risque dans en milieu équatorial. Comme limites *analytiques*, on peut mentionner la précision voulue, le nombre minimal d'observations requises ainsi que le type et la puissance de l'ordinateur nécessaire pour résoudre les équations du système.

## **4.5.2 Modèles analytiques**

### **4.5.2.1 Modèle Stanford IV**

Le modèle a été élaboré à l'Université de Stanford par Crawford et Linsley [1963]. Il permet d'analyser l'évolution des différentes composantes du cycle hydrologique et de leurs relations pour simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant. Le principe de base est d'assimiler le système physique du bassin versant à une série de réservoirs dont le remplissage et le vidange s'effectuent selon des relations analytiques précises, et constituent les étapes dans l'évolution de l'écoulement. Le modèle de Stanford IV peut être utilisé aussi bien pour analyser globalement le comportement du bassin, à la suite d'une précipitation donnée, que pour une application simultanée à différentes parties du bassin avec, éventuellement, des valeurs différentes des divers paramètres.

Le principe de base du modèle Stanford IV est que les différentes parties du sol se comportent comme des réservoirs d'eau. Ceux-ci se remplissent suivant une loi conditionnée par la partie en amont du système et se vident suivant une loi qui dépend de leur propre constitution, de leur degré de remplissage et de l'état des réserves en aval. Dans le cas du modèle Stanford, le nombre de réservoirs est huit, dont trois sont utilisées dans la sous-routine de la fonte des neiges.

La version originale du modèle Stanford a été employée avec succès pour simuler le ruissellement dans plusieurs bassins de grandes dimensions aux États-Unis. Une modification du modèle, faite à l'Université de l'État de l'Ohio, a permis d'étendre son utilisation à des petits bassins dont les dimensions varient entre 1 et 75 km<sup>2</sup> dans le Centre-Ouest des États-Unis. Finalement, une nouvelle version du modèle Stanford IV a été validée sur la forêt Montmorency (Québec, Canada) par un groupe de chercheurs à l'Université Laval (Llamas 1993).

### **4.5.2.2 Modèle HEC-4**

Élaboré par le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis avec le modèle de simulation du ruissellement mensuel, ce modèle produit et reconstitue des valeurs du débit mensuel ou saisonnier d'une rivière à l'aide d'une régression linéaire à variables multiples. Le modèle HEC-4 offre plusieurs options, parmi lesquelles : (1) le choix de la fonction de distribution des variables, (2) la modification des séries chronologiques de débits en résidus markoviens de premier ordre, (3) la sélection progressive des variables (4) le groupement de plusieurs

variables de débit mensuel pour l'analyse saisonnière, (5) l'inclusion des valeurs estimées dans la régression.

Dans le modèle HEC-4, les variables indépendantes sont les précipitations, la température, le niveau des et des réservoirs ou d'autres variables métrologiques pertinentes. Afin d'éliminer l'effet de stockage de l'eau sur le bassin, il est recommandé de transformer des valeurs des variables indépendantes (débit) suivant le modèle de Markov de premier ordre. Ce modèle a en particulier été utilisé pour estimer des séries de débits moyens mensuels de la rivière La Grande au nord-est du Québec (Karim-Bhuiya, 1973).

#### **4.5.2.3 Méthode de «l'US Soil Conservation Service» (SCS)**

La méthode du SCS ou «Curve Number» a été présentée pour la première fois dans un manuel de conservation des eaux et des sols au milieu des années 50 (Banton *et al.* 1996). Elle se fondait d'abord sur les interprétations de mesures d'infiltration à partir des simulateurs de pluie sur des parcelles tests de dimension 2 x 4 m. Cette méthode a été développée pour déterminer le débit en fonction de l'utilisation des terres ou de modifications de leur profil, des types des sols, de l'humidité résiduelle et de la hauteur des pluies. Les effets sur le ruissellement des modifications dans l'utilisation des sols et des mesures de lutte contre l'érosion ont été particulièrement étudiés.

Depuis son introduction, la méthode a été appliquée partout dans le monde pour tous les problèmes d'hydrologie ; elle est l'une des plus répandues pour la détermination des écoulements dans les bassins versants. Le paramètre CN du ruissellement représentant le complexe hydrologique sol-couverture est une sorte de coefficient de ruissellement dépendant de la nature du sol et de son utilisation (Faultier et Marche 1993 ; Ganoulis 1996 ; Lane et Wallage 1976).

En dépit de son utilisation très répandue et des résultats positifs qu'elle permet, la méthode SCS présente des inconvénients. De nombreux auteurs considèrent comme un défaut important la sélection d'une constante pour les pertes initiales ; d'autres difficultés proviennent de la non prise en compte de l'effet de temps sur la pluie. En effet, cette méthode ne tient pas compte de l'influence de la durée d'un événement pluvieux sur l'infiltration et par conséquent sur le ruissellement (Bosnay 1989). En revanche, la méthode SCS donne de bons résultats pour les pluies dont l'intensité initiale est forte et dont la hauteur totale est supérieur à 40 mm. Étant donné que c'est une méthode à un seul

paramètre (CN), la méthode SCS fournit une approximation grossière des processus hydrologiques complexes.

Pour que la modélisation de ruissellement d'un bassin versant soit réaliste, il s'avère crucial d'extraire la géométrie réelle du terrain, de fournir au modèle hydrologique les données du relief : géométrie, pente, paramètres descriptifs, etc. (Bel Hadj Kacem *et al.* 1998-b). Les trois modèles analytiques qui ont été présentés ci-haut ne permettent pas de répondre à de tels besoins. Comme première alternative nous présentons une deuxième catégorie de modèle dit distribué qui présentent l'avantage par rapport aux précédents d'être plus flexible et réaliste. En effet, les modèles distribués permettent de palier au handicap majeur que présentent les modèles analytiques et ce, en utilisant une base de données géographique pour représenter le territoire ; par contre la simulation hydrologique se déroule encore selon le principe des modèles analytiques.

#### **4.5.3 Les modèles distribués**

La liste des modèles connus à ce jour serait longue, ces modèles étaient essentiellement globaux, en ce sens que les bassins pour lesquels les débits sont simulés sont considérés comme un tout non subdivisé. Très vite, des modèles ont vu le jour permettant de tenir compte de la variabilité des phénomènes hydrologiques à l'intérieur du bassin versant. (Girard *et al.*, 1971 ; Morin 1991).

Sans que cela soit impossible pour autant, aucun des modèles ci-dessus n'avait toutefois été conçu pour vraiment bénéficier des données décrivant dans le détail le territoire physique considéré, comme celles provenant de la télédétection ou des systèmes d'information géographique (SIG), (Fortin *et al.*, 1995 ; Geertman et Ritsema 1995 ; Goodchild 1987-a ; Goodchild 1988 ; Goodchild 1991-a ; Jankowski 1990 ; Eton et Smith 1993). Pour pouvoir tirer profit de ces nouvelles technologies, il importait donc de développer une nouvelle génération de modèles, puisque la plupart des modèles existants possédaient des structures incompatibles avec les caractéristiques des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique (Kemp 1992-a ; Liker *et al.* 1993).

Parmi les modèles disponibles dans la littérature nous avons sélectionné les deux modèles suivants : CEQEAU, HydroTEL.

#### 4.5.3.1 Modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU<sup>22</sup> a été développé par groupe de chercheurs de l'INRS-EAU dans les années 70 dans le cadre du développement du projet hydroélectrique de la Baie-James. Le modèle CEQUEAU est un modèle déterministe matriciel d'usage souple. Il prend en considération la variation spatio-temporelle des caractéristiques physiques du bassin versant. Le bassin versant est découpé en "carreaux entiers". Ce découpage en surfaces élémentaires carrés facilite l'utilisation de la télédétection pour définir certaines caractéristiques physiographiques comme le couvert végétal, le réseau de drainage, etc.

Le modèle CEQUEAU permet de calculer les débits aussi bien aux points de jaugeage qu'en n'importe quel autre endroit. Le modèle comporte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire d'un bassin versant :

- **La première partie** concerne l'écoulement vertical de l'eau, dont les principaux phénomènes sont la pluie, la fonte de neige, l'évapotranspiration, l'infiltration et le jeu des réserves superficielles et profondes. Cette première partie est désignée par le terme "fonction de production" et elle est calculée sur chaque carreau.
- **La deuxième partie** concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage. Les processus compris dans cette partie tiennent compte de l'influence des lacs, des marécages et des ouvrages artificiels tels que barrage, détournement, etc.

Le volume d'eau disponible sur un carreau est obtenu en multipliant le volume produit sur le carreau entier par le pourcentage de superficie du carreau considéré. Ce volume est ajouté aux volumes entrant dans ce carreau depuis le ou les carreaux partiels directement en amont. Le volume résultant devient le volume disponible pour le transfert vers le carreau immédiatement en aval. Ce processus est répété de carreau en carreau jusqu'à l'exutoire.

#### 4.5.3.2 Modèle HydroTEL

Le modèle de simulation HydroTEL<sup>23</sup> a été développé par Fortin *et al.* [1995]. Ce modèle a été validé sur la rivière Chaudière de la province du Québec (Canada) ; il a été testé avec succès sur des bassins versants d'autres provinces canadiennes (Ontario et Colombie-Britannique). La simulation comporte deux étapes :

---

<sup>22</sup> CEQUEAU : CEntre Québécois de l'EAU

<sup>23</sup> HydroTEL : HYDROlogie TÉLédétection



- **Le traitement des données** en provenance de la télédétection est réalisé à l'aide du modèle PHYSITEL<sup>24</sup> (PHYsique TÉLédétection). En effet, PHYSITEL permet d'extraire la structure du réseau d'écoulement du bassin versant nécessaire pour réaliser les simulations par HydroTEL. À partir d'un modèle numérique de terrain sous forme matricielle 400mx400m, PHYSITEL permet d'extraire la pente et la direction d'écoulement de chaque maille. En identifiant la maille considérée comme exutoire, et en remontant vers l'amont de maille à maille grâce à un algorithme récursif, il permet d'identifier toutes les mailles constituant le bassin versant relatif à cette «*maille-exutoire*».
- La détermination des sous-bassins versants ayant les mêmes caractéristiques hydrologiques (relief, sol, végétation, etc.) et des données météorologiques disponibles. Les sous-bassins versant ainsi déterminés servent comme unité de simulation hydrologique.

#### 4.5.3.3 Limitations des modèles distribués

L'utilisation des modèles globaux est grandement facilitée par leur simplicité, liée au fait qu'ils ne font en général intervenir qu'un nombre très restreint de paramètres. En revanche, l'absence d'une prise en compte explicite de leur variabilité spatiale constitue un handicap dans l'analyse de l'évolution du comportement d'un bassin suite à sa modification.

Ainsi, par exemple un aménagement selon qu'il se trouve dans la partie amont, centrale ou aval du bassin provoque des effets différents sur son comportement (figure 4.5). Mais la différence de ces comportements ne peut pas être expliquée par des modifications des coefficients de ruissellement globaux du bassin, car ces coefficients ne reflètent pas la structure intérieure du bassin. De manière analogue, une modification apportée au bassin versant de type aménagement de conservation des eaux et des eaux (construction d'un réseau de banquettes de rétention) se répercute sur le coefficient de ruissellement global mais également sur la distribution spatiale de ce paramètre, aspect qui également difficile à exprimer. Pour cette raison les modèles de simulation hydrologiques de type global se prêtent mal à une prévision de l'impact d'une modification d'un bassin sur son comportement. Une telle prévision requiert une solide expérience du modèle global utilisé pour déterminer le module et les paramètres de simulation adéquats. Le nouveau paradigme qui sera énoncé dans le chapitre prochain et dont les résultats seront discutés et analysés

---

<sup>24</sup> PHYSITEL : PHYsique TÉLédétection

au chapitre 7 offre des solutions rigoureuses permettant de résoudre définitivement cette complexité majeure relative à la spatialisation de l'impact des aménagements sur le régime hydrologique du bassin versant.

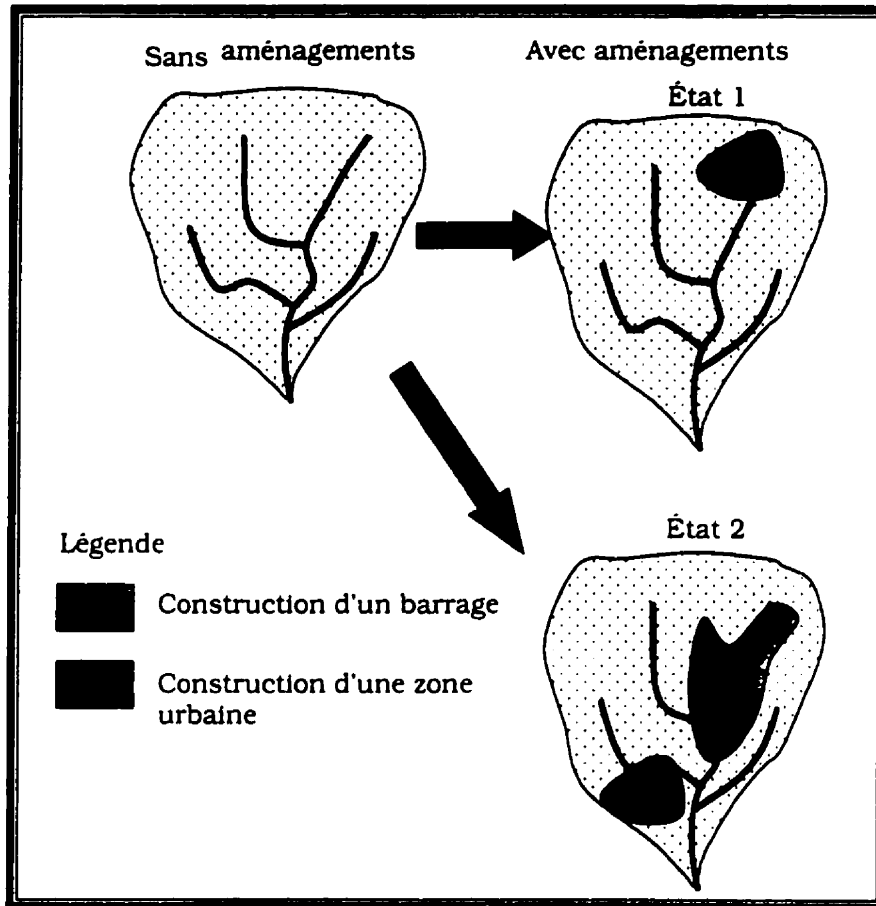


Figure 4.5 Évolution spatio-temporelle des aménagements sur un bassin versant

#### 4.6 Conclusion et synthèse du chapitre

Les modèles de simulation hydrologique apportent une aide particulièrement précieuse aux gestionnaires du territoire. Ils permettent de synthétiser un nombre important d'informations et d'effectuer entre autres le calcul des bilans et l'évaluation des risques potentiels de contamination (Oliveira 1997-b ; Puente et Castollo 1996 ; Sherir et Marche 1992)

Ce chapitre a permis de mettre en exergue les principaux paramètres nécessaires pour la modélisation l'hydrologique du bassin versant. Il en sort que la majorité de ces paramètres présentent une variation spatio-temporelle. Comme conséquence, ces modèles présentent plusieurs inconvénients qui peuvent être synthétisés globalement en deux catégories :

- Les modèles hydrologiques actuels considèrent le bassin versant dans sa globalité comme un tout, alors il est difficile de tenir compte des caractéristiques physiques et descriptives du territoire d'une manière précise en tenant compte de la variation spatiale et de l'évolution temporelle (végétation, rugosité, texture du sol, état d'érosion, etc.)
- Les modèles actuels tentent de fournir des résultats «absolus» à un endroit précis du territoire, à l'exutoire du bassin versant (débit des crues, hauteur d'eau moyenne, vitesse moyenne). Ils ne donnent aucune information sur l'évolution des résultats sur le bassin versant.

La réponse à ces deux catégories d'inconvénients sera résolue d'une part, à l'aide de l'utilisation des SIG, pour la modélisation physique et descriptive du territoire et, l'utilisation de la méthode des éléments finis (objet du chapitre 6) pour la modélisation du ruissellement. En effet, la méthode des éléments finis présente plusieurs atouts qui favorisent son utilisation : elle utilise des équations mathématiques dites couplées permettant ainsi de décrire la variation spatio-temporelle de plusieurs paramètres (rugosité, perméabilité, hauteur , d'eau, vitesse locale, etc.). Le fait d'intégrer à la fois l'aspect spatial et temporel rend l'utilisation de la simulation hydrologique par éléments finis incontournable particulièrement pour l'aspect décisionnel. En effet, pour évaluer l'impact des deux scénarios différents sur le régime du bassin (figure 4.5), variant dans l'espace et dans le temps, l'utilisation d'un outil basé sur le couplage SIG-MEF rend ce défi réalisable. Le prochain chapitre sera consacré à la définition de la procédure du couplage des systèmes d'informations géographiques et la modélisation numérique par éléments finis pour la simulation hydrologique.

## **5 Couplage SIG-MEF pour la modélisation hydrologique : «le nouveau paradigme»**

### **5.1 Introduction**

Les modèles d'hydrologie analytique présentés dans le chapitre précédent se heurtent à une difficulté de l'évaluation du potentiel du ruissellement. Ainsi la majorité des ces modèles considèrent le bassin versant d'une façon globale. De ce fait, la détermination de paramètres physiques<sup>25</sup> qui conditionnent l'hydrodynamique du bassin versant est relativement subjective. Par ailleurs, l'estimation de ces paramètres dépend étroitement de l'expérience pratique et de la connaissance de l'hydrologue au bassin versant. Souvent c'est de la mauvaise connaissance de l'aptitude au ruissellement du bassin versant que découlent la plupart des difficultés d'estimation des débits sur les bassins versants.

### **5.2 Variation spatio-temporelle des paramètres hydrologiques**

La complexité du comportement hydrologique des bassins versants a été discutée dans la littérature (Fortin *et al.* 1995). En effet, les processus hydrologiques varient dans l'espace et dans le temps en fonction de la variabilité spatio-temporelle des paramètres d'écoulement.

En plus, le volume d'eau recueilli par un bassin versant est étroitement tributaire de la variabilité spatiale et temporelle de ses caractéristiques physiographiques. Il nous paraît donc crucial de combiner ces deux technologies actuelles complémentaires : un *modèle de simulation numérique* robuste, capable de bénéficier des moyens offerts par les SIG de fournir de l'information adéquate sur les diverses variables affectant les écoulements de surface et la méthode des éléments finis permettant de simuler les écoulements où tous les anciens modèles analytiques décrits dans le chapitre précédent ont échoué.

### **5.3 Limitations des modèles analytiques**

Les modèles de l'hydrologie analytique présentés au chapitre précédent des limitations majeures que nous pouvons synthétiser ainsi :

---

<sup>25</sup> Les paramètres physiques : pente, perméabilité, coefficient du ruissellement, etc.

- La **non-spatialisation** des paramètres physiques et descriptifs du bassin versant dont dépend étroitement le régime hydrologique simulé. Et, par l'effet même, la dimension **temporelle** des paramètres physiques et hydrodynamiques n'est pas considérée.
- La **morphologie** du terrain prise en compte dans les modèles sous forme schématique ; en effet, il est impossible de tenir compte d'une manière explicite de la géométrie réelle du terrain.
- La **linéarité** entre les sollicitations du bassin suite à un événement pluvial et la réaction représentée par le débit de crue.
- La **non-transportabilité** des modèles : une fois calibré et validé pour un bassin versant d'une région donnée, les modèles hydrologiques traditionnels ne sont pas utilisables sur d'autres bassins dans des conditions semblables. Ce handicap résulte du fait que le calibrage utilise des coefficients empiriques qui seront ajustés selon le principe «essai - erreur» et par conséquent, il serait très précaire d'utiliser ces modèles de nouveau sans refaire le calibrage, un processus pouvant s'échelonner sur plusieurs années d'observations.

Actuellement, ni les SIG, ni la modélisation par éléments finis ne peuvent répondre d'une manière isolée à toutes ces exigences. Par contre, le résultat escompté du nouveau paradigme résultant du couplage SIG-MEF, est de résoudre ce genre de difficultés. Pour que la modélisation de ruissellement d'un bassin versant soit réaliste, il s'avère crucial : d'extraire la géométrie réelle du terrain et de fournir au modèle hydrologique les **vraies** données du relief.

## **5.4 Structures géométriques des SIG et des éléments finis**

### **5.4.1 Les structures géométriques des SIG**

Le chapitre 3 nous a rappelé que les SIG présentent des fonctionnalités particulièrement intéressantes pour la modélisation numérique et descriptive du terrain. Par conséquent la modélisation du relief est possible soit à l'aide des structures géométriques *régulières*, soit *irrégulières* (Clarke 1995 ; Davidson *et al.* 1993 ; Dawes et Short 1994 ; De Oliveira 1997 ; Desmet et Govers 1996).

**Le modèle de type grille** est constitué d'une matrice de points situés les uns par rapport aux autres, à égale distance. Chacun des points comprend des coordonnées

tridimensionnelles, ce qui permet de représenter le relief. Ce type de modèle est représenté sous la forme d'un ensemble de cellules carrées épousant la forme du relief. De plus, le relief décrit à l'aide d'un GRID permet aisément la représentation en perspective du terrain (figure 5.1) ; il est aussi plus facile de modifier son niveau de détail.

**Un modèle numérique de type TIN** est formé d'un réseau de triangles irréguliers reliés les uns aux autres, ce qui permet de représenter le relief d'une surface topographique. Ce type de modèle numérique présente l'avantage de bien représenter le relief lorsque la répartition des points recueillis n'est pas homogène. Le réseau de triangles irréguliers s'adapte à n'importe quel type de relief (plat ou accident) puisque la dimension des triangles est variable. De plus, il est possible d'obtenir directement un TIN à partir des points décrivant des courbes de niveau provenant d'un fichier numérique (Eddy et Looney 1993 ; Heller 1984 ; Marble 1979 ; Pike et Acevedo 1991 ; Tachikawa *et al.* 1993 ; Taylor 1985).

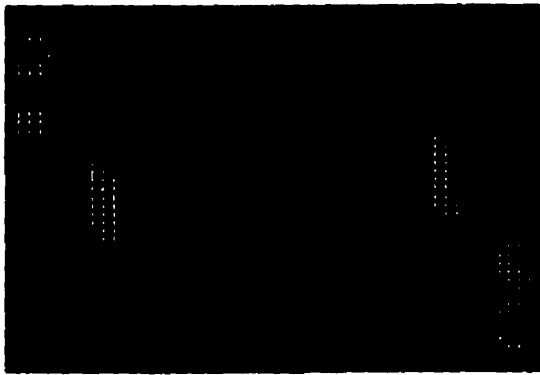


Figure 5.1 Structure matricielle « raster »

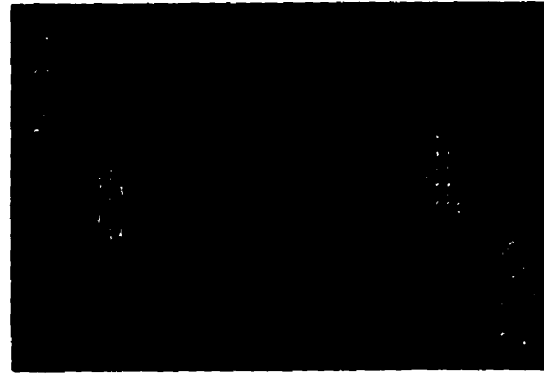


Figure 5.2 Structure vectorielle « TIN »

#### 5.4.2 Les structures géométriques de base en modélisation numérique

Plusieurs méthodes de discrétisation ont été développées, entre autres, la méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis de frontières (MEFF), méthode des volumes finis (MVF).

##### 5.4.2.1 La méthode des différences finies

La méthode des différences finies est considérée par les spécialistes de modélisation numérique comme un cas particulier de la méthode des éléments finis (Ozol et Mcgrath

---

<sup>26</sup> Structure matricielle : Le SIG Arc/Info utilisé dans le contexte de cette recherche comporte un module permettant de gérer les structures matricielles appelé GRID.

1993, Robert 1993-b). Le pas de discrétisation est constant dans toutes les directions. Par conséquent, l'approximation du milieu se fait à l'aide de l'emploi d'une grille régulière figure (5.3).

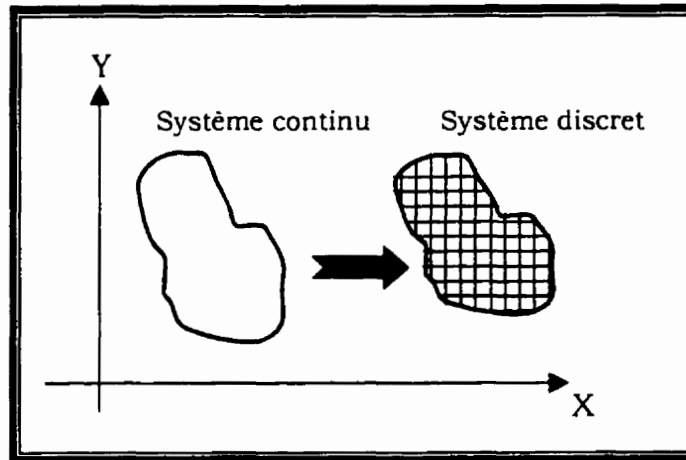


Figure 5.3 Principe de la méthode des différences finies (Robert 1993)

L'utilisation des grilles régulières (figure 5.4) constitue une contrainte limitant ainsi la flexibilité de cette méthode dans le cas des problèmes ayant des géométries complexes, des tels problèmes nécessitent souvent un raffinement de maillage. En revanche, elle est plus appropriée pour la modélisation des problèmes physiques représentant des stratifications. C'est le cas des structures géologiques, elle est souvent employée pour la modélisation hydrogéologique (Ozol et Mcgrath 1993). En outre, le fait qu'elle utilise un pas de discrétisation constant, elle constitue la méthode par excellence pour la résolution numérique de la composante temporelle des problèmes physiques qui sera élaboré en détail dans le prochain chapitre.

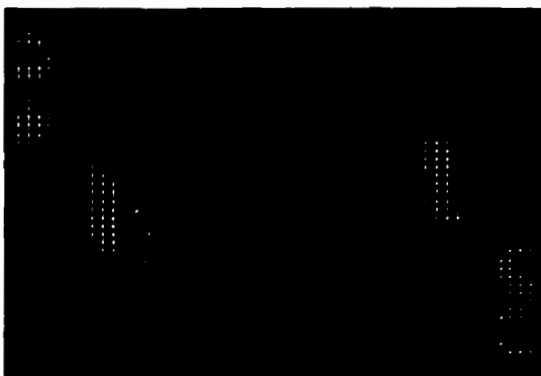


Figure 5.4 Maillage par différences finies

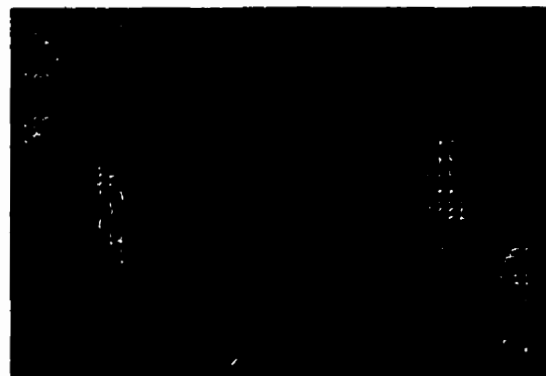


Figure 5.5 Maillage par éléments finis

#### 5.4.2.2 La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est basée fondamentalement sur les techniques d'approximation grâce auxquelles nous pouvons remplacer un système continu par un système discretisé équivalent (Dhatt et Touzot 1981). La description détaillée ainsi que les concepts de base de la méthode des éléments finis seront présentés dans le prochain chapitre.

La méthode des éléments comprends deux aspects : (1) la discrétisation des équations aux dérivées partielles est la transformation de la forme intégrale en une forme algébrique qui s'accommode parfaitement à la résolution à l'aide de l'algèbre matricielle, (2) la discrétisation géométrique : cette étape consiste à représenter le domaine physique à l'aide des éléments de formes géométriques régulières ou irrégulières. La seule restriction est l'exclusion de recouvrement d'éléments, et l'ensemble de ces derniers doit constituer un domaine aussi proche que possible du domaine d'étude. La méthode des éléments finis utilise des éléments de 1D, 2D, 3D. Le nombre de nœuds que les éléments finis peuvent comporter varie avec la nature du problème à modéliser. Dans le cas d'une discrétisation à deux dimensions l'élément le plus pertinent pour cette recherche est le **triangle à 3 nœuds**, puisque c'est l'élément de base des modèles de relief de type TIN.

Dans chaque élément un certain nombre de points sont définis, qui peuvent être positionnés sur la frontière ou à l'intérieur de l'élément. Ces nœuds constituent les points où les valeurs numériques des fonctions inconnues et éventuellement leurs dérivées, seront déterminées. Le nombre total d'inconnues aux nœuds, valeurs de fonctions et éventuellement leurs dérivées, sont appelées les **degrés de libertés** du problème numérique, ou **variables nodales**.

### 5.5 Couplage SIG-MEF : vers une synergie numérique

Depuis quelques années, le couplage des SIG avec différents types de modèles (physiques, numériques, stochastiques, etc.) a reçu une attention particulière de la part de la communauté internationale œuvrant dans le domaine des SIG, aboutissant à la tenue de la première conférence internationale de l'intégration des SIG et de la modélisation environnementale (Goodchild 1985 ; Goodchild 1992 ; Goodchild 1993, McNolg 1996 ; Morris 1993 ; Openshaw 1990, Parker 1988 ; Pilon et McIntyre 1993).

Comme il a été présenté dans le chapitre 3, les SIG permettent la modélisation du relief et ce à l'aide du TIN. La modélisation numérique de relief est basé sur deux concepts de base



d'une part la continuité numérique qui est satisfaite à l'aide de la topologie et l'utilisation des fonctions linéaires pour l'interpolation du relief. Par ailleurs nous verrons dans le chapitre 6 que la méthode des éléments présentent des affinités avec les SIG ; en effet, la notion de topologie au niveau des SIG est traduite par le connectivité qui permet d'assurer la continuité au sens physique et mathématique du domaine. De plus, la méthode des éléments finis utilise plusieurs techniques d'interpolation (linéaires quadratiques, trigonométriques, fonctions harmoniques, etc.).

### **5.5.1 Problèmes d'intégration des SIG et de la modélisation hydrologique**

Les critiques adressées aux capacités analytiques des SIG pourraient paraître ambiguës si elles ne se situaient pas par rapport à un objectif bien déterminé. Pour faire face aux limitations des SIG au niveau l'analyse spatiale, certains auteurs recommandent l'intégration de modèles analytiques (Burrough 1993 ; Chu et Marble 1995). Dumolard [1992] propose l'ajout de capacités de modélisation et de simulation aux outils de l'analyse spatiale et il s'exprime ainsi :

*«Les outils de l'analyse spatiale traitent des données pour en extraire de l'information a posteriori, ce qui n'aide les décisions qu'indirectement. En outre, si le traitement de la géométrie/topologie des données est relativement bien pris en compte, le thématicien de l'espace est frustré par la faiblesse du traitement sémantique de celles-ci. Une véritable aide à la décision suppose le recours à une "modélisation sémantique" et à la **simulation.**»*

La littérature met bien en évidence le fait que, malgré leur énorme potentiel, les SIG ne contribuent que fort peu à la solution des problèmes spécifiques des décideurs. On peut en effet identifier les besoins (modélisation, simulation, évolution temporelle, etc.), non satisfaits par les logiciels actuels et leurs fonctionnalités analytiques. Pour combler ces lacunes, l'avenue d'une solution résultant du couplage SIG-MEF pourra révolutionner l'efficacité des deux outils utilisés jadis d'une manière isolée pour résoudre des problèmes d'ingénierie.

### **5.5.2 Solution proposée couplage SIG-MEF**

La méthode des éléments finis utilise le plus souvent des fonctions d'interpolation linéaire dans le but de discrétiser les équations différentielles. La représentation du relief à l'aide d'une structure géométrique triangulaire du type TIN utilise aussi également des fonctions

d'interpolation linéaire. Cette similitude nous a permis de tirer profit d'une réelle « **synergie numérique** ».

L'importance du potentiel de modélisation offert par les SIG a été discutée par plusieurs auteurs (Bel Hadj Kacem et *al.* 1998-c ; Fortin et *al.* 1995 ; Goodchild 1993 ; Hutchinson 1993). L'élaboration d'un logiciel complètement intégré contenant à la fois les SIG et les MEF est loin d'être réalisée. C'est d'ailleurs l'un des axes de recherche auxquels se sont intéressés plusieurs chercheurs à travers le monde [Vieux 1996], d'où l'intérêt de cette recherche. Comparativement aux SIG, la modélisation numérique par éléments finis possède un historique assez consistant. En effet, les équations de Navier-Stokes qui constituent la base de la mécanique des fluides sont connues depuis plus d'un siècle (Oreskes et *al.* 1994, Robert 1983). La formulation mathématique reste invariante ; par contre, les schémas numériques de résolution évoluent en parallèle avec les performances des outils informatiques. La figure 5.6 présente la démarche d'intégration de la modélisation par éléments finis du ruissellement des eaux de surface utilisant les données numériques de provenance du système d'information géographique.

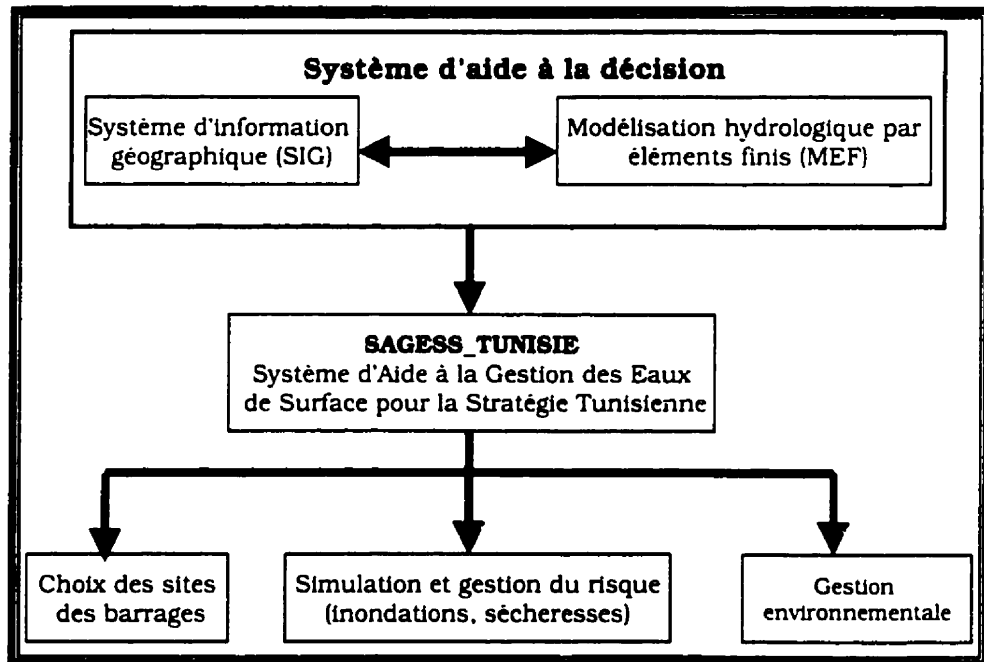


Figure 5.6 Principe du prototype proposé

### 5.5.3 Présentation du nouveau paradigme

#### 5.5.3.1 Énoncé du nouveau paradigme

La présente recherche propose une nouvelle méthode pour la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant. En effet, l'utilisation isolée de chacune des techniques pour la modélisation hydrologique se heurte rapidement à des difficultés incontournables, compte tenu de la complexité du processus hydrologique à l'échelle du bassin versant.

Le nouveau paradigme proposé par cette recherche vise à pallier à ces difficultés, par la conjonction de plusieurs composantes :

- *Introduire* la méthode des éléments finis dans le processus décisionnel pour la gestion des ressources en eaux du bassin versant.
- *Coupler* les systèmes d'information géographiques et de la méthode des éléments finis. L'utilisation des SIG servira comme outil de **génération automatique** de la **géométrie** du bassin versant et **l'extraction des attributs descriptifs** au niveau nodal.

### 5.5.4 Introduction de la continuité numérique

Il ressort de l'analyse des modèles hydrologiques traditionnels que la reproduction réelle du territoire (la forme, la topographie, les attributs descriptifs) joue un rôle important pour réaliser des simulations hydrologiques fiables. Par ailleurs, la technique des éléments finis très populaire pour la simulation numérique présente une limitation majeure: la saisie et la génération automatique du maillage (Dhatt et Touzot 1981). Le prototype développé dans cette recherche utilise **trois** types de **données numériques**. En effet, le relief est représenté à l'aide d'un modèle numérique de terrain, les attributs descriptifs sont transformés en valeur numérique et la simulation hydrologique s'effectue, à l'aide d'un modèle numérique aux éléments finis.

#### 5.5.4.1 Défi de la génération automatique du maillage par éléments finis

La méthode des éléments finis s'est désormais imposée comme étant une des méthodes numériques les plus puissantes conçue à ce jour. Parmi ses caractéristiques de base qui ont conduit à sa popularité actuelle, c'est la facilité de modélisation des géométries de forme complexe, le traitement naturel des conditions aux limites de type différentiel, ainsi que la

possibilité d'être programmée sous la forme de logiciels adaptables au traitement d'une vaste gamme de problèmes (Donéa 1992).

Très souvent, la résolution d'un problème de mécanique des fluides suppose un processus itératif dans lequel on compare le résultat du calcul obtenu sur plusieurs maillages de résolution différente. Dans ce type d'approche, il y a une génération d'un nouveau maillage à chaque pas de temps, dans ces conditions il faut faire le transfert des valeurs calculées par le modèle au pas de temps précédent sur l'«ancien maillage» vers les valeurs calculées sur le «nouveau maillage». Par ailleurs Gold (1994) mentionne que la l'évolution des SIG doit impérativement passer par le décloisonnement des SIG et la géométrie algorithmique, dans ce sens il indique :

*• I strongly believe that future of GIS lies in a closer collaboration between Computer Science especially Computational Geometry and the Applied sciences •*

Avec l'avènement des méthodes numériques (différence finis, volumes finis, éléments finis), le nombre de paramètres physiques à inclure dans un modèle, ainsi que leur variation spatio-temporelle ne constituent plus une entrave pour réaliser des simulations efficaces et représentatives de la réalité sur le territoire (Baker et Soliman 1978).

De ce fait, il apparaît que l'intégration des modèles numériques et des SIG pourrait être bénéfique aussi bien pour les SIG que pour les modèles de simulation. En effet, le potentiel de modélisation numérique permet de simuler différents scénarios permettant aux SIG d'atteindre leur objectif ultime d'être considérés comme des véritables outils d'aide à la décision. La figure 5.7 présente la démarche d'intégration de la modélisation par éléments finis du ruissellement des eaux de surface utilisant les données numériques de provenance du système d'information géographique, ainsi que les différentes phases de ce travail de recherche. Cette nouvelle démarche constitue le cœur du paradigme qui s'inspire de la synergie numérique offerte conjointement par le couple SIG-MEF.

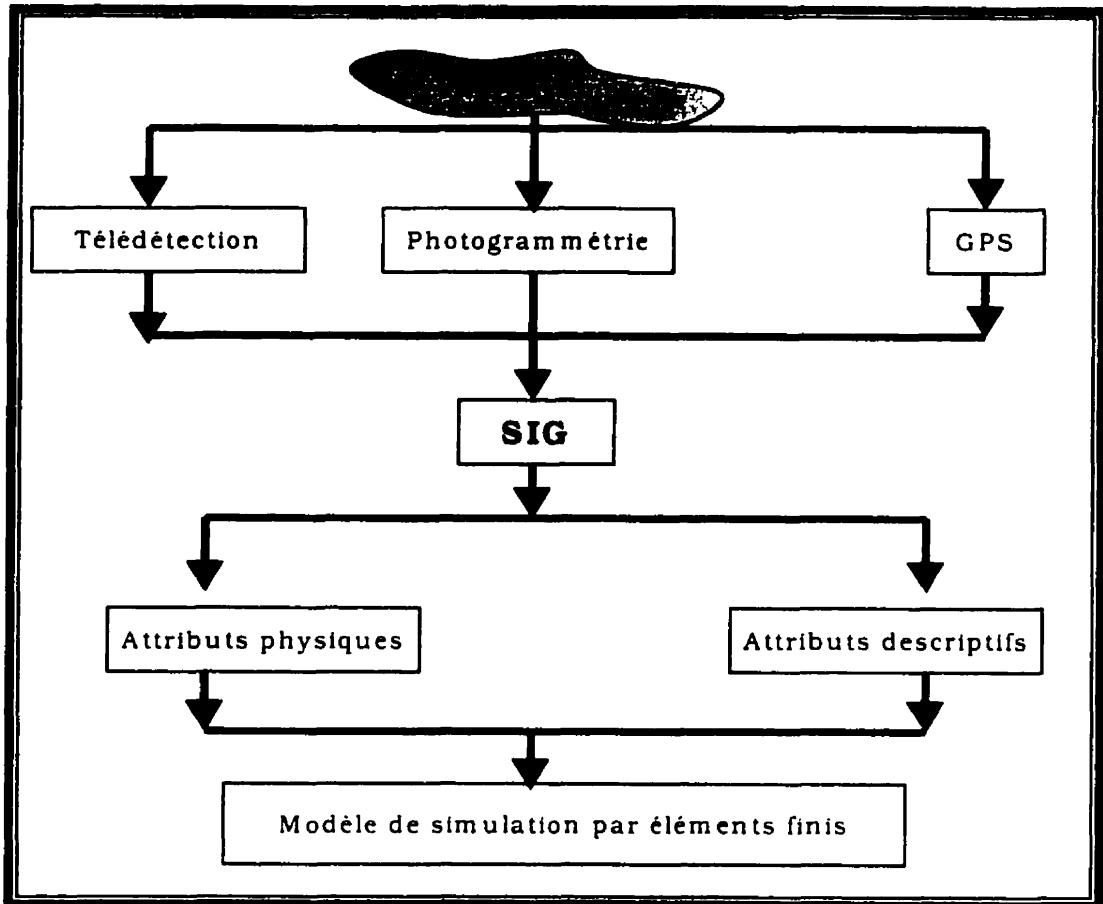


Figure 5.7 Modélisation hydrologique à l'aide du nouveau «paradigme»  
(Bel Hadj Kacem et al. 1998-a)

#### 5.5.4.2 Représentation du relief à l'aide du MNT

Les technologies géomatiques (télédétection, photogrammétrie, GPS) offrent la possibilité de saisir automatiquement les données relief et des ses caractéristiques (figure 5.7). Les SIG permettent des gérer ces données et d'extraire automatiquement le relief sous forme vectorielle du type TIN nécessaire pour réaliser les simulations hydrologiques. La structure des données offertes par le SIG<sup>27</sup> utilisé s'est avérée non compatible avec les exigences de l'environnement des éléments finis. Ce problème a été solutionné par le développement et l'implémentation d'un algorithme «TIN-MEF» (présenté en annexe 1) permettant la structuration des données du SIG nécessaire pour alimenter le modèle de simulation.

<sup>27</sup> Dans le cadre de cette recherche le logiciel Arc/Info 7.03 fonctionnel sur station de travail Unix a été utilisé pour la gestion et la génération des données physiques et descriptives.

### 5.5.4.3 Notion de matrice de transfert des attributs

Le choix de l'utilisation d'un modèle numérique de terrain sous forme vectorielle du type TIN permet de répondre aux exigences suivantes qui résolu par le couplage SIG-MEF. La modèle de numérique de terrain du type « TIN » constitue la seule alternative pour réussir le couplage SIG-MEF. En effet, le triangle, entité géométrique de base permet de jouer un triple rôle :

- **La représentation** du relief à l'aide du module « TIN » au niveau du SIG,
- **L'extraction** des attributs descriptifs au niveau nodal,
- **La discrétisation** des équations aux dérivées partielles.

Les attributs descriptifs énumérés sur la figure (5.8) ont été obtenus par la technique de superposition connue sous le nom « overlay ». Il n'existe pas actuellement des algorithmes permettant la transformation automatique des attributs descriptifs en des paramètres numérique. Cette étape a été résolue d'une manière intuitive part et grâce à notre connaissance au territoire. Par ailleurs le développement des algorithmes performant pour la transformation automatique des attributs descriptifs (ou attributs qualitatifs) en des attributs numériques (ou attributs quantitatifs), constitue un enjeu considérable et un défi majeur pour les technologies géomatiques dans le futur, permettant de satisfaire les besoins de la simulation par éléments finis.

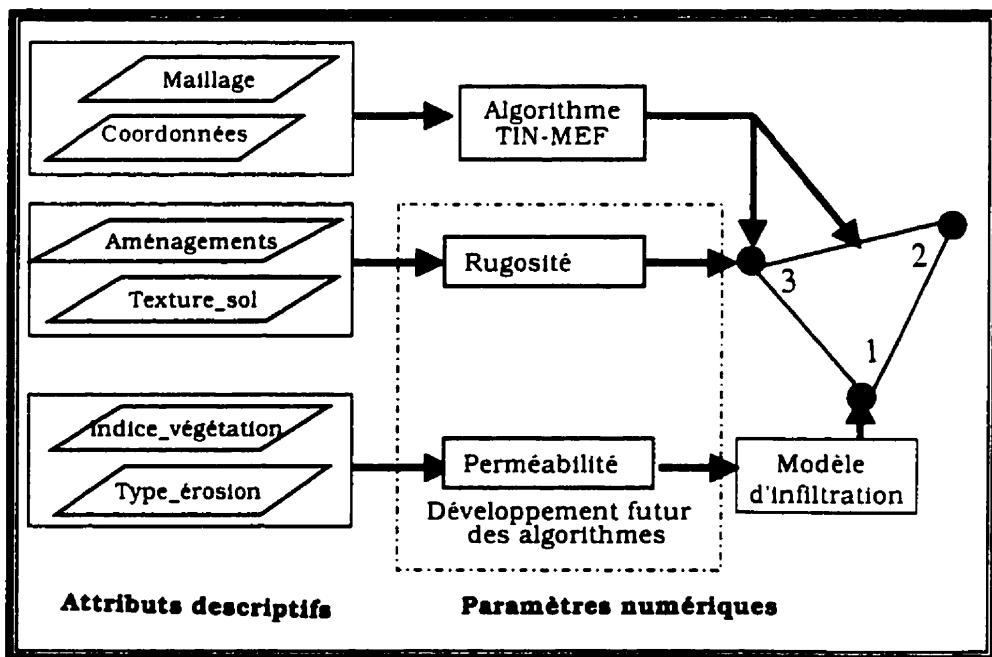


Figure 5.8 Notion de matrice de transfert : attributs descriptifs en valeur numérique

#### 5.5.4.4 Intégration d'un modèle d'un modèle d'infiltration «locale»

La représentation et la gestion du territoire à l'aide d'une base de données géoréférencées vont contribuer à élargir les potentialités de modélisation numérique pour mieux représenter les processus physiques à modéliser, qui présentent une variation spatio-temporelle. En effet, tous les modèles hydrologiques disponibles n'ont pas la possibilité de représenter d'une manière précise le phénomène d'infiltration ; la coutume fait que ces modèles utilisent un coefficient d'infiltration constant pour tout le territoire. Une telle approche ne répond pas aux besoins de « différenciation spatiale » nécessaire à la prise de décision sur le territoire.

Dans le cadre de cette recherche, une loi d'infiltration dite « locale<sup>28</sup> » a été introduite. En effet, le modèle d'infiltration a été intégré du niveau nodal (figure 5.9) du triangle, ainsi la loi d'infiltration utilise les coefficients de perméabilité propre à chaque élément. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles d'infiltration. Toutefois le modèle d'Horton (figure 5.9) a été retenu car il est le plus utilisé en hydrologie de surface. Il est représenté l'équation suivante :

$$f(t) = (f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}) \quad (5.1)$$

les paramètres du modèle sont :

$f_0$  : la capacité d'infiltration maximale,

$f_c$  : la valeur de l'infiltration minimale,

$k$  : une constante positive,

$t$  : la durée de l'averse.

---

<sup>28</sup> Loi d'infiltration locale : le modèle d'infiltration est intégré au niveau du niveau nodale (voir figure 5.9)

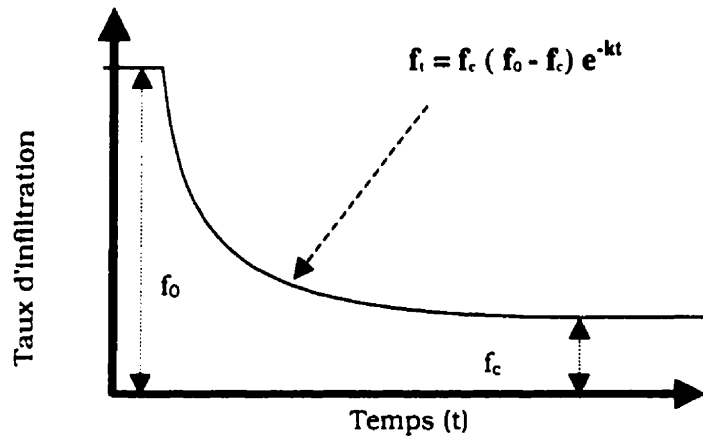


Figure 5.9 Modèle d'infiltration de Horton (1967)

## 5.6 Conclusion et analyse du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté le nouveau paradigme résultant du couplage SIG-MEF, juger pertinent et innovateur pour éclairer le décideur dans sa tâche au niveau de la planification stratégique, étape cruciale pour la gestion ultérieure et durable des ressources en eau à l'échelle du bassin versant particulièrement dans les pays arides et semi-arides. Dans ce cadre, nous avons voulu :

- **Rappeler** brièvement les limites des modèles hydrologiques traditionnels,
- **Énoncer** le nouveau paradigme résultant du couplage SIG-MEF, jugé nécessaire d'une part pour solutionner les difficultés de l'utilisation séparées des SIG (pas de gestion de l'évolution temporelle), et des éléments finis (saisie de la géométrie du domaine), d'autre part permettre une modélisation **hydrologique réaliste** en fonction d'une réalité terrain (acquisition automatique des données à l'aide des technologies géomatique : figure 5.7) dans le but d'**éclairer** et de **soutenir** le décideur dans sa tâche.
- **Présenter** la technique du couplage SIG-MEF, **esquisser** une matrice de transformation des attributs descriptifs en paramètres numériques, nécessaires pour les développements futurs des algorithmes de passage de l'état descriptif au niveau de la base de données géographiques à l'état numérique au niveau simulation numérique par éléments finis.

Le prochain chapitre sera consacré à la description et au développement du modèle de simulation hydrologique par éléments finis.



# 6 Développement mathématique et par éléments finis du modèle de simulation hydrologique

## 6.1 Introduction

Les sciences de l'ingénieur (mécaniques des fluides, mécaniques des solides, thermodynamique, etc.) permettent de décrire le comportement d'un système physique, grâce aux équations, aux dérivées partielles (Dhatt et Touzot 1981). La méthode des éléments finis est l'une des méthodes aujourd'hui pour résoudre en pratique ces équations. La méthode des éléments finis est un outil de discrétisation. C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. Elle est maintenant très répandue dans les industries, en particulier en construction **aéronautique**, **aérospatiale** (figure 6.1), **navale** et **nucléaire**.

Ce chapitre est composé deux parties : (1) la première donne une description sommaire de la méthode des éléments finis, (2) la seconde partie sera consacrée au développement physique et mathématique du modèle hydrologique, et sa formulation par la méthode des éléments finis dont les détails seront présentés en annexe (§10.1).

## 6.2 Description de la modélisation par éléments finis

La modélisation par éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.



Figure 6.1 Application de la modélisation par éléments finis en aéronautique  
(<http://www.nasa.geolab.com>)

Elle fait appel aux trois domaines suivants (1) les sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles, (2) les méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques, (3) la programmation et la mise en œuvre informatique pour exécuter efficacement les calculs sur ordinateurs (Dhatt et Touzot, 1981).

L'application des conditions d'équilibre et des lois de comportement de la mécanique permet de construire des équations approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en un ensemble bien choisi de points, appelés les nœuds de la discrétisation. Une simulation réaliste peut exiger des centaines de milliers de nœuds et d'éléments. Les systèmes à résoudre sont donc énormes et demandent l'emploi d'ordinateurs puissants (Robert 1983).

### 6.2.1 Évolution de la méthode des éléments finis

Les idées de base de la méthode des éléments finis sont apparues vers les années 40, (Dhatt et Touzot). Durant les années 50, Turner *et al.* [1956], introduisent le concept **d'élément fini** qui fut appliqué pour la première fois pour la mécanique des structures. Par ailleurs, à partir de 1967, de nombreux livres sont publiés sur la méthode : Zienkiewicz [1967], Norrie [1973] Brebbia [1973], Absi [1978], Aziz [1972].

La méthode des éléments finis est maintenant très répandue dans les industries. Elle se développe de plus en plus dans les applications de la mécanique des fluides : étude de la marée (Robert 1983), des transports de sédiments (Frenette 1996), étude des phénomènes de pollution, interaction fluide - structure. De nombreux programmes généraux de calcul sont disponibles pour l'utiliser à des fins industrielles (par exemple NASTRAN, HYBAQUS, COSMOS), ou pour des fins de recherche académiques REFLEX, MEFL3D (Robert 1983).

### 6.2.2 Légitimation de la simulation par éléments finis

**L'expérimentation est un art difficile**, la mise au point de prototypes est coûteuse. Lorsqu'il s'agit de modèles réduits, le passage à la vraie grandeur réserve parfois des surprises. Lorsque l'application d'une théorie a acquis une maturité suffisante dans un contexte donné, la simulation numérique par éléments finis permet de réduire considérablement les coûts de mise au point d'une application : le fait de pouvoir employer des modèles complexes et réalistes permet ensuite la réalisation de prototypes dont le comportement est plus prévisible. Il existe même des exemples où le calcul a permis de cerner des solutions qui avaient échappé aux études expérimentales (Dhatt et Touzot 1981).

La simulation numérique par éléments finis est devenue au cours des quarante dernières années une des composantes de la méthode scientifique en génie, au même titre que ses deux composantes traditionnelles, la théorie et l'expérience. Traditionnellement, le développement de nouvelles connaissances s'appuie sur des résultats expérimentaux que l'on cherche à expliquer par une théorie, laquelle prédit à son tour des résultats nouveaux que l'expérience confirme ou infirme. De façon analogue, le développement d'une application industrielle requiert une phase d'étude suivie de la réalisation d'un prototype, dont le comportement peut exiger de nouvelles études, engendrant ainsi un procédé itératif conduisant à un produit utilisable.

La **modélisation numérique** par éléments finis intervient de deux façons : d'une part du fait que, s'il est souvent possible de définir le modèle mathématique décrivant une théorie, le

nombre de cas où l'on peut résoudre effectivement les équations du modèle est réduit ; d'autre part, une résolution explicite demande souvent des simplifications outrancières. L'écoulement de l'air autour d'un avion obéit aux équations de Navier-Stokes qui sont connues depuis plus de cent ans, mais les cas où l'on sait les résoudre sont rares et très éloignés de la réalité de l'application envisagée. La simulation numérique permet de contourner ce problème en résolvant, de façon approchée certes, les équations du modèle mathématique dans des conditions inaccessibles par les techniques classiques.

### 6.3 Démarche de modélisation par éléments finis

Compte tenu de la complexité du milieu physique sur lequel nous voulons simuler le comportement hydrologique, il est nécessaire d'utiliser une technique de discrétisation pour obtenir une solution numérique. La méthode des éléments finis (MEF) est une des méthodes qui offre plus de souplesse pour discrétiser un domaine de géométrie complexe. La figure 6.2 illustre les différentes étapes nécessaires à la résolution d'un problème physique par la MEF.

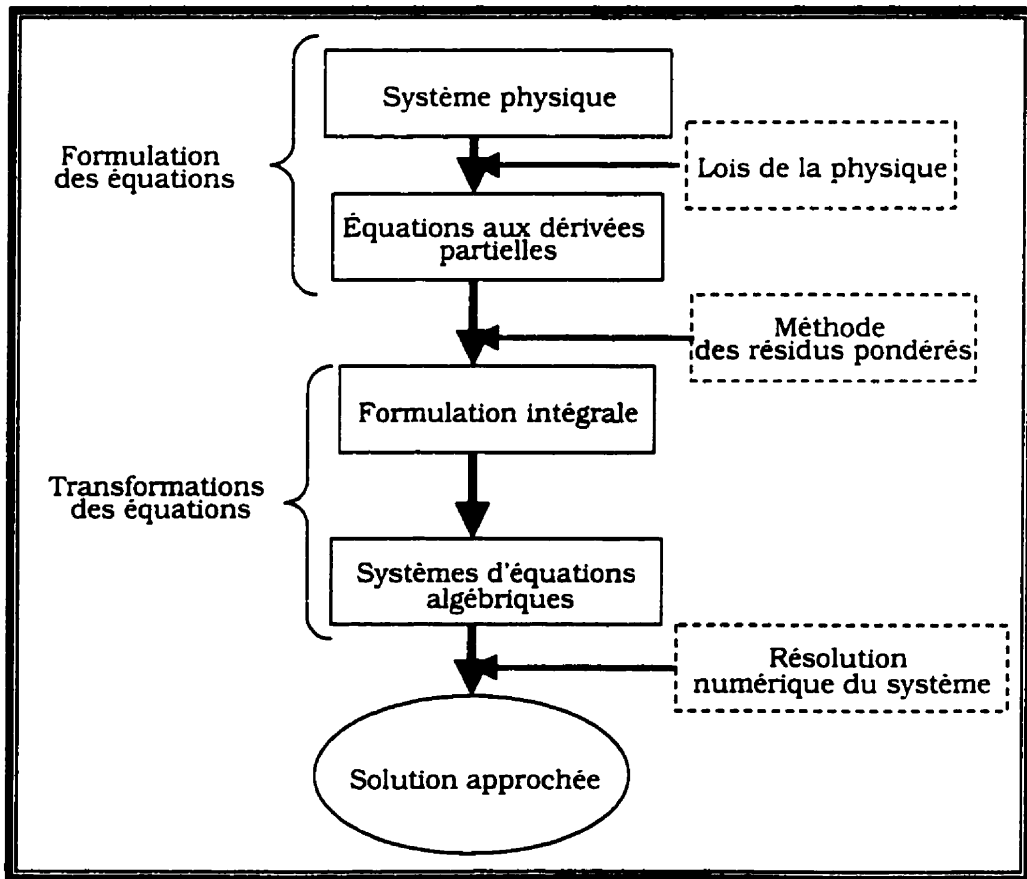


Figure 6.2 Démarche de modélisation par éléments finis (Dhatt et Touzot 1981)

### 6.3.1 Systèmes discrets et systèmes continus

Un système physique quelconque est défini par un ensemble de variables qui peuvent varier dans l'espace ( $x, y, z$ ) et dans le temps ( $t$ ). Si les variables sont indépendantes du temps, le système est dit stationnaire. Le nombre de degrés de liberté du système est égal au nombre de paramètres nécessaires pour définir les variables inconnues telles que les vitesses, les pressions, les températures, etc. Si le nombre de degrés de liberté est fini, le système est dit discret. Au contraire, si le nombre de degrés de liberté est infini, le système est dit continu (Dhatt et Touzot 1981). Généralement, le comportement d'un système discret est représenté par des équations algébriques tandis celui d'un système continu est représenté les équations aux dérivées partielles. La figure 6.3 présente une classification exhaustive des différents systèmes physiques rencontrés et dont la résolution se fait par la méthode des éléments finis.

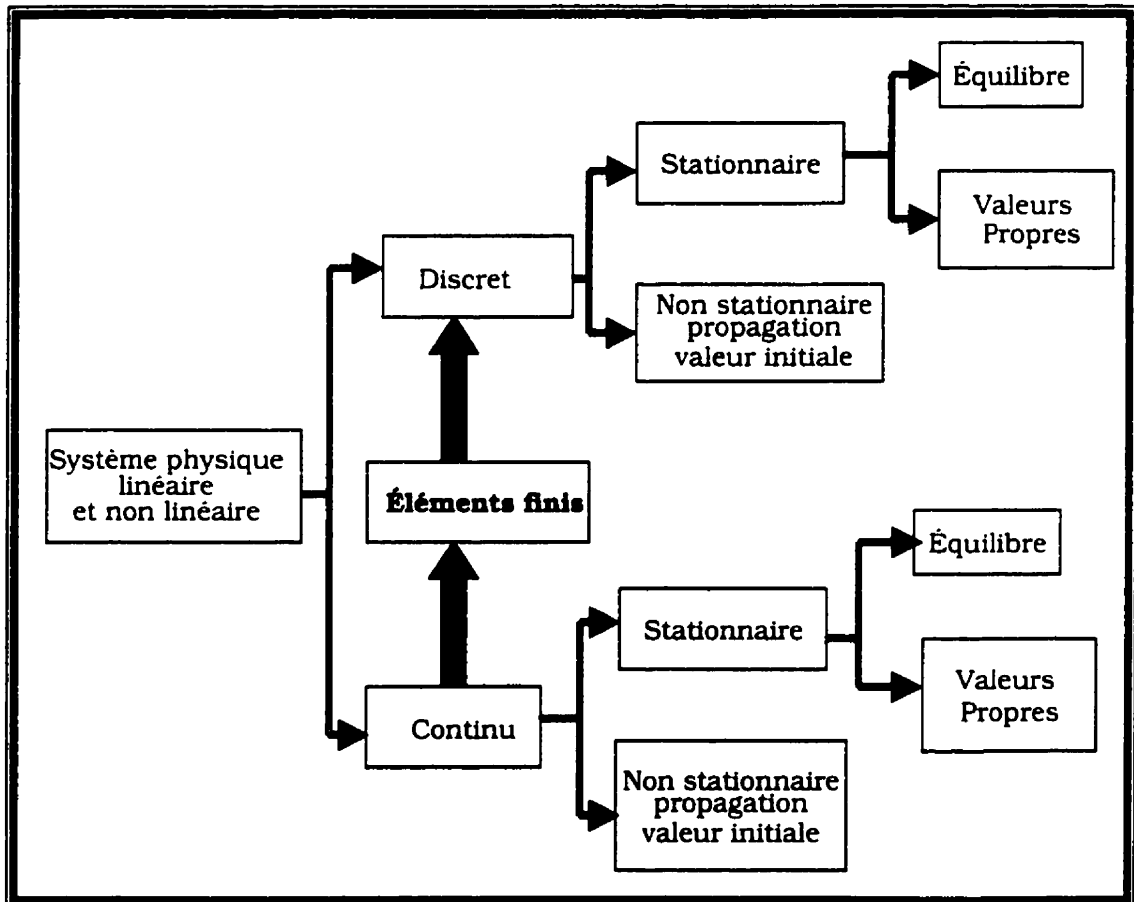


Figure 6.3 : Classification des systèmes physiques (Dhatt & Touzot 1981)

### 6.3.2 Méthode des résidus pondérés

Soit un système continu et stationnaire dont le comportement est représenté par les équations aux dérivées partielles suivantes (équation 6.1) :

$$L(u) + f_v = 0 \text{ sur le domaine } V \quad (6.1)$$

Avec les conditions aux limites exprimées comme suit :  $C(u) = f_s$  sur la frontière  $S$

où :

- $L, C$  : les opérateurs différentiels caractérisant le système.
- $u$  : les fonctions inconnues.
- $f_v$  et  $f_s$  : les fonctions sollicitations (fonctions connues).

Le résidu  $R(u)$  est défini comme suit :

$$R(u) = L(u) + f_v \quad (6.2)$$

La fonction  $R(u)$  s'annule lorsque  $u$  est une solution exacte du système d'équations (6.1). La méthode des résidus pondérés consiste à chercher des fonctions  $u$  qui annulent les formes intégrales suivantes :

$$W(u) = \int_V \langle \psi \rangle \{ R(u) \} dV = \int_V \langle \psi \rangle \{ L(u) + f_v \} dV \quad (6.3)$$

où :

$\psi$  : est une fonction de pondération quelconque appartenant à un ensemble de fonctions  $E_\psi$

Il y a plusieurs choix pour les fonctions de pondération. Les plus populaires sont:

- **La méthode de collocation par points** : cette méthode est, d'après Dhatt et Touzot [1981], peu utilisée, car elle est difficile à mettre en œuvre avec une approximation éléments finis ;
- **La méthode de collocation par sous-domaine** : cette méthode est aussi peu utilisée, car le choix des sous-domaines est très difficile ;
- **La méthode de Galerkin** : cette méthode est la plus utilisée en éléments finis. Elle consiste à choisir la fonction de pondération  $\psi$  dans le même espace que  $u$ .

### 6.3.3 Transformations des formes intégrales

La forme intégrale présentée par la relation 6.3 est appelée forme *intégrale forte* vu qu'elle peut contenir des dérivées de  $u$  d'ordre élevé. Pour réduire cet ordre, on procède généralement à une intégration par partie. Le résultat de cette étape est connu sous le nom de *formulation faible*. Elle permet de réduire les exigences sur l'ordre de dérivabilité de  $u$  et, l'apparition des termes de contour, ce qui facilite l'introduction des conditions aux limites de type flux.

### 6.3.4 Approximation par éléments finis.

Le passage d'un système continue à un système discret équivalent se fait par l'utilisation de techniques d'approximation. Cela nécessite deux étapes : (1) l'introduction de l'approximation nodale, (2) le découpage par éléments finis.

#### 6.3.4.1 Approximation nodale

Pour n'importe quel système physique, le modèle mathématique qui le décrit fait intervenir plusieurs variables ou fonctions dites exactes  $u_{ex}(x)$  telles que la température, la vitesse, la pression, etc. Ces fonctions peuvent être approximées par d'autres fonctions  $u(x)$  de manière que l'erreur : soit aussi petite que le degré de précision souhaité.

$$e(x) = u(x) - u_{ex}(x) \quad (6.4)$$

En imposant que  $e(x)$  est nul aux nœuds, on définit une fonction d'approximation nodale tel que :

$$u(x) = \langle N(x) \rangle \{u_n\} \quad (6.5)$$

où :

$\langle N(x) \rangle$  : vecteur des fonctions d'approximation,

$\{u_n\}$  : vecteur colonne des variables nodales.

#### 6.3.4.2 Approximation par sous-domaines

Lorsque le nombre de nœuds d'interpolation est relativement petit et le domaine a une forme simple, il est très pratique d'utiliser une *approximation nodale* pour approcher la fonction exacte (Dhatt et Touzot 1981, Robert 1993). Par contre, lorsque le nombre de nœuds est

considérable, il devient difficile de construire une fonction approchée  $u(x)$ . La situation se complique davantage lorsque le domaine  $V$  a une forme complexe d'autant plus qu'il y a des conditions aux limites à satisfaire par  $u(x)$  sur la frontière de  $V$ .

Pour ce faire, il s'avère très avantageux d'utiliser la méthode *d'approximation nodale par sous-domaine*. Il s'agit de diviser le domaine global  $V$  en sous-domaines  $V_e$  de formes relativement simples et de définir une fonction approchée  $u(x)$  sur chaque sous-domaine, ce qui simplifie beaucoup la construction de  $u(x)$ . C'est la méthode d'approximation par éléments finis. Toutefois, les fonctions approchées  $u(x)$  doivent être continues sur  $V_e$  en plus de satisfaire les conditions de continuité entre les différents sous-domaines. Chacun des sous-domaines  $V_e$  est appelé élément. Ainsi, la forme intégrale globale  $W(u)$  sera la somme de toutes les formes intégrales élémentaires  $W_e(u)$ .

### 6.3.5 Définition de l'espace de discrétisation en éléments finis

À partir de la formulation intégrale, la méthode des éléments finis consiste à découper le domaine d'intégration en multiple sous domaines : composés de formes géométriques simples et de dimensions finies appelées éléments finis et définis par une ensemble de nœuds et de fonctions d'interpolations géométriques. Ce découpage permet de transformer l'intégration sur tout le domaine en une sommation d'intégrales élémentaires. Parallèlement à cette opération de discrétisation géométrique, on approche la fonction  $u$  à l'aide de valeurs nodales  $u_n$  et de fonctions d'interpolation  $N$  valides sur le domaine en question.

Les fonctions d'interpolation  $N$  et leur dimension étant dépendantes du choix de discrétisation. La fonction de pondération  $\psi$  quant à elle est choisie comme étant du même espace fonctionnel que  $u$ , selon la méthode de Galerkin, c'est à dire qu'elle aussi approchée par des valeurs nodales  $\psi_n$  correspondantes et les mêmes fonctions d'interpolation  $N$ . Il est d'usage de représenter les fonctions  $N$  et de leurs dérivées sur un élément de références défini dans un repère de référence,  $\xi, \eta, \zeta$  afin de calculer l'intégration. Cette technique permet de définir d'une façon systématique tous les éléments d'un même type.

La transformation de la géométrie en éléments et l'approximation des fonctions  $u$  et  $\psi$  à l'aide des valeurs nodales  $u_n$  et  $\psi_n$  correspondantes et leurs fonctions d'interpolation transforme la résolution de la formulation intégrale  $W$  en la résolution d'équations algébriques : ce qui revient à résoudre un système d'équations que l'on représente généralement sous la forme :



$$\{R(u_n)\} = \{F\} - [K]\{u_n\} = 0 \quad (6.6)$$

avec :

$\{R(u_n)\}$ : vecteur résidu,

$[K]$  : matrice de comportement,

$\{u_n\}$  : vecteur solution,

$\{F\}$  : vecteur sollicitation.

pour les problèmes stationnaires, ou encore pour les équations à résolution temporelle :

$$[M]\{\Delta u_n\} = \Delta t \{R(u_n)\} \quad (6.7)$$

avec :

$[M]$  : matrice masse,

$\Delta\{u_n\}$  : vecteur solution incrémentale temporelle,

$\{R(u_n)\}$  : vecteur résidu =  $\{F\} - [K]\{u_{n,t}\}$ .

## 6.4 Formulation du modèle hydrologique

### 6.4.1 Modèle mathématique

Les écoulements à surface libre sont régis par les deux lois fondamentales (Robert 1983) :

- **Conservation de la masse** (équation de continuité): elle traduit la conservation de la masse du fluide. Elle est exprimée mathématiquement en fonction des vitesses (U, V, W), et de la masse spécifique.
- **Conservation de la quantité de mouvement** (équations de Navier-Stokes): Elle est établie à partir de la seconde loi de Newton qui stipule que le produit de la masse par l'accélération est égal à la somme des forces extérieures sur un élément de fluide.

#### Niveau de référence

En coordonnées cartésiennes, le niveau de référence se présente selon la figure 6.4.

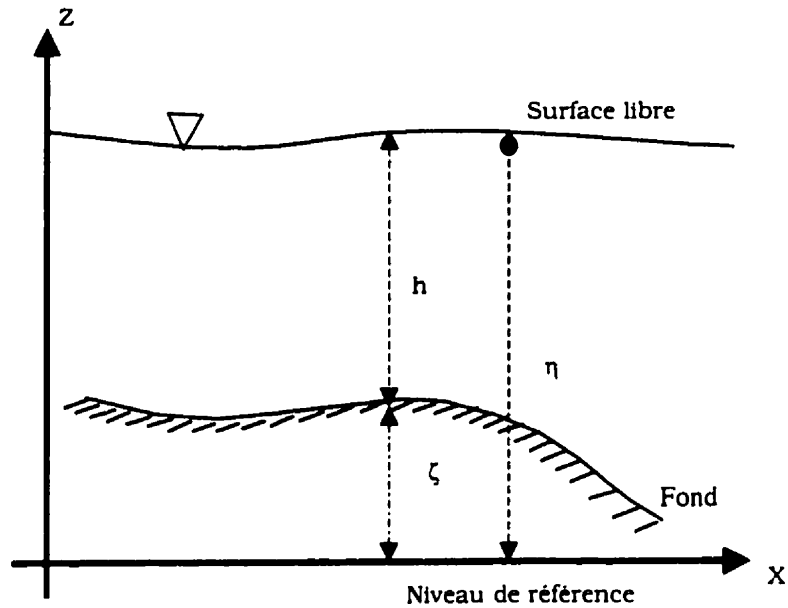


Figure 6.4 Convention du niveau de référence

#### 6.4.2 Modèle d'écoulement 2D

Le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal découle de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique (ou ondes longues). Le modèle de Saint-Venant est également appelé « *modèle pour les eaux peu profondes* » ou « *shallow water equations* ».

**Hypothèses** : Dans le cadre de ruissellement des eaux de surface les inconnues du problème ne varient pas selon l'axe  $z$ .

- La pression est considérée comme hydrostatique selon verticale,
- La variation de la vitesse selon l'axe  $z$  sera nulle,
- La profondeur est faible devant les autres dimensions du domaine.

En tenant compte de la première hypothèse on peut écrire :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (6.8)$$

soit :

$$p(z) = p_a + g \int_z^h \rho g dz \quad (6.9)$$

Dans le cas du ruissellement nous allons considérer comme hypothèse que la densité ( $\rho$ ) est constante :

$$p(z) = p_a + \rho g(h - z) \quad (6.10)$$

Les équations de base du modèle sont (6.11, 6.12, 6.13) :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U \partial U}{\partial x} + \frac{V \partial U}{\partial y} + \frac{W \partial U}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial V}{\partial y} + \frac{W \partial V}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (6.13)$$

Nous savons que les vitesses horizontales  $U$  et  $V$  varient en fonction de la profondeur d'eau. Dans le cadre de la modélisation des écoulements des eaux de surface sur un bassin versant, la hauteur de la lame d'eau ruisselée est très faible par rapport aux dimensions du bassin versant, ce qui nous amène à considérer une vitesse moyenne sur la verticale ; nous pouvons définir les vitesses moyennes de la manière suivante :

$$U = \frac{1}{(h + \xi)} \int_{\xi}^h u dz \quad (6.14)$$

$$V = \frac{1}{(h + \xi)} \int_{\xi}^h v dz \quad (6.15)$$

$$X = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (6.16)$$

$$Y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (6.17)$$

où:

$$\tau_x = \rho \frac{g}{C_c^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6.18)$$

$$\tau_y = \rho \frac{g}{C_c^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6.19)$$

Dans le but de simuler adéquatement le ruissellement sur un bassin versant, d'une manière numérique, il est indispensable de tenir compte de toutes les composantes qui influencent ce phénomène. En effet, le modèle de simulation numérique exige qu'il soit alimenté par une source, dans le cas de l'hydrologie il s'agit de la pluie effective qui déclenche le processus de ruissellement. Dans ces circonstances, l'infiltration et l'évaporation devront être intégrées dans le modèle de simulation.

$i_o = I - E - R$  terme source ou pluie nette,

$I$  infiltration,

$E$  évaporation,

$R$  ruissellement.

Le modèle mathématique en 2D final qui se présente sous la forme suivante

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U\partial U}{\partial x} + \frac{V\partial U}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) = \nu_t \nabla^2 U + \frac{i_o U}{h} \quad (6.20)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U\partial V}{\partial x} + \frac{V\partial V}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) = \nu_t \nabla^2 V + \frac{i_o V}{h} \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U}{\partial x} + \frac{\partial h V}{\partial y} = I - E - R \quad (6.22)$$

#### Définitions des composantes du modèle :

$\frac{\partial U}{\partial t}$  inertie locale,

$\frac{U\partial U}{\partial x} + \frac{V\partial U}{\partial y}$  accélération locale convective,

$\frac{g\partial h}{\partial x}$  force de pression,

$\frac{g\partial \xi}{\partial x}$  force de gravité ou terme de pente,

$\frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{hC^2}$  force de frottement du fond selon la direction x.

$\nu_t \nabla^2 U$	force de dissipation turbulente et visqueuse selon la direction x.
$\nu_t = C_v h \sqrt{U^2 + V^2}$	viscosité turbulente.
$\frac{i_o U}{h}$	terme de dissipation causé par la précipitation selon la direction x
$C_v$	coefficient d'ajustement de la viscosité turbulente.
$C_c$	coefficient de Chézy.
$U, V$	vitesse selon x et y.
$h$	profondeur de la lame d'eau.
$\xi$	élévation du fond.

Le modèle hydrologique développé est conçu pour tenir compte de l'évaporation. Cependant, nous ne disposons pas de données sur ce phénomène pour le territoire pilote ; les résultats fournis par le modèle ne tiennent donc pas compte de ce facteur et le considèrent comme nul.

#### 6.4.3 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle d'écoulement bidimensionnel à surface libre sont du type Dirichlet sur les frontières ouvertes et du type Cauchy-Neuman sur les frontières fermées (Zienckiewicz 1977, Dhatt et Touzot 1981). Les conditions limites à considérer sont les frontières suivantes :

- *Imposer* les composantes U et V de la vitesse d'écoulement, et la hauteur d'eau h.
- *Imposer* des contraintes proportionnelles au gradient des vitesses dans un fluide newtonien tel que l'eau.

Concrètement, l'application des conditions aux limites pour le traitement d'une frontière naturelle (bassin versant dans le cas de cette recherche), ceci pourra se réaliser de plusieurs façons :

- *L'adhérence parfaite* du fluide à la paroi s'obtient en imposant :  $U = V = 0$  à la paroi. Cette condition stipule qu'il n'a pas d'écoulement à la frontière du bassin, ceci cadre parfaitement avec la réalité observée.

- Le glissement parfait, c'est à dire en imposant seulement une vitesse nulle selon la normale à la paroi et en laissant la vitesse tangentielle libre.
- Par une substitution intermédiaire où la vitesse normale est nulle mais une loi de frottement est spécifiée sous forme d'une contrainte tangentielle, en général au carré de l'intensité de la vitesse.

#### 6.4.4 Formulation par éléments finis

La formulation mathématique est transformée en formulation variationnelle faible de type Galerkin (méthode des résidus pondérés) avant de procéder à la discrétisation laquelle assure le passage au modèle numérique. Nous n'élaborerons pas plus en détail cet aspect mathématique très particulier. La discrétisation est une opération permettant de transformer un modèle mathématique dans une version numérique qui peut être traitée par des moyens informatiques. Toutes les variables distribuées dans l'espace ou le temps, soit le niveau d'eau, les composantes de la vitesse, la topographie du terrain, les paramètres de frottement, doivent ainsi être représentées de manière discrète soit porter sur des «nœuds» lesquels, une fois connectés entre eux, forment des «éléments finis».

Dans l'environnement MEFL3D, comme dans la plupart des programmes de calcul hydrodynamique en éléments finis, les éléments décrivant le domaine de calcul dans le plan sont de forme triangulaire ce qui permet d'adapter facilement la densité du maillage à la topographie et aux singularités locales. La discrétisation temporelle des variables transitoires s'effectue par un schéma de type "différences finies" convenant pour la méthode de résolution d'Euler **implicite** qui présente l'avantage d'être inconditionnellement stable.

Le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal découle de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique (ou ondes longues). Le modèle de Saint-Venant est également appelé «modèle des eaux peu profondes», «équations d'ondes longues» et en anglais " *shallow water equations*". Afin de simplifier la définition analytique des éléments de forme complexe, nous utiliserons un élément de référence de forme très simple repéré dans un espace qui peut être transformé en chaque élément réel par une transformation géométrique  $\tau^e$  (Batoz et Dhatt 1990).

#### 6.4.4.1 Intégration par partie «forme faible »

L'intégration par partie fournit des formes intégrales dites faibles qui présentent les avantages suivants :

- L'ordre maximum des dérivées de  $U$  qui apparaissent à la forme intégrale diminue. Les conditions de dérivabilités de  $U$  sont donc moins fortes ;
- Certaines de conditions aux limites qui apparaissent dans la forme faible peuvent être prises en compte dans la formulation intégrale, au lieu d'être satisfaites identiquement par  $U$ .

#### 6.4.4.2 Approximation sur un élément de référence

Il existe plusieurs éléments classiques qui diffèrent du point de vue formes, dimensions et coordonnées des nœuds qui les définissent. Il est alors évident que la construction des fonctions approchées  $u^e(x)$  et des fonctions d'interpolation  $N_i(x)$  pour chaque élément devient de plus en plus compliquée et pénible à la fois avec les éléments de formes complexes. À cet effet, la notion d'éléments de référence a été introduite pour des raisons de simplification. Cela permet de refaire les mêmes calculs pour chaque élément sans avoir la peine de reconstruire à chaque fois les fonctions d'interpolation. La notion d'élément de référence  $V^r$  est illustrée à la figure 6.5 pour le cas d'un triangle.

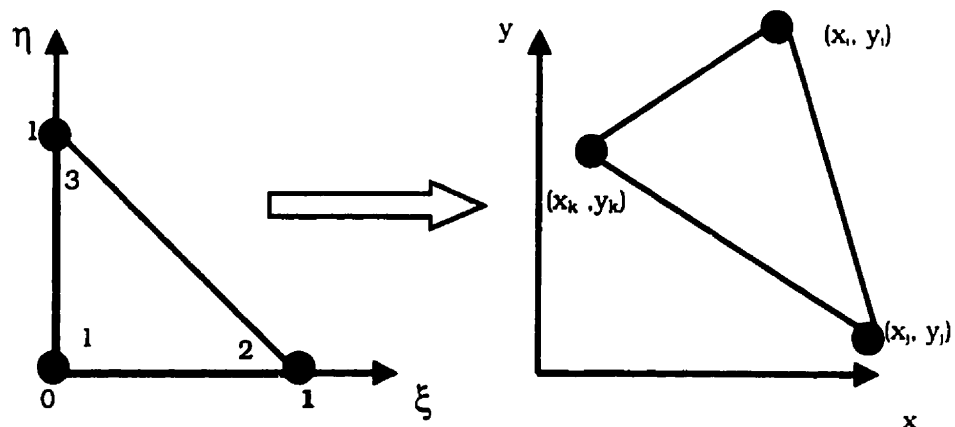


Figure 6.5 Approximation sur un élément de référence

Ainsi, les coordonnées  $x^e$  de chaque point de l'élément réel sont définies à partir des coordonnées  $\xi$  du point correspondant de l'élément de référence par une transformation  $\tau$  :

Chaque élément réel lui correspond alors une transformation propre vu que  $\tau$  dépend des coordonnées des nœuds géométriques des éléments. D'après Dhatt et Touzot [1981], chaque transformation  $\tau$  doit avoir les propriétés fondamentales suivantes :

- Elle doit être bijective, c'est à dire, à chaque point de l'élément de référence  $V^r$  correspond un point de l'élément réel  $V^e$  et un seul, et inversement ;
- Les nœuds géométriques de  $V^r$  correspondent aux nœuds géométriques de  $V^e$  ;
- À chaque frontière de l'élément réel correspond une frontière de l'élément de référence.

#### 6.4.4.3 Résolution par la méthode de Newton-Raphson

La discrétisation des formulations intégrales des problèmes d'écoulement à surface libre conduit à la résolution de systèmes d'équations non linéaires. La méthode de résolution est celle de Newton-Raphson. La forme algébrique du système d'équation pour un problème non linéaire permanent est la suivante :

$$[K(U)]\{U\} = \{F\} \quad (6.23)$$

Le résidu est nul pour une solution exacte du système algébrique, c'est à dire

$$\{R(U)\} = \{F\} - [K(U)]\{U\} = \{0\} \quad (6.24)$$

L'expression de la matrice tangente  $K_t$  s'obtient assemblage des matrices tangentes  $k_t$  élémentaires qui sont obtenues en dérivant la relation (24) par rapport aux variable nodales  $\{U\}$

$$[K_t(U^{i-1})] = - \left[ \frac{\partial R(U)}{\partial U} \right]_{U=U^{i-1}} \quad (6.25)$$

## 6.5 Conclusion et analyse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté le développement mathématique et la description par éléments finis du modèle hydrologique. Dans le prochain chapitre, le modèle développé sera mis à l'épreuve à deux séries de tests : d'une part des tests de validation au sens éléments finis, permettant de s'assurer de la validité des différentes étapes du développement du



modèle présenté à la figure 6.1. d'autre part, les tests devront répondre aux questions posées au niveau du processus décisionnel par exemple quelle sera l'impact de l'implantation d'un réseau de banquettes à rétention sur la réponse du bassin?, et par conséquent l'influence de ces aménagements, sur le champ des vitesses la hauteur d'eau, etc.

## 7 Application et validation du modèle

### 7.1 Introduction

Le modèle développé a été mis en œuvre autour de deux logiciels : d'une part le SIG Arc/Info pour l'extraction et la génération des modèles numériques de terrain et des attributs descriptifs du territoire ; d'autre part le logiciel MEFL3D pour la simulation numérique. Idéalement, pour faciliter l'utilisation pratique, les différentes composantes (extraction des attributs descriptifs, génération des modèles numériques de terrain, structuration et transformation de données, utilisation automatique des algorithmes d'optimisation de maillage) du modèle devraient être accessibles au moyen d'une interface unique. Par contre, le développement et la mise en œuvre informatique d'un modèle complètement intégré représente un travail dont l'ampleur dépasse largement le cadre d'une recherche doctorale.

Dans le cadre de cette recherche, le modèle hydrologique aux éléments finis a été soumis à deux types d'essais :

- **Les essais de validation numérique** (§ 7.3) : Le but de ces essais est de s'assurer que le modèle aux éléments finis reproduit parfaitement la solution analytique obtenue sur des cas simples. Au cours de cette étape, nous avons comparé les résultats obtenus analytiquement et ceux simulés par le modèle.
- **Les essais de validation du prototype** (§ 7.4) : L'objectif de ces essais est de vérifier si le modèle peut répondre aux hypothèses qui ont été formulé dans le processus décisionnel (§ 2.5).

Nous rappelons que le modèle développé dans cette recherche est un modèle de planification. En effet, lorsque le décideur se trouve en haut de la pyramide (§ 2.3) et face à une situation de conservation des eaux et des sols, son souci n'est pas de connaître d'une manière détaillée la valeur exacte de l'apport en eau du bassin, mais plutôt d'avoir une vue d'ensemble de la réponse hydraulique du bassin. À l'opposé dans le cas de la localisation d'une retenue collinaire, le décideur a besoin de deux informations différentes : (1) l'endroit où la lame d'eau est la plus haute, ce qui constitue un site potentiel, (2) la vulnérabilité de

ce site à l'envasement par les sédiments. L'outil développé devra donc fournir des réponses en informations adaptées nœud décisionnel choisi.

## 7.2 Les essais de validation du modèle

Avant de présenter aux § 7.3 et 7.4 les résultats des divers essais effectués, rappelons quelques-uns des principes relatifs à ce type d'essai.

### 7.2.1 Les résultats d'essais numériques

Tous les modèles de simulation numérique par éléments finis donnent deux types de résultats :

- **Les résultats des inconnues du problème.** ils représentent les degrés de liberté. Dans le cas de prototype, les inconnues sont : les vitesses selon x et y (U, V) et la hauteur (h) de la lame d'eau ruisselée. Ces résultats sont obtenus à l'aide des simulations numériques (par la méthode des éléments finis) par le modèle et ils sont appelés des solutions nodales ou valeurs nodales.
- **Les résultats du post-traitement.** ils découlent de l'utilisation des résultats précédents comme données de calcul. À titre d'exemple, le calcul du débit de crue à la sortie du bassin versant nécessite la connaissance de la vitesse et de la section mouillée de sortie à l'exutoire.

### 7.2.2 Essais de validation du modèle

Le modèle de simulation hydrologique développé doit être mis à l'épreuve avec des données synthétiques pour explorer ses diverses attitudes, et tester sa capacité à simuler les différents phénomènes se produisant dans la réalité dans le but de contrôler sa fiabilité. Afin de réussir cette étape, une surface de forme géométrique carrée a été utilisée pour vérifier le principe de **conservation du débit**, principe de **base de l'équation de continuité**. De plus, des tests numériques sur une surface inclinée ont permis de valider l'écoulement (frottement, hauteur d'eau) calculé à l'aide **des équations dynamiques**.

Ces tests permettent :

- De *vérifier* la convergence,
- D'*évaluer* la précision de l'élément (la vitesse, la hauteur d'eau, etc.),
- De *s'assurer* de la validité de la programmation du modèle.

### 7.2.3 Étude de sensibilité du modèle

L'objectif principal de la modélisation numérique par éléments finis, est le passage du langage humain qui essaie d'analyser un phénomène physique, en un langage informatique permettant ainsi la transmission de l'information sur le problème choisi. La simulation par éléments finis rencontre souvent des problèmes de stabilité, liés à l'incompatibilité entre les éléments utilisés et la formulation variationnelle (Dhatt et Touzot 1981). Pour les fluides incompressibles, cette situation est bien connue et la construction d'éléments compatibles fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au GIREF<sup>29</sup>.

L'analyse de sensibilité est un concept propre à l'analyse de modèle. Il permet de quantifier les influences réciproques entre les paramètres d'un modèle. McCuen [1976] donne une définition très large de la sensibilité. La sensibilité est le taux de changement d'une variable par rapport à une autre. Elle prend la forme d'un rapport de deux différences.

L'analyse de sensibilité permet, en premier lieu, de hiérarchiser l'importance des paramètres sur certaines caractéristiques intéressantes de sa réponse. Plusieurs méthodes ont été développées pour analyser les effets de l'incertitude de paramètres sur la modélisation du ruissellement de surface. La technique la plus simple consiste à faire la simulation en modifiant à chaque fois un des paramètres et à observer la variation du résultat obtenu (Rovey *et al.* 1977).

Dans le cadre de cette recherche nous avons soumis le modèle à deux types d'essai de sensibilité à savoir : (1) *au frottement* qui constitue une composante épineuse pour les chercheurs quant au choix de la valeur représentative à utiliser dans les calculs, (2) *aux termes d'inertie* qui offrent une possibilité de simplification du modèle.

#### 7.2.3.1 Sensibilité du modèle au frottement

1. Le modèle de frottement est un amalgame de différentes influences de même type comprenant la résistance de la surface du sol (rugosité, végétation, aménagement de CES<sup>30</sup>, etc.). Le coefficient de frottement est un paramètre important faisant l'objet de plusieurs travaux de recherche. Plusieurs expressions empiriques, basées sur des

---

<sup>29</sup> GIREF : groupe interdisciplinaire de recherche en éléments finis : c'est un centre d'excellence de recherche affilié à la faculté des sciences et génie de l'université Laval, il a été créé en 1994. Il constitue le plus important pôle de recherche en éléments finis en Amérique du nord.

<sup>30</sup> CES : conservation des eaux et des sols

expériences en laboratoire ont été proposées. Les deux coefficients de frottement les plus populaires sont ceux de Chézy et de Manning.

- **Modèle de frottement de Chézy** : l'expression mathématique de Chézy, qui donne une évaluation de la vitesse moyenne en fonction de la résistance à l'écoulement, a été obtenu en posant l'hypothèse suivante : le mouvement dans le chenal est causé par la résultante des forces extérieures agissant dans la direction de l'écoulement. L'expression de la vitesse d'écoulement intégrant le modèle de frottement de Chézy est la suivante :

$$V = C\sqrt{R_h S} \quad (7.1)$$

où :

- V : vitesse d'écoulement,
- C : coefficient de frottement de Chézy,
- $R_h^{31}$  : rayon hydraulique,
- S : pente de la ligne d'écoulement.

Le coefficient de frottement C joue un rôle capital car la vitesse lui est directement proportionnelle, tous les autres paramètres étant constants.

- **Modèle de frottement de Manning** : à partir d'observations réalisées en rivières, certains chercheurs ont montré qu'il y existe une relation entre la profondeur d'écoulement et le coefficient de rugosité. Le modèle de Manning est le plus utilisé pour les écoulements à surface libre particulièrement pour les bassins versants et les rivières. La formulation de la vitesse selon Manning est la suivante :

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7.2)$$

---

<sup>31</sup>  $R_h$  : c'est le rapport de la section mouillée traversée par un courant d'eau sur le périmètre mouillé.

En comparant les équations de Chézy (1) et de Manning (2), nous obtenons la relation entre  $C$  et  $n$  :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \quad (7.3)$$

Dans le cadre de cette recherche, les deux coefficients de frottement représentés par (7.3) et (7.4) ont été intégrés au niveau du modèle de la simulation hydrologique aux éléments finis lui offrant ainsi plus de flexibilité.

Pour des raisons pratiques, l'utilisateur n'a pas à se soucier de quel coefficient il s'agit. En effet, tout coefficient inférieur à 1 est considéré comme coefficient de Manning, alors que les valeurs supérieures à 1 représentent un coefficient de Chézy. La loi d'écoulement correspondante est alors automatiquement sélectionnée.

L'utilisation du coefficient de Chézy sur un territoire de forme géométrique simple donne des résultats acceptables (bonne convergence), alors que sur un territoire de géométrie complexe en l'occurrence le bassin versant, son utilisation entraîne une dégradation de la convergence. En vertu des tests réalisés avec différents coefficients de Chézy et de Manning, il apparaît que le coefficient de Manning est plus approprié pour réaliser des simulations hydrologiques sur un bassin versant (tableau 7.1)

Tableau 7.1 Essais de sensibilité du modèle aux frottements

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Résultats observés
Coefficient de Chézy	50	20	10	1	0.132	divergence
Coefficient de Manning	0.1	0.01	0.02	0.025	0.03	convergence

<sup>32</sup> Formule de Chézy provisoirement imposée dans le modèle.

### 7.2.3.2 Sensibilité aux termes d'inertie

Dans les écoulements à faible hauteur d'eau, puisque la masse d'eau est peu importante, l'inertie est faible. Les termes d'inertie sont non linéaires et alourdissent le procédé de calcul. Il serait donc pertinent de vérifier l'influence de ces termes.

Les termes d'inertie figurent dans les équations différentielles (6.10 et 6.11 de la section § 6.3.2) de Saint-Venant sont :

$$\text{Selon la direction X : } \frac{U\partial U}{\partial x} + \frac{V\partial U}{\partial y}$$

$$\text{Selon la direction Y : } \frac{U\partial V}{\partial x} + \frac{V\partial V}{\partial y}$$

Afin d'analyser l'influence des termes d'inertie sur le régime hydrologique simulé par le modèle, nous avons réalisé des tests sans tenir compte de ces composantes. Les résultats obtenus montrent que l'absence des termes d'inertie n'a pas affecté la solution obtenue par le modèle ; ceci peut s'expliquer par le fait que nous sommes en présence d'un régime hydrologique particulier appelé régime du bassin versant où l'épaisseur de la lame d'eau qui ruisselle ne dépasse pas quelques centimètres.

## 7.3 Validation numérique et applications

### 7.3.1 Secteur - pilote et source des données utilisées

La région d'étude, située dans la plaine du Kairouan dans la Tunisie centrale, et couvrant environ 154 000 ha, correspond au bassin versant de l'oued Merguelil (figure 7.1). Le territoire de validation de l'outil en cours de développement fait partie intégrante du bassin versant de Merguelil, où est prévue la construction d'un réseau de barrages collinaires dans le cadre de la stratégie nationale de mobilisation des eaux de surface. Les travaux en cours se basent sur les données recueillies dans le cadre du projet SAGATELE (tableau 7.1) tel que la couverture du sol, la pédologie, les aménagements anti-érosifs existants.

### 7.3.2 Description de la géométrie

Les modèles numériques de terrain qui ont été utilisés sont représentés sur les figures 7.2 à 7.5. Afin de tester l'influence de la représentation du relief sur les résultats de simulation, nous avons utilisé à la fois les méthodes de densification (mailles de 200 m et de 100 m) et

l'adaptation (affinage par modèle triangulé selon les détails du réseau hydrographique). Les figures 7.2 et 7.3 représentent un maillage régulier dont les points ont été saisis par photogrammétrie numérique et d'une manière systématique tous les 200 m et 100 m respectivement. Les figures 7.4 et 7.5 représentent les mêmes maillages réguliers de 200 m et 100 m avec l'adaptation pour les singularités du relief.

Tableau 7.2 Données physiques de base (Pouliot, 1994).

Données de base	Mode de captage	Source	Échelle	Date
Type de sol	Numérisation	Carte pédologique	1/500 000	1973
Modèle numérique de terrain	DVP <sup>33</sup> (restitution numérique)	Photographies aériennes	1/80 000	1998
Zones de pente	Analyse	MNT	Maille 50 m	1985
Couverture végétale	Analyse	Indice de végétation (TM)	Maille 20 m	1987
Degré l'érosion	Numérisation	Carte d'érosion	1/200 000	1978

Tableau 7.3 État récapitulatif des tests de simulation

Tests	Maillage 200 m		Maillage 100 m	
	régulier	adapté avec hydrographie	régulier	adapté avec hydrographie
Avec infiltration	✓	✓		
Sans infiltration	✓	✓	✓	✓
Intensité de pluie variable	✓			
Pluies en séries	✓			
Localisation des aménagements	✓			
Localisations des sites des lacs collinaires	✓	✓	✓	✓
Localisations des sites ouvrages hydrauliques				✓

<sup>33</sup> DVP • Digital Video Plotter •



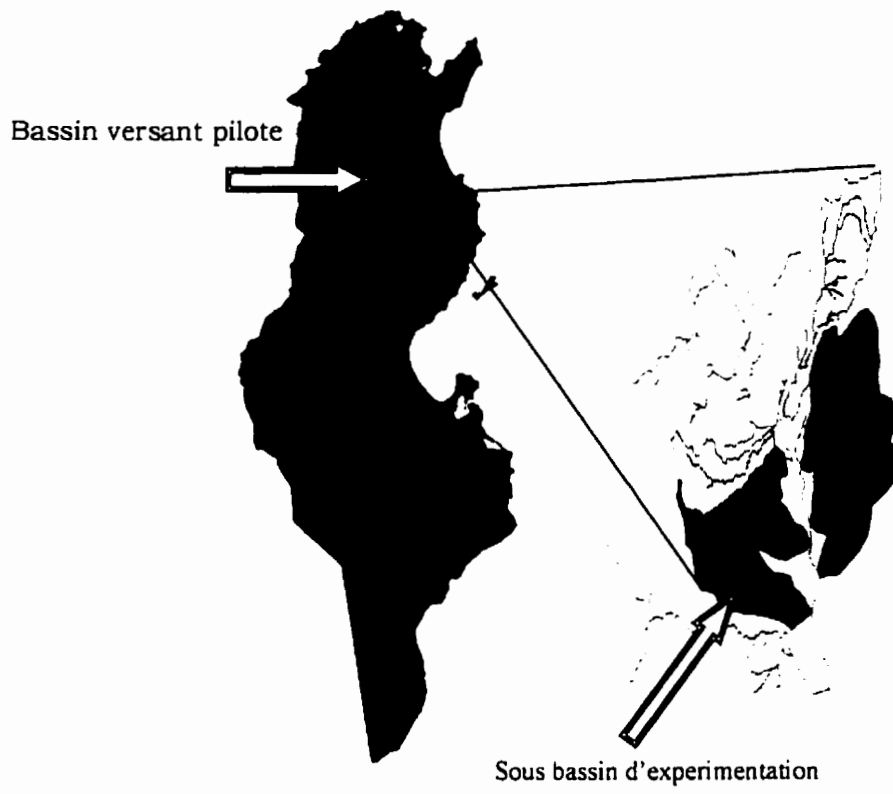


Figure 7.1 Situation du bassin versant pilote

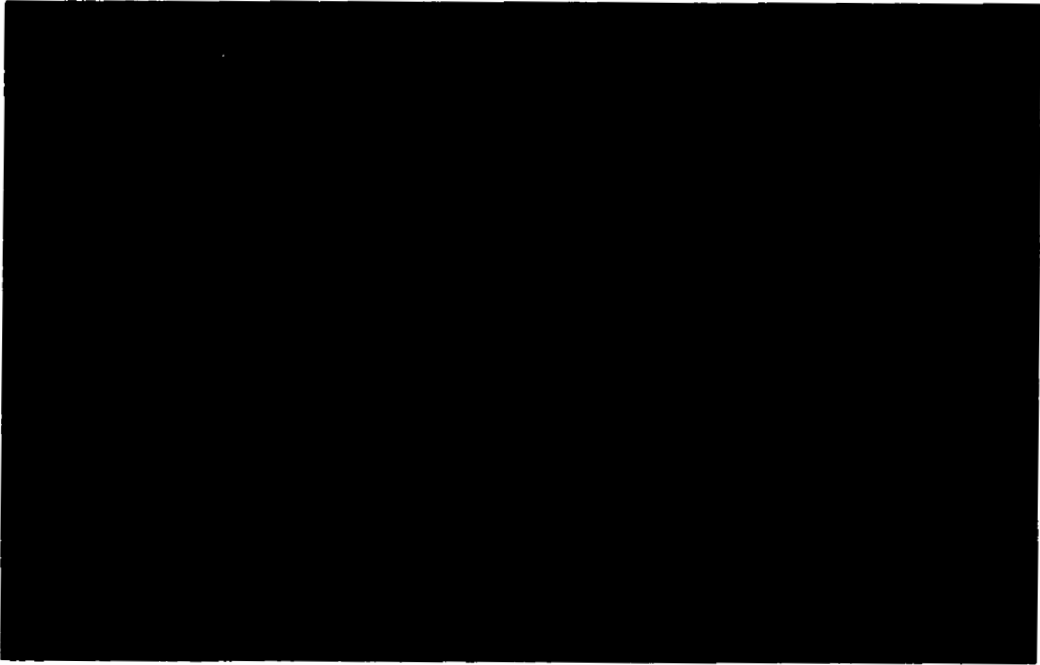


Figure 7.2 Modèle numérique de terrain : maillage régulier (200 m)

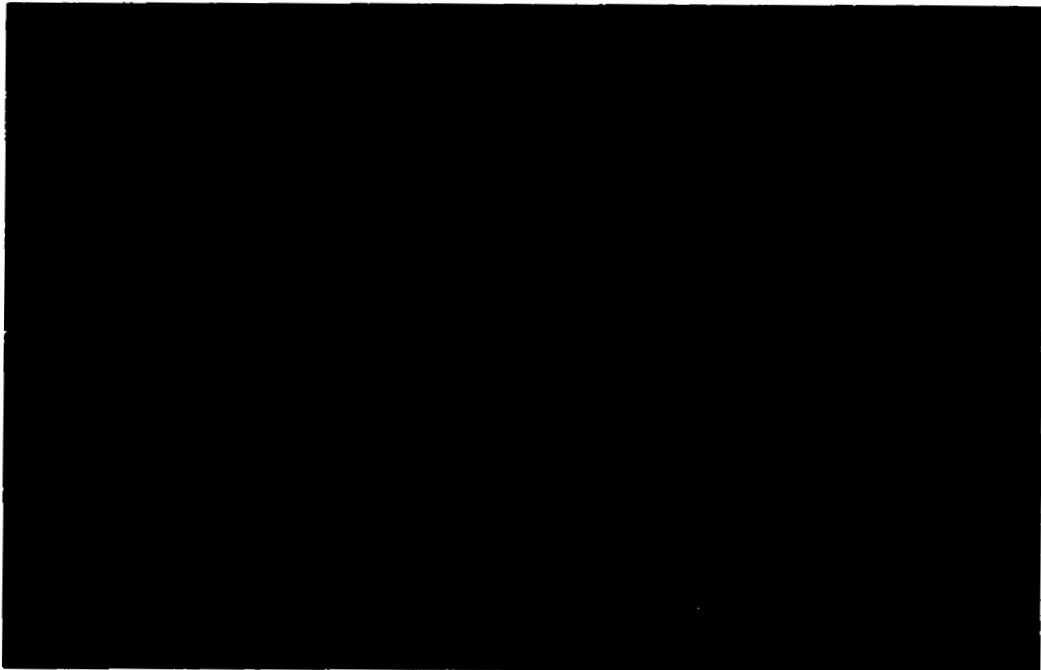


Figure 7.3 Modèle numérique de terrain : maillage régulier (100 m)

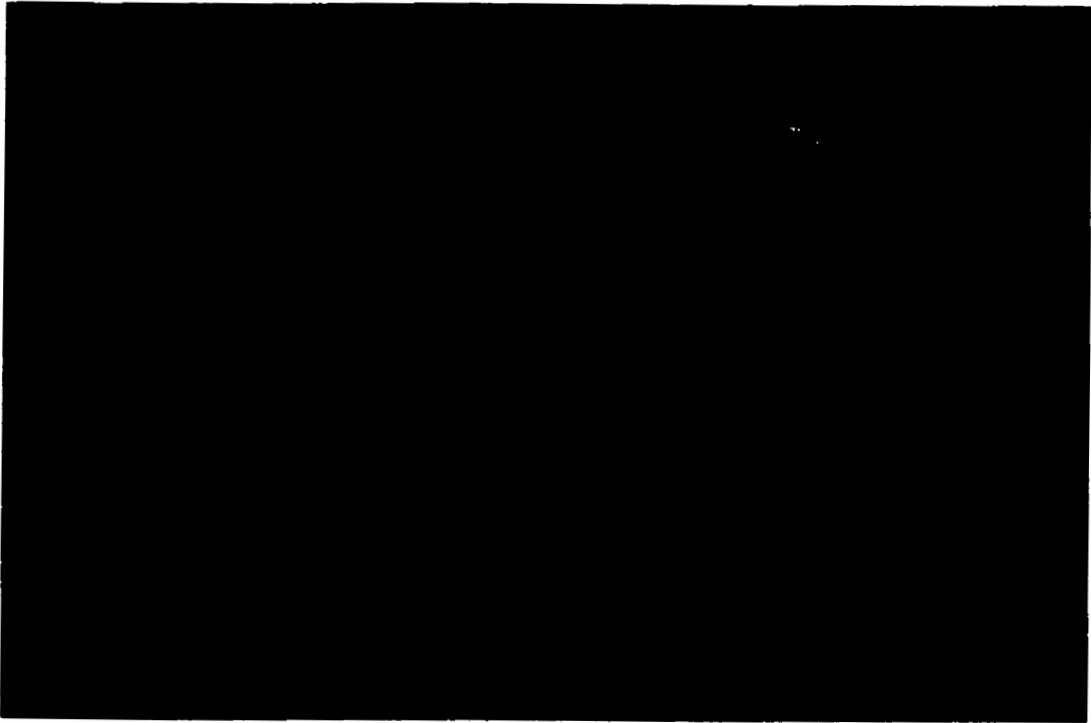


Figure 7.4 Modèle numérique de terrain : maillage adapté (200 m)

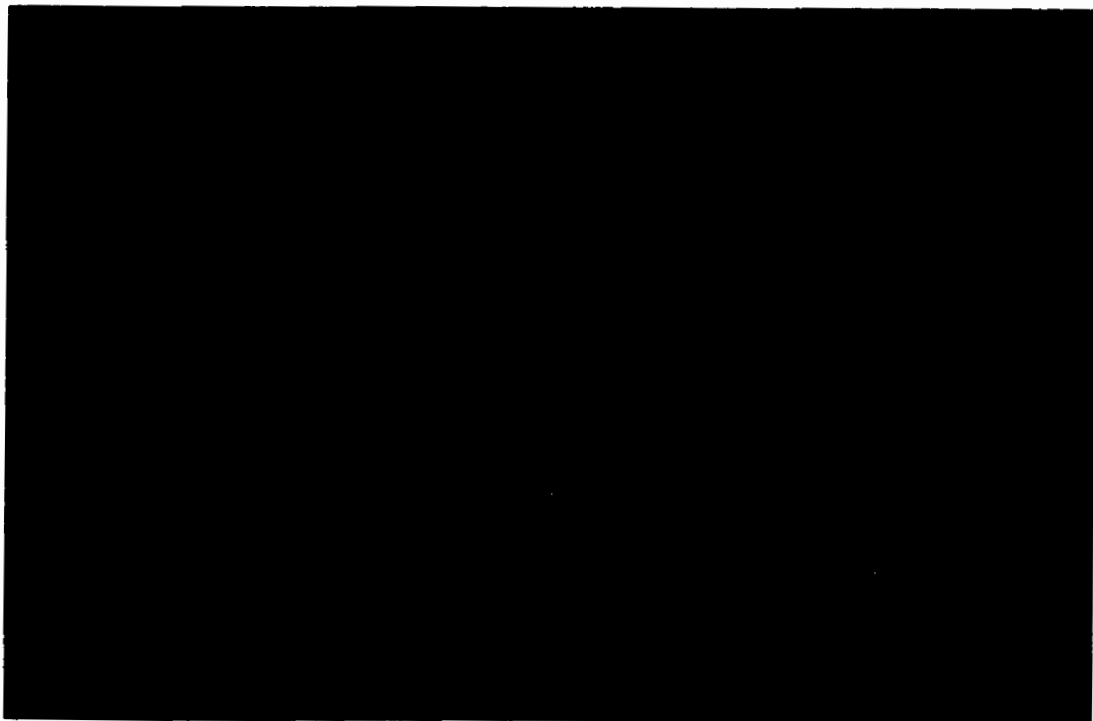


Figure 7.5 Modèle numérique de terrain : adapté (100 m)

### 7.3.3 Hydrogrammes simulés

L'hydrogramme de crue constitue un outil important pour toute étude de conception des infrastructures en milieu rural ou urbain, comme il a été montré dans le chapitre 4. En outre, il permet la prédiction des crues suite à un événement pluvial particulier. Il sert comme un moyen de gestion des ressources eau retenues par un ouvrage hydraulique.

L'hydrogramme est quelque sorte «une réaction complexe» résultant de la sollicitation bassin versant par une pluviométrie (P) d'une certaine intensité (I), ayant une durée (D) et une fréquence d'apparition (F)<sup>34</sup>. Souvent, le choix de l'intensité de la pluie nécessaire pour la conception des ouvrages constitue un **compromis** entre la **sécurité** et le **coût** de l'ouvrage. Traditionnellement, pour réduire le coût des infrastructures hydrauliques, les concepteurs sont contraints de prendre des débits de crue correspondants à des faibles périodes de retour, ceci a pour conséquence de réduire la sécurité apportée à l'ouvrage.

Cette recherche se situe dans le cadre de la stratégie tunisienne de mobilisation des eaux de ruissellement (§ 2.5.2), laquelle prévoit la construction d'un réseau de barrages de petites et moyennes dimensions, dans le but de stocker l'eau de ruissellement pour être utilisée durant les périodes de disette. Compte de tenu des dimensions de stockages très limités, les règles de conception de ce genres d'ouvrage stipulent que la période de retour pour les petits barrages (appelé souvent lacs collinaires) est de 50 ans, et, dans le cas des barrages de dimensions moyennes, la période de retour est de 100 ans (Bel-Hadj Kacem 1991).

Dans le but de mettre à la disposition des divers intervenants dans le domaine des ressources en eau en Tunisie, des outils de simulations robustes permettant de prédire d'une manière intrinsèque le potentiel de ruissellement en surface ; nous avons retenu volontairement les valeurs des paramètres de conception qui cadrent parfaitement avec ceux utilisés dans la pratique courante soit des périodes de retour  $T = 50$  ans, et  $T = 100$  ans.

### 7.3.4 Apport de la spatialisation de l'infiltration

Les hydrogrammes qui sont présentés sur la figure 7.6 ont été simulés avec les données de base suivantes :

- Période de retour :  $T = 100$  ans.

---

<sup>34</sup> En hydrologie analytique ce terme est souvent confondu avec la période de retour, or la fréquence c'est l'inverse de la période ( $F = 1/T$ ).

- Intensité :  $I = 72 \text{ mm/h}$ ,
- Durée :  $D = 40 \text{ min}$ ,
- Coefficient de frottement de Manning  $n = 0.01$ .

Une première des contributions du nouveau prototype développé, c'est l'effet de l'intégration d'une loi d'infiltration<sup>35</sup> au niveau du modèle par éléments finis qui permet la spatialisation de l'infiltration. Dans un premier temps, nous avons testé l'influence globale du modèle d'infiltration.

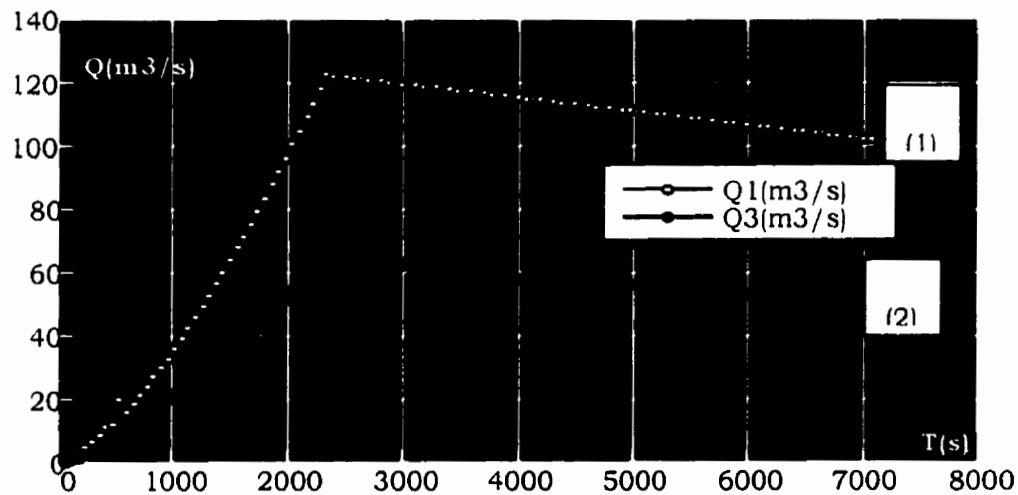


Figure 7.6 Influence de l'infiltration sur le débit de crue

Les deux hydrogrammes représentés sur la figure 7.6 ont été obtenus à l'aide de deux simulations : la courbe 1 est réalisée sans infiltration, alors que la courbe 2 est obtenue en tenant compte de l'infiltration calculée à l'aide du modèle de Horton. Il en sort clairement que l'influence de l'infiltration sur le débit à la sortie du bassin est très marquée. En effet, l'introduction du concept de l'infiltration localisée change radicalement le débit de crue effectif : le débit calculé à l'exutoire est en effet réduit pratiquement de moitié. De ce fait, les facteurs de sécurité des ouvrages découlant de l'utilisation des méthodes hydrologiques traditionnelles pourraient être ajustés à la baisse en réduisant le coût sans toutefois hypothéquer la sécurité. En effet, comme nous avons mentionné au (§ 7.3.2), pour assurer une meilleure sécurité des ouvrages hydrauliques, il est de coutume d'augmenter la période de retour, ce qui se traduit par un débit de crue plus élevé, dans le but d'avoir des ouvrages

<sup>35</sup> La loi d'infiltration de Horton a été retenue pour cette recherche. Dans la littérature, il existe un nombre important de modèles d'infiltration, le cadre de cette recherche est d'explorer le potentiel du couplage des concepts basés sur les SIG-MEF, alors la justification du choix du modèle de Horton par rapport à d'autres n'a pas été traitée volontairement, vu qu'il déborde du cadre de cette recherche.

plus sécuritaires mais dont le coût est excessivement élevé. La prise en compte d'une manière réaliste de la contribution de l'infiltration, nous permet d'avoir des hydrogrammes plus conformes à la réalité. Nous avons des débits à l'exutoire plus faibles.

Ces résultats peuvent être interprétés de plusieurs points de vue : (1) l'apport et l'intégration des données descriptives à référence spatiale a modifié d'une manière drastique la réponse du bassin versant pour une pluviométrie donnée, et par conséquent le débit de crue, (2) la prise en compte d'une valeur fiable du débit des crues dans les calculs de conception d'ingénierie permet la réalisation des ouvrages économiques et sécuritaires.

### **7.3.5 Influence de l'intensité pluviométrique**

Afin de mettre le modèle à l'épreuve, quant à sa capacité de simuler certains événements pluviaux complexes, nous avons réalisé des essais sous des intensités variables. La figure 7.7 représente le résultat d'un essai de simulation sans infiltration en sollicitant le bassin versant dans une première étape avec une intensité  $I = 76$  mm/h ; et dans une seconde étape en doublant l'intensité soit avec  $I = 152$  mm/h. On constate que la forme générale de l'hydrogramme ne change pas, la valeur maximale du débit de pointe est toujours aux alentours de 40 min (soit la durée de l'averse). Cependant, nous constatons que la décrue est plus prononcée dans le cas de l'hydrogramme sollicité par la pluie d'intensité double, que celui obtenu sous une intensité simple. Ceci s'explique par le fait le bassin à une superficie très limitée de 3000 ha environ.

### **7.3.6 Simulation des événements pluviaux en série**

Ce type d'essai plus complexe consiste en un événement pluvial, composé de deux pluies ayant les mêmes caractéristiques (durée, intensité et fréquence), et séparées par un arrêt de 60 minutes entre les deux. Le choix d'une durée d'arrêt de 60 min est arbitraire, du faite que nous disposons pas de données réelles sur le site d'essai. La simulation de l'arrêt de la pluie est effectuée de la manière suivante : on fait fonctionner le modèle avec une pluviométrie nulle, en lui donnant comme données d'entrée les résultats de la première simulation, ce qui correspond parfaitement ce qui peut se produire dans la nature.

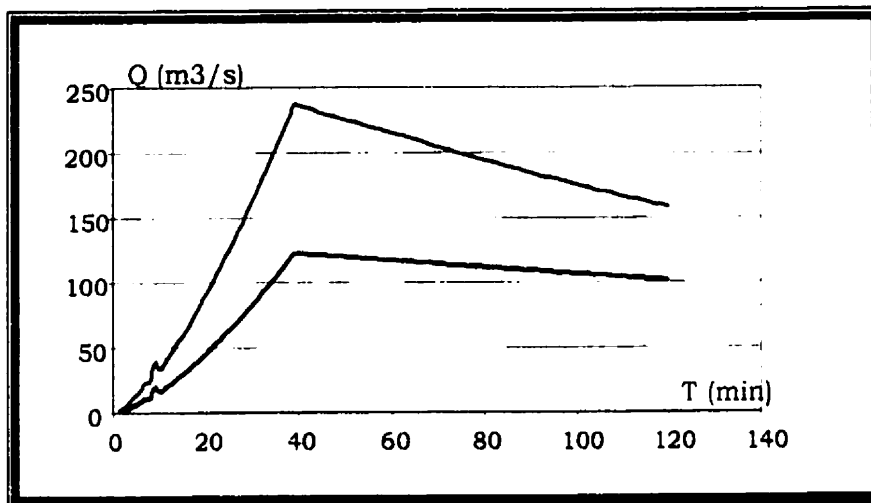


Figure 7.7 Hydrogramme sous diverses intensités (sans infiltration)

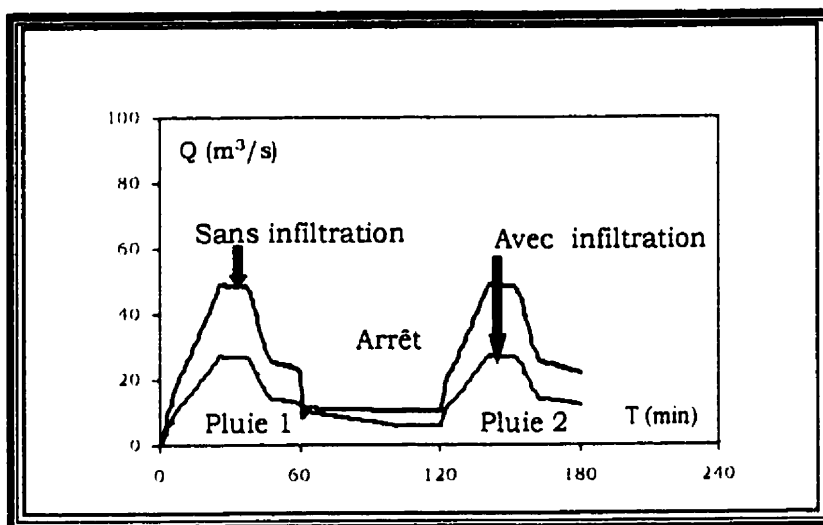


Figure 7.8 Simulations des pluies en série

Le résultat présenté à la figure 7.8 montre une simulation qui a été réalisée dans un premier cas sans infiltration (courbe bleu), la seconde simulation a été effectuée en tenant compte de l'infiltration (courbe rouge) ce qui traduit par une diminution du débit de crue. La forme des deux courbes est la même ; cependant durant l'arrêt de la pluie (la partie du milieu de l'hydrogramme), la première courbe étant le résultat d'une simulation sans infiltration, nous constatons que la diminution du débit est beaucoup moins importante dans le cas d'une simulation sans infiltration. Nous ne disposons pas de mesures de terrain sur le sous-bassin pour caler les résultats simulés. En absence de telles données très précieuses, nous avons utilisé les résultats observés sur le sous-bassin versant limitrophe de l'oued Ettiour<sup>36</sup> qui a des caractéristiques très semblables (superficie, topographie, couverture végétale, etc.).

Nous avons comparé le résultat obtenu à l'aide du modèle de simulation par élément finis développé dans cette recherche avec les mêmes données (intensité 72 mm/h, durée 40 min) pour lesquelles les chercheurs l'ORSTOM (1994) ont obtenu des résultats (débit de pointe 112 m<sup>3</sup>/s) terrain sur un bassin versant de 21,20 km<sup>2</sup> de caractéristiques similaires. Nous constatons que la valeur mesurée sur le bassin versant de référence est légèrement supérieure à la valeur simulée à l'aide du modèle numérique (débit de pointe 120 m<sup>3</sup>/s, figure 7.6), malgré que la différence n'est pas très importante elle peut être attribuée à la topographie du bassin qui est plus accentuée que les caractéristiques physiques du sol.

## **7.4 Les applications du prototype**

Le prototype est basé sur le concept de la continuité numérique depuis l'étape d'acquisition des données jusqu'à la simulation. En effet, les SIG sont utilisés pour la modélisation numérique du relief et l'extraction des attributs descriptifs, ces deux types de données sont indispensables pour les modèles éléments finis.

### **7.4.1 Outils de base pour la simulation environnementale**

Dans tous les problèmes d'écoulements (hydraulique des cours d'eau, hydraulique des estuaires, hydrologie des bassins versants), la répartition spatiale des vitesses d'écoulement

---

<sup>36</sup> Le choix de ce bassin est fondé sur les constats suivants : ce bassin a fait partie du territoire étudié dans la première phase lors du développement du Prototype SAGATELE. Actuellement, le bassin versant de l'oued Ettiour sert comme bassin pilote, il a été observé par un groupe de chercheur de l'ORSTOM dans le but de mesurer le transport solide apporté par ce bassin.



constitue un des paramètres les plus importants pour l'analyse et la conception des infrastructures hydrauliques.

Les figures 7.9 à 7.11 représentent la variation spatio-temporelle du champ des vitesses à des pas de temps successifs. Ces résultats ont été à l'aide du MNT 200 (figure 7.2). Nous constatons que l'évolution du champ des vitesses avec le temps montre clairement la structure du réseau hydrographique, au fur et à mesure que l'eau de ruissellement parvient dans le lit des cours d'eau. Par ailleurs, la simulation numérique des processus environnementaux, tel que le transport solide (érosion hydrique du sol) transport et diffusion de la pollution nécessite comme données d'entrée les résultats de l'hydrodynamique (champ de vitesse et hauteur d'eau). Ce type de résultat constitue l'élément de base pour la modélisation des processus environnementaux permettant l'appréhension et le contrôle de la pollution des bassins versants en milieu agricole, causés par l'utilisation des produits chimiques.

#### **7.4.2 Simulation et suivi des inondations**

L'épaisseur de la lame d'eau écoulee joue un rôle capital dans le choix de la nature des ouvrages et leur conception. En effet, dans le domaine de conservation des eaux et de sols, particulièrement dans les milieux arides et semi-arides où l'eau joue un rôle prépondérant, c'est le cas de la Tunisie.

Les résultats présentés sur les figures 7.12 à 7.14 représentent un extrait de quelques séquences de l'évolution, la hauteur d'eau sur le bassin versant. Ce genre de résultat est très pertinent dans la mesure où il peut être exploité dans les pays humides où la surveillance continue de l'évolution de la hauteur d'eau constitue un souci majeur. Par conséquent, l'évolution spatio-temporelle de la hauteur d'eau pourra être utilisée à des fins de sécurité civile pour le suivi des inondations en période de crue. D'autres types de fonctionnalités permettant l'identification de l'étendue des zones inondables seront présentés plus loin dans ce chapitre (§ 7.5.2).

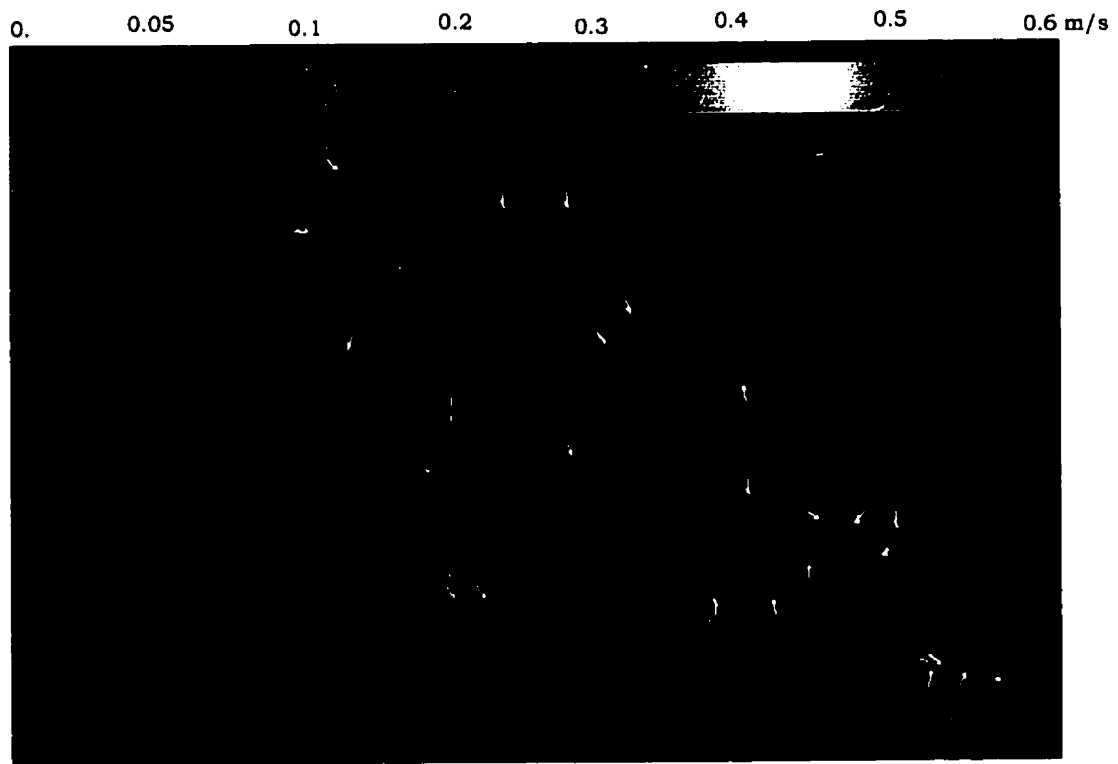


Figure 7.9 Champ des vitesses (t = 60 s)

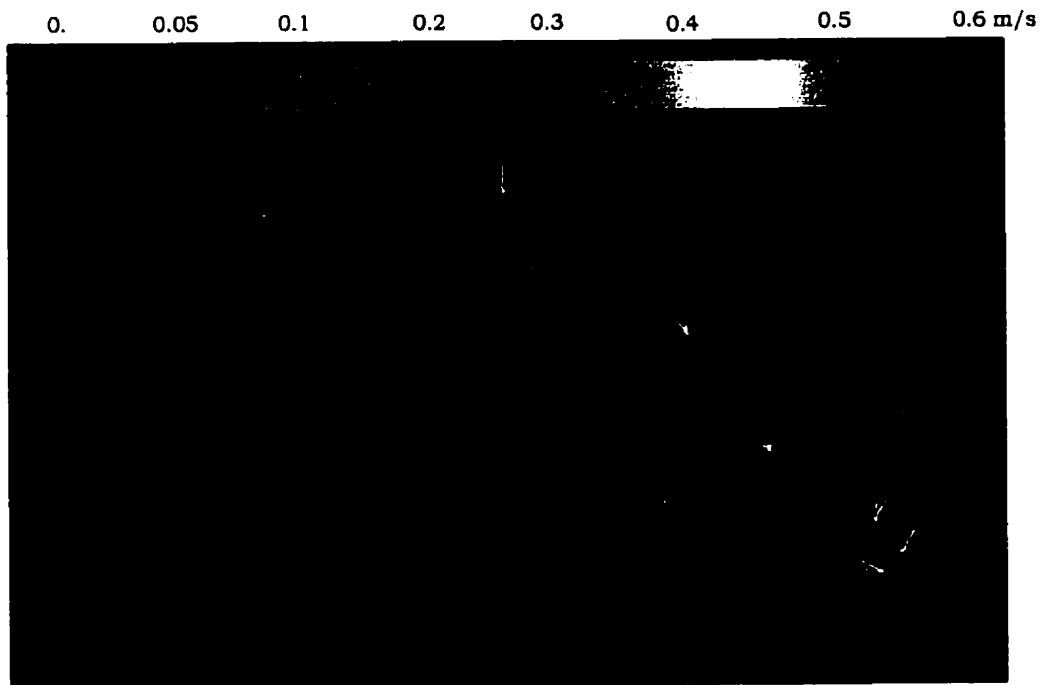


Figure 7.10 Champ des vitesses (t = 1200 s)

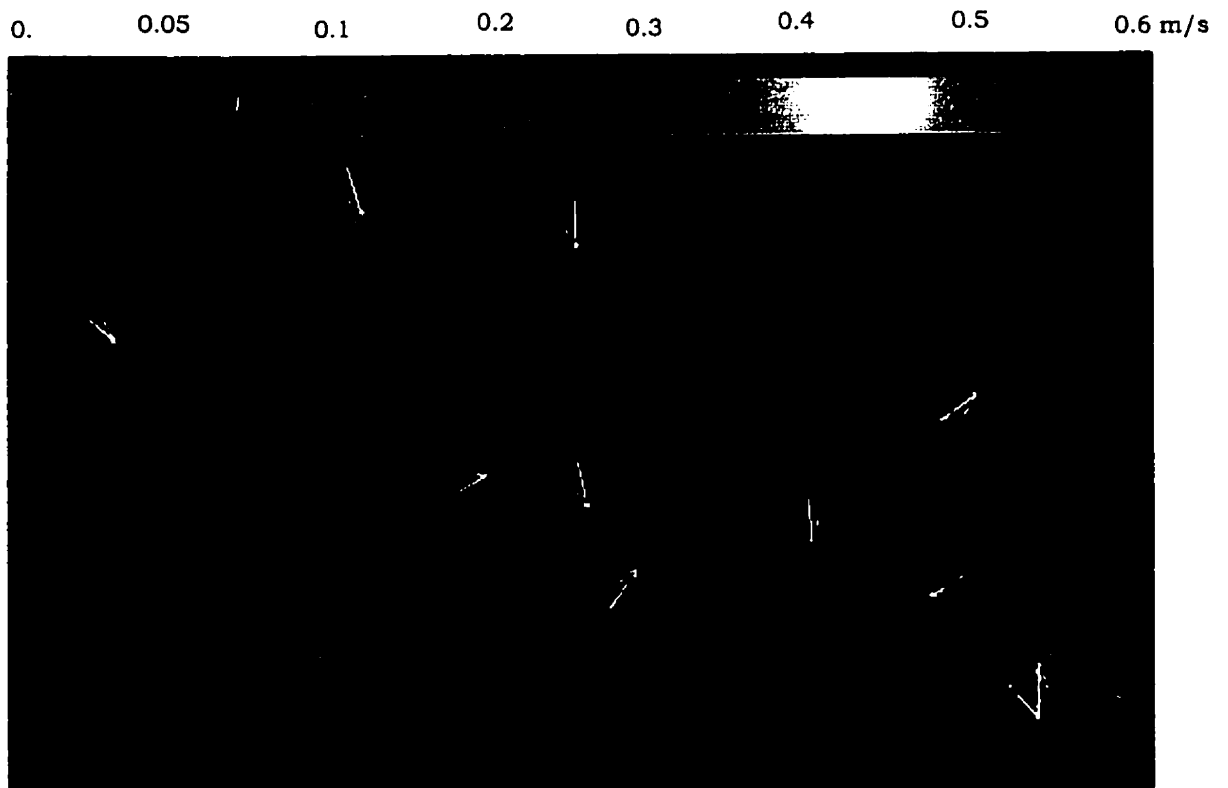


Figure 7.11 Champ des vitesses ( $t = 2400$  s)

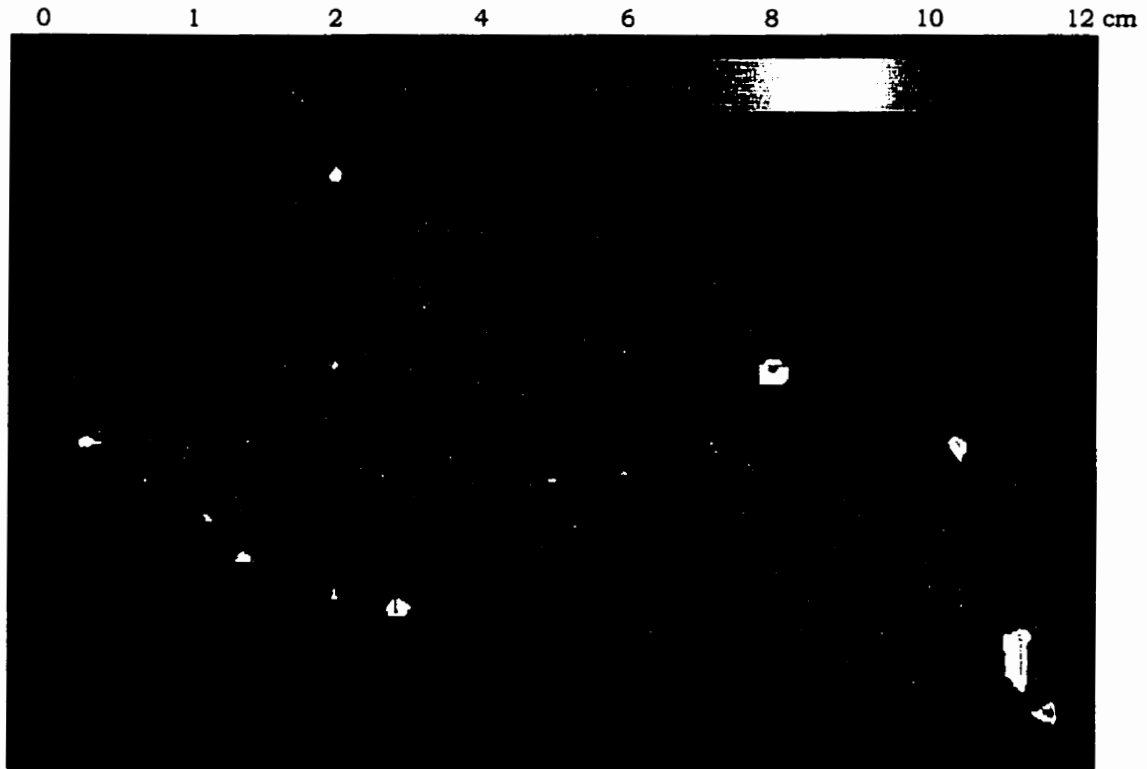


Figure 7.12 Hauteur d'eau sur le bassin ( $t = 60$  s)

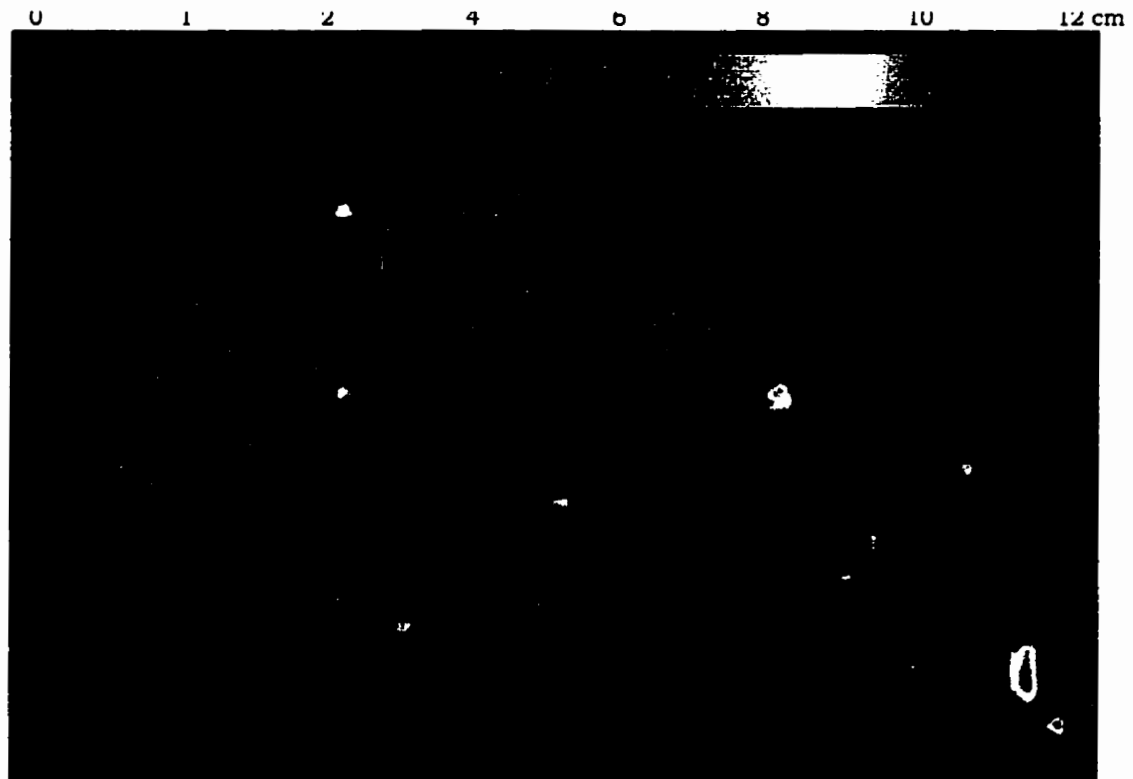


Figure 7.13 Hauteur d'eau sur le bassin ( $t = 1200$  s)

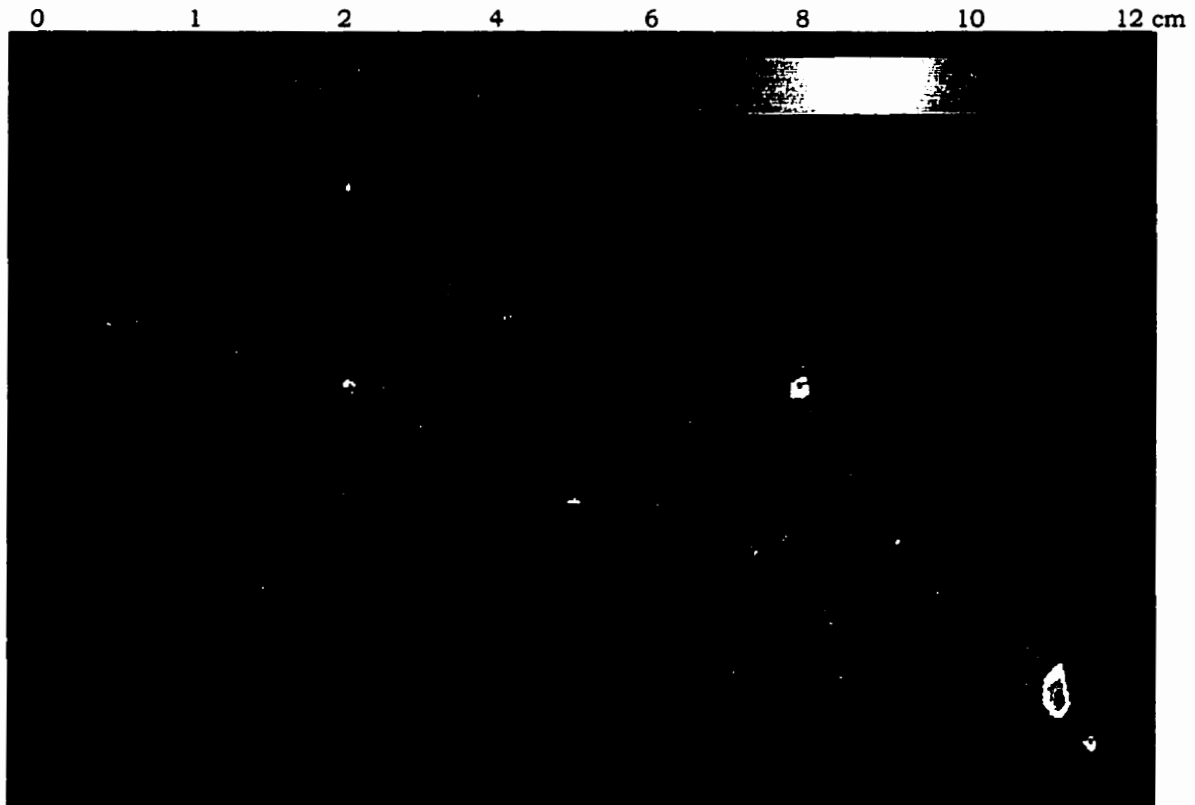


Figure 7.14 Hauteur d'eau sur le bassin ( $t = 2400$  s)

#### 7.4.3 La simulation hydrologique : outils d'aide à la planification

L'analyse de l'impact des travaux de conservation des sols doit passer impérativement par l'introduction de l'effet ces aménagements dans le modèle de simulation qui se traduit par un changement au niveau du frottement, de l'infiltration, etc., tel que nous le présenterons plus loin.

Il est possible de contrôler l'influence de la contribution localisée due à l'ajout (des banquettes de rétention d'eau) ou à la disparition des aménagements (suite à des inondations, feux de forêt, etc.). Les technologies géomatiques (les prises de vue aériennes) offrent des perspectives prometteuses, dans la mesure où il serait possible d'extraire et de délimiter les pourcentages du territoire affecté par ces changements.

Pour étayer cette réflexion, nous avons présenté les mêmes résultats du champ des vitesses discutées précédemment (7.9 à 7.11) sous un autre aspect visuel. En effet, la figure 7.15 représente la composante de la vitesse selon la direction X, la figure 7.16 représente la composante selon Y, la figure 7.17 représente la résultante du champ des vitesses représenté et discuté précédemment.

Les résultats présentés sous une forme thématique offrent, à l'aide d'une analyse **synoptique** et **panoptique** du bassin versant, un apport considérable au décideur pour la planification stratégique (premier niveau de la pyramide de décision § 2.3). Ce résultat, concorde parfaitement avec la définition de Roy et Bouyssou [1993] présentée la section § 2.4.1 et montre que le **décideur** n'a pas à se soucier de **connaître** la valeur **absolue** du potentiel érosif à un endroit donnée du territoire.

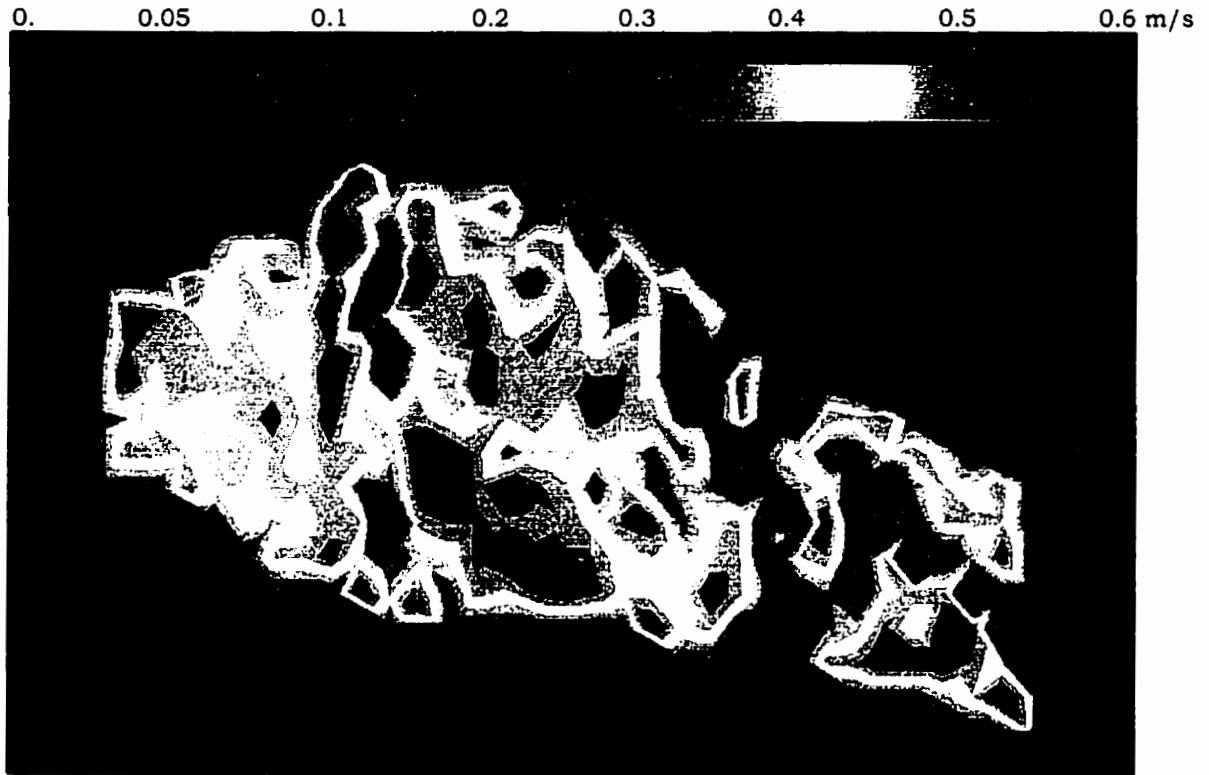


Figure 7.15 Représentation thématique du champ des vitesses selon X

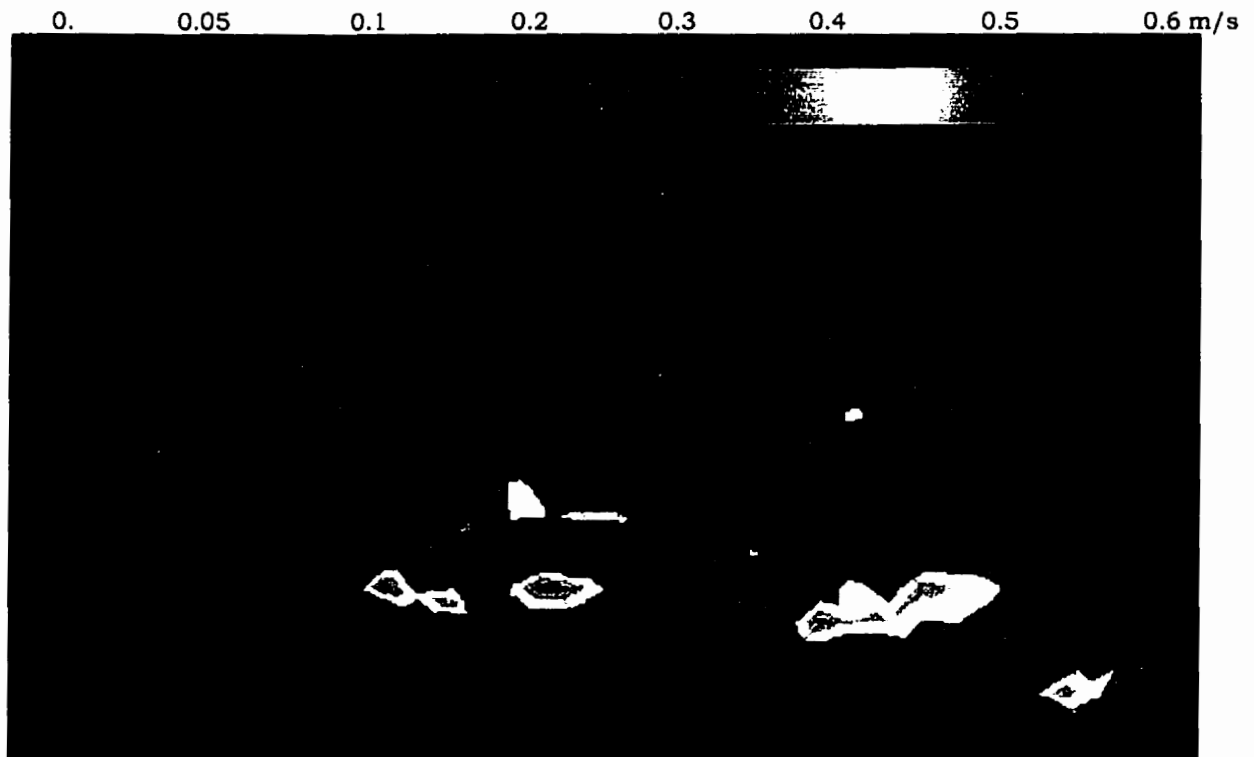


Figure 7.16 Champ des vitesses selon Y

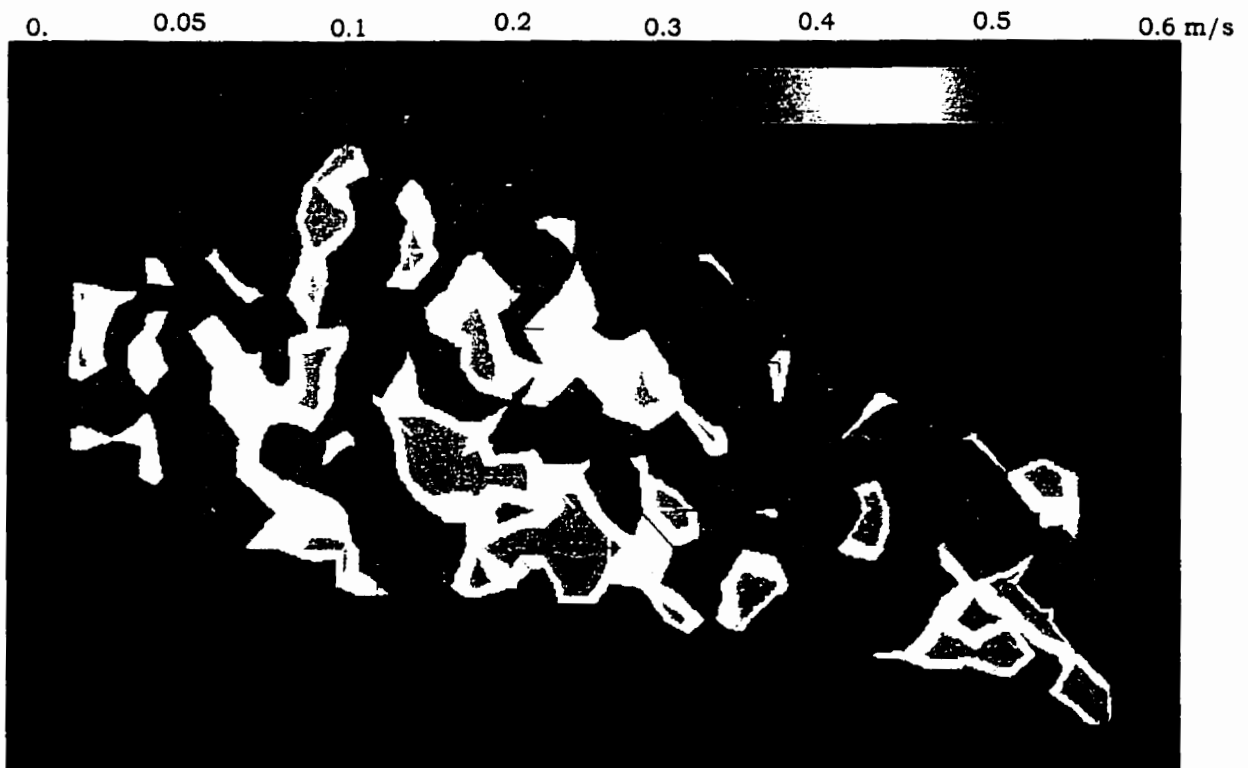


Figure 7.17 Intensité du champ des vitesses

La vitesse d'écoulement constitue le paramètre déclencheur de la dégradation du sol. Il est possible de planifier les aménagements adéquats afin de réduire la vitesse d'écoulement et augmenter l'infiltration dans le sol. Dans la pratique, ceci se traduit par l'implantation des ouvrages de rétention d'eau. Le modèle offre la possibilité de sélectionner les zones nécessitant de genre d'aménagements en fonction la vitesse d'écoulement. Par conséquent l'aménagiste peut planifier des travaux de conservation des eaux et des sols pour freiner l'érosion du sol et permettre la rétention des eaux de ruissellement, et ce en utilisant les aménagements appropriés.

#### **7.4.4 Évaluation de l'impact des aménagements**

Une planification réfléchie pour un aménagement intégré constitue un souci réel. Par exemple, dans un bassin versant, considéré comme un système d'écoulement des eaux de surface vers un exutoire, l'aménagement en amont conditionne celui qui se trouve en aval. Autrement dit, une intervention ne peut-être appréhendée et conçue indépendamment des autres aménagements faisant que la pérennité d'un aménagement anti-érosif soit largement tributaire de l'efficacité des aménagements qui se trouvent à son amont et des conséquences occasionnées à son aval. Ceci met en évidence le concept d'aménagement intégré à l'échelle du bassin versant, traduisant en réalité une problématique complexe.

Par conséquent, le développement des outils et des méthodes d'informations sur le territoire est devenu nécessaire. Ces outils peuvent servir à identifier de manière systématique les zones prioritaires d'intervention dans un bassin versant, à **sélectionner** les types d'aménagement appropriés avec leurs localisations, à **évaluer** un ensemble de scénarios potentiels et, enfin, à **réaliser** un scénario bien déterminé et à **assurer** son suivi.

Afin de contribuer à solutionner partiellement le problème mentionné ci-dessus, nous avons intégré dans le modèle de simulation par éléments finis la possibilité de la prise en compte de l'impact de l'aménagement sur une portion du territoire. Les figures 7.19 à 7.23 représentent l'état du bassin suite à une simulation avant et après l'introduction des aménagements. Ces figures montrent les champs des vitesses selon la direction l'écoulement naturel, représenté sous forme vectorielle (figures 7.19 et 7.20) et, sous forme thématique (figures 7.21 à 7.23).

Les figures 7.20 et 7.23 représentent l'effet simulé des aménagements sur le comportement du bassin suite au même événement pluvial. L'introduction des aménagements au niveau modèle numérique est traduite par (1) le coefficient de la rugosité Manning, (2) et le coefficient de perméabilité nécessaire pour le modèle d'infiltration. Les aménagements qui



ont été introduits sont de type banquette à rétention totale (figure 7.21), ils permettent de retenir complètement les eaux du ruissellement et augmenter l'infiltration dans le but de favoriser la recharge de la nappe phréatique

Les travaux virtuels qui ont introduit (banquettes de rétention) influencent donc directement les coefficients du frottement de Manning et, de l'infiltration. Pour matérialiser l'effet de ces changements au niveau du modèle de simulation, le coefficient de frottement de Manning et le coefficient de perméabilité ont été multipliés par 10. Le résultat est spectaculaire, le champ de vitesse aux endroits où les aménagements sont introduits a disparu complètement, ce qui est en étroite concordance avec les hypothèses de solution émises lors du choix de l'aménagement et son impact escompté sur le régime hydrologique du bassin versant.

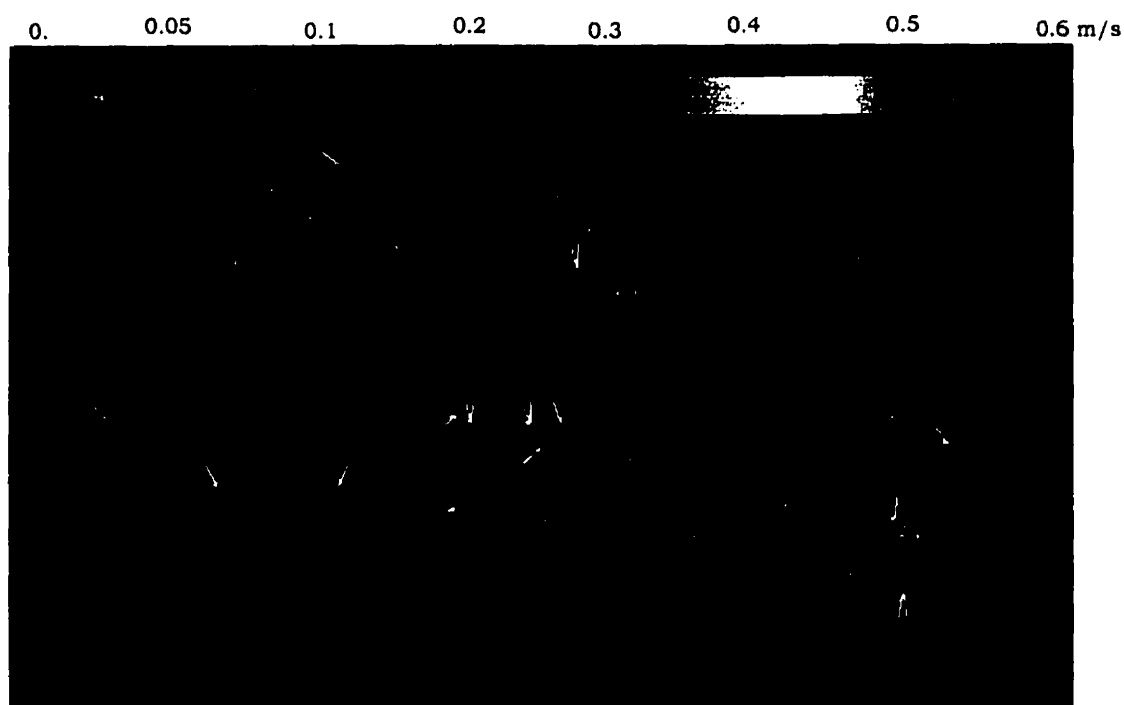


Figure 7.18 Champ des vitesses (représentation vectorielle), état 1 : sans aménagements

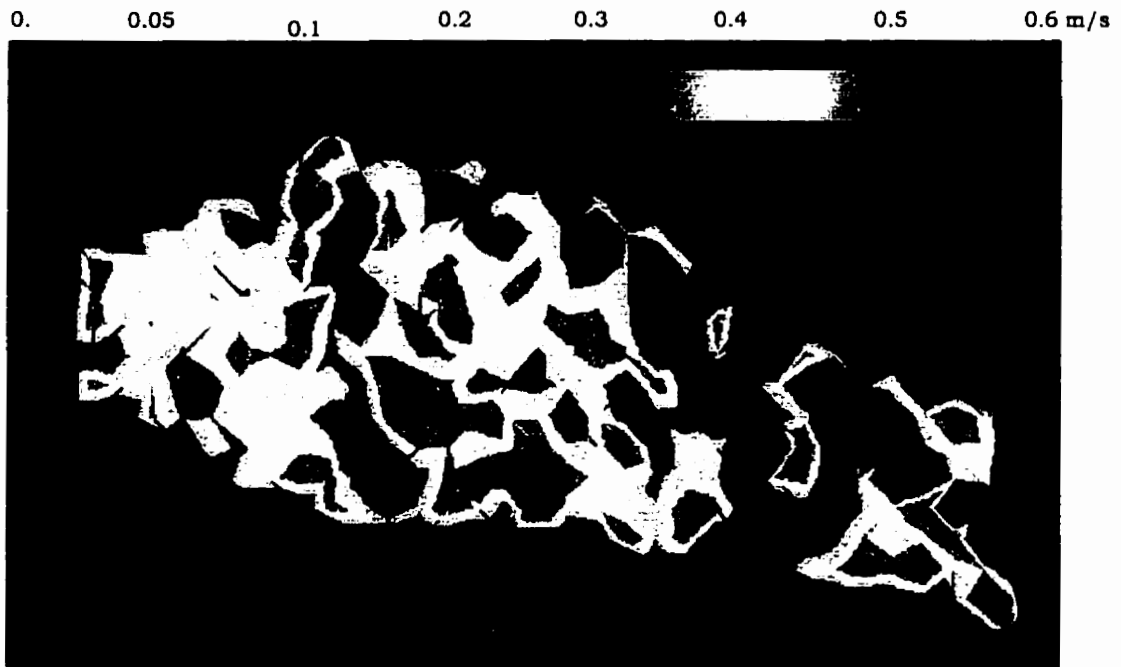


Figure 7.19 Champ des vitesses, état 1 : sans aménagements

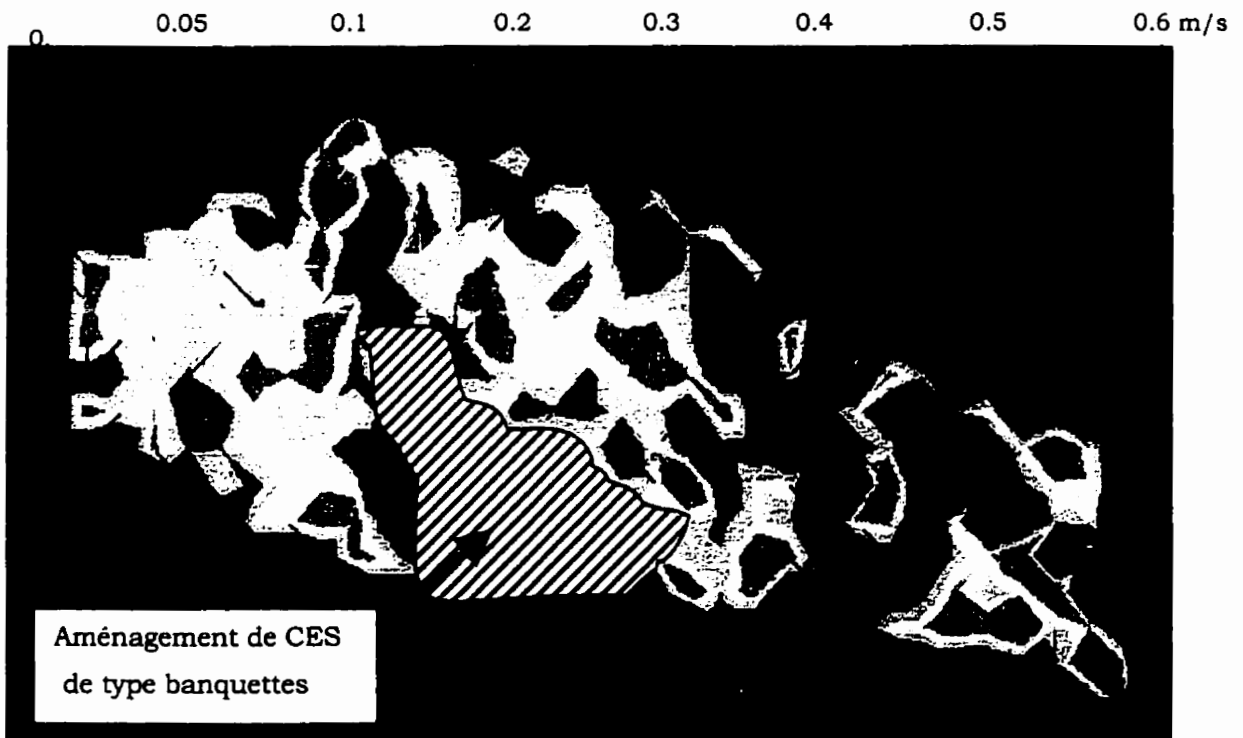


Figure 7.20 Champ des vitesses : aménagement de type banquettes de rétention

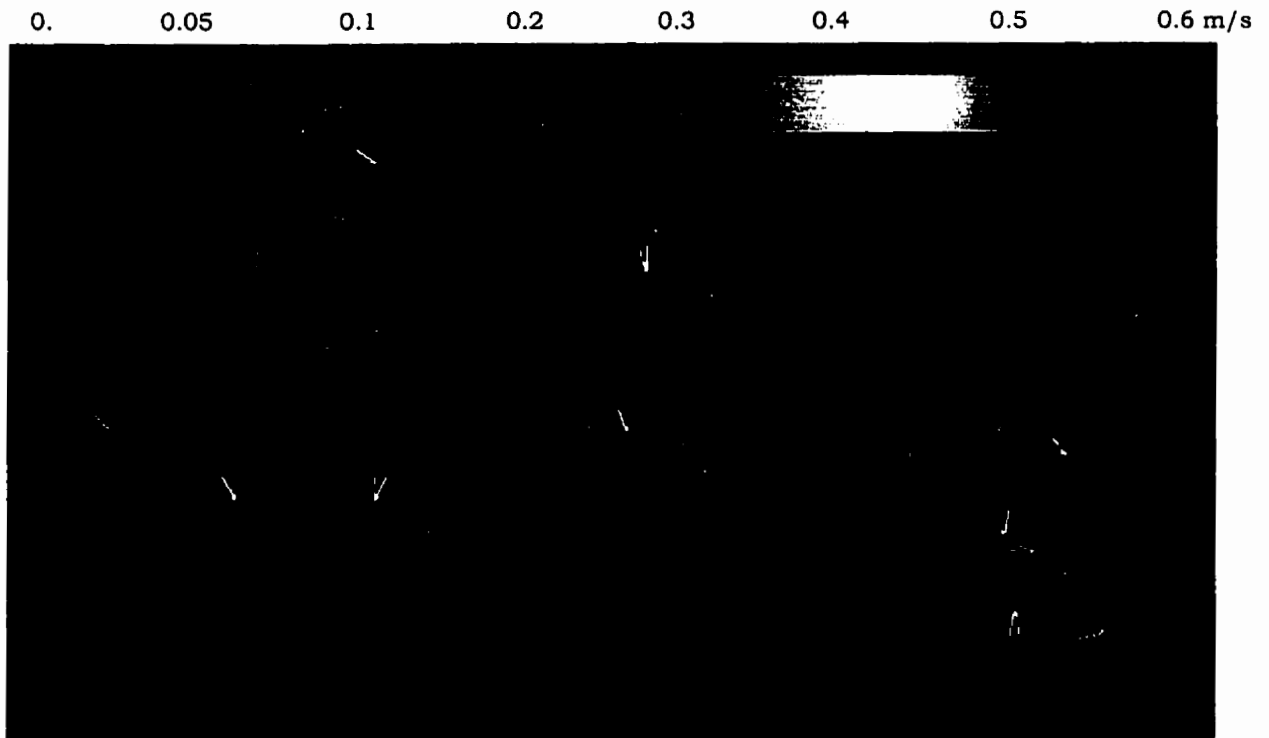


Figure 7.21 Champ des vitesses (représentation vectorielle) : état 2 avec aménagements

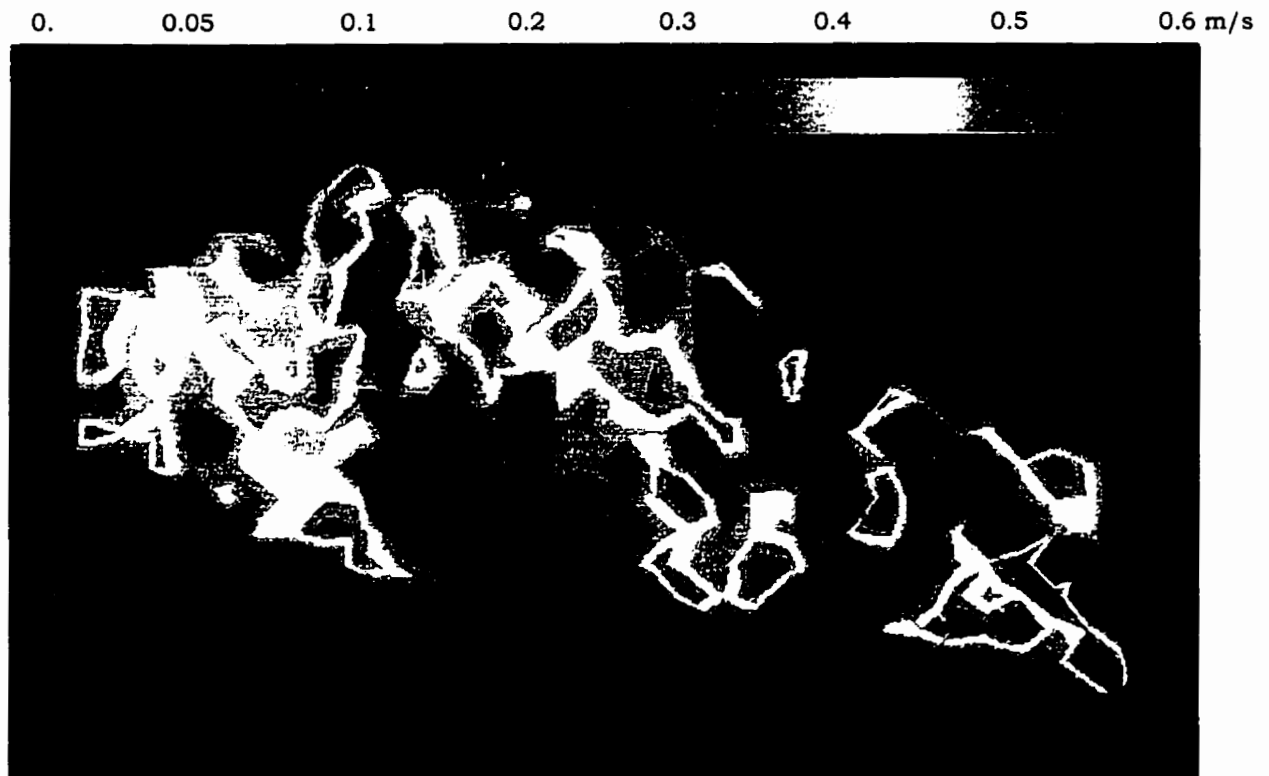


Figure 7.22 Champ des vitesses sous forme thématique : état 2 : avec aménagements

## **7.5 Incidence sur les besoins en modélisation du relief**

Dans cette recherche, nous avons exploré l'utilisation du nouveau concept : la «synergie numérique» résultant du couplage SIG-MEF qui a été présenté à la section (§5.6). En effet, rappelons-le, il s'agit de montrer les apports substantiels qu'offre l'utilisation conjointe des technologies géomatiques et de la modélisation par la méthode des éléments finis.

Parmi les possibilités offertes par les SIG, c'est l'acquisition des données topographiques qui permet le **raffinement et l'adaptation du maillage**, tel que discuté dans le chapitre 5 (§5.4.1). Le raffinement consiste à passer d'une première grille grossière à une deuxième plus raffinée. Ceci permet une représentation plus fidèle de l'ensemble du territoire. L'adaptation consiste à densifier localement l'information topographique de façon à mieux l'adapter au calcul numérique de l'écoulement.

### **7.5.1 Raffinement du maillage**

Afin de tester l'apport additionnel d'une telle procédure sur la modélisation des écoulements par les éléments finis, nous avons représenté le terrain à l'aide de deux maillages réguliers ayant respectivement une résolution de 200 m et 100 m. Les figures 7.24 et 7.25 représentent les champs des vitesses pour ces deux résolutions.

Il est clair que le patron d'écoulement suit parfaitement la topographie du relief, de plus le réseau hydrographique se dessine nettement. La figure 7.25 est obtenue à l'aide d'un maillage de 100 m. L'hydrographie du bassin versant est beaucoup plus nette que celle obtenue avec un maillage de 200.

La structure du réseau hydrographique témoigne de l'activité hydrologique du bassin versant, et constitue un indicateur fidèle de sa vulnérabilité à l'érosion et toutes autres formes de dégradations. En outre, elle permet de mieux cibler l'emplacement des aménagements. Il est donc primordial de disposer des techniques les plus fiables permettant de modéliser ces structures complexes, afin de reproduire d'une manière fiable la géométrie du territoire.

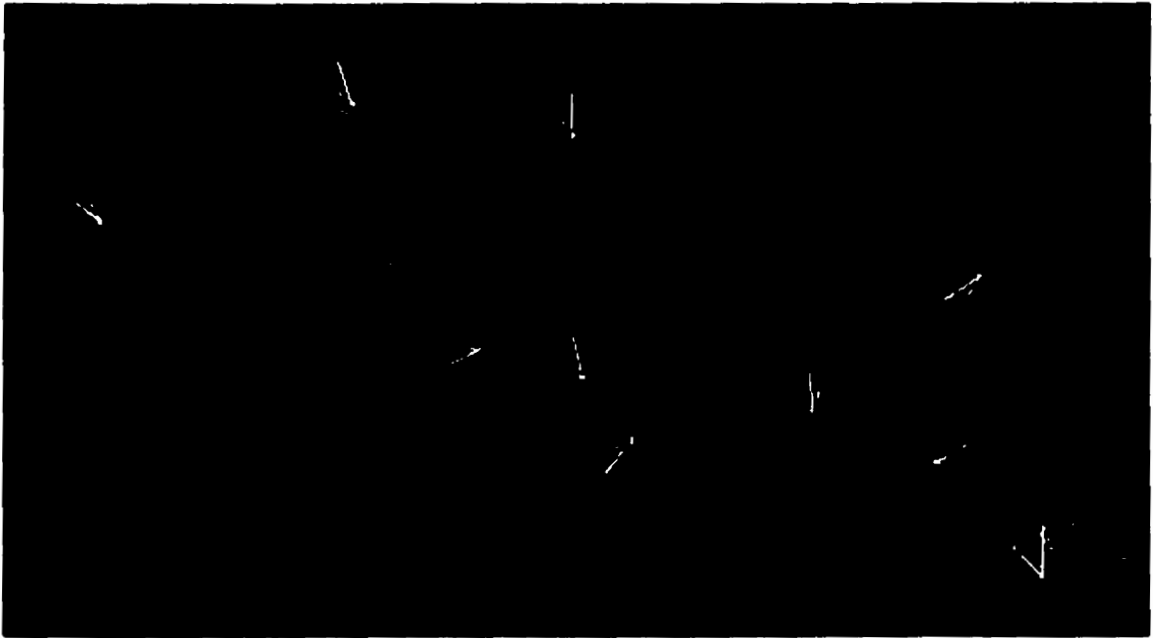


Figure 7.23 Maillage régulier 200 m



Figure 7.24 Maillage régulier 100 m

### 7.5.2 Adaptation du maillage

Les figures 7.26 et 7.27 ont été obtenues à l'aide des maillages de 200 et 100 m auxquels, nous avons adapté le maillage pour la détection des singularités du relief le réseau hydrographique.

Les résultats obtenus avec le maillage adapté montrent que cette technique n'apporte pas d'amélioration substantielle aux résultats obtenus précédemment avec un maillage raffiné. L'adaptation du maillage sera plus recommandée pour l'extraction et la représentation du réseau hydrographique. En comparant la structure du réseau obtenue avec un maillage raffiné (figures 7.24 à 7.25) et celle obtenue avec un maillage adapté (figures 7.26 à 7.27), il apparaît évident que le réseau hydrographique est fidèlement mis en évidence, de plus l'adaptation de maillage aux singularités de relief apparaît comme une bonne technique pour mieux représenter le changement des pentes, ce qui constitue un élément fondamental pour la détection de l'emplacement des ouvrages hydrauliques.



Figure 7.25 Maillage adapté 200 m



Figure 7.26 Maillage adapté 100 m

### **7.5.3 Simulation des retenues des barrages collinaires**

Le choix de l'emplacement des petits barrages en terre nécessite un emplacement adéquat, pour stocker une réserve d'eau. Pour les lacs collinaires, la hauteur maximale admise pour ce genre d'ouvrage est de l'ordre de 20 m, les ouvrages ayant des hauteurs comprises entre 20 m et 50 m font partie de la catégorie des barrages collinaires.

Dans le but de tester l'apport des techniques de maillages (raffinements et adaptation) pour le choix de l'emplacement de ces ouvrages hydrauliques, nous avons réalisé deux séries d'essai. La première est relative à la simulation des retenues collinaires, la seconde fait référence aux barrages collinaires.

Le choix adéquat est dicté par le potentiel de stockage en eau de la future retenue et de son étendue, car plus la retenue est vaste, plus elle sera soumise aux phénomènes d'évaporation et d'infiltration ce qui réduit notablement son apport réel en eau. Ainsi, dans le cas du choix de l'emplacement d'un lac collinaire, nous procédons comme suit : l'exutoire du bassin versant où nous projetons la construction de la digue sera fermé jusqu'à une hauteur de 20 m correspondant à la hauteur réelle de l'ouvrage. Nous observons ensuite le remplissage de la retenue pour deux types de maillage. Dans le cas du maillage régulier (figure 7.28), l'étendue de la retenue est très vaste ; dans ce cas, nous pouvons déduire que le site ne serait pas retenu pour d'autres études complémentaires. Par contre, le même site traité avec un maillage adapté aux singularités (figure 7.29) et dans les mêmes conditions, montre une possibilité beaucoup plus importante que précédemment.

La deuxième série d'essai de simulation de remplissage des retenues (figures 7.30 et 7.31) a été réalisé pour le cas des barrages collinaires. Le même principe est appliqué la seule dimension qui c'est la hauteur de remplissage qui était de 20 m dans le cas des lacs collinaires sera de 50 m.

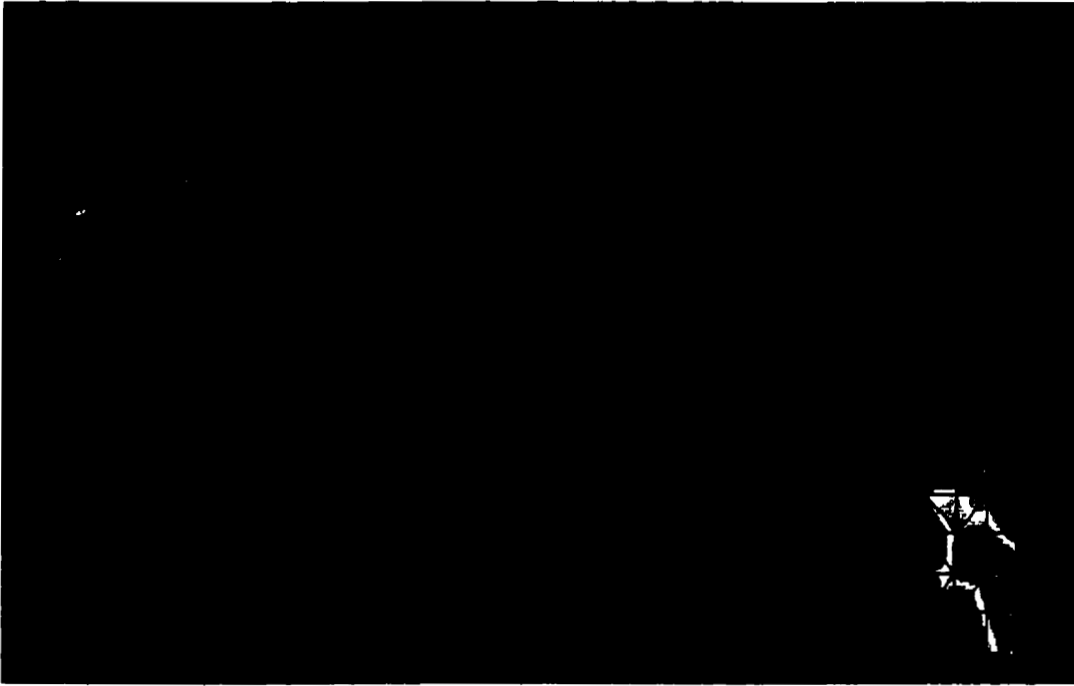


Figure 7.27 Simulation d'une retenue collinaire à l'aide d'un maillage régulier ( $h = 20$  m)



Figure 7.28 Simulation d'une retenue collinaire à l'aide d'un maillage adapté ( $h = 20$  m)



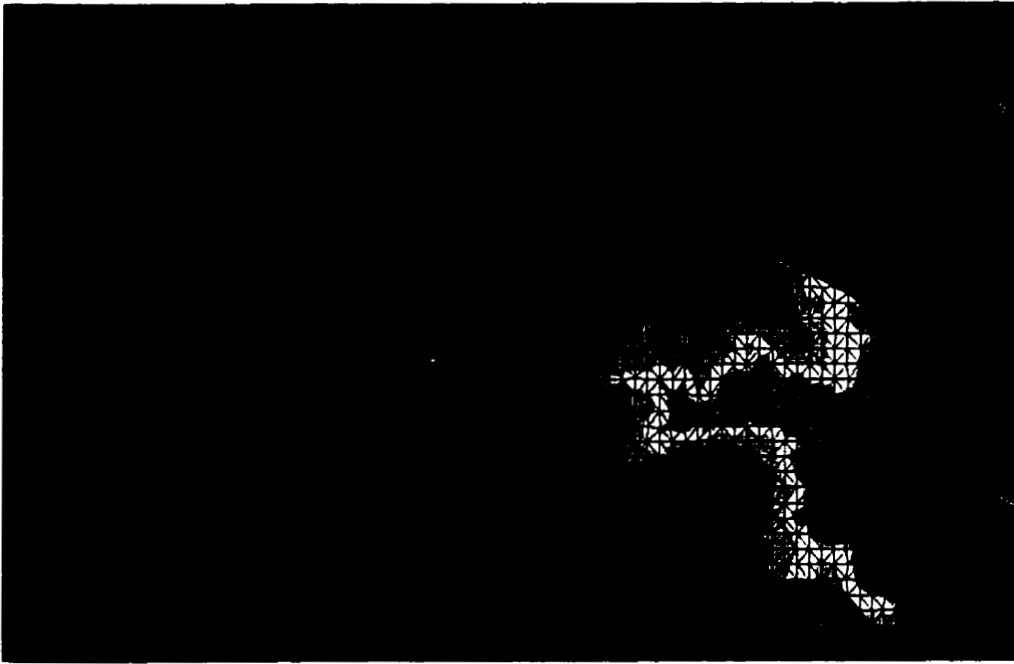


Figure 7.29 Simulation d'un barrage collinaire à l'aide d'un maillage régulier ( $h = 50$  m)

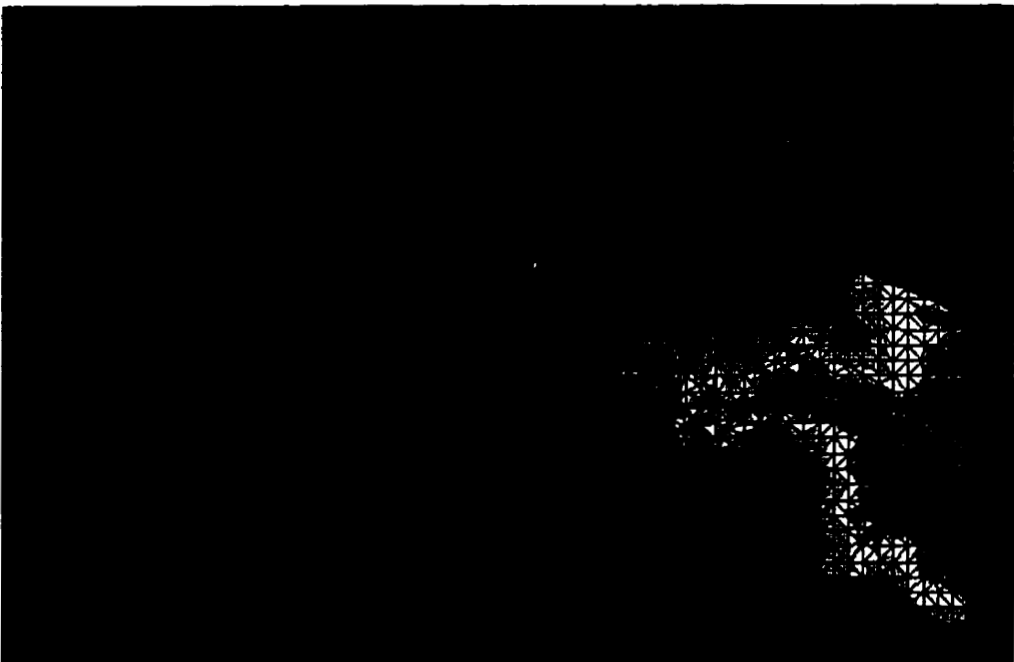


Figure 7.30 Simulation d'un barrage collinaire à l'aide d'un maillage adapté ( $h = 50$  m)

#### **7.5.4 Localisation des sites des ouvrages hydrauliques**

La gestion, l'évolution, et le suivi du tirant<sup>37</sup> d'eau constitue un enjeu crucial que ce soit dans les pays semi-arides dans les pays humides. En effet, la gestion et le contrôle des plaines inondables constituent un véritable souci à l'approche des crues printanières dans les pays nordiques. Au contraire, dans les pays où l'eau est considérée comme une denrée précieuse, le souci des décideurs est la gestion de l'efficacité. L'utilisation de la technique d'adaptation de maillage montre qu'elle apporte des résultats plausibles permettant une prise de décision rigoureuse.

Les travaux de conservation des eaux et sols incluent plusieurs types d'ouvrages (barrages collinaires, banquettes de rétention, seuils filtrants, etc.). Dans les pays semi-arides, il existe plusieurs techniques physiques<sup>38</sup> et biologiques<sup>39</sup> très populaires utilisées pour le traitement et la stabilisation des voies d'eau, les plus utilisées actuellement dans les pays arides et semi-arides sont : (1) les seuils de rétention, (2) les seuils filtrants.

Quel que soit le but pour lequel ils sont construits, le choix de l'emplacement des ces ouvrages chez les décideurs constitue un enjeu de taille. Parmi les résultats plausibles fournis par notre prototype, c'est la détection des dépressions où il pourrait éventuellement y avoir une accumulation d'eau (figure 7.32).

Plus la lame d'eau accumulée est importante dans les rivières à certains endroits, plus ces endroits constituent des sites potentiels d'implantations des ouvrages hydrauliques. Dans le but de freiner la vitesse d'écoulement en brisant l'énergie cinétique, par l'implantation des ouvrages de type seuils déversoirs (ouvrages colorés en rouge, figure 7.32). Dans le cas des plaines où la hauteur est en généralement faible, il s'agit alors d'étaler l'eau à la surface du sol pour des besoins d'irrigation et d'alimentation de la nappe à l'aide des ouvrages d'épandage des eaux de ruissellement (ouvrage coloré en brun, figure 7.32). En effet, les résultats présentés sur cette figure jouent un rôle capital dans une première étape au niveau de la planification. La figure 7.32 donne une vue d'ensemble sur l'envergure de travaux de conservation des eaux et des sols nécessaires pour aménager les voies d'eau, les sites identifiés devront faire l'objet d'une étude de faisabilité et de conception par les ingénieurs spécialistes en conservation des eaux et des sols.

---

<sup>37</sup> Tirant d'eau : la hauteur d'eau disponible à un instant donné dans un réservoir, retenue collinaires, dépression naturelle, etc.

<sup>38</sup> Techniques physiques : seuil déversoir, seuil filtrant, banquette de rétention totale ou partielle, etc.

<sup>39</sup>Techniques biologiques : plantation des arbres.

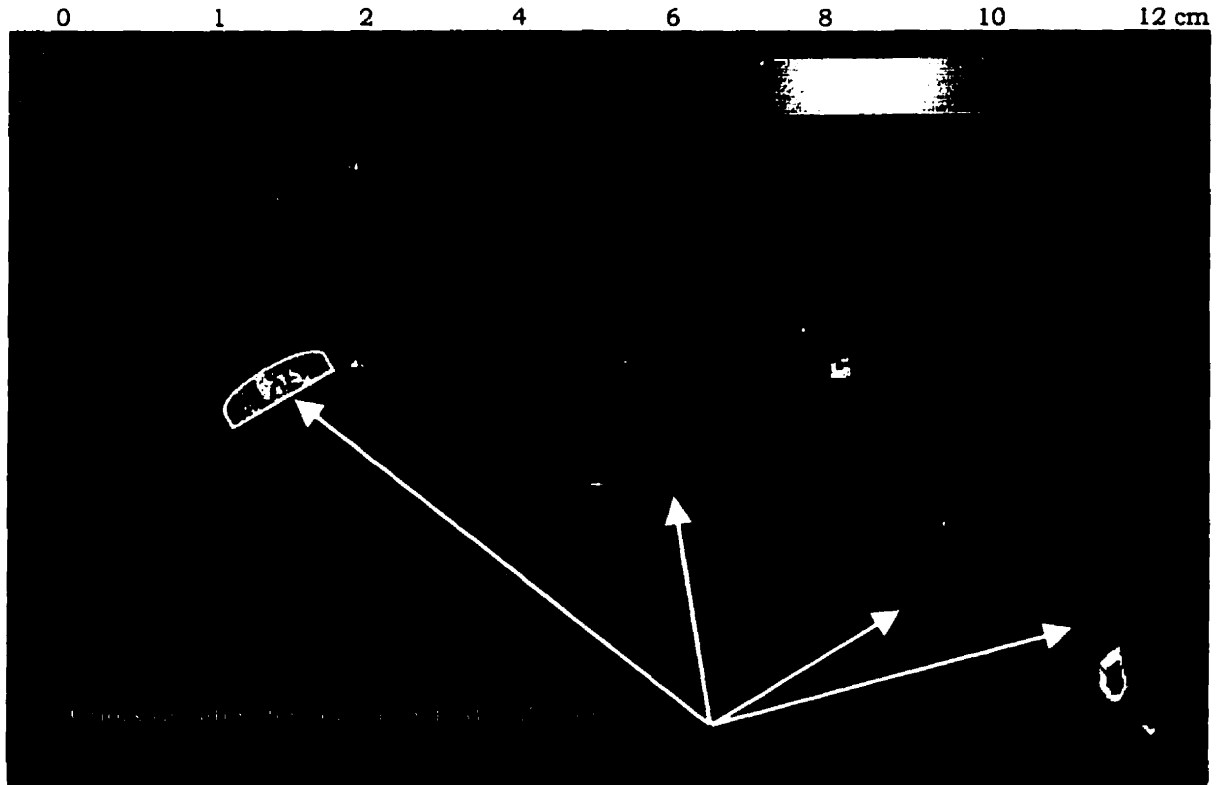


Figure 7.31 Localisation des ouvrages hydrauliques

### 7.5.5 Évaluation du raffinement et de l'adaptation du maillage pour la simulation des retenues hydrauliques

Nous avons comparé les résultats obtenus par les deux techniques de maillages : (1) maillage raffiné (figure 7.24 à 7.27), (2) maillage adapté (figure 7.28 à 7.31).

Il apparaît clairement que l'adaptation du maillage reflète mieux le réseau hydrographique. Par conséquent, le mode de visualisation du résultat peut influencer la perception, alors il apparaît important de se doter des bons outils pour répondre adéquatement à des questions clairement identifiées. Dans ce cas particulier, les deux modes de visualisation sont pertinentes, voir même nécessaires mais pour des besoins différents, la représentation vectorielle du champ des vitesses constitue un outil de base pour la description de l'hydrodynamique du bassin versant, nécessaire pour démarrer la modélisation d'autre processus tel que la propagation d'un front de pollution.

## **7.6 Analyse critique des outils de modélisation du relief**

### **7.6.1 Les aspects techniques**

Il apparaît important de mentionner quelques problèmes qui ont été rencontrés lors de cette recherche. En effet, les outils de générations de maillage disponibles en ce qui concerne SIG ne répondent pas parfaitement aux besoins de la modélisation par éléments finis au niveau éléments finis. Certaines problèmes relatifs à la structuration des données ont été résolu, par le développement et l'intégration de l'algorithme TIN-MEF (annexe 1). Par ailleurs, le nettoyage des frontières (figure 7.33) du modèle numérique de terrain intégrant le réseau hydrographique constitue encore un problème majeur qui n'a pas été résolu définitivement dans cette recherche. En effet, le nettoyage des frontières dans le cas de la présence du réseau hydrographique a été réalisé manuellement. Les figures 7.33 et 7.34 montrent l'état d'un maillage irrégulier avant et après le nettoyage des frontières.

D'autres limitations de la modélisation du relief grâce aux technologies SIG<sup>40</sup> actuelles qui surgissent au moment de la simulation numérique ; il s'agit du sens et de l'ordre de la numérotation des nœuds. Nous avons constaté que les sens de numérotation des nœuds au niveau SIG sont aléatoires, ceci conduit à une erreur de signe lors de du calcul de la superficie de l'élément. Par ailleurs, l'ordre de numérotation des nœuds, s'il n'est pas adéquat, produit une largeur de bande des matrices très importantes, nécessitant un temps de calcul très élevé. L'introduction des algorithmes d'optimisation de maillages de renumérotation des nœuds, a permis de réduire la largeur de la bande de la matrice. À titre d'exemple de 100 fois pour maillage de 200 m, ce qui se traduit par une réduction du temps de calcul, mentionnons que le temps requis pour une simulation d'un événement pluvieux avec un modèle de relief du type 200m, dure 18 minutes sans l'introduction des algorithmes d'optimisation du maillage ; le même type de simulation ne dure que 30 secondes. Ce type de test a réalisé à l'aide des stations de travail H.P. du GIREF ayant un seul processeur de 180 Mhz.

De plus, la structure géométrique du maillage fourni par les SIG présente un inconvénient majeur pour la représentation des plaines inondables. En effet, l'orientation des triangles ne respecte pas la ligne d'écoulement naturel. Une telle situation peut causer des problèmes de stabilité numérique au niveau du modèle de simulation qui pourrait être une des origines de

---

<sup>40</sup> Le SIG auquel nous faisons référence il s'agit d'Arc/Info, et toutes les conclusions et les recommandations que nous présentons peuvent être différentes pour d'autres logiciels.

la divergence observée lors de la décrue. Cette situation est évidemment plus critique pour les résolutions faibles et les réseaux hydrographiques non raffinés.



Figure 7.32 Maillage irrégulier avant nettoyage



Figure 7.33 Maillage irrégulier après nettoyage

### 7.6.2 Les aspects décisionnels

Les résultats obtenus permettent également d'évaluer les besoins en modélisation pour la plupart des nœuds décisionnels identifiés.

Tableau 7.4 Besoins en modélisation du relief pour les divers nœuds décisionnels

Nœuds décisionnels	Maillage 200 m		Maillage 100 m	
	régulier	adapté avec hydrographie	régulier	adapté avec hydrographie
Nœud 1	acceptable	acceptable	acceptable	acceptable
Nœud 2	acceptable	excellent	acceptable	excellent
Nœud 3	excellent	ne s'applique pas		
Nœud 4	excellent	-	-	-
Nœud 5	ne s'applique pas			
Nœud 6	excellent	-	-	-

## 7.7 Conclusion et analyse du chapitre

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que le modèle développé répond parfaitement aux objectifs escomptés annoncés dans le premier chapitre de cette thèse. Cette conclusion présente d'une manière succincte les principaux résultats du modèle développé. En effet le modèle développé met en évidence des réponses plausibles aux questions relatives à chacune des composantes de cette recherche présentée à la figure 1.1 soit : (1) l'aide à la décision, (2) les SIG, (3) la modélisation numérique par éléments finis, (4) l'hydrologie analytique.

- Au niveau décisionnel** le modèle apporte une aide substantielle pour la planification des aménagements. En effet, il permet de fournir aux décideurs des éléments d'analyse relatifs à l'impact des aménagements de conservation des eaux et du sol sur le régime hydrologique du bassin versant. La simulation de scénario permet d'établir une comparaison entre plusieurs variantes d'aménagement, dans le but de réaliser des études socio-économiques, d'évaluer l'impact sur le territoire et par l'effet même sur l'environnement de chaque scénario simulé et ce dans une perspective de développement des ressources hydriques à l'échelle du bassin versant. Les résultats présentés dans les figures (7.19 à 7.23) fournissent des résultats plausibles au nœud décisionnel 5 (§ 2.5), tandis que les résultats de la figure 7.32 constituent un outil fiable pour alimenter le nœud 4 (§ 2.5) dans le but d'analyser le potentiel hydraulique, étape préalable et nécessaire pour la sélection des aménagements bien adaptés.

- **Au niveau des SIG** la modélisation physique et descriptive du territoire fait ressortir l'avantage majeur suivant : l'introduction d'une loi d'infiltration nodale permettant ainsi, au modèle de tenir compte des paramètres physiques à l'échelle de l'élément. Aussi, faut-il mentionner que la précision des données pédologiques disponibles n'est pas très adéquate. En effet le prototype développé permet d'extraire des attributs descriptifs pour chaque sommet, de le distribuer pour chaque triangle et ce pour l'ensemble du modèle numérique de relief (à titre d'exemple à des points espacés de 200 m), alors que la carte pédologique de base utilisée est à l'échelle 1/500 000 et date de 1973).
- **La synergie numérique** résultant du couplage SIG-MEF offre des solutions efficaces pour la gestion des ressources en eau. En effet, nous avons montré que l'outil convient parfaitement pour les régions arides où la question majeure est le choix du site des retenues. La simulation numérique des processus environnementaux, tel que le transport solide (érosion hydrique du sol) transport et diffusion de la pollution nécessite comme données d'entrée les résultats de l'hydrodynamique (champ de vitesse et hauteur). Ce type de résultat pourra être un outil prometteur pour l'appréhension et le contrôle de la pollution des bassins versants en milieu agricole, induite suite à l'utilisation des produits chimiques.

## 8 Conclusion générale

### 8.1 Introduction

Le thème de cette recherche se situe au point de rencontre de quatre domaines : l'aide à la décision, les systèmes d'information géographique, la modélisation numérique par éléments finis et l'hydrologie. Il s'agit d'une démarche de généraliste qui tente de profiter des outils et des méthodes à disposition pour résoudre, avec un certain pragmatisme, des problèmes rencontrés concrètement dans la réalité. Dans ce cadre, notre travail de recherche s'est fixé comme objectif d'apporter des solutions conceptuelles et méthodologiques pour la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant.

Ce travail a débuté par une analyse succincte des besoins en outils décisionnels orientés vers l'aménagement du territoire et la gestion des ressources en eau. Une recherche bibliographique approfondie ayant montré que le thème exploré dans cette recherche est encore récent, une démarche globale du type heuristique a été suivie.

L'élaboration de la méthodologie proposée pour cette recherche est passée par une appréhension rapide des quatre domaines suivants : l'aide à la décision, les SIG et la méthode des éléments finis et l'hydrologie. Les problèmes identifiés mais non résolus dans le cadre de cette recherche **seront** passés en revue. Des perspectives pour les recherches ultérieures **seront** évoquées.

Cette conclusion rappelle succinctement les principaux objectifs de la recherche et fait une synthèse des principaux résultats. Elle met en évidence la synergie résultant du couplage des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis permettant de mieux cerner la complexité de l'hydrologie du bassin versant.

### 8.2 Rappel des objectifs et des originalités

Les principaux objectifs de cette recherche ont été présentés dans la section § 1.3. Il s'agissait :

- **D'évaluer** le potentiel de l'utilisation de la méthode des éléments finis pour appuyer le processus décisionnel proposé.



- **De réaliser** le couplage des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis pour la modélisation hydrologique,
- **De développer** un modèle de simulation hydrologique aux éléments finis,
- **D'identifier** les fonctionnalités à ajouter aux SIG actuels nécessaires pour satisfaire les besoins de la modélisation numérique par éléments finis.

En plus des objectifs mentionnés ci-dessus, les originalités de cette recherche peuvent se résumer ainsi :

- **Préciser** les besoins en paramètres et extraire automatiquement les paramètres physiques à partir du SIG, nécessaires pour alimenter le modèle de simulation hydrologique par éléments finis,
- **Évaluer** l'impact des aménagements sur le régime hydrologique,
- **Étudier** l'effet de l'inertie au niveau de la formulation mathématique du modèle éléments finis,
- **Évaluer** l'apport des techniques de maillage (raffinement et adaptation) pour le choix des sites potentiels des ouvrages hydrauliques.

Les résultats présentés et analysés dans le chapitre précédent montrent que tous les objectifs de cette thèse ont été atteints. Nous présentons dans la section 8.3 un bref résumé des résultats de la recherche.

## **8.3 Synthèse des résultats obtenus**

### **8.3.1 Aide à la décision**

En matière de gestion des ressources en eau, l'appréhension de la complexité du processus hydrologique à l'échelle du bassin versant passe par la planification, la conception, la gestion du potentiel en eau et risque d'inondations. Il est donc crucial de disposer d'outils basés sur des méthodes d'analyses rigoureuses, permettant de fournir aux décideurs des réponses plausibles à des questions explicites, variables selon le stade de réalisation du projet. Rappelons brièvement la définition de l'aide à la décision (§ 2.4.1 donnée par Roy et Bouyssou [1993]) :

*«l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision [...]».*

Selon ces auteurs,

*«Il est préférable de se faire une opinion à partir d'informations approximatives ayant un caractère exhaustif plutôt qu'à partir de calculs exacts ne prenant pas en compte certains facteurs essentiels ».*

Le modèle développé offre une aide substantielle à l'aide des réponses plausibles au niveau de plusieurs noeuds décisionnels formulés au (§2.5) :

- **Noeud 1** : Le modèle fournit au décideur des solutions plausibles de ruissellement. À ce niveau, le décideur a besoin d'une vision globale du potentiel en eau pour dresser une stratégie de planification efficace.
- **Noeud 2** : La synergie numérique résultant du coulage « SIG-MEF » a permis à l'aide de l'utilisation du raffinement et de l'adaptation du maillage, l'identification des sites potentiels des retenues collinaires (§7.5.4).
- **Noeud 3** : Le modèle permet de comparer les scénarios en tenant compte dans le modèle de simulation hydrologique de la variation spatio-temporelle des aménagements de conservation des eaux et des sols (§ 7.4 .4).
- **Noeud 4** : La simulation par éléments finis fournit la répartition spatio-temporelle des facteurs d'analyses du potentiel hydrauliques (vitesse et hauteur d'eau). La connaissance de ces paramètres permet d'identifier d'une part les zones vulnérables à l'érosion et, par conséquent de programmer les aménagements appropriés ; et d'autre part d'évaluer le choix des sites des aménagements hydrauliques (§7.4.2).
- **Noeud 6** : La simulation des scénarios exceptionnels, en effet les infrastructures hydrauliques sont conçues en fonction d'une période de retour  $T = 50$  ans pour les lacs collinaires (§ 7.4.1).

### **8.3.2 Hydrologie numérique**

Les modèles d'hydrologie analytique discutés au chapitre 4 ne permettent pas de tenir compte de la variation spatio-temporelle des paramètres d'analyse du potentiel hydraulique (hauteur d'eau, vitesses, etc.). Or toutes les facettes de l'hydrodynamique du bassin versant

(érosion, transport de pollution) requièrent la connaissance préalable de ces deux grandeurs physiques.

La fiabilité du modèle suggéré par cette recherche dépend principalement de la qualité (précision - fiabilité- mise à jour, etc.) des données de base qui alimentent ce modèle à savoir les données géométriques (modèle numérique du terrain) et **descriptives** (pédologie, indice de végétation, érosion etc.) qui se traduisent au niveau du modèle de simulation par éléments finis en paramètres de **perméabilité** et de **rugosité**.

Dans le cas des modèles de l'hydrologie analytique, l'étalonnage passe souvent par un processus itératif standard essai-erreur. En revanche, étant donné que le modèle développé dans cette recherche est conçu selon les lois de la physique les plus générales (équations de Saint-Venant), il peut être sans autre utilisé sur n'importe quel bassin versant.

### 8.3.3 Les contributions et originalités

L'utilisation des SIG et de la modélisation numérique par éléments finis dans un contexte décisionnel constitue la principale originalité de cette recherche. En effet, actuellement les SIG ne permettent pas une modélisation spatio-temporelle d'un processus physique, en particulier l'hydrologie ; par contre, ils offrent un potentiel important pour la modélisation géométrique et descriptive du territoire. Par ailleurs, la méthode des éléments finis s'apprête admirablement à la modélisation spatio-temporelle de tous les processus physiques observés dans la nature, mais elle a besoin d'outils supplémentaire pour travailler sur des géométries complexes. Le couplage SIG-MEF présente un double intérêt : (1) **montrer** que le couplage est techniquement fonctionnel, (2) **répondre** à des questions formulées au niveau du processus décisionnel, en effet, l'outil développé offre des résultats simplifiés par rapport aux modèles hydrologiques traditionnels. Le décideur ne cherche pas à **connaître la valeur exacte** du débit ou l'apport solide en un **point particulier** du bassin (**l'exutoire**), mais de **comparer** les zones sensibles à l'érosion et **concevoir** et **planifier** les scénarios d'aménagement adéquat.

Le SIG permet au décideur de s'informer, et de subvenir aux besoins des modèles de simulations en données descriptives nécessaires pour la réalisation des simulations numériques. La modélisation par éléments finis est considérée comme une technique universelle permettant de réaliser des simulations vraisemblables et rigoureuses sur n'importe quel territoire, sachant qu'on dispose au préalable de sa géométrie et de ses attributs descriptifs.

Le processus auquel nous nous intéressons (hydrologie de surface) évolue dans l'espace et dans le temps. Alors, il est essentiel de prendre en compte de cette dimension dans le processus de modélisation. En effet, l'une des contributions majeures de recherche c'est l'extraction locale (ou «*nodale*» dans le jargon des éléments finis) des attributs descriptifs nécessaires pour la modélisation de l'écoulement (végétation, perméabilité, etc.).

#### **8.4 Les difficultés rencontrées**

Le développement du modèle a parmi de mettre en évidence quelques difficultés que nous citons brièvement :

- Le modèle de simulation hydrologique est conçu pour simuler des régimes de faible hauteur d'eau. Lors des essais de simulation certains problèmes ont été identifiés. En effet, sur les sommets des montagnes où la pente est très élevée (supérieur à 45°), la vitesse d'écoulement est tellement élevée de telle manière que les éléments n'auront jamais une accumulation d'eau. Ce type de problème a perturbé la convergence du modèle et par conséquent l'obtention d'un résultat acceptable.
- Les dépressions naturelles constituent un problème de taille pour assurer la convergence du modèle. En effet, au début de l'événement pluvial, le modèle se comporte parfaitement tant que la hauteur d'eau accumulée dans ces dépressions est faible. Dès que la hauteur devient importante, c'est-à-dire qu'elle dépasse largement la hauteur ruisselée sur le bassin, nous atteignons un régime strictement fluvial ; le problème provient de la transition entre le régime de ruissellement et le régime fluvial. Une spécialisation de l'élément à cet égard serait donc à définir.
- Durant l'étape d'extraction des attributs descriptifs au niveau du SIG nous avons opté volontairement pour des simplifications. En effet, les attributs au niveau nodal sont générés suite à une superposition d'une couverture polygonale et d'un modèle numérique de terrain du type TIN de la même couverture. Dans le cas le plus général, il peut y avoir dans un même triangle un ou plusieurs polygones permettant la description du territoire à l'échelle polygonale. Dans cette recherche, nous n'avons pas tenu compte de la contribution partielle au niveau nodal de chaque polygone lors de l'extraction des attributs descriptifs.

## **8.5 Perspectives de recherche et de développement**

Les résultats de cette recherche montrent que les technologies géomatiques en particulier les SIG constituent des outils idéaux pour la modélisation numérique de bassins versants, permettant ainsi l'extraction des données **géométriques** et **descriptives** nécessaires pour alimenter les modèles de simulation. Cependant, un certain nombre de recommandations doivent être formulées pour améliorer le couplage SIG-MEF réalisé dans cette recherche, elle sont identifiées en trois niveaux: (1) à court terme, (2) à moyen terme, (3) à long terme.

### **8.5.1 Perspectives à court terme**

Dans cette recherche nous n'avons pas pu valider le modèle avec des données représentant une réalité terrain pour deux raisons : (1) nous n'avons pas pu disposer de la plupart des données fiables, résultant d'une campagne de mesure rigoureuse, (2) certains types de données disponibles ne répondent pas aux exigences du modèle développé. En effet, le modèle par éléments finis utilise une discrétisation spatiale de 200 m ou 100 m, alors que certaines données sont dérivées de cartes pédologiques au 1/500 000 et datent de 1973. Par conséquent, à court terme nous suggérons que les points suivants soient traités.

- La validation avec des données réelles ; compte tenu de notre expérience dans le domaine de la gestion de ressources en eau, et plus particulièrement du territoire utilisé pour des fins d'expérimentation, nous pouvons mentionner que les données disponibles actuellement auprès des services hydrologiques tunisiens ne permettent pas de réaliser des simulations crédibles. Alors une validation rationnelle passe nécessitent par des campagnes de mesures sur le terrain, dont les résultats observés (débit à l'exutoire) permettront de calibrer les résultats actuels et de faire les modifications appropriées.
- Le développement et l'intégration des algorithmes de délimitation automatique du bassin versant ; dans cette recherche, cette étape a été effectuée manuellement, ce qui a engendré des difficultés au niveau de l'application des conditions aux limites (frontières du bassin versant).
- La détermination d'une liste exhaustive de tous les paramètres pertinents nécessaires pour réaliser adéquatement les simulations hydrologiques.
- Le développement des techniques et des méthodes géomatiques pour acquérir directement les facteurs nécessaires au traitement numérique (rugosité,

perméabilité, etc.) ; dans le but de plus devoir les dériver des données cartographiques (végétation, pédologie, etc.). Le passage des attributs descriptifs dérivés de la base de données du SIG, aux paramètres numériques a été fait volontairement d'une manière intuitive, car l'aspect relatif au développement algorithmique permettant la transformation des attributs descriptifs en paramètres numériques dépasse largement le cadre de cette recherche.

- Le renforcement du modèle par finis éléments actuel par l'introduction d'un élément mixte permettant de simuler les situations **intermédiaires** relatives aux dépressions naturelles (transition, ruissellement fluvial, etc.).
- L'analyse de la convergence du modèle à la décrue (après l'arrêt de la pluie).

### 8.5.2 Perspectives à moyen terme

Dans cette recherche, l'intégration d'une loi d'infiltration au niveau du modèle éléments finis donne plus de flexibilité à son utilisation, soit en milieu urbain, ou en milieu rural et plus de rigueur aux résultats obtenus. Nous n'avons fait pas une revue de littérature exhaustive justifiant le choix de ce modèle, ceci nous amène à proposer l'utilisation de la technique de pondération à l'aide des polygones de Thiessen pourra être explorée comme piste pour améliorer la signification et la représentation des attributs descriptifs.

### 8.5.3 Perspectives à long terme

Le prototype SAGESS-Tunisie développé dans cette recherche fonctionne dans deux environnements séparés : soit le SIG d'Arc/Info sur station Unix, et le modèle de simulation par éléments finis intégrées à l'environnement MEFL3D, fonctionnel sur les stations H.P. du GIREF. Il est souhaitable que les recherches futures à long terme s'orientent de telle manière que les points suivants seront abordés :

- **Développer** une interface à l'utilisateur convivial permettant l'accès et la navigation entre les différents logiciels de l'ensemble SIG-MEF. Le développement d'un éditeur de scénario pourra faciliter l'analyse et d'interprétation des résultats.
- **Intégrer** un modèle de simulation par éléments finis 3D, permettant de simuler l'écoulement au niveau des rivières,
- **Coupler** un modèle de simulation de transport - diffusion des polluants à l'échelle du bassin versant.

- **Migrer** les résultats actuels vers un système de gestion de base de données standards (Access, Oracle, etc.), et éventuellement vers d'autres outils promoteurs en cours de développement actuellement tel OLAP (On Line Analytical Processing) et SOLAP (Spatial OLAP On Line Analytical Processing) qui fait l'objet actuellement d'une recherche doctorale.
- **Développer** de nouvelles technologies géomatiques d'acquisition de données sous forme numérique susceptible d'alimenter automatiquement les modèles de simulation par éléments finis.

Cette thèse a permis de proposer aux décideurs un nouvel outil pour la planification et la gestion durable des eaux de surface à l'échelle du bassin versant, et de proposer un nouveau paradigme basé sur une nouvelle vision inhérente à un problème d'une importance cruciale avec l'avènement du nouveau millénaire, soit le développement durable des ressources naturelles, et en particulier celui des eaux de surface.

Par la nature exploratoire de cette recherche, nous avons **soulevé** et **défini** certains aspects de la prise de décision relative à la gestion des ressources en eau qui ont été **ajustés** et **repensés**. Par ailleurs, nous n'avons pu résoudre tous les problèmes rencontrés, nous espérons que les recherches futures tirent profit de cette contribution modeste à l'avancement de la science, et que ces recherches tiennent compte des aspects soulevés dans ce travail.

## 9 Références bibliographiques

- Aangeenbrug, R.T. **1991**. A critique of GIS. In Maguire, D.J. ; Goodchild, M.F. ; Rhind, D. (eds.), *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Longman, London, Vol. 1, pp. 101-107.
- Abednego, B.S.P. **1989**. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Thèse de Doctorat en Sciences techniques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse, pp. 205.
- Abel, D.J. ; Kirby, P.J. ; Cameron, M A. **1994**. A federated Systems approach to design of spatial decision supports Systems, Sixth ISDH'94, International Symposium on Spatial Data Handling. Edinburgh, Scotland, UK, Vol. 1, pp. 46-59.
- Abell, D.F. **1985**. Defining the Business, The Starting Point of Strategic Planning. Chapter 7, pp. 316-333. Harvard Expansion.
- Absi., E. **1978**. Méthode de calcul numérique en élasticité. Eyrolles, France
- Ait Belaid, M., **1990**. Cartographie de l'utilisation des sols par analyse numérique d'image SPOT : Cas du MAROC. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, pp. 134.
- Albergel, J. **1988**. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Collection Études et thèse, ORSTOM, Paris, pp. 345
- Anastassopoulos, J.P. ; Blanc, G. ; Dussauge, P. ; Reitter, R. **1988**. STRATGOR: Stratégie, Structure, Décision, Identité. Politique générale d'entreprise. Chapitre 13 et 14, pp. 313- 361, Inter Éditions, Paris, France.
- Armstrong, M.P. ; Densham, P. J. ; Lolonis, P. ; Rushton, G., **1992**. Cartographic Display to Support Locationnal Decision-Making. *Cartography and Geographic Information Systems*, Vol. 19, 3, pp. 154-164.



- Armstrong, M.P. ; Richard., M. **1995**. Massively parallel processing of spatial statistics. International Journal of Geographic Information System, Vol. 9, N<sup>o</sup>. 2, pp. 169-189.
- Aronoff, S. **1989-a**. Any manual or computer based set of procedures used to store and manipulate geographically referenced data.
- Aronoff, S. **1989-b**. Geographic Information System: a management perspective. WDL Publications, Ottawa, Canada.
- Arnold, S.H. **1989**. Sustainable Development : A Solution to the Development Puzzle? In Development. Society for International Development, Rome. Pp-35.
- Aziz, A.K. **1973**. The Mathematical foundations of the finite Element Method with applications to Partial Differentiel Equations. Academic Press. New York
- Bacha, A. **1995**. La gestion des ressources naturelles en Tunisie. Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche (UTAP). Congrès de la 50<sup>e</sup> anniversaire de l'Organisation Mondiale pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO). Québec, Canada. pp. 1-8.
- Banton, O. ; Jordana, S. ; Larocque, M. **1996**. Simplification rationnelle des outils hydrologiques de gestion : Recommandations pour la constructions de modèles semi--empiriques à origine mécaniste. Revue des sciences de l'eau, Vol. 9, N<sup>o</sup>. 2, pp. 147-161.
- Baker, A.J. ; Soliman, M.O. ; Pepper, D.W. **1978**. A time-split finite element algorithm for environmental release prediction, Finite Elements in Waters Resources, pp. 53-112.
- Barna, A.S. ; Yosibah, Z. **1996**. Numerical analysis of singularities in two dimensions. Part2: Computations of generalized flux/stress intensity factors. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 39, pp. 409- 434.
- Barry, J.K. **1988**. Geographical Information System in island resource planning: a case study in map analysis. Journal of Forestry, 84, pp. 39-43.

- Batoz, J.L. ; Dhatt, G. **1990**. Modélisation des structures par éléments finis. Volume 1, les presses de l'Université Laval, pp. 45.
- Bathurst, J.C. ; O'Connell, P.E. **1993**. Future of distributed modeling: the system hydrologic European advanced in hydrological processes, pp. 213-225.
- Battad, D.T. **1993**. Integration of Geographic Information Systems with models for watershed erosion prediction. Ph. D. Thesis, University of Texas, USA, pp. 168.
- Battaglin, W.A. ; Hay, L.E. ; Parker, R.S. ; Leavesley, G.H. **1993**. Application of GIS for Modeling the sensitivity of water resources alterations in climate in the Gunnison river basin, Colorado., Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 203-210.
- Batty, M. ; Xie, Y. **1994**. Modeling inside GIS: part 1. Model structures, exploratory spatial data analysis and aggregation, 1994 , Vol. 8, No. 3, pp. 291-307.
- Bédard, Y. ; Chevallier, J.J. ; **1989**. Processus de modélisation dans les systèmes d'information à référence spatiale. Notes de cours. Université Laval - Laboratoire de SIRS.
- Bédard, Y. ; Van Chestein, Y. **1995**. La gestion du temps avec les systèmes de données localisées : état actuel et avenues futures, Recueil d'actes du colloque GÉOMATIQUE V, Montréal, pp. 21-33.
- Bel Hadj Kacem, M.S. **1991**. Étude d'exécution d'un lac collinaire sur l'oued Aïn Essnoussi. Mémoire de fin d'étude du cycle ingénieur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis ENIT, 180 pp. Université de Tunis.
- Bel Hadj Kacem, M.S. ; Chevallier, J.J. ; Robert, J.L. **1996-a**. Utilisation de la modélisation numérique par éléments finis et des systèmes d'informations géographiques pour la gestion des ressources hydriques. The 8<sup>th</sup> International Conference on Geomatics'96. Ottawa. pp. 15
- Bel Hadj Kacem, M.S. ; Chevallier, J.J. ; Robert, J.L. **1996-b**. Système d'aide à la décision à référence spatiale: Intégration de la méthode des éléments finis avec les systèmes d'informations géographiques pour le choix des sites des barrages collinaires. Magasine Système d'informations sur le territoire <http://dgrwww.epfl.ch/SIRSindex.fr.html/INFO-SIT>.

- Bel Hadj Kacem, M. S. ; Robert, J-L.. **1997-a**. Un nouveau modèle hydrologique aux éléments finis pour une gestion stratégique et le développement durable des eaux de surface en Tunisie. The Tunisian Water Forum, July 1997, Tunis, <http://www.menet.umn.edu/~TSC/TWF>
- Bel Hadj Kacem, M.S. ; Robert, J.L. ; Gold, C.M. ; Chevallier J.J. **1998-a**. Modeling a hydrological process using a GIS and Finite Numerical Simulation: towards a new paradigm for sustainable development. International Symposium on real-time Imaging and Dynamic Analysis, ISPRS, June 2-5 1998, Hakodate, Japan. <http://www.t.u-tokyo.ac.jp/ISPRS>
- Bel Hadj Kacem, M.S. ; Robert J.L. ; Gold, C.M. ; Chevallier J.J. **1998-b**. Modeling a hydrological process using a GIS and the Finite Numerical Method: a new tools for the strategic management of water resources., Spatial Data Infrastructures, SDI'98, Ottawa, Canada., <http://www.ccrs.nrcan.ca/sdi98>
- Bel Hadj Kacem, M.S. ; Chevallier, J.J. ; Robert, J.L. ; Gold, C.M. **1998-c**. Intégration de la méthode des éléments finis dans un système d'information hydrologique pour la gestion stratégique des eaux de surface.(accepté pour publication) : La revue de géomatique internationale de géomatique (édition Hermès, France). Pp.22.
- Bennet, D.A. **1994**. An extensible geographical Modeling system for the development of dynamic watershed models. Ph.D. Thesis, The University of Iowa, USA, pp.314.
- Bennis, S. **1993**. Comparaison des méthodes d'estimation des débits journaliers. revue canadienne de génie civil, Vol. 20, pp. 480-489.
- Bernier, J. **1990**. Les incertitudes hydrologiques dans les problèmes de dimensionnement d'ouvrages: Valeur des informations locales et spatiales, Revue des sciences de l'eau , Vol. 3, N°. 1, pp. 37-53.
- Betson, R.P. **1964**. What is watershed runoff? Journal of Geophysical Research. Vol. 69, No. 8, pp. 1541-1552.
- Betson, R.P. ; Mauris. ; J.P. **1969**. Source areas of storm runoff. Water resources research, Vol. No. 3 ; pp. 1541-1552.

- Beven, K. ; Binley, A. **1993**. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Advanced in hydrological processes*, pp. 227-246.
- Beven, K.J. ; Moore, I.D. **1993**. Terrain Analysis and Distributed Modeling In hydrology. *Advances in Hydrological Processes*, pp. 249.
- Binley, A. ; Breven, K. **1993**. Three- dimensional modeling of hillslope hydrology, *Advanced in hydrological processes*, pp. 107-119.
- Birkin, M. ; Clarke, G. P. ; Wilson, A. G. **1987**. Geographic information systems and model-based location analysis: ships in the night or beginning of a relationship?. University of Leeds, School of Geography. Working paper 498
- Birkin, M. ; Clarke, G. ; Clarke, M. ; Wilson, A. **1996**. Intelligent GIS Location decisions and strategic planning, *Geoinformation international*, pp. 288.
- Bissonette, J.A. ; Sherburne, S.S. ; Ramsey, R. D. **1994**. Analyzing telemetry data with a GIS-based vector structure, *IJGIS*, Vol. 8, N° 6, pp. 533-543.
- Blanchard, B. J. ; McFarland, M.J. ; Rhoades, E. **1981**. Estimation of soil moisture with API algorithms and Microwave emission., *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Associations, Vol. 1, N° 5, pp. 767-774.
- Brebbia, C.A. ; Tottenham, H. **1973**. *Variational Methods In Enginerring*, Southampton University.
- Boursier, P. **1991**. Modélisation et simulation géographiques pour les applications de type de planification aménagement. SIGEO'91. Laboratoire de recherche en informatique, Université de Paris Sud France.
- Brooks, P. ; David, B. **1988**. Sustainable Development: Easy Slogan or Difficult Choice? Ébauche inédite adaptée d'un exposé devant la TOES/North America Conference. .
- Brooks, P. ; David, B. **1990**. Que signifie exactement le développement durable?. *Le CRDI Explore*, Octobre 1990. Pp. 235-241.

- Burrough, P. A. **1986**. Principles of Geographic Information Systems for land resources Assessment. Clarendon. Oxford.
- Boughton, W.C. **1987**. Hydrograph analysis as a basis for rainfall-runoff modeling. Civil Engineering, Vol. 29. No. 1, pp. 28-33.
- Boussema, M. R., Raïs, S. ; Khallalah, A. ; Khelifa, A. ; Chevallier, J.J. ; Thomson, K.P.B. ; Poullot, J. **1992**. SIRS basé sur des données de télédétection pour la protection des sols et des eaux (Tunisie). Actes du Congrès SIG'92, Ottawa.
- Boznay, M. **1989**. Generalization of SCS Curve Number method. Journal of irrigation and drainage Engineering, Vol. 115, N° 1, pp. 139- 144.
- Brayan, R.B. ; Yair, A. ; Hodges, W.K. ; **1978**. Factors controlling the initiation of runoff. Alberta, Canada. Suppl ,Bd 29, pp. 151-168.
- Burlando, P. ; Rosso, R., **1996**. Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation, Journal of Hydrology, Vol. 187, N° 1694, pp.45-64.
- Burrough, P.A., **1993**. Soil Information Systems, Geographical Information systems (Chapter 46), pp. 153-168.
- Cahill, T.H. ; Smith, C. **1993**. Hydrologic and water quality Modeling with GIS, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 313-317.
- Carter, J.K. **1989**. On defining the geographic information system. In: Ripple W J (ed.) Fundamentals of geographic Information Systems: a compendium. ASPRS/ACSM, Falls Church Virginia, pp: 3-7.
- Carver, S. J. ; Brandon, C. F. **1994**. Vector to raster conversion error and feature complexity: an empirical study using simulated data, IJGIS, Vol. 8, N° 3, pp. 261-270.
- Champoux, P. **1991**. Étude sur les fonctions d'analyse spatiale à utiliser dans un SIRS appliqué à l'exploitation minière. Mémoire de maîtrise. Département des Sciences Géodésiques et de Télédétection, Université Laval, Québec.

- Chairat, S. ; Delleur, J.W. **1993**. Effects of the topographic index distribution on the predicted runoff using GRASS. *Geographic Information Systems and Water Resources*, pp. 285-292.
- Chandy, J.V. ; Satish, M.G. ; Waller, D.H. **1995**. Development and evaluation of numerical hydrodynamic models for small lakes and reservoirs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 270-282.
- Chappell, N. ; Ternan, L. **1993**. Flow path dimensionality and hydrological modeling. *Advanced in hydrological processes*, pp. 121-139.
- Cheibani, A. **1994**. Estimation des crues au Sahel à partir de la pluviométrie et de la morphologie des bassins, thèse de doctorat, Université Laval, Vol. pp. 270.
- Chevallier, J.J. **1983-a**. Une approche systémique des systèmes d'information du territoire et de leur intégrité. Thèse de Doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), pp. 100.
- Chevallier, J.J. **1992**. S'informer ou décider? des SIRS aux SADR. Conférence canadienne sur les SIG, SIG'92, Ottawa, 23-26 mars 1992.
- Chevallier, J.J. **1993-a**. Systèmes d'aide à la Décision à Référence Spatiale (SADR): Méthode de conception et de développement. Actes GIS'93, Ottawa, 23-25 mars 1993. pp.
- Chevallier, J.J. ; Pouliot, J. ; Thomson, K. P. B. **1993-b**. Système d'aide à la décision à référence spatiale (SADR) pour les pays en développement: le projet CRDI-Université Laval-ENIT, GIS/SIG'1993, Vol. 1, pp. 540-549.
- Chevallier, J.J. **1993-c**. Système d'aide à décision à référence spatiale (méthode de conception et de développement, GIS /Ottawa 1993, Vol. 1, pp. 1-12.
- Chevallier, J.J. ; Pouliot, J. ; Thomson, K. P. B. ; Alaya, K. ; Boussema, M. R. **1993-d**. Systèmes d'aide à la décision à référence spatiale (SADR) pour les pays en développement: le projet CRDI - Université Laval - École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, GIS/SIG'93, A. c. d. s. géomatiques (eds.), Ottawa, Canada, Vol. 1, pp. 540-549.

- Chevallier, J.J., **1994-a**. De l'information à l'action: vers des systèmes d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS), Fifth European conference and Exhibition on Geographical Information System EGIS, Paris, France, Vol. 1, pp. 9-21.
- Chevallier, J.J. ; Gagnon, P. **1994-b**. Gestion des ressources en milieu forestier: développement d'une méthode d'intégration des décisions et d'aménagement, GIS/SIG'93, Vol. 1, pp. 733-714.
- Chevallier, J.J. ; Thomson, K. P. B. ; Pouliot, J. **1994-c**. Un exemple de coopération internationale réussi: le projet SAGATELE, GIS/SIG'94, Ottawa, Canada, Vol. 1, 2, pp. 264- 271.
- Chevallier, J.J. ; Daudelin, S. **1996**. La géomatique pour l'aide à l'aide à la décision en gestion des ressources naturelles : Exemple de la protection des paysages forestiers, la revue Internationale de géomatique.
- Chevallier, J.J. ; Van Chestein, Y. ; Daudelin, S. **1997**. L'apport de la géomatique et des méthodes d'aide à la décision pour la gestion des paysages forestiers, GIS'97 CD-ROM/Ottawa, pp. 1-9.
- Chevalier, P. **1983-b**. L'indice des précipitations antérieures. Évaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. ORSTOM, série hydrologie, Vol. 20. N° 3, pp. 179-189.
- Chu, Y.F. ; Marble, D.F. **1995**. Technical issues surrounding the integration of GIS with three dimensional numerical models of spatial processes, GIS 1995, Vancouver, Vol. 1, pp. 374-381.
- Chuhadaroglu, M. **1992**. Integrating a Finite Element Model with Geographic Information System to Model Urban Stormwater Flow, Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, pp. 297.
- Cialella, A.T. ; Dubayah, R. ; Lawrence, W. ; Levine, E. 1997. Predicting Soil Drainage Class Using remotely Sensed And Digital Elevation Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, N° 2, pp. 171-178.
- Clarke, M. **1990**. Geographic Information Systems and Model Based Analysis: Towards Effective Decision Support. In: Scholten, H. J., Stillwell, J.C.H.,

(eds.), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*, Kluwer, Dordrecht, pp. 165-175.

Clarke, K.C. **1995**. *Analytical and Computer Cartography*. 2nd Edition, Hunter College, City of New York. Library of congress. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

CMED. **1987**. *Commission Mondiale sur l'environnement et le développement. Notre avenir à tous*. Montréal, Éd. du fleuve, pp. 285

Collinet, J. ; Valentin, C. **1979**. *Analyse des différents facteurs intervenants sur l'hydrodynamique superficielle*. OROSTOM, série pédologique, Vol. 17, No 4, pp. 283-328.

Cowen D.J. **1988**. *GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?* *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, N°. 54, pp. 1551-1554.

Cowen, D.J. ; Shirley, W. **1993**. *Integrated Planning Information Systems*, *Geographical Information systems* (Chapter 56), pp. 297-310.

Cowen, D. J.' Ehler, G. B. **1994**. *Incorporating multiple sources of knowledge into a spatial decision support system*, Sixth ISDH'94, International Symposium on Spatial Data Handling, Edinburgh, Scotland, UK, Vol. 1, pp. 60-72.

Crawford, N.H. ; Linsley, R.K. **1963**. *Conceptuel Model of the Hydrological Cycle*. *Bulletin International Association of Scientific Hydrology*, N°. 62, pp. 65-92.

Cung, J.A. **1987**. *Numerical hydraulics Modeling*, AIRH- congress- IAHR, Lausanne EPFL, pp. 17-30.

Dangermond, J. **1987**. *The maturing of GIS and a new age for Geographic Information Modeling (GIMS)*. In: Aangeenbrug, R.T., Shiffman, Y. M. (eds.), *International Geographic Information Systems (IGIS): The research agenda*, NASA Symposium, Arlington, Virginia, Vol. 2, pp. 55 -66.

Davidson, D.A. ; Watson, A.I. ; Selman, P.H. **1993**. *An evaluation of GIS as aid to the planning of proposed developments in rural areas*, *Geographical Information Handling, Research and applications*, edited by P.M. Mather, Jhon Wiley & Sons Ltd. pp. 251-259.



- Daly, H. ; Cobb, J. **1989**. For the common good: Redirecting the Economy toward Community, the Environment and a Sustainable Future. Oxford University, Press, Toronto.
- Davis, G.B. ; Olson, M.H. ; Ajenstat, J. ; Peaucelle, J.L. **1985**. Systèmes d'Informations pour le Management, Volume 2, les approfondissements. Éditions G. Vermette inc. (Québec) et Éditions Economica (Paris), pp. 356.
- Dawes, W.R. ; Short, D. **1994**. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes, Water Resources Research, Vol. 30, N° 34, pp. 1045-1055.
- Deanna, K. **1997**. Multi-method visualization for teach concepts in runoff modeling, <http://www.datavis97.com/Proceedings>.
- De Cola, L. **1994**. Simulating and mapping spatial complexity using multi-scale techniques. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 8, N° 5, pp. 411-427.
- De Floriani, L. ; Falcidieno, B. ; Pievovi, C. **1985**. Delaunay-based representation of surface Defined over arbitrarily Shaped Domains. Computer Vision Graphics and Image Processing, Vol. 32, pp. 127-140.
- De Floriani, L. **1994**. Parallelizing visibility computations on triangulated terrain. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 8, N° 6, pp. 515-531.
- Delauney, B. **1928**. Sur la Sphère Vide, Proceedings of international congress on Mathematics, Toronto : University of Toronto press, Vol. 1, pp. 695-700.
- De Man, W.H.E. **1990**. Establishing a Geographic Information System in relation to its use: a processes of strategic choices, in Peuquets, J.D. and Marble, D.F. Introductory readings in Geographic Information System, pp. 25.
- De Oliveira, J. L. ; Pires, F., Bauzer Medeiros, C. **1997**. An Environment for modeling and Design of geographic applications, Geolnfomatica, Vol. 1, pp. 30-57.

- Densham, P. J. ; Goodchild, M. F. **1989**. Spatial Decision Support Systems: A research agenda. SIG/LIS'89 Proceedings, Orlando, Florida, Vol. 2, pp. 707-716.
- Densham, P.J. **1991**. Spatial Decision Support Systems. In Maguire, D. J., Goodchild, M.F., Rhind, D., (eds.), Geographical Information Systems : Principles and Applications, Longman, London, Vol. 1, pp. 403- 412.
- Densham, P.J. ; Armstrong, M. P. **1994**. A heterogeneous processing approach to spatial decision supports systems, Sixth ISDH'94, International Symposium on Spatial Data Handling, Edinburgh, Scotland, UK. Vol. 1, pp. 29-45.
- Desmet, P. J. J. ; Govers, G. **1996**. Comparison of routing algorithms for digital elevations and Their implications for predicting ephemeral gullies, IJGIS, Vol. 10, No 3, pp. 311-331.
- Dhatt, G. ; Touzot, G. **1981**. Une présentation de la méthode des éléments finis. Maloine S. A. Éditeur, les presses de l'Université Laval, (maloine), PUL, pp. 543
- Dickson, C. **1988**. The economic evaluation of implementing a GIS. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 2, pp. 307- 327.
- Didier, M. ; Bouveron, C. **1993**. Guide économique et méthodologique des SIG, Hermes, Paris.
- Djokic, D. ; Maidment, D.R. **1993**. Terrain Analysis for urban stormwater modeling. Advanced in hydrological processes, pp. 183-191.
- Donéa, J. **1992**. Application de la méthode des éléments finis aux problèmes de convection diffusion. Support de cours, centre commun de recherche, commission des communautés européennes. Pp.45.
- Dooge, J.C. **1968**. The hydrological cycle as a close system. Bulletin international association of scientific hydrology. Pp.225-242.
- Drolet, J., **1997**. Towards a cross-platform finite element application framework: a tool to simplify finite element simulations, <http://www.uconcordia.ca/~jd>.

- Dueker, K.J. **1979**. Land resource information systems: a review of fifteen years experience. *Geo-Processing 1*: pp: 105- 128.
- Dumolard, P. **1992**. Les fonctions d'analyse dans les SIG du futur. Actes de la conférence de l'Information Géographique Numérique. MARI 92, CNIT Paris La Défense, France.
- Dunne, T. ; Black, R. D. **1970-a**. An experimental investigation of runoff production in permeable soils, *Water Resources Research*, Vol. 6, pp. 478-490.
- Dunne, T. ; Black, R.D. **1970-b**. Partial area contributions to storm runoff in small New England watershed, *Water Resources Research*, Vol. 6, N°. 5, pp. 1296.
- Eddy, C.A. ; Looney, B. **1993**. Three-dimensional digital imaging of environmental data: selection of grinding parameters, *IJGIS*, Vol. 7, N°.2, pp. 165-172.
- Earth, G. ; Günter, G. ; Ranzinger, M. **1992**. Move-X: A system for combining Video Films, Computer animation and GIS data. Recueil des communications du 15<sup>e</sup> symposium européen des systèmes d'informations géographiques urbaines (UDMS), Lyon, France, pp. 247- 254.
- Falcidieno, B. ; Spagnuolo, M. **1994**. A new method for the characterization of topographic surfaces, *IJGIS*, Vol. 5, N°.4, pp. 397-412.
- Faultier, J.R. ; March, C. **1993**. Flood frequency analysis: regional versus spatial approach. *Geographic Information Systems and Water Resources*, pp. 241-250.
- Fleming, G. **1975**. Computer simulation Techniques in hydrology. New York, Elsevier, environmental science series: Biswas, A. K., editor. pp.35-42
- Ferland, Y. **1996**. Savoir intégrer par le dialogue les données socio-économiques dans un système d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS). Thèse de maîtrise, département des Sciences géomatiques, Université Laval, pp. 229,
- Fortin, J. P. Moussa, R., Boucquillon, C., Villeneuve, J. P. **1995**. Hydrotel. un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'informations géographiques. *Revue des sciences de l'eau*, N°. 8, pp. 97- 124.

- Frenette, R. **1996**. Modélisation tridimensionnelle par éléments finis du transport des sédiments dans les cours d'eau, thèse de doctorat, Université Laval, pp. 350.
- Gagnon, P. ; Coleman, D.J. **1990**. La géomatique : Une approche systémique intégrée pour répondre aux besoins d'informations sur le territoire, CISM Journal ACSCG, Vol. 44, N° 4, pp. 383-389.
- Gagnon, P. ; Bédard, Y. ; Edwards, G. **1992**. La gestion du temps dans les SIRS : certains concepts fondamentaux, Conférence canadienne sur les SIG-92, Ottawa, pp.393-405.
- Ganoulis, J. **1996**. Modeling Hydrologic Phenomena, Revue des sciences de l'eau, Vol. 9, N°4, pp. 421-434.
- Gao, X. ; Soroshian, S.S. ; Goodrich, D.C. **1993**. Linkage of GIS to Distributed Rainfall-Runoff Model, Environmental Modeling with GIS, pp. 182-187.
- Garg, P.K. ; Harrison, A.R., **1988**. Quantitative representation of land-surface morphology from digital elevation models, pp. 273-282.
- Gee, D.M. ; MacArthur, R.C. **1978**. development of generalized free surface flow models using finite element techniques, Finite Elements in Waters Resources, pp. 61-77.
- Geertman, S.C.M. ; Ritsema Van Eck, J.R. **1995**. Geographic information system and models of accessibility potential: an application in planning. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 1, pp. 67-80
- Genest, S. ; Lardin, P. ; Chevallier, J.J. ; Bel Hadj Kacem, M.S. **1996**. GÉOVIE-TUNISIE, Vers une modélisation intégrée des eaux souterraines et des eaux de surface, Symposium international sur la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen. pp. 1-15.
- Geuzaine, Laurent, 1997. Conception d'un outil utilisant les technologies SIG et GPS pour les missions de recherche et de sauvetage aérien. Mémoire de maîtrise en sciences géomatiques, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada. 108 p.

- Ghanmi, A. **1995**. Modélisation physique et par éléments finis de l'adaptation des courants secondaires dans les cours d'eau naturels. Thèse de Doctorat, département de génie civil, Université Laval, Québec, Canada. pp. 225.
- Girard, G. ; Morin, G. ; Charboneau, R. **1972**. Modèle précipitations- débits à discrétisation spatiale, cahier. OROSTOM, série. Hydrologie, Vol. 9, No.4, pp.35-52.
- Golay, F. **1992**. Modélisation des systèmes d'information à référence spatiale et de leurs domaines d'utilisation spécialisés : Aspects méthodologiques, organisationnels et technologiques. Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse. Pp. 95.
- Gold, C.M. **1994-a** An object-based method for modeling geological surface containing linear data., proceedings of the annual meetings of the international association for mathematical geology, Mon-tremblant, Québec. pp. 141-147.
- Gold, C.M. **1994-b**. The interactive map, proceedings of the advanced geographic data-modeling workshop, Netherlands Geodetic Commission, Vol. 40. pp.121-128.
- Guarnieri, F. **1995**. Modèles et systèmes et systèmes de modèles dans les systèmes à base de connaissances. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble France, pp. 220.
- Goodchild, M.F. **1985**. Geographic Information Systems in undergraduate geography: a contemporary dilemma. *The Operational Geographer*, Vol. 8, pp. 34-38.
- Goodchild, M.F. **1987-a**. Towards an enumeration and classification of GIS functions. In: Aangeenbrug, R.T., Shiffman, Y. M. (eds.), and *International Journal of Geographical Information Systems (IJGIS)*. The research agenda. NASA Symposium, Arlington, Virginia, Vol. 2, pp 67-77.
- Goodchild, M.F. **1987b**. A spatial analytical perspective on geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems (IJGIS)*, Vol. 1, N° 4, pp. 327- 334.

- Goodchild, M.F. **1988**. Stepping over the line: technological constraints and the new cartography. *The American Cartographer*, Vol. 15, Nº. 3, pp. 311-319.
- Goodchild, M.F. **1990**. Keynote address: spatial information science. Proceedings, Fourth International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, pp. 107-114.
- Goodchild, M.F. **1991-a**. Geographic Information and Environmental Modeling. Proceeding of the First International Conference on Integrating Geographic Information System, Environmental Modeling, Boulder, CO. pp. 325-342.
- Goodchild, M.F. **1991-b**. Progress on the GIS research agenda. In: Harts, J., Ottens, H.F.L., Sholten, M. J., (eds.), Proceedings of the Second European Conference on Geographical Information Systems (EGIS '91), April 2-5 1991, Bruxelles, Belgique, Vol. 1, pp. 342- 350.
- Goodchild, M.F. **1991-c**. The Technological Setting of GIS. In: Maguire, D.J., Goodchild, M.F., Rhind, D., (eds.), *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Longman, London, Vol. 1, pp. 45-54.
- Goodchild, M.F. ; Haining, R. ; Wise, S. **1992**. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities *International Journal of Geographical Information Systems*, IJGIS, Vol. 6, Nº. 5, pp. 407-423.
- Goodchild, M.F. **1993**. The state of GIS for Environmental Problem-solving. In: Goodchild, M. F., Parks, B.O., Steyaert, L. T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, New York.
- Goodland, J. **1988**. Implications of Sustainable Development. Presentation to Canadian Government Affairs Seminar "World Commission on Environment and Development: Canada's Response". Banque mondiale. Washington. Pp- 325.
- Gottardi, G. ; Venutelli, M. **1997**. Landflow: computer program for the numerical simulation of two-Dimensional overland flow, *Computers & Geosciences*, Vol. 24, Nº1, pp. 77-89.

- Greg Rowe, R. P. F. **1993**. GIS analysis of timber supplies in sensitive domestic watersheds in the Slokan valley of British Columbia, GIS'93 Vancouver, Vol. 1, pp. 306-311.
- Gribb, W.J. **1991**. Integrating visitor surveys, environmental factors, and GIS into recreation planning: Site development at grayroks reservoir, Wyoming, GIS/LIS 91, Vol. 1, pp. 177.
- Hallett, S.H. ; Jones, R.J.A. ; Keay, C.A. **1996**. Environmental Information systems developments for planning sustainable land use, IJGIS, Vol. 10, N° 1, pp. 47-64.
- Harris, J., Gupta, S., Woodside, G., Ziemba, N. **1993**. Integrated Use of GIS and three-dimensional, Finite Element Model: San Gabriel Basin Groundwater Flow Analyses, Environmental Modeling with GIS, pp. 169-172.
- Heller, M. **1984**. Triangulation's algorithms for adaptive terrain modeling, ISSDH, pp. 163-174.
- Hickman, B.L. ; Bishop, M.P. ; Rescigno, M.V. **1995**. Advanced computational methods for spatial information extraction, Computers & Geosciences, Vol. 21, N° 1, pp. 153-173.
- Hinaman, K.C. **1993**. Use of geographic information system to assemble input-Data sets for finite-difference model of ground-water flow, Geographic information systems and water resources, pp. 405-412.
- Hizem, M.H. **1995**. Projet de guide méthodologie d'approche participative dans le domaine de la conservation des eaux et des sols en Tunisie. Rapport du projet PNUD/FAO/TUN/92/001. Appui technique pour la mise en oeuvre de la stratégie nationale de la conservation des eaux et des sols. pp. 25.
- Hopkins, L.D. **1985**. Analytic and cartographic data storage: a two-tiered approach to spatial decision support systems, proceedings of Auto-Carto 7, pp. 283-291.
- Horton, R.E. **1932**. Drainage- Bassins Characteristics, Transactions, American Geophysical Union, pp. 350-361.

- Horton, R.E. **1967**. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 14, pp. 446-460.
- Huston, P. **1989**. Some Thoughts on Population, Equity and Sustainable Development, in Development . Society for International Development, Rome. Pp. 71-91.
- Hutchinson, M.F. **1993**. A continental hydrological assessment of new grid-based digital elevation model of Australia, Advanced in hydrological processes, Vol. 1, pp. 49-62.
- Jacomio, V.M.F. ; Fields, D.E. **1997**. A critical approach to the calibration of watershed model, water resources bulletin, Vol. 33, Nº.1, pp. 143-154.
- Jankowski, P. **1990**. A model management approach to modeling and simulation of natural systems, ISSDH'90, Zürich , Vol.1, pp. 531-540.
- Jankowski, P. ; Nyerges, T.L. ; Smith, A. ; Moore, T.J. ; Horvath, E. **1997**. Spatial group choice: a SDSS tool for collaborative spatial decision-making, IJGIS, Vol. 11, Nº.6, pp. 577-602.
- Jepson, S.K. **1993**. Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models, Advanced in hydrological processes, pp. 35-48.
- Jeton, A.E. ; Smith, J. **1993**. Development of watershed models for two Sierra Nevada basins using GIS, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 251-258.
- Jianping, X. ; Lathrop, R.G. **1995**. Improving simulation accuracy of spread phenomena, International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 9, Nº. 2, pp. 153-168.
- Jones, C.B. ; Ware, J.M. ; Bundy, G.L. **1992**. Multiscale spatial modeling with triangulated surfaces, Proceedings of the 5th international symposium on spatial data handling, August, Charleston, South Carolina USA, Vol. 2, pp. 612-621.



- Julien, P.Y. ; Saghaflan, B. ; Ogden, F.L. **1996**. Raster-Based hydrologic modeling of spatially varied surface runoff, Water resources bulletin, American water resources association , Vol. 31, N° 3, pp. 523-536.
- Karim-Bhuiya, K. ; **1973**. Report on the estimate of long Term Flow of La Grande Complex. Division hydrologie des services hydrauliques, Hydro-Québec, pp 325.
- Keeney, R.L. **1982**. Decision Analysis: An Overview. Operations Research, Vol. 30, N° 5, pp. 803-838.
- Kemp, K.K. **1992-a**. Spatial models for environment modeling with GIS. Proceedings 5<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling ISSDH, August, Charleston, South Carolina, USA. , Vol. 2, pp. 524- 533.
- Kemp, K.K. **1992-b**. Environnemental modeling with GIS: a strategy for dealing with spatial continuity, GIS/LIS 1992, Vol. 1, pp. 397-406.
- Kergreis, A. ; Claude, J. **1991**. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, Actualité Scientifique de l'AUPELF-UREF, Vol. 1, pp. 342.
- Kettal, E. **1996**. Système expert d'information géographique orienté objet (SEIGO2) : application à l'écoulement de l'eau sur les terrains, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon (INSA), France, pp. 210.
- Khelifa, A. **1992**. Nouvelle approche en éléments finis pour la modélisation du phénomène de transport permanent et non permanent. Thèse de maîtrise, département de génie civil, Université Laval, Québec, Canada. Pp. 127.
- Khelifa, A. ; Robert, J.L. ; Ouellet, Y. **1993**. A Douglas-Wang finite element approach for transient advection-diffusion problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, N° 100, pp. 113- 129.
- Kincaid, D.R. ; Gardner, J.L. ; Schreiber, H. A. **1963**. Soil and vegetation parameters affecting infiltration under semi-arid conditions, IAHS publications, Vol. 65, pp. 440-453.

- Kleinstreuer, C., **1978**. Interactive finite element mesh generators for flow systems, *Finite Elements in Waters Resources*, pp. 99-120.
- Knapp, L. **1991**. Volumetric GIS: Generic or domain specific, *GIS/LIS*, Vol. 1, N° .1, pp.
- Knick, S.T. ; Rotenberry, J.T. ; Zarriello, T.J. **1997**. Supervised Classification of Landsat Thematic Mapper Imagery in Semi-Arid rangeland by nonparametric Discriminant Analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* , Vol. 3, N° .1, pp. 79-86.
- Koide, S. ; Wheeler, H.S. **1993**. Subsurface flow simulation of small plot at loch chon, Scoland. *Advanced in hydrological processes*, pp. 141-168.
- Korten, S. ; David Armstrong, C. **1998**. International Assistance, Development and the Global System: Issues for Southeast Asia and Beyond. *The People-Centered Development Forum*, Manille, Philippines. Pp. 25-35.
- Kirkby, M. **1988**. Hillslope runoff processes and models. *Journal of hydrology*. N°. 100, pp.315- 339.
- Kreitner, R. **1992**. Management. Houhton, 5<sup>th</sup> edition, pp. 662.
- Kuniansky, E.L. ; Lowther, R.A. **1993**. Finite-element mesh generation from mappable features, *International Journal of Geographical Information Systems (IJGIS)* Vol. 7, N° 5, pp. 395- 405.
- Laaribi, A. **1995**. Systèmes d'informations géographiques et analyse multicritère : Intégration pour l'aide à la décision à référence spatiale. Thèse de Doctorat, département des sciences géomatiques, Université Laval, Québec, Canada. pp. 209
- Lamary, M., Bel Hadj Kacem, M. S **1997-b**. Les aspects institutionnels de la conservation des eaux et des sols en Tunisie. *The Tunisian Water Forum*.  
<http://www.menet.umn.edu/~TSC/TWF/Submit/>
- Lane, L. J. ; Wallage, D.E. **1976**. Simulation of partial area response from a small semi-arid watershed, *American Water Resources Association*, Arizona section, Arizona. pp. 137-147.

- Lane, L.J. **1982**. Distributed model for small semiarid watershed, Journals of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, HY10, pp. 1114-1131.
- Langran, G. **1993**. Time in Geographic Information Systems, Taylor & Francis, London, New York, pp. 189.
- Larouche, C. ; He, K. ; Bais, J.A. R. **1993**. Evolutionary Spatial modeling of creosote sites on the Bow River, Calgary, Alberta., GIS/SIG' 93, Vol. 1, pp. 430-441.
- Laurini, R. ; Milleret-Raffort, F. **1993**. Les bases de données en géomatiques, traitées des nouvelles technologies, série géomatiques, Hermès, pp. 339.
- Lebrun, Réjean, 1998. Potentiel d'utilisation des outils géomatiques pour l'aménagement visuel des paysages forestiers. Mémoire de maîtrise en sciences géomatiques. Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 118 p.
- Leclerc, G. ; Schaake, J. **1973**. Methodology for Assessing the potential impact of Urban Development on Urban Runoff and the relative Efficiency of Runoff Control Alternatives. MIT technical report. Cambridge, Mass., Ralph M. Parsons Laboratory for water Resources and Hydrodynamics, MIT
- Lee, J. **1991**. Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models, IJGIS, Vol. 5, N<sup>o</sup>. 3, pp. 267-285.
- Lee, D.C. **1994**. Simulating and mapping spatial complexity using multi-scale techniques. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 8, N<sup>o</sup>. 5, pp. 411- 417.
- Lek, S. ; Dimopoulos, I. ; Derraz, M. ; El Ghachtoul, Y. **1996**. Modélisation de la relation pluie débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels, Revue des sciences de l'eau, Vol. 9, N<sup>o</sup>. 3, pp. 319-331.
- Lichty, R.W. ; Karlinger, M.R. **1990**. Climate factor for small-basin flood frequency, Water resources bulletin, American water resources association, Vol. 26, No. 4, pp. 577-586.
- Le Moigne, J.L. **1986**. Intelligence et conception. In: Le Moigne, J.-L., (ed.), Intelligence des mécanismes, Mécanismes de l'intelligence, Fayard, Paris, 240 p.

- Lévine, P. ; Pomerol, J.C. **1995**. The Role of Decision-Maker in DSSs and representation Levels. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, pp.24 -51.
- Llamas, J. **1993**. Hydrologie générale: principes et applications. 2<sup>e</sup> édition, Éditeur Gaëtan Morin, pp. 527.
- Lloyd, E.H. **1978**. An exemple of multi-parameter likelihood influence in hydrology, pp. 150-166.
- Lotti, C. ; Pandolfi, C. ; Gabos, A. **1978**. Stochastic nature of water resources in the context of regional planing, pp. 265-269.
- Looks, A. ; Quick, M.C. **1993**. Hydrology behavior of a mountainous watershed, revue canadienne de génie civil , Vol. 20, N<sup>o</sup>. 3, pp. 1-8.
- Loukas, A. ; Quick, M.C. **1996**. Spatial and temporal distribution of storm precipitation in southwestern British Columbia, Journal of Hydrology, Vol.174, pp. 37-56.
- Luker, S. ; Samson, S.A. ; Schroeder, W.W. **1993**. Development of GIS based hydrologic model for predicting direct runoff volumes, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 303-311.
- Maguire, D. ; Goodchild, M.F. ; Rhind, D. **1991**. Geographical Information Systems: Principles and Applications (volume 2), London: Longman, and New York: Wiley.
- Maguire, D.J. ; Dangermond, J. **1993**. The Functionality of GIS, Geographical Information systems (Chapter 21), pp. 319-335.
- Maguire, D.J. **1993**. An Overview and definition of GIS, Geographical Information systems (Chapter 1), pp. 1-19.
- Maidment, D.R. **1996**. GIS and hydrology modeling an assessment of progress, <http://www.ce.utexas/prof/maidment>.
- Males, R.M. ; Walter, M.G. **1992**. Past, Present and futur of Geographic information systems in water resources. Update Water Resources, the Universities Council on Water resources, Issue N<sup>o</sup>. 8, pp. 183-191.

- Marble, D.F. **1979**. Integrating Cartographic and Geographic Information Systems Education. Technical Papers of the 39<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM), Falls Church, pp. 493-499.
- Martz, L.W. ; Garbrecht, J. **1993**. Generation of network and subwatershed parameters from digital elevation models. Part I: Algorithms and system design of DEDNM, GIS'93, Symposium of Vancouver, Vol. 1, pp. 337-344.
- Martz, L.W. ; Garbrecht, J. **1995**. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and new method. Journal of hydrology, Vol. 167, pp. 393-396.
- McCuen, R.H. **1976**. The anatomy of the modelling process. In • Mathematical models for environmental problems •, John Wiley & Sons, Inc., pp.104-412
- McGuire, T.W. ; Melone, N.P. ; Lawrence, W.C. **1995**. Effects of DSS, modeling and exogenous factor quality and confidence. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Hawaii international conference on system sciences. Pp-152-159.
- McKibben, J.W. ; Gautsh, J.M. **1992**. Wastewater flow estimating model, GIS/LIS 1992, Vol. 1, pp. 532-553.
- McNoleg, O. **1996**. The integration of GIS, remote sensing, expert systems and adaptive co-charging for environmental habitat modeling of the highland haggis using object-oriented, fuzzy-logic and neural-network techniques. Computers & Geosciences, Vol. 22, 5, pp. 585-588.
- Melon, N.P ; McGiure, T.W. ; Wai Chen, L. ; Gerwing, T.A. **1995**. Effects of DSS, modeling, and Exogenous Factors on Decision Quality and Confidence. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, pp. 152 -159.
- Moore, I.D. ; O'Loughlin, G.R. ; Burch, G.J. **1988**. A Contour-Based Topographic Model for Hydrological and Ecological Application. Earth Surface processes and Landforms, Vol.13, pp. 305-320.

- Moore, I.D. ; Grayson, R.B. ; Ladson, A.R. **1993-a**. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Advanced in hydrological processes*, Vol. 1, pp. 7-34.
- Moore, I.D. ; Turner, A.K. ; Wilson, J.P. ; Jenson, S.K. ; Band, L.E. ; **1993-b**. GIS and Land-surface-Subsurface Process Modeling, *Environmental Modeling with GIS*, pp. 196-229.
- Morin, G. **1991**. Le modèle hydrologique CEQUEAU, Ed. AUPELF-UREF, pp. 23-39.
- Morris, D.G. ; Flavin, R.W. **1993**. A digital terrain model for hydrology pp. 250-262.
- Munn, R.E. **1989**. Toward Sustainable Development: An Environmental Perspective, in *Development*. Society for International Development, Rome. Pp. 245.
- Murphy, J.B. ; Wallance, D.E. ; Lane. ; L.J. **1977**. Geomorphic parameters hydrograph characteristics in the Southwest, *Water Bulletin*, American Water Resources Association, Vol. 13, No.1, pp. 25-2-38
- Nemec, J. ; Rodier, J.A. ; **1979**. Streamflow characteristics in Areas of low precipitation with a special reference to low and high flow. *IAHS Publication*, N°. 128, pp.126-140.
- Norrie, D.H. ; Vries, G. **1973**. *The Finite Element Method*, Wiley, London.
- Nyerges, T.L. **1992**. Coupling GIS and Spatial Analytic Models. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling (ISSDH'92)*. Charleston, South Carolina, USA, Vol. 2, pp. 534- 543.
- O'Callaghan, J.F. ; Garner, B.J. **1993**. Land and geographical information systems in Australia, *Geographical Information systems (Chapter 39)* pp. 57-69.
- Oliveira, J.L. ; Pires, F. ; Medeiros, C B. **1997-a**. An Environment for Modeling and Design of Geographic Applications, *Geoinformatica* , Vol. 1, 1, pp. 1-58.
- Olivera, F. ; Maidment, D.R. **1997-b**. Runoff computation using spatially distributed Terrain parameters, <http://www.cd.utexas.edu>.
- Openshaw, S. **1990**. Spatial Analysis and Geographical Information Systems: a review of progress and possibilities. In: Scholten, H.J., Stillwell, J.C.H. (eds.),

Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 156-163.

- Oreskes, N.K. ; Shrader, F. ; Belitz, K. **1994**. Verification, Validation, and confirmation of numerical models in Earth Sciences, pp. 641-646
- Orzol, L.L. ; Mcgrath, T.S. **1993**. Summary of modifications of the U.S geological survey modular, finite difference, ground-water flow model to read and write geographic information systems files, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 423-430.
- Osborn, H.B. ; Bernard, K.G. **1973**. Thunderstorm runoff on the Walnut Gulf experimental watershed, Arizona, USA. IAHS Publication, No. 9, pp . 455-464.
- Osmond, D.L. ; Gannon, R.W. ; Gale, J.A. ; Line, D.E. ; Knott, C.B. ; Phillips, K.A. ; Turner, M.H. ; Foster, M.A. ; Lehning, D.E. ; Coffey, S.W. ; Spooner, J. **1997**. Watershed DSS: A decision support system for watershed-scale nonpoint source water quality problems, water resources bulletin, Vol. 33, No .2, pp. 327-341.
- Ozemoy, S. ; Sicherman. **1981**. Evaluating computerized geographic information system using decision analysis. Interfaces Vol. 11, pp. 92-108.
- Parker, H.D. **1988**. The unique qualities of geographic information system: a commentary. Photogrammetric engineering and remote sensing. Vol. 54, No. 11, pp. 1547- 1549.
- Perez, A. **1990**. The International Center for Human Rights and Democratic Development: A New Approach to Politics and Democracy in Developing Countries? Manuscrit inédit., pp. 185.
- Pike, R.J. ; Acevedo, W. **1991**. Topographic grain automated from digital elevation models. Proceedings of 9Th Auto-carto 9, Baltimore, Maryland. USA, pp. 128-137.
- Pilon, P.G. ; McIntyre, J.B. **1993**. Compiling three-dimensional resource information data sets for integrated watershed analysis using airborne digital images, digital terrain data and GIS., GIS'93 Symposium, Vancouver, Vol. 1, pp. 313-318.

- Planchon, O. **1991**. La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation, Ed AUPELF-UREF, pp. 59-75.
- Puech, C. ; Vine, P. ; Weesakul, U. **1991**. Hydrologie et télédétection : Utilisation d'un découpage géographique selon la végétation pour expliquer les écoulements annuels de petits bassins versants méditerranéens, Ed AUPELF-UREF, pp. 53-77.
- Pouliot, J. **1994**. SAGATELE: Système d'Aide pour la Gestion et l'Aménagement du Territoire pour la lutte contre l'Érosion, Rapport du projet de recherche Canada-Tunisie, Centre de recherche de l'Université Laval, pp. 120.
- Puente, C.E. **1996**. A new approach to hydrologic modeling: derived distributions revisited, Journal of Hydrology, Vol. 187, pp. 65-80.
- Puente, C.E. ; Castollo, P. A. **1996**. On the fractal structure of networks and dividers within a watershed, Journal of Hydrology, Vol. 187, pp. 173-181.
- Pullar, D. **1991**. Spatial overlay with inexact numerical data, Auto-carto 10, pp. 313-320.
- Puppo, E. ; Davis, L. ; Menthon, D. ; Ten, Y.A. **1994**. Parallel terrain triangulation, IJGIS 1994, Vol. 8, N° 2, pp. 105-128.
- Qiming, Z. **1992**. Relief shading using digital elevation models, Computers & Geosciences, Vol. 18, N° 8, pp. 1035-1045.
- QUETIN, B. **1987**. Apports des modèles de simulation de la turbulence des lacs, IHAR EPFL, pp. 77-82.
- Quinn, P. ; Beven, K. **1993**. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, advanced in hydrological processes, pp. 63-83.
- Rango, A. ; Forster, J. ; Salomonson, V.V. **1975**. Extraction and utilization of space acquired Physiographic data for water ressources development, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, Vol. 11, N°6, pp. 1245-1255.



- Raper, J. **1989**. Three-dimensional applications in Geographical Information System. Department of Geography, Birkbeck College, University of London. Pp.189
- Raper, J.F. ; Kelk, B. **1993**. three-dimensional GIS. In Maguire, D.J. ; Goodchild, M.F. ; Rhind, D.W. ; GIS Volume 1: Principles, Langman Science & Technical, pp. 229- 317.
- Reddy, J.N. **1986**. Applied Functional Analysis and variationnel Methods in Engineering. (New York, N.Y.: McGraw-Hill).
- Rhind, D. **1988**. A GIS research agenda. International Journal of Geographical Information Systems, IJGIS, Vol. 2, pp. 23-28.
- Richards, C.J. ; Roaza, H. ; Roaza, R.M. **1993**. Integrating geographic information system in well field design and aquifer impact analysis using the MODFLOW finite element modeling technique, Geographic Information Systems and Water Resourcesm pp. 413-422.
- Richards, D.R. ; Jones, N.L. ; Lin, H.C. **1993**. Graphical Innovations in Surface water Flow Analysis, Environmental Modeling with GIS, pp. 188-195.
- Richer, O. ; Chevallier, J.J. **1992**. SIRS pour la récolte forestière: outil d'inventaire ou moyen de planification? Conférence canadienne sur les SIG/GIS. Ottawa, mars, pp. 291-302.
- Robert, J.F. ; Chandry, H. M. **1990**. Explicit method for 2-D Transient Free-Surface Flows. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, N<sup>o</sup>. 8.
- Robert, J.L. **1983**. Modélisation tridimensionnelle des écoulements à surface libre, permanent et non permanent par la méthode des éléments finis. Thèse de Doctorat, Université Laval, pp 223, Québec, Canada, 350.
- Robert, J.L. **1993-a**. Développement d'un élément de contrôle du débit dans un modèle hydrodynamique par la méthode des éléments finis. Rapport GCS 93-04, département de génie civil, Université Laval, pp. 1-43, Québec, Canada.
- Robert, J.L. **1993-b** Méthode Numérique en ingénierie. Note de cours, département de génie civil, Université Laval. Pp. 80.

- Robert, J.L. ; Hossein Hamadi, M. **1995**. Introduction des conditions réelles de débit aux limites d'un modèle hydrodynamique. *Canadian Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 1133-1142. Canada.
- Roche, M. **1967**. Essai de définition d'un hydrogramme standard, dans *Compte rendu du colloque international d'hydrologie*, Fort Collins (Colorado), pp- 325-344.
- Roy, B. ; Slowinski, R. ; Treichel, W. **1992**. Multicriteria Programming of Water Supply Systems for Rural Areas. *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, N°.1, pp. 13- 31.
- Roy, B. ; Bouyssou, D. **1993**. Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. *Economica*, Paris.
- Sadoux, R. **1996**. Extrait du rapport de la banque mondiale «l'eau: L'or de l'an 2000». *Journal Jeune Afrique*, N°. 1835, pp. 78-87
- Schärlig, A. **1985**. Décider sur plusieurs critères : Panorama de l'aide à la décision multicritère. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.
- Serhir, N. ; Marche, C. **1992**. La simulation assistée par ordinateur dans le contrôle et l'utilisation optimale des ressources hydriques, *revue canadienne de génie civil* , Vol. 19, N°. 3, pp. 432-440.
- Seytoux, H.J.M. **1978**. Some recent developpments in physically based rainfall-runoff modeling, pp. 37-51.
- Sherman, L.K. **1932**. Stream Flow from Rainfall by the Unit graphs Method, dans *Engineering News Records*, Vol. 108.
- Simon, H.A. **1960**. *The New Science of Management Decision*. Harper and Row, New York.
- Simon, H.A. **1987**. Two heads are better than one: the collaboration between AI and OR. *Interfaces*, Vol. 17, pp. 8-15.
- Simos, J. **1989**. Évaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation. *Collection Méta*, Presses

Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, p. 261

- Smith, T.R. ; Menon, S. ; Starr, J.L ; Estes, J.E. **1987**. Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems, Vol. 1, pp. 13- 31.
- Soldati, S. **1995**. Interface à l'usager pour l'élaboration des scénarios d'aménagement du territoire. Mémoire présenté pour l'obtention du titre d'ingénieur de génie rural spécialisation «mensuration » géomatique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, pp. 230. Suisse.
- Soliz, J.G. **1994**. Établissement d'un modèle mixte pour les conditions hydrologiques complexes, Thèse de Doctorat, Département de génie civil, Université Laval, pp. 211.
- Snodgrass, R. ; Ahn, I. **1985**. A taxonomy of time in databases: Proceedings of the SIGMOD'85 Conference , New York : ACM, pp. 236-245.
- Srinivasan, R. ; Arnold, J.G **1994**. Integration of basin-scale water quality model with GIS. water resources bulletin , Vol. 30, N° 3, pp. 453-462.
- Srinivasan, R. ; Engel, B.A. **1994**. A spatial decision support system for assessing agricultural nonpoint source pollution, water resources bulletin (AWRA), Vol. 30, N° 3, pp. 441-452.
- Strang, G. ; Fix, G.J. **1973**. An Analysis of Finite Element Method. prentice-Hall, New-Jersey. 1973.
- Strong, G. ; Maurice, F. **1989**. Ending Hunger through Sustainable development, in Development 1989, Society for International Development, Rome, pp. 287-325.
- Tachikawa, Y. ; Shiiba, M. ; Takasao, T. **1993**. Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 163-172.
- Taniguchi, T. ; Holz, K-P. ; Ohta, C. **1992**. Grid generation for 2D flow problems, International journal for numerical methods in fluids , Vol. 15, pp. 985-997.

- Tarboton, D.G. ; Bras, R.L. ; Rodriguez-Iturbe, I. **1993**. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Advanced in hydrological processes*, pp. 85-104.
- Taylhardat, Violeta, 1996. Apport des outils de simulation visuelle dans une méthode d'analyse de paysages forestiers. Mémoire de maîtrise en sciences géomatiques, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 93 p.
- Taylor, C.T. **1985**. Map symbols for use in The three dimensional graphic display of large scale digital terrain models using microcomputer technology, *proceedings of Auto-Carto 7*, pp. 526-531.
- Thapa, K. **1991**. Data compression and critical points detection using normalized symmetric scattered matrix, *Proceedings of 9<sup>th</sup> Auto-carto 9*, Baltimore, Maryland, USA, Vol. 1, pp. 78-89.
- Thomas, T.G. ; Williams, J.J.R. **1994**. Simulation numérique d'écoulements laminaire à surface libre, *Journal of hydraulic research*, Vol. 32, N° 4, pp. 599-613.
- Thomson, K. ; Pouliot, J. ; Chevallier, J.J. **1994**. Application Intégrée des techniques géomatiques pour l'aménagement anti-érosif du territoire agricole, pp. 1-10.
- Tkach, R. J. **1997**. A new approach to multi-criteria decision making in water resources, <http://www.ce.umonitoba.ca/~rob/>.
- Tribe, A. **1990**. Towards the automated recognition of landforms (valleys heads) from digital elevation models, *ISSDH' 90*, Zürich, Switzerland, Vol. 1, pp. 45-53.
- Tsai, V.J.D. ; Vonderohe, P. **1991**. A generalized algorithm for the construction of Delaunay triangulations in Euclidean n-space., *GIS/LIS '91*, Vol. 1, pp. 562-572.
- Tsai, V.J.D. **1993**. Delauney triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm, *IJGIS*, Vol. 7, N° .6, pp. 501-524.

- Turban, E. **1990**. Decision Support and Expert Systems: Management support systems. 2<sup>nd</sup> edition, Chapter 2 pp. 31-67, chapter 3, pp. 73-101.
- Turban, E. ; Meredith, J. **1991**. Fundamentals of Management Science. Homwood, Illinois, 5<sup>th</sup>, pp. 85-112.
- Turk, A.G., **1990**. Towards an understanding of human-computer interaction aspects of geographic information systems, Cartography, Vol. 19, N°1, pp. 31-60.
- UICN .**1998**. Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources. World Conservation Strategy for the 1990s. Première ébauche. World Conservation Union, Gland, Suisse.
- UICN. **1989**. From Strategy to Action: The IUCN Response to the Report of the World Commission on Environment and Development. UICN, Gland, Suisse.
- UICN. **1990**. Caring for the World: A Strategy for Sustainability. Second Draft, June **1990**. World Conservation Union (IUCN), Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et World Wildlife Fund for Nature (WWF), Gland, Suisse.
- Van Deursen, W.P.A. ; Kwadijk,J. **1990**. Using the watershed tools for modeling the rhine cathment, EGIS'90 , Vol. 1, N°1, pp. 254-262.
- Van Kreveld, M., **1996**. Efficient methodes for isoline extraction from a TIN, IJGIS, Vol. 10, N° 5, pp. 523-540.
- Vieux, B.E. ; Farjallah, N.S. **1996**. Temporel and spatial aggregation of NEXRAD rainfall estimates on distruted storm runoff simulation. American Society of Civil Engineering Journal of Computing in civil Enginnering special Issue on geographic information analysis. <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/sf>.
- Warrick, R.D. ; Short, D. **1994**. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes. Water resources research, Vol. 10, N° 4, pp. 1045-1055.

- Watson, P.M. ; Wadsworth, R.A. **1996**. A computerized decision support system for rural policy formulation, *IJGIS*, Vol. 10, N° .4, pp. 425-440.
- Wickham, J.D. ; O'Nelli, R.V. ; Ritters, K.H. ; Wade, T.G. ; Jones.B. **1997**. Sensitivity of Selected Landscape Pattern Metrics to Land-Cover Misclassification and Differences In Land-Cover Composition, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63, N° 4, pp. 397-402.
- Wolf, G.W. **1992**. Hydrologic applications of weighted surface networks, *Proceedings of the 5th international symposium on spatial data handling*, August, Charleston, South Carolina USA, Vol. 2, pp. 567-579.
- Wong, J.L.G.. **1993**. Evaluating the water resource impacts of afforestation in upland Britain, *GIS'93 Symposium of Vancouver*, Vol. 1, pp. 319-324.
- Wright, R. ; Hoinkes, R. **1996**. Computational issues in landscape planning: implication for decision making in sub-watersheds. Centre for Landscape research, <http://www.clr.toronto.edu:1080/PAPERS95/SUBWATER>
- Xiandeng, H. **1993**. Intelligent cartographic modeling for resources management. *Symposium on geographic information systems and water resources*. American Water Resources Association. Alabama. USA. pp. 183-191.
- Xiong, J. ; Wang, L., **1993**. A preliminary study of river order unit hydrograph for flood forecasting with GIS techniques: a case study of Xixi basin, *Geographic Information Systems and Water Resources*, pp. 293-300.
- Xu, J. ; Lathrop, R.G. **1995**. Improving simulation accuracy of spread phenomena, *IGIS*, Vol. 9, N° 2, pp. 153-168.
- Yamada, T. ; Fujita, K. ; Hino, M. **1978**. The Role of Infiltration in runoff, pp. 52-78.
- Yan, J. ; Smith, K.R. **1994**. Simulation of integrated surface water and ground systems-model formulation, *Water resources bulletin*, American water resources association, Vol. 30, N° . 5, pp. 879-890.
- Yang, W. ; Gold, C. M. **1994**. The architecture of a dynamic distributed GIS, *Proceedings of the Canadian conference on GIS*, Ottawa, Canada, Vol. 2, pp. 1185-1192.

- Yang, X. ; Parent, E. ; **1996**. Analyse de fiabilité en modélisation hydrologique: concepts et applications au modèle pluies-débits GR3, Revue des sciences de l'eau, Vol.9, N°1, pp. 31-49.
- Yin, Z. ; Lee Williams, T.H. **1997**. Obtaining Spatial and Temporel Vegetation Data from Leanest MSS and AVHRR/NOAA Satellite Images for Hydrological models, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , Vol. 63, N°1, pp. 69-77.
- Zelt, R.B. ; Dudgeon, J.T. **1993**. Simulation and mapping of soil-water conditions in the great plans, Geographic Information Systems and Water Resources, pp. 193-200.
- Zengshan, D. **1994**. GIS for groundwater modeling the integration of Ilwis and PM (MODFLOW), GIS'Ottawa 1994, Vol. 1, pp. 373-381.
- Zhang, W. ; Cundy, T.W. **1989**. Modeling of two-dimensional Overland flow, Water resources research, Vol. 25, N° 9, pp. 2019-2035.
- Zienkiewicz, O.C. **1969**. The finite Element Method In Engineering Science, McGraw-Hill, New York, 1<sup>st</sup> edition, 1967,
- Zienkiewicz, O.C. ; Taylor, R.L. **1989**. The Finite Element Method, Fourth edition Volume 1. Basic Formulation and linear problems (London, UK.: McGraw-Hill).
- Zollweg, J.A. **1994**. Effective use of a geographic information system rainfall-run-off modeling. Ph.D. Thesis, Cornell university, pp.172, USA.

## 10 Annexes

Dans ce chapitre, le modèle mathématique développé et présenté au chapitre 6 sera discrétisé par éléments, ainsi que la matrice tangente.

### 10.1 Formulation par éléments finis

#### 10.1.1 Forme forte

La forme forte du modèle se présente ainsi :

$$\int_D \delta U \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U \partial U}{\partial x} + \frac{V \partial U}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) \right) dD - \int_D \delta U \left( v_i \nabla^2 U + \frac{i_o U}{h} \right) dD = 0 \quad (10.1)$$

$$\int_D \delta V \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial V}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) \right) dD - \int_D \delta V \left( v_i \nabla^2 V + \frac{i_o V}{h} \right) dD = 0 \quad (10.2)$$

$$\int_D \delta h \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \eta U}{\partial x} + \frac{\partial \eta V}{\partial y} \right) dD = 0 \quad (10.3)$$

#### 10.1.2 Intégration par partie «forme faible »

Les formes (1) et (2) deviennent:

$$\begin{aligned} & \int_D \delta U \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U \partial U}{\partial x} + \frac{V \partial U}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) dD \\ & + \int_D v_i \left( \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) dD - \oint \delta U v_i \frac{\partial U}{\partial n} ds - \int_D \delta U \left( i \frac{U}{h} \right) dD = 0 \end{aligned} \quad (10.4)$$

$$\begin{aligned} & \int_D \delta V \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial V}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C_c^2 h} \right) dD \\ & + \int_D v_i \left( \frac{\partial \delta V}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial \delta V}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} \right) dD - \oint \delta V v_i \frac{\partial V}{\partial n} ds - \int_D \delta V \left( i \frac{V}{h} \right) dD = 0 \end{aligned} \quad (10.5)$$



### 10.1.3 Forme faible de l'expression de la profondeur d'eau «h»

L'expression de la forme faible de l'équation continuité s'écrit de la manière suivante:

$$\int_D \delta h \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \eta U}{\partial x} + \frac{\partial \eta V}{\partial y} \right) dD = \int_D \delta h h dD - \int_D \text{grad} \delta h (\eta U) dD + \int_S \delta h \eta U_n dS \quad (10.6)$$

### 10.1.4 Transformation des dérivées

L'application du principe de dérivation en chaîne pour le calcul des dérivées en  $\xi$  d'une fonction nous permet d'écrire :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (10.7)$$

ou encore :

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \right\} = [J] \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \right\} \quad (10.8)$$

$J$  est la matrice jacobienne de la transformation géométrique qui s'obtient de la façon suivante :

$$[J]_{2D} = \begin{pmatrix} \langle N, \xi \rangle \\ \langle N, \eta \rangle \end{pmatrix} \left[ \{x_n\} \quad \{y_n\} \right] \quad (10.9)$$

Dans laquelle  $N$  représente la fonction de transformation géométrique et  $x_n, y_n$  sont les coordonnées des noeuds de l'élément réel. Dans la formulation variationnelle nous avons besoin des dérivées en  $x$  d'une fonction on fait apparaître des dérivées en  $\xi$ . Cette forme s'obtient en inversant  $J$ .

$$\{\partial_x\} = [J]^{-1} \{\partial_\xi\} = [j] \{\partial_\xi\} \quad (10.10)$$

### 10.1.5 Transformation des intégrales

Le changement de variable d'une fonction d'une fonction sur un élément de référence réel  $V$  nous conduit à une intégration en  $\xi$  et  $\eta$  sur un élément de référence. Sachant que l'élément de surface  $dD$  est le produit mixte:

$$dD = (dx\vec{i} \times dx\vec{j}) \quad (10.11)$$

et avec la matrice jacobienne de transformation géométrique on obtient

$$dD = \det(J) d\xi d\eta \quad (10.12)$$

Par conséquent l'intégrale d'une fonction sur un élément de référence par changement de variable s'écrit:

$$\int_{D'} f(x, y) dx dy = \int_{D'} f(\xi, \eta) \det(J) d\xi d\eta \quad (10.13)$$

où:

- $D_e$ : est le domaine élémentaire réel ;
- $D_r$ : est le domaine élémentaire de référence.

#### 10.1.6 Intégration numérique

L'utilisation de la méthode d'intégration directe du modèle variationnel est une technique complexe conduisant souvent à de nombreux risques d'erreurs. Le recours à la méthode d'intégration dite «réduite» est populaire en modélisation par éléments finis. La précision du résultat est fonction du nombre de points utilisés. Pour l'élément T3-3 (triangle à trois nœuds), la méthode est celle de Gaus-Hammer (Dhatt et Touzot 1981) utilisant quatre points d'intégration. Par ailleurs la justification du nombre de point d'intégration relié d'une part à la précision escompté et du degré du polynôme d'interpolation utilisé dans la discrétisation.

#### 10.1.7 Discrétisation de la forme intégrale

Afin de transformer le modèle intégro-différentiel en un système d'équations différentielles, il suffit de remplacer les fonctions continues  $U$ ,  $\delta U$ , etc., par des fonctions paramétriques obtenues par approximation nodale c'est à dire, utilisant comme paramètres les valeurs discrètes et les fonctions localisées en différents noeuds de l'élément. Dans le cas de notre modèle, nous utiliserons des éléments triangulaires à trois noeuds.

Les fonctions d'approximation nodale seront basées sur une fonction polynomiale quadratique pour les vitesses (U, V) et elles seront linéaires pour les hauteurs d'eau (h). Ainsi les fonctions d'approximation seront :

- Fonction test ou pondération type Galerkin: l'espace des fonctions  $y$  est identique à l'espace de U. En utilisant la notion de la première variation, nous écrivons que

$$\psi = \delta U = \langle \delta U, \delta V, \delta \eta \rangle \quad (10.14)$$

Les fonctions d'approximation nodale se présentent ainsi

$$\begin{aligned} U &= \langle N \rangle \{U\} \\ \text{Pour } U : \quad U_{,x} &= \langle N_{,x} \rangle \{U\} \\ U_{,y} &= \langle N_{,y} \rangle \{U\} \end{aligned} \quad (10.15)$$

$$\begin{aligned} V &= \langle N \rangle \{V\} \\ \text{Pour } V : \quad V_{,x} &= \langle N_{,x} \rangle \{V\} \\ V_{,y} &= \langle N_{,y} \rangle \{V\} \end{aligned} \quad (10.16)$$

$$\begin{aligned} h &= \langle N \rangle \{h\} \\ \text{Pour } h : \quad h_{,x} &= \langle N_{,x} \rangle \{h\} \\ h_{,y} &= \langle N_{,y} \rangle \{h\} \end{aligned} \quad (10.17)$$

$$\begin{aligned} \xi &= \langle N \rangle \{\xi\} \\ \text{Pour } \xi : \quad \xi_{,x} &= \langle N_{,x} \rangle \{\xi\} \\ \xi_{,y} &= \langle N_{,y} \rangle \{\xi\} \end{aligned} \quad (10.18)$$

En tenant compte des expressions des approximations nodales (10.15, 10.16, 10.17, v18), les relations (10.4) et (10.5) donnent le résultat final suivant :

$$\begin{aligned}
W_x = & \int_D \{N\} \frac{du}{dt} dD + \int_D \{N\} \{N\} \{U\} \{N_{,x}\} \{U\} dD + \int_D \{N\} \{N\} \{V\} \{N_{,y}\} \{U\} dD + \\
& \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{h\} g dD + \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{\xi\} g dD + \int_D \{N\} \{N\} \{U\} \alpha^2 \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h} dD + \\
& \int_D \left( C_v \{N\} \{h\} \sqrt{U^2 + V^2} dD \right) \left[ \{N_{,x}\} \{N_{,x}\} \{U\} + \{N_{,y}\} \{N_{,y}\} \{U\} \right] \\
& - \oint_s \{N\} \frac{\partial U}{\partial n} dS - \int_D \{N\} \{N\} \{U\} \frac{i}{h} dD = 0
\end{aligned} \tag{10.19}$$

$$\begin{aligned}
W_y = & \int_D \{N\} \frac{dV}{dt} dD + \int_D \{N\} \{N\} \{U\} \{N_{,x}\} \{V\} dD + \int_D \{N\} \{N\} \{V\} \{N_{,y}\} \{V\} dD \\
& + \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{h\} g dD + \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{\xi\} g dD + \int_D \{N\} \{N\} \{V\} \alpha^2 \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h} dD \\
& + \int_D \left( C_v \{N\} \{h\} \sqrt{U^2 + V^2} dD \right) \left[ \{N_{,x}\} \{N_{,x}\} \{V\} + \{N_{,y}\} \{N_{,y}\} \{V\} \right] - \oint_s \{N\} \frac{\partial V}{\partial n} dS \\
& - \int_D \{N\} \{N\} \{V\} \frac{i}{h} dD = 0
\end{aligned} \tag{10.20}$$

### 10.1.8 Calcul de la matrice tangente élémentaire

La forme incrémentale de W s'écrit:

$$\begin{aligned}
\Delta W_u^e = & \int_D \delta U \frac{\partial \Delta U}{\partial t} + \int_D \delta U \left( \Delta U \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial \Delta U}{\partial x} \right) dD + \int_D \delta U \left( \Delta V \frac{\partial U}{\partial y} + V \frac{\partial \Delta U}{\partial y} \right) dD \\
& - \int_D \delta U (F \Delta V) dD + \int_D g \delta U \frac{\partial \Delta h}{\partial x} dD + \int_D g \delta U \frac{\partial \Delta \xi}{\partial x} dD \\
& + \int_D \left( \alpha^2 \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h} \left[ \Delta U \delta U + \delta U \frac{U^2 \Delta U + UV \Delta V}{U^2 + V^2} - \delta U \Delta h U \right] \right) dD \\
& + \int_D v_i \left( \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial \Delta U}{\partial x} + \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial \Delta U}{\partial y} \right) dD - \int_D \frac{i}{h^2} \delta U (\Delta U h + U \Delta \Delta) dD = 0
\end{aligned} \tag{10.21}$$

$$\begin{aligned}
\Delta W_v^e &= \int_D \delta V \frac{\partial \Delta V}{\partial t} dD + \int_D \delta V \left( \Delta U \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial \Delta V}{\partial x} \right) dD + \int_D \delta V \left( \Delta V \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial \Delta V}{\partial y} \right) dD \\
&- \int_D \delta V (F \Delta U) dD + \int_D g \delta V \frac{\partial \Delta h}{\partial y} dD + \int_D g \delta V \frac{\partial \Delta \xi}{\partial y} dD \\
&+ \int_D \left[ \alpha^2 \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h} \left[ \Delta V \delta V + \delta V \frac{U^2 + V^2}{U^2 + V^2} (U^2 \Delta U + UV \Delta V) - \delta V \Delta h U \right] \right] dD \\
&+ \int_D v_t \left( \frac{\partial \delta V}{\partial x} \frac{\partial \Delta V}{\partial x} + \frac{\partial \delta V}{\partial y} \frac{\partial \Delta V}{\partial y} \right) dD - \int_D \frac{l}{h^2} \delta V (\Delta V h + V \Delta h) dD = 0
\end{aligned} \tag{10.22}$$

$$\begin{aligned}
\Delta W_\eta^c &= \int_D \delta \eta \left[ \frac{\partial \Delta h}{\partial t} + \eta \frac{\partial U}{\partial x} + \eta \frac{\partial \Delta V}{\partial y} + U \frac{\partial \Delta h}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta h}{\partial y} \right] dD \\
&+ \int_D \delta \eta \left[ \Delta U \frac{\partial \eta}{\partial x} + \Delta V \frac{\partial \eta}{\partial y} + \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \Delta h \right] dD = 0
\end{aligned} \tag{10.23}$$

En introduisant les fonctions d'approximations présentées (10.37, 10.38, 10.39, 10.40), nous obtenons la forme faible discrète élémentaire.

$$\begin{aligned}
\Delta W_u &= \int_D \{N\} \frac{\partial U}{\partial t} dD + \int_D \left[ \{N\} \{N\} \frac{\partial U}{\partial x} + \{N\} \{N\} \{U\} \{N\} \right] dD \\
&+ \int_D \{N\} \{N\} \frac{\partial U}{\partial y} + \{N\} \{N\} \{V\} \{N_{,y}\} dD + \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{h\} g dD + \int_D \{N\} \{N_{,x}\} \{\xi\} g dD \\
&+ \int_D \left[ B_1 + B_2 + \left( U^2 + UV - \frac{1}{h} \right) \{N\} \{N\} \right] dD + \int_D v_t \left[ \{N_{,x}\} \{N_{,x}\} + \{N_{,y}\} \{N_{,y}\} \right] dD \\
&- \int_D \left[ \{N\} \{N\} \frac{l}{h} + \{N\} \{N\} \frac{U}{h^2} \right] dD = 0
\end{aligned} \tag{10.24}$$

$$\begin{aligned}
\Delta W_v &= \int_D \{N\} \frac{\partial V}{\partial t} dD + \int_D \left[ \{N\} \langle N \rangle \frac{\partial U}{\partial x} + \{N\} \langle N \rangle \{U\} \langle N_{,x} \rangle \right] dD \\
&+ \int_D \{N\} \langle N \rangle \frac{\partial U}{\partial y} + \{N\} \langle N \rangle \{V\} \langle N_{,y} \rangle dD \\
&+ \int_D \{N\} \langle N_{,y} \rangle \{h\} \rho dD + \int_D \{N\} \langle N_{,y} \rangle \{\xi\} \rho dD \\
&+ \int_D \left[ B_1 + B_2 + \left( U^2 + UV - \frac{1}{h} \right) \{N\} \langle N \rangle \right] dD \\
&+ \int_D v_t \left[ \{N_{,x}\} \langle N_{,x} \rangle + \{N_{,y}\} \langle N_{,y} \rangle \right] dD \\
&- \int_D \left[ \{N\} \langle N \rangle \frac{i}{h} + \{N\} \langle N \rangle \frac{V}{h^2} \right] dD = 0
\end{aligned} \tag{10.25}$$

## 10.2 Transfert des données du « TIN » vers « MEF »

La structure des données du MNT générée à l'aide du SIG n'est pas compatible avec celle de l'environnement MEFL3D, le programme suivant traduit l'algorithme qui a été développé dans cette recherche permettant ainsi de structurer les données en provenance du TIN.

```

C=====C
C
C          TIN-MEF
C
C Extraction d'une base de données MNT des fichiers de coordonnées
C et de connectivités de format MEFL3D
C
C La BD MNT contient les informations suivantes :
C
C - 1 mot-clef NODES suivi d'une liste de no. de noeuds et des
C   coordonnées x, y et z qui lui sont associés,
C
C - 1 mot-clef EDGES suivi d'une liste de no. de segments, des
C   no. de noeuds le définissant et d'un code indiquant si le segment
C   appartient au contour (0) ou pas (1),
C
C - 1 mot-clef TRIANGLES suivi d'une liste de no. de triangles et des
C   no. de segments le définissant.
C
C=====C

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      REAL*8 N
      CHARACTER*9 MOTCLE
      CHARACTER*80 NOMFIC
      DIMENSION XYZ(3,20000),KSEG(2,40000),KTRI(3,30000)
      DATA MTIN/10/,MCOR/11/,MELE/12/

C=====C
C
C          OUVERTURE DES FICHIERS
C
C=====C
      WRITE(*,*)' NOM DU FICHIER A TRANSFORMER:'
      READ(*,'(A)') NOMFIC
      OPEN(MTIN,file=NOMFIC,status='OLD',err=999,iostat=IOERR)
C
      WRITE(*,*)' NOM DU FICHIER DE COORDONNEES A GENERER:'
      READ(*,'(A)') NOMFIC
      OPEN(MCOR,file=NOMFIC,status='UNKNOWN',err=999,
&         iostat=IOERR)
C
      WRITE(*,*)' NOM DU FICHIER DE CONNECTIVITES A GENERER:'
      READ(*,'(A)') NOMFIC
      OPEN(MELE,file=NOMFIC,status='UNKNOWN',err=999,
&         iostat=IOERR)

```

```

      GO TO 1
C
999  WRITE(*, '(I10,A)') ' ERREUR ', IOERR,
    &      ' A L'OUVERTURE DU FICHER: ', NOMFIC
      STOP

C=====C
C
C   LECTURE DES DECALAGES ET FACTEURS D'EHELLES
C
C=====C
1   WRITE(*,*) ' DECALAGES EN X,Y ET Z:'
    READ(*,*) DX,DY,DZ
    WRITE(*,*) ' FACTEURS D'EHELLES EN X,Y ET Z:'
    READ(*,*) FX,FY,FZ

C=====C
C
C   LECTURE DES COORDONNEES DES NOEUDS
C
C=====C
      NNT=0
10  READ(MTIN, '(A)') MOTCLE
    IF(MOTCLE.EQ.'NODES') THEN
      J=1
15  READ(MTIN, *, ERR=100) N, (XYZ(I,J), I=1,3)
      NNT=NNT+1
      J=J+1
      GO TO 15
    ENDIF
    GO TO 10
100 WRITE(*,*) NNT, ' NOEUDS TROUVES'
     REWIND(MTIN)

C=====C
C
C   LECTURE DES CONNECTIVITES DES SEGMENTS
C
C=====C
      NSG=0
20  READ(MTIN, '(A)') MOTCLE
    IF(MOTCLE.EQ.'EDGES') THEN
      J=1
25  READ(MTIN, *, ERR=200) N, (KSEG(I,J), I=1,2)
      NSG=NSG+1
      J=J+1
      GO TO 25
    ENDIF
    GO TO 20
200 WRITE(*,*) NSG, ' SEGMENTS TROUVES'
     REWIND(MTIN)

C=====C
C

```



C           LECTURE DES CONNECTIVITES DES TRIANGLES

C

C=====

```

NTR=0
30  READ(MTIN, '(A)') MOTCLE
   IF(MOTCLE.EQ.'TRIANGLES') THEN
     J=1
35  READ(MTIN, *, END=300) N, (KTRI(I, J), I=1, 3)
     NTR=NTR+1
     J=J+1
     GO TO 35
   ENDIF
   GO TO 30
300 WRITE(*, *) NTR, ' TRIANGLES TROUVES'
    REWIND(MTIN)

```

C=====C

C

C           VALIDATION DES DONNEES

C

C=====C

```

IF(NNT.EQ.0.OR.NSG.EQ.0.OR.NTR.EQ.0) THEN
  WRITE(*, *) ' BASE DE DONNEES INCOMPLETE '
  STOP
ENDIF

```

C=====C

C

C           CONSTRUCTION DU FICHIER DE NOEUDS

C

C=====C

```

NDLN=3
NDIM=3
FX=1
FY=1
FZ=1
WRITE(MCOR, '(3I5, 3F10.0)') NNT, NDLN, NDIM, FX, FY, FZ
DO I=1, NNT
  X=FX*(XYZ(1, I)-DX)
  Y=FY*(XYZ(2, I)-DY)
  Z=FZ*(XYZ(3, I)-DZ)
  WRITE(MCOR, 1000) I, X, Y, Z
1000 FORMAT(I5, 3F10.3)
ENDDO
WRITE(MCOR, '(I5)') -1

```

C=====C

C

C           CONSTRUCTION DU FICHIER D'ELEMENTS

C

C=====C

```

NELT=NTR
NNEL=3
NTPE=1

```

```

NGRE=1
NSYM=1
WRITE(MELE, '(5I5)') NELT, NNEL, NTPE, NGRE, NSYM
DO I=1, NELT
  N1=KSEG(1, KTRI(1, I))
  N2=KSEG(2, KTRI(1, I))
  N3=KSEG(1, KTRI(2, I))
  IF(N3.EQ.N1.OR.N3.EQ.N2) N3=KSEG(2, KTRI(2, I))

C=====C
C   CALCUL DES COORDONNEES NECESSAIRE POUR LE DETERMINANT
C=====C
  X1=FX*(XYZ(1, N1)-DX)
  Y1=FY*(XYZ(2, N1)-DY)
  X2=FX*(XYZ(1, N2)-DX)
  Y2=FY*(XYZ(2, N2)-DY)
  X3=FX*(XYZ(1, N3)-DX)
  Y3=FY*(XYZ(2, N3)-DY)
  DETER=(X2*Y3)-(X3*Y2)-(X1*Y3)+(X3*Y1)+(X1*Y2)-(X2*Y1)
  IF(DETER.GT.0.0D0) THEN
    WRITE(MELE, 1010) I, 0, 0, 1, 1, 1, N1, N2, N3, 0
  ELSE
    IF(DETER.LT.0.0D0) THEN
      WRITE(MELE, 1010) I, 0, 0, 1, 1, 1, N1, N3, N2, 0
      write(*,*) 'connectivite retourne'
    ELSE
      WRITE(*,*) 'ERREUR : SURFACE NULLE'
    ENDIF
  ENDIF
1010  FORMAT(16I5)
ENDDO
WRITE(MELE, '(I5)') -1
STOP
END

```

### 10.3 Modèle hydrologique par éléments finis

```

SUBROUTINE ELEM01 (VCORE, VPRNE, VPREE, VDLE, VKE, VFE)
C=====C
C   --- ELEMENT T3 ---
C   ELEMENT TRIANGULAIRE A DEUX DIMENSIONS
C   INTERPOLATION LINEAIRE SUR LES HAUTEURS ET SUR LES VITESSES
C   EQUATIONS DE NAVIER-STOKES INTEGREES VERTICALEMENT
C   FORME FORTE DE L'EQUATION DE CONTINUITE
C   2 DIMENSIONS: ELEMENT ISO-PARAMETRIQUE A 3 NOEUDS
C   NOMBRE DE POINTS D'INTEGRATION : 3
C   NOMBRE DE DEGRES DE LIBERTE EN CHAQUE NOEUD :3 AUX SOMMETS
C   MATRICE OU VECTEUR ELEMENTAIRE CONSTRUIT PAR CE SOUS-PROGRAMME
C   SELON LA VALEUR DE ICODE :
C       ICODE.EQ.1  RETOUR DES PARAMETRES
C       ICODE.EQ.2  CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION ET DES
C                   COEFFICIENTS D'INTEGRATION NUMERIQUE
C       ICODE.EQ.3  MATRICE ELEMENTAIRE (VKE)
C       ICODE.EQ.4  MATRICE TANGENTE (VKE)....PAS ECRIT....
C       ICODE.EQ.5  MATRICE MASSE (VKE)
C       ICODE.EQ.6  PRODUIT K . U   (VFE)
C       ICODE.EQ.7  SOLLICITATION ELEMENTAIRE (VFE)....PAS ECRIT....
C       ICODE.EQ.8  IMPRESSION DES GRADIENTS....PAS ECRIT....
C   PROPRIETES ELEMENTAIRES
C       VPREE(1)   ACCELERATION GRAVITATIONNELLE
C       VPREE(2)   PRECIPITATION BRUTE
C       VPREE(3)   COEFFICIENT PAR DEFAUT DE CHEZY OU MANNING SI < 1
C       VPREE(4)   PARAMETRE DE LA VISCOSITE TURBULENTE
C       VPREE(5)   COEFFICIENT DE VISCOSITE CINEMATIQUE DU FLUIDE
C       VPREE(6)   DUREE DE LA PRECIPITATION
C       VPREE(7)   CK : CONSTANTE POSITIVE DU CALCUL DE L'INFILTRATION
C       VPREE(8)   CF : COEFFICIENT
C       VPREE(9)   CI : INDICE DE NON CALCUL DES TERMES D'INERTIE
C   PROPRIETES NODALES
C       VPRNE(1)  F0 : CAPACITE D'INFILTRATION MAXIMALE DU SOL SEC
C       VPRNE(2)  FC : CAPACITE D'INFILTRATION MINIMALE (F0/CK)
C       VPRNE(3)  CN : COEFFICIENT DE MANNING
C
C
C=====C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
      COMMON/COOR/NDIM, NNT, NDLN, NDLT, FAC (3)
      COMMON/ASSE/NSYM, NKG, NKE, NDLE
      COMMON/RGDT/IEL, ITPE, ITPE1, IGR, IDLE, ICE, IPRNE, IPREE, INEL, IDEG, IPG
1  , ICODE, IDLE0, INEL0, IPG0
      COMMON/NLIN/EPDDL, XNORM, OMEGA, XPAS, DPAS, DPAS0, NPAS, IPAS, NITER,
1  ITER, IMETH
      COMMON/ES/M, MR, MP, M1, M2, M3, M4, M5, MLUN (5)
      COMMON/ASSCL/IMPNZ
      DIMENSION VCORE(*), VPRNE(*), VPREE(*), VDLE(*), VKE(*), VFE(*)
C=====C
C..... DIMENSIONS CARACTERISTIQUES DE L'ELEMENT
C=====C
C   DIMENSION VCPG (IPG), VKPG (NDIM*IPG), XYZ (NDIM)

```

```

      DIMENSION VCPG( 3),VKPG( 6)
C     DIMENSION VJ (NDIM*NDIM),VJ1(NDIM*NDIM)
      DIMENSION VJ ( 4),VJ1( 4)
C     DIMENSION VNIX( INEL*NDIM),VNI ((1+NDIM)*INEL*IPG),IPGKED(NDIM)
      DIMENSION VNIX( 6),VNI ( 27),IPGKED( 2)
      DIMENSION U(3),V(3),H(3),Z(3),VV(9)
      DIMENSION F0(3),FC(3),CN(3),isec(3)
      DATA ZERO/0.D0/
C=====C
C     NOMBRE DE P.G. DE SENS KSI,ETA,DZETA
C=====C
      IPGKED(1)=3
      IPGKED(2)=1
C.....
      IKE=IDLE*IDLE
      NDIM=2
      IDLN=3
      IPRN=IPRNE/INEL
      IMAT=0
      IF(IMETH.EQ.1) IMAT=1
      IF(IMETH.EQ.3.AND.ITER.EQ.1) IMAT=1
      G = VPREE(1)
      R = VPREE(2)
      C = VPREE(3)
      CV= VPREE(4)
      CC= VPREE(5)
      DP= VPREE(6)
      CK= VPREE(7)
      CF= VPREE(8)
      CI= VPREE(9)
      IF(CF.LE.ZERO) THEN
        CF=1.D0
        IF(IEL.EQ.1) WRITE(MP,*) 'CF NUL : FC = F0'
      ENDIF
      DO I=1, INEL
        II=IPRN*(I-1)+1
        F0(I)=VPRNE(II)
        FC(I)=F0(I)/CF
        CN(I)=VPRNE(II+1)
      ENDDO
C=====C
C----- CHOIX DE LA FONCTION A EXECUTER C
C=====C
      GO TO (100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000), ICODE

C=====C
C----- RETOUR DES PARAMETRES DE L'ELEMENT DANS LE COMMON 'RGDT' C
C=====C
100  IDLE0=IDLE
      INEL0=INEL
      IPG0=3
      NDIM=3
      RETURN
C=====C
C----- CALCUL DES COORDONNEES ET POIDS DES P.G., C
C----- DES FONCTIONS N ET DE LEURS DERIVEES C
C=====C

```

```

200  CALL GAUSST(IPGKED,2,VKPG,VCPG,IPG)
      CALL NI01(VKPG,VNI)
      NPRN=IPRNE/INEL
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
C-----  LE CALCUL DE 'K' A ETE EFFECTUE EN 600 SELON LE BESOIN  C
C=====

```

```

300  CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
C-----  CALCUL DE LA MATRICE TANGENTE ELEMENTAIRE (INCLUS DANS 600) C
C=====

```

```

400  CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
C-----  MATRICE MASSE
C=====

```

```

500  DO I=1,IKE
      VKE(I)=ZERO
    ENDDO

```

```

C=====
C-----  EXTRACTION DE H
C=====

```

```

      INN=0
      DO I=1,INEL
        H(I)=VDLE(INN+3)
        INN=INN+IDLN
      ENDDO

```

```

      INI=0
      DO 540 IG=1,IPG

```

```

C=====
C-----  CALCUL DE LA MATRICE JACOBIEENNE  C
C=====

```

```

      I1=INI+INEL+1
      CALL JACOB(VNI(I1),VCORE,2,INEL,VJ,VJ1,DETJ)
      IF(M.GE.3) WRITE(MP,3037) (VJ(I),I=1,4),DETJ
3037  FORMAT(' JACOBIEN= ',4G12.5,' DET= ',G12.5)

```

```

C=====
C-----  CALCUL DU POIDS  C
C=====

```

```

      COEF=VCPG(IG)*DETJ
      IF(M.GE.4) WRITE(MP,3036) COEF
3036  FORMAT(' POIDS D'' INTEGRATION = ',G12.5)

```

```

C=====
C-----  PRODUIT SCALAIRE SUR H
C=====

```

```

      PNH=ZERO
      DO I=1,INEL

```

```

      I1=INI+I
      PNH=PNH+VNI(I1)*H(I)
    ENDDO
    IF(PNH.LE.ZERO) PNH=1.D-6

```

```

C=====C
C----- TERMES DE LA MATRICE MASSE C
C=====C

```

```

      K1=0
      DO 520 J=1, INEL
        K2=0
        DO 525 I=1, INEL
          I1=INI+I
          I2=INI+J
          TVKE=VNI(I1)*VNI(I2)*COEF
          IK=1+K2+IDLE*K1
          DO K=1, IDLN
            IF(K.EQ.3) THEN
              CH=1
            ELSE
              CH=PNH
            ENDIF
            VKE(IK)=VKE(IK)+CH*TVKE
            IK=IK+IDLE+1
          ENDDO
          K2=K2+IDLN
        525 CONTINUE
        K1=K1+IDLN
      520 CONTINUE
      INI=INI+3*INEL
    540 CONTINUE
    IF(M.GE.3.AND.IEL.EQ.1) THEN
      WRITE(MP,3030)
    3030 FORMAT('/ MATRICE MASSE AVANT ROTATION')
      DO J=1, IDLE
        J1=J+(IKE-IDLE)
        WRITE(MP,3060) (VKE(I), I=J, J1, IDLE)
    3060 FORMAT(5X,10G12.5)
      ENDDO
    ENDIF
    NDIM=3
    RETURN

```

```

C=====C
C----- CALCUL DU RESIDU ELEMENTAIRE NON LINEAIRE C
C=====C

```

```

600 IF(IMPNZ.NE.0) THEN
      DO I=1, IDLE
        VV(I)=VFE(I)
      ENDDO
    ENDIF
    DO I=1, IDLE
      VFE(I)=ZERO
    ENDDO
    IF(IMAT.EQ.1) THEN
      DO I=1, IKE
        VKE(I)=ZERO

```

```

      ENDDO
    ENDIF
    INI=1+INEL
    INO=0

```

```

C=====C
C-----  EXTRACTION DES DDL                                     C
C=====C
      INN=0
      DO I=1,INEL
        U(I)=VDLE(INN+1)
        V(I)=VDLE(INN+2)
        H(I)=VDLE(INN+3)
        Z(I)=VCORE(3*I)
        INN=INN+IDLN
      ENDDO

C----  detection des noeuds secs pour imposition de conditions aux limites
      do i=1,inel
        isec(i)=0
        if(h(i).lt.0.d0) isec(i)=1
      enddo

C----  detection des elements en etat intermediaire
      hlim=.01
      if(h(1).le.hlim.and.h(2).le.hlim.and.h(3).le.hlim) then
        inter=0
      else
        if(h(1).ge.hlim.and.h(2).ge.hlim.and.h(3).ge.hlim) then
          inter=0
        else
          inter=1
        endif
      endif
      write(*,*) 'element ',iel,(h(i),i=1,3),inter
      write(*,*) isec

      DO 610 IG=1,IPG
C=====C
C-----  CALCUL DE LA MATRICE JACOBIENNE ET DES DERIVEES DE N EN X,Y,Z  C
C=====C
      CALL JACOB(VNI(INI),VCORE,2,INEL,VJ,VJ1,DETJ)
      IF (M.GE.3) WRITE(MP,2540) (VJ(I),I=1,4),DETJ
2540  FORMAT(' VJ=',5G12.5)

C-----  LONGUEUR CARACTERISTIQUE DE L'ELEMENT
      LE=SQRT(DETJ/2.D0)

C=====C
C-----  CALCUL DES DERIVEES DE N EN X,Y,Z
C=====C
      CALL DNIDX(VNI(INI),VJ1,NDIM,INEL,VNIX)

```

```

C=====
C-----  CALCUL DU COEFFICIENT COMMUN
C=====
          COEF=VCPG (IG) *DETJ

```

```

C=====
C-----  CALCUL DES PRODUITS SCALAIRES
C=====

```

```

          PNU=ZERO
          PNV=ZERO
          PNH=ZERO
          PN XU=ZERO
          PN XV=ZERO
          PN XH=ZERO
          PN XZ=ZERO
          PNYU=ZERO
          PNYV=ZERO
          PNYH=ZERO
          PNYZ=ZERO
          PNF0=ZERO
          PNFC=ZERO
          PNCN=ZERO
          IF (IMPNZ.NE.0) PNVV=ZERO
          DO 620 I=1, INEL
              I1=IN0+I
              I2=INEL+I
              PNU=PNU+VNI (I1) *U (I)
              PN V=PNV+VNI (I1) *V (I)
              PN H=PNH+VNI (I1) *H (I)
              PN XU=PN XU+VNIX (I) *U (I)
              PN XV=PN XV+VNIX (I) *V (I)
              PN XH=PN XH+VNIX (I) *H (I)
              PN XZ=PN XZ+VNIX (I) *Z (I)
              PNYU=PNYU+VNIX (I2) *U (I)
              PNYV=PNYV+VNIX (I2) *V (I)
              PNYH=PNYH+VNIX (I2) *H (I)
              PNYZ=PNYZ+VNIX (I2) *Z (I)
              PNF0=PNF0+VNI (I1) *F0 (I)
              PNFC=PNFC+VNI (I1) *FC (I)
              PNCN=PNCN+VNI (I1) *CN (I)
              IF (IMPNZ.NE.0) PNVV=PNVV+VNI (I1) *VV (3*I)
620      CONTINUE
          Cosx=cos (atan (pnxz) )
          Cosy=cos (atan (pnyz) )

```

```

C=====
C-----  HAUTEUR D'EAU NULLE OU NEGATIVE
          IF (PNH.LT.ZERO) PNH=1.D-6
C-----  PRECIPITATION
C=====

```

```

          PINF=PNFC+ (PNF0-PNFC) *DEXP (-CK*XPAS)
          IF (R.LT.PINF) THEN
              PR=0.0
          ELSE
              PR=R-PINF

```



```

ENDIF
IF (DP.LE.XPAS) THEN
  R=ZERO
  IF (PNH.GT.ZERO) THEN
    PR=-PINF
  ELSE
    PR=ZERO
  ENDIF
ENDIF

```

```

C=====
C----- FROTTEMENT
C-----
C=====
IF (VPREE(3).LT.0.0) C=(1/(-VPREE(3)))*PNH**(1./6.)
IF (PNCN.GT.ZERO) THEN
  C=(1/PNCN)*PNH**(1./6.)
  if (c.eq.zero) c=1.0
ENDIF

```

```
FR=G/C**2
```

```

C=====
C----- MODULE DE LA VITESSE
C-----

```

```

U2=PNU*PNU
V2=PNV*PNV
UV=PNU*PNV
VMU=DSQRT(U2 + V2)
IF (VMU.EQ.ZERO) VMU=1.D-6

```

```

C=====
C----- VISCOSITE
C-----

```

```

C ref M S Cuhadaroglu
VT=PNH*(CC + CV*PNH*VMU)

```

```

VXX=VT
VXY=0.0
VYX=0.0
VYY=VT

```

```

C Petrov Galerkin
C VT=PNH*(CC + CV*VMU*LE/2)
C Taylor Galerkin
C VXX=PNH*(CC + CV*DPAS*U2/2)
C VXY=PNH*(CC + CV*DPAS*UV/2)
C VYY=VXY
C VYY=PNH*(CC + CV*DPAS*V2/2)
C----- CALCUL DU RESIDU ELEMENTAIRE
C-----

```

```

INN=0
if(inter.eq.0) then

```

```

if (ci.eq.zero) then
VKU=PNH*(PNU*PNXU+PNV*PNYU)+FR*PNU*VMU/Cosx
1   +G*PNH*(PNXH+PNXZ)+R*PNU
VKV=PNH*(PNU*PNXV+PNV*PNYV)+FR*PNV*VMU/Cosy
1   +G*PNH*(PNYH+PNYZ)+R*PNV
  else
VKU=FR*PNU*VMU/Cosx
1   +G*PNH*(PNXH+PNXZ)+R*PNU
VKV=FR*PNV*VMU/Cosy
1   +G*PNH*(PNYH+PNYZ)+R*PNV
  endif
else
vku=0.d0
vkv=0.d0
endif
DO 640 I=1,INEL
  I1=IN0+I
  I2=INEL+I
  J1=INN+1
  VFE(J1) =VFE(J1) +(VNI(I1)*VKU+VNIX(I)*(VXX*PNXU+
&   VXY*PNYU)+VNIX(I2)*(VYX*PNXU+VYY*PNYU))*COEF
  VFE(J1+1)=VFE(J1+1)+(VNI(I1)*VKV+VNIX(I)*(VXX*PNXV+
&   VXY*PNYV)+VNIX(I2)*(VYX*PNXV+VYY*PNYV))*COEF
  VFE(J1+2)=VFE(J1+2)+VNI(I1)*(PNU*PNXH + PNV*PNYH
&   +PNH*(PNXU + PNYV)-PR)*COEF
  INN=INN+IDLN
640  CONTINUE

C=====
C----- CALCUL DU TERME DE CONDITION AUX LIMITES NON NUL POUR LES
C   METHODE NON INCREMENTALE
C
C=====
IF (IMPNZ.EQ.0) THEN
  C1=COEF*PNVV
  DO I=1,INEL
    I1=IN0+I
    VFE(3*I)=VFE(3*I)-VNI(I1)*C1
  ENDDO
ENDIF
IF (IMAT.EQ.1) THEN

C=====
C
C----- CONSTRUCTION DE LA MATRICE NON LINEAIRE AVEC TERMES TANGENTS
C
C=====
  IJ=0
  DO 330 J=1,INEL
    J1=IN0+J
    J2=INEL+J
    DO 335 I=1,INEL
      LIJ=IJ
      I1=IN0+I
      I2=INEL+I
      VNN =VNI(I1) *VNI(J1) *COEF

```

```

VNNX  =VNI(I1) *VNIX(J) *COEF
VNNY  =VNI(I1) *VNIX(J2) *COEF
VNXNX =VNIX(I) *VNIX(J) *COEF
VNYNY =VNIX(I2) *VNIX(J2) *COEF
VNXNY =VNIX(I) *VNIX(J2) *COEF
VNYNX =VNIX(I2) *VNIX(J) *COEF

```

```

C=====
C-----          COLONNE U
C=====
      if(inter.eq.0) then
        if(ci.eq.zero) then
          VKE(LIJ+1)= VKE(LIJ+1) + (VNNX*PNU + VNNY*PNV
&                + VNN*PNXU)*PNH + R*VNN
&                + FR*(VMU+U2/VMU)*VNN/Cosx
&                + VXX*VNXNX+VXY*VNXNY+VYX*VNYNX+VYY*VNYNY
          VKE(LIJ+2)=VKE(LIJ+2) + VNN*(PNXV*PNH + FR*UV/VMU/Cosx)
        else
          VKE(LIJ+1)= VKE(LIJ+1) + R*VNN
&                + FR*(VMU+U2/VMU)*VNN/Cosx
&                + VXX*VNXNX+VXY*VNXNY+VYX*VNYNX+VYY*VNYNY
          VKE(LIJ+2)=VKE(LIJ+2) + VNN*FR*UV/VMU/Cosx
        endif
      else
        VKE(LIJ+1)= (VNXNX+VNYNY)*VT
        VKE(LIJ+2)= 0.d0
      endif
      VKE(LIJ+3)=VKE(LIJ+3) + VNI(I1)*(PNH*VNIX(J)
&                + PNXH*VNI(J1))*COEF
      LIJ=LIJ+IDLE

```

```

C=====
C-----          COLONNE V
C=====
      if(inter.eq.0) then
        if(ci.eq.zero) then
          VKE(LIJ+1)=VKE(LIJ+1) + VNN*(PNYU*PNH + FR*UV/VMU/Cosy)
          VKE(LIJ+2)=VKE(LIJ+2) + (VNNX*PNU + VNNY*PNV
&                + VNN*PNYV)*PNH + R*VNN
&                + FR*(VMU+V2/VMU)*VNN/Cosy
&                + VXX*VNXNX+VXY*VNXNY+VYX*VNYNX+VYY*VNYNY
        else
          VKE(LIJ+1)=VKE(LIJ+1) + VNN*FR*UV/VMU/Cosy
          VKE(LIJ+2)=VKE(LIJ+2) + R*VNN
&                + FR*(VMU+V2/VMU)*VNN/Cosy
&                + VXX*VNXNX+VXY*VNXNY+VYX*VNYNX+VYY*VNYNY
        endif
      else
        VKE(LIJ+1)= 0.d0
        VKE(LIJ+2)= (VNXNX+VNYNY)*VT
      endif
      VKE(LIJ+3)=VKE(LIJ+3) + VNI(I1)*(PNH*VNIX(J2)
&                + PNYH*VNI(J1))*COEF
      LIJ=LIJ+IDLE

```

```

C=====
C-----          COLONNE ETA
C=====

      if(inter.eq.0) then
          VKE(LIJ+1)=VKE(LIJ+1) + G*VNNX*PNH
C                                     + FR*(PNU*VMU/PNH)*VNN
          VKE(LIJ+2)=VKE(LIJ+2) + G*VNNY*PNH
C                                     + FR*(PNV*VMU/PNH)*VNN

      else
          vke(lij+1)=0.d0
          vke(lij+2)=0.d0
      endif
      VKE(LIJ+3)=VKE(LIJ+3) + VNI(I1)*(PNU*VNIX(J)+PNV*VNIX(J2)
&                                     +(PNXU+PNYV)*VNI(J1))*COEF

      IJ=IJ+IDLN
335      CONTINUE
      IJ=IJ+2*IDLE
330      CONTINUE
      ENDIF

      inn=0
      do i=1,inel
          if(isec(i).eq.1) then
              j1=inn+1
              vfe(j1) =1.d10*u(i)
              vfe(j1+1)=1.d10*v(i)
              vfe(j1+2)=1.d10*h(i)
          endif
          inn=inn+idl
      enddo

      ij=1
      do i=1,inel
          lij=ij
          if(isec(i).eq.1) then
              vke(lij) =1.d10
              vke(lij+idle+1) =1.d10
              vke(lij+2*idle+2)=1.d10
          endif
          ij=ij+idl*idle+idl
      enddo

      INO=INO+3*INEL
      INI=INI+3*INEL
610      CONTINUE

C=====
C-----          IMPRESSION
C=====

      IF(M.GE.2) THEN
      WRITE(MP,*)' MATRICE TANGENTE : '
      DO J=1, IDLE
          J1=J+(IKE-IDLE)
          WRITE(MP,3025) (VKE(I), I=J,J1, IDLE)
3025      FORMAT(5X,10G12.5)
      ENDDO

```

```

      WRITE(MP,3020) (VFE(I), I=1, IDLE)
3020  FORMAT(/' VECT. RESIDU : ',/, (5X,10G12.5))
      ENDIF
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
C-----          CALCUL DE FE
C=====
700  CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
C-----  CALCUL DES GRADIENTS
C=====
=
C
800  CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
==
C-----  CALCUL DES FONCTIONS ET DERIVEES AUX NOEUDS
C=====
==
900  CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN

```

```

C=====
=====
C-----  CALCUL DE LA MATRICE K CONSTANTE
C=====
=====
1000 CONTINUE
      NDIM=3
      RETURN
      END
      SUBROUTINE NI01 (VKPG, VNI)

```

```

C=====C
C  CALCUL DES FONCTIONS D'INTERPOLATION N ET DE LEURS DERIVEES          C
C  D(N)/D(KSI) D(N)/D(ETA) PAR LA METHODE GENERALE DE PN INVERSE      C
C  (TRIANGLE LINEAIRE A 3 NOEUDS)                                       C
C  ENTREES                                                                C
C  VKPG      COORDONNEES EN LESQUELLES CALCULER  N ...                  C
C  IPG       NOMBRE DE POINTS                                           C
C  INEL      NOMBRE DE FONCTIONS N (DE NOEUDS)      INEL.EQ.3          C
C  NDIM      NOMBRE DE DIMENSIONS                      NDIM.EQ.2          C
C  SORTIES                                       C

```

```

C          VNI          FONCTIONS N ET DERIVEES                      C
C=====
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      COMMON/COOR/NDIM,NNT,NDLN,NDLT,FAC(3)
      COMMON/RGDT/IEL,ITPE,ITPE1,IGRE,IDLE,ICE,IPRNE,IPREE,INEL,IDEG,IPG
1     ,ICODE,IDLE0,INEL0,IPG0
      DIMENSION VKPG(*),VNI(*)

C=====
C.....  INFORMATIONS CARACTERISTIQUES DU TRIANGLE A 3 NOEUDS
C          (INEL.EQ.3  NDIM.EQ.2)
C=====

C          DIMENSION VKSI (NDIM*INEL) , KEXP (NDIM*INEL) , KDER (NDIM)
          DIMENSION VKSI (          6) , KEXP (          6) , KDER (          2)
C          DIMENSION VPN (INEL*INEL) , VP (INEL)
          DIMENSION VPN (          9) , VP (          3)
C          DIMENSION K1 (INEL)
          DIMENSION K1 (          3)
C          COORDONNEES DES NOEUDS DE L'ELEMENT DE REFERENCE
          DATA VKSI/0.E0,0.E0,1.E0,0.E0,0.E0,1.E0/
C          EXPOSANTS DES MONOMES DE LA BASE POLYNOMIALE,DEGRE MAX.
          DATA KEXP/0,0, 1,0, 0,1/
C
C.....
          IDEG=1
          INEL=3

C=====
C-----  CALCUL DE LA MATRICE PN INVERSE
C=====
          CALL PNINV(VKSI,KEXP,VP,K1,VPN)

C=====
C-----  CALCUL DE N,D(N)/D(KSI),D(N)/D(ETA) AUX P.G.
C=====
          I1=1
          I2=1
          DO 10 IG=1,IPG
              KDER(1)=0
              KDER(2)=0
              CALL NI(VKPG(I1),KEXP,KDER,VP,VPN,VNI(I2))
              I2=I2+INEL
              KDER(1)=1
              CALL NI(VKPG(I1),KEXP,KDER,VP,VPN,VNI(I2))
              I2=I2+INEL
              KDER(1)=0
              KDER(2)=1
              CALL NI(VKPG(I1),KEXP,KDER,VP,VPN,VNI(I2))
              I2=I2+INEL
10     I1=I1+NDIM
          I0=1
          RETURN
          END

```

## 10.4 Extraction de la frontière du bassin versant

```

C*****
C   VERSION RAPIDE EXTRAITE DE MEFGRA
C*****
      DIMENSION KNE(7,30000),NN(10000,2)
      DIMENSION ISEG(30000,30),NDP(10000)
      DATA MCONEC/10/,MOUT/12/
      DO 1 I=1,5000
      ISEG(I,1)=0
1     CONTINUE
C
C----- LECTURE DES CONNECTIVITES
C           FICHER .ELE
      READ(MCONEC,3000) NELT,NNEL
3000  FORMAT(2I5)
      WRITE(*,*)NELT
      DO 10 I=1,NELT
          KNE(NNEL+1,I)=0
          READ(MCONEC,1010,end=88) (KNE(J,I),J=1,NNEL)
10     CONTINUE
1010  FORMAT(30X,10I5)
C
C----- CALCUL DE LA PEAU
C
      NNT=0
      DO 40 I=1,NELT
          J=1
41     N1=KNE(J,I)
          N2=KNE(J+1,I)
          IF(N1.GT.NNT) NNT=N1
          IF(N2.GT.NNT) NNT=N2
          IF(N2.EQ.0) N2=KNE(1,I)
          IF(N2.LT.N1) THEN
              N=N1
              N1=N2
              N2=N
          ENDIF
          K=1
42     IF(ISEG(N1,K).EQ.0) THEN
              ISEG(N1,K)=N2
              ISEG(N1,K+1)=0
              GO TO 43
          ENDIF
          IF(ISEG(N1,K).EQ.N2) THEN
              ISEG(N1,K)=-N2
              GO TO 43
          ENDIF
          K=K+1
          IF(K.GT.30) THEN
              WRITE(*,*)' MANQUE DE MEMOIRE POUR ISEG K= ',K

```

```

        STOP
        ENDIF
        GO TO 42
43      J=J+1
        IF(KNE(J,I).NE.0) GO TO 41
40      CONTINUE
        KL=0
        WRITE(*,*) 'NNT = ',NNT
        DO 45 I=1,NNT
            J=1
46      IF(ISEG(I,J).GT.0) THEN
                KL=KL+1
                NN(KL,1)=I
                NN(KL,2)=ISEG(I,J)
            ENDIF
            IF(ISEG(I,J).EQ.0) GO TO 45
            J=J+1
            GO TO 46
45      CONTINUE
        WRITE (MOUT,200) (NN(I,1),NN(I,2),I=1,KL)
200     FORMAT(10X,16I5)
        ND=0
        KK=0
301    IF(KL-KK.LE.0) STOP
        WRITE(*,*) 'IL RESTE ',KL-KK,' PAIRES DE NOEUDS A TROUVER'
        ND=ND+1
        IF(NN(ND,1).EQ.0) GOTO 301
        WRITE(*,*) 'NOUVEAU CONTOUR'
        WRITE (MOUT,*) '                NOUVEAU CONTOUR'
        WRITE (*,400) (NN(I,1),NN(I,2),I=ND,ND+1)
400    FORMAT(' LES DEUX SEGMENTS DE DEPART SONT:',2I5,' ET ',2I5,',
&         ' ON PREND LE 1 OU LE 2? ', $)
        READ (*,*) IREP
        IF(IREP.EQ.2) THEN
            N1=NN(ND,1)
            N2=NN(ND,2)
            NN(ND,1)=NN(ND+1,1)
            NN(ND,2)=NN(ND+1,2)
            NN(ND+1,1)=N1
            NN(ND+1,2)=N2
        ENDIF
        WRITE(*,*) NN(ND,1),NN(ND,2)
        WRITE (MOUT,201) NN(ND,1),NN(ND,2)
        IDP=1
        NDP(IDP)=NN(ND,1)
        IDP=IDP+1
        NDP(IDP)=NN(ND,2)
        IDP=IDP+1
        KK=KK+1
        NN12=NN(ND,2)
7      IF(NN12.EQ.NN(ND,1)) GOTO 302
18     DO 8 I=1,KL
            IF(NN12.EQ.NN(ND,1)) GOTO 302
            IF(NN(I,1).NE.NN12) GOTO 8
            WRITE(*,*) NN(I,1),NN(I,2)
            WRITE (MOUT,201) NN(I,1),NN(I,2)
            NDP(IDP)=NN(I,2)

```



```
      IDP=IDP+1
      KK=KK+1
      NN12=NN(I,2)
      NN(I,1)=0
      NN(I,2)=0
8     CONTINUE
      NNN=0
      DO 9 I=1,KL
        IF(NN(I,2).NE.NN12) GOTO 9
        IF(NN(I,2).EQ.NN(ND,2)) NNN=NNN+1
        IF(NNN.EQ.1) GOTO 9
        WRITE(*,*) NN(I,2),NN(I,1)
        WRITE(MOUT,201) NN(I,2),NN(I,1)
        NDP(IDP)=NN(I,1)
        IDP=IDP+1
        KK=KK+1
        NN12=NN(I,1)
        NN(I,1)=0
        NN(I,2)=0
        GOTO 18
9     CONTINUE
      GOTO 7
201  FORMAT(10X,2I5)
302  WRITE(MOUT,202) (NDP(I),I=1,IDP-1)
202  FORMAT(16I5)
      GO TO 301
88   WRITE(*,*) 'ERREUR -- FIN PREMATURE DU FICHIER INPUT'
      STOP
      END
```

## 10.5 Extraction des variables nodales

```

C*****
C   Transformation d'un *.vno pour ajouter en post-traitement
C   des colonnes supplémentaires obtenues par combinaison
C   des colonnes résultats du calcul
C
C*****
      DIMENSION NI(25000),DL(25000,21)
      DATA MSOL/14/,MVNO/11/,MELE/12/,MCOR/13/
C
      IBAT=0
      IHAUT=0
      WRITE(*,1002)
1002  FORMAT(' TOPGRAPHIE? (0 OU 1):', $)
      READ(*,*) ITOP
      WRITE(*,1003)
1003  FORMAT(' INTENSITE DES VITESSES? (0 OU 1):', $)
      READ(*,*) IVIT
      NSEP=-999
C--- Lecture des coordonnees
      READ(MCOR,1000) NNT,NDLN,NDIM,FX,FY,FZ
1000  FORMAT(3I5,3F10.0)
C--- SAUT DES VALEURS INITIALES NUL >< -1
      READ(MVNO,1000) NUL
      READ(MVNO,1001) NUL
1001  FORMAT(19X,I5)
      READ(MVNO,1000) NUL,NDL,NPAS
      IF(ITOP.EQ.1) THEN
        DO I=1,NNT
          READ(MCOR,1004) Z
1004  FORMAT(25X,F10.0)
          DL(I,NDL+1)=Z*FZ
        ENDDO
      ENDIF
      IF (NUL.EQ.-1) GO TO 50
      DO I=2,NNT
        READ(MVNO,*) NUL
      ENDDO
      READ(MVNO,1000) NUL,NDL,NPAS
C ECRITURE DE L'ENTETE
50  IMOINS=NUL
      IPAS=1
      ITER=0
      TEMPS=1.0
C BOUCLE SUR LES PAS DE TEMPS
C LECTURE DES D.L.
      DO KK=1,NPAS
        write(*,*) ndl
        DO I=1,NNT
          READ(MVNO,1030) NI(I),(DL(I,J),J=1,NDL)
        ENDDO

```

```

1030  FORMAT(I5,6G12.5,/, (5X,6G12.5))
      READ(MVNO,1000) NSEP
      IF(KK.NE.NPAS) READ(MVNO,1001) NUL
C   ECRITURE DES RESULTATS
      WRITE(MSOL,1000)NSEP
      WRITE(*,1010) IPAS
      WRITE(MSOL,1010)IPAS,ITER,TEMPS
1010  FORMAT('      pas numero      ',i5,'      iteration numero      ',i5,
&'      temps      ',g12.5)
      IF(IPAS.EQ.1)WRITE(MSOL,1000) IMOINS,NDL+ITOP+IVIT,NPAS
      DO I=1,NNT
        IF(IVIT.EQ.1) THEN
          DL(I,NDL+ITOP+IVIT)=SQRT(DL(I,1)**2+DL(I,2)**2)
        ENDIF
        WRITE(MSOL,1040) I, (DL(I,J),J=1,NDL+ITOP+IVIT)
      ENDDO
1040  FORMAT(I5,10G12.5,/, (5X,10G12.5))
      ipas=ipas+1
      TEMPS=TEMPS+1.
      ENDDO
      STOP
      END

```