

RAFAEL ARCE-MESÉN

**CONCEPTION D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
POUR L'AMÉNAGEMENT DES BASSINS-VERSANTS AU COSTA RICA**

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

**Département de géographie
FACULTÉ DES LETTRES
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC**

NOVEMBRE 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.

0-612-48524-2

Canada

RÉSUMÉ (court)

Les SIG sont devenus très populaires dans certains milieux techniques et scientifiques de la société moderne. Comme technologie, ils facilitent énormément les tâches de gestion et de planification territoriale; comme science, ils offrent un espace à la réflexion sur des sujets peu souvent abordés en la géographie, comme la statistique et l'analyse spatiale. Puisque l'évolution des SIG a été fortement marquée par l'aspect commercial, les fondements scientifiques ont été beaucoup moins diffusés et on retrouve des disparités remarquables dans la rigueur de leur utilisation. Malgré l'existence de contrastes importants à l'intérieur des pays développés, on constate que les différences sont plus marquées dans les pays sous-développés. Ce travail montre qu'une approche semi-structurée par prototypage utilisant le formalisme entité - relation est suffisante pour initier l'utilisation des SIG d'une façon plus méthodique dans les pays non développés où les SIG peuvent contribuer substantiellement à créer les bases de données nécessaires pour appuyer les décisions en matière d'utilisation du territoire.

Rafael Arce-Mesén

Ph.D. Jean-Claude Dionne

RÉSUMÉ (long)

Le but principal dans cette recherche était de concevoir un SIRS visant la gestion et l'aménagement des bassins-versants. L'application s'est orientée notamment vers les pays non développés où on note un retard important dans l'acquisition des concepts de modélisation de bases de données à référence spatiale, de sorte que les applications des SIG restent très orientées vers l'utilisation des routines analytiques disponibles, sans aucun encadrement dans le contexte général de l'application du SIRS.

La méthode suivie provient de la théorie du développement des SIRS corporatifs, basée dans l'application d'une *démarche progressive* qui minimise les risques de fracas. Plusieurs étapes doivent être franchies. Nous nous sommes cependant contentés de faire une étude générale des opportunités tenant compte du contexte de trois institutions intéressées aux bassins-versants : l'Institut Costaricien d'Électricité, l'Institut Costaricien des Aqueducs, et la Municipalité de Santa Ana; puis nous avons fait une étude de l'encadrement juridique concernant l'aménagement des bassins-versants ainsi qu'une description générale du bassin-versant Uruca et de sa problématique. Ces études, ainsi que l'étude des besoins institutionnels ont servi de guide pour la conception du SIRS, ce qui s'est matérialisé dans un premier temps par la création du *Modèle Conceptuel de Données* (MCD) et le développement d'une application *prototype* dans le bassin-versant Uruca, Costa Rica.

Après une discussion sur les Modèles Numériques de Terrain, concept important et utile pour l'analyse des bassins-versants, nous donnons un exemple montrant l'exploitation du MCD pour aboutir à la cartographie des risques naturels, des potentiels et limitations au développement et des discordances entre les plans d'utilisation du sol actuels et proposés dans le schéma directeur municipal. Enfin, nous discutons des opportunités pour développer une approche intégrée en matière de gestion des bassins-versants à l'aide des SIRS.

AVANT-PROPOS

Je suis très reconnaissant et témoigne ma gratitude envers mon directeur de thèse, Monsieur **Jean-Claude Dionne**. Il a eu la patience de lire et relire mes brouillons jusqu'à obtenir un document convenable, en français. Il m'a accompagné aussi sur le terrain au Costa Rica. Il m'a donné son appui et la confiance même dans les moments les plus durs.

J'exprime ma reconnaissance et gratitude à mon codirecteur de thèse, Monsieur **Marius Thériault**, qui a apporté beaucoup de corrections très précises et précieuses pour cette thèse, notamment en ce qui concerne les Modèles Numériques de Terrain. Il a été aussi très diligent dans l'acquisition du logiciel DVP dont je me suis servi pour créer une partie des données topographiques. Il m'a aussi trouvé de l'espace et m'a manifesté sa confiance, de sorte que j'ai pu travailler confortablement lors de mon séjour à l'Université Laval.

Je désire également remercier Monsieur **Jean Raveneau**, lecteur de ma thèse, professeur honorable à qui je dispense beaucoup de respect.

Je remercie aussi tous les copains et amis à l'université Laval qui m'ont donné leur soutien moral lors des longues journées de travail. En particulier je mentionne mon grand ami **Marcel Beaudoin** qui m'a beaucoup encouragé.

C'est grâce au système de bourses-prêts du *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT)* que j'ai eu le soutien économique pour étudier à Québec. Je leur suis très reconnaissant.

Aussi, je remercie l'université de Costa Rica, *Oficina de Asuntos Internacionales*, pour le soutien économique complémentaire, ainsi que l'université Laval et le gouvernement du Québec pour leur aide respective à travers les *fonds de soutien* et *l'exemption des droits de scolarité majorés*.

DÉDICACE

Je dédie cet effort à mon père Ernesto, décédé un mois après mon arrivée à Québec, à mon frère Olivier, décédé deux mois avant la fin de mon séjour à Québec, à ma mère Balsamina, qui s'est sacrifiée durant les sept ans qu'a duré mon doctorat, à mes autres frères et soeurs, et à mon épouse Sonia et sa famille, eux aussi sacrifiés par le temps excessif consacré à mes études et à la recherche.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ (court)	i
RÉSUMÉ (long)	ii
AVANT-PROPOS	iii
DÉDICACE	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvii

PARTIE 1

CHAPITRE 1 PRÉSENTATION DU PROJET ET DU CONTEXTE

1.1 Mise en situation	2
1.2 Problématique	5
1.3 Objectifs et portée de la recherche	6
1.3.1 Objectifs	7
1.3.1.1 Généraux	7
1.3.1.2 Spécifiques	7
1.3.2 Limites de la recherche	8
1.4 Méthodologie de la recherche	8
1.5 Structure du rapport	10
1.6 Références bibliographiques du chapitre	11

CHAPITRE 2 RÉVISION DES CONCEPTS DE BASE

2.1 L'aménagement et l'aménagement des bassins-versants	15
2.1.1 L'aménagement du territoire: histoire et concept	16

2.1.2 La gestion et l'aménagement des bassins-versants	18
2.2 Bassins-versants	24
2.2.1 Concept	24
2.2.2 Délimitation, partition, hiérarchisation	25
2.2.3 Les bassins-versants et l'analyse du territoire	30
2.2.3.1 Le problème du découpage du territoire	30
2.2.3.2 Les modèles physiques (distribués) dans l'étude des bassins-versants	32
2.3 Système d'information géographique (SIG)	34
2.3.1 Concepts de SIG	34
2.3.2 Diverses approches dans les SIG	36
2.3.3 Les logiciels et la machinerie des SIG	38
2.3.3.1 Les logiciels	38
2.3.3.2 La machinerie	39
2.3.4 Les données	40
2.3.5 Fonctions de base dans les logiciels SIG	41
2.3.6 Les applications des SIG	42
2.4 Références bibliographiques du chapitre	45

CHAPITRE 3 CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET

3.1 Aspects biophysiques	69
3.2 Aspects psyco - sociaux - économiques	70
3.3 Risques, vulnérabilité et risques socio - environnementaux	72
3.3.1 Risques séismiques et tectoniques	74
3.3.2 Risques volcaniques	75
3.3.3 Risques d'inondation	76
3.3.4 Risques liés aux glissements de terrain et aux coulées de débris	77
3.3.5 Autres risques	83
3.4 Contexte politique, juridique et institutionnel	84
3.4.1 Contexte politique	85

3.4.2 Contexte juridique	87
3.4.3 Contexte institutionnel	94
3.5 Projets de SIG au Costa Rica	101
3.5.1 Les SIGs dans l'enseignement	102
3.5.2 Les SIGs dans la recherche	102
3.5.3 Les SIGs dans l'entreprise privée	103
3.5.4 Les SIGs dans les organisations non gouvernementales (ONGs)	103
3.5.5 Les SIGs dans les institutions publiques	104
3.6 Références bibliographiques du chapitre	104

CHAPITRE 4 ASPECTS BIOPHYSIQUES ET SOCIAUX DU BASSIN-VERSANT URUCA

4.1 Introduction	111
4.2 Histoire tectonique	114
4.3 Constitution géologique	115
4.4 Géologie structurale	124
4.5 Géomorphologie	130
4.6 Dynamique des versants	133
4.7 Glissements de terrain	147
4.7.1 Le glissement de l'Alto Tapezco	147
4.7.2 Le glissement de Matinilla	152
4.7.3 Les glissements anciens	154
4.8 Sols	155
4.9 Relief	156
4.9.1 L'inclinaison des pentes	156
4.9.2 L'orientation des pentes	156
4.9.3 Courbure du relief local	157
4.9.4 Unités de terrain	158
4.10 Climat	161

4.11 La couverture végétale	165
4.11.1 L'indice de végétation	165
4.11.2 L'utilisation du sol	165
4.12 Peuplement	171
4.13 Croissance de la population	174
4.14 Répartition de la population dans l'espace et le temps	175
4.15 Infrastructure	175
4.16 Références bibliographiques du chapitre	177

PARTIE 2

CHAPITRE 5 CONCEPTION DU SYSTÈME D'INFORMATION À RÉFÉRENCE SPATIALE

5.1 Fondements conceptuels	183
5.1.1 Les méthodes d'élaboration des SIRS	183
5.1.2 Modélisation des données et modélisation des traitements	190
5.1.3 Les niveaux de la modélisation	191
5.1.4 Les formalismes utilisés	192
5.1.5 Autres règles à considérer	197
5.1.6 Choix d'une méthode	198
5.2 Conception général du SIRS	200
5.2.1 La proposition d'un schéma directeur	201
5.2.3 L'organisation et les besoins particuliers des institutions: schéma conceptuel ...	212
5.3 Conception détaillée	221
5.3.1 Modèle Conceptuel de Données	222
5.3.2 Dictionnaire de données	231
5.3.3 Modèle Logique de Données	236
5.3.4 Méta-données	238
5.4 Références bibliographiques du chapitre	239

CHAPITRE 6 CONSTRUCTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE (MNA)

6.1 Introduction	244
6.2 Étapes dans la construction des MNA	246
6.3 Les méthodes de construction des MNA	252
6.3.1 La méthode en quadrillage régulier (MNA matriciels)	253
6.3.2 La méthode des facettes triangulaires	255
6.3.3 La méthode vectorielle ou des trapézoïdes	261
6.4 Discussion des méthodes et algorithmes d'interpolation	263
6.4.1 La méthode des moyennes mobiles pondérées	265
6.4.2 La moindre courbure	267
6.4.3 Triangulation	270
6.4.4 Le krigeage	273
6.5 Calcul des dérivées	284
6.5.1 Discussion du concept	284
6.5.2 Présentation des algorithmes	287
6.5.2.1 Dérivation par différences finies appliquées aux quadrillages réguliers	287
6.5.2.2 Dérivation par calcul sur des éléments finis triangulaires	294
6.5.2.3 Dérivation par calcul sur des éléments finis dans une structure trapézoïdale	297
6.6 L'échantillonnage optimal	299
6.7 Discussion à propos du MNA du bassin-versant Uruca	306
6.7.1 Historique de sa conception	306
6.7.2 Pré-traitement des données	307
6.7.3 Choix de la méthode	308
6.7.4 Choix d'un algorithme d'interpolation	309
6.7.5 Interpolation du modèle	312
6.7.5.1 Étude préliminaire	312
6.7.5.2 Analyse géostatistique	320

6.7.5.3 Discussion des résultats	329
6.8 Les documents dérivés de MNA	332
6.8.1 La carte des pentes	332
6.8.2 La carte d'exposition du relief	332
6.8.3 La carte de la courbure du relief	333
6.9 Vérification du MNA et produits dérivés	337
6.10 Références bibliographiques du chapitre	341

CHAPITRE 7 EXPLOITATION DU SIRS ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

7.1 Exemples d'exploitation du SIRS	351
7.1.1 Carte des différences entre utilisation actuelle et potentielle du sol.	351
7.1.2 Évaluation des risques naturels	365
7.2 Aménagement du territoire et des bassins-versants : schéma d'intégration	377
7.2.1 Réflexion conceptuelle	377
7.2.2 Discussion pratique de la méthode	379
7.2.3 Vers une approche universelle d'aménagement et de gestion de bassins-versants	383
7.3 Références bibliographiques du chapitre	391

CHAPITRE 8 CONCLUSIONS

8.1 Sur le plan conceptuel	393
8.2 Sur le plan méthodologique	398
8.3 Sur le plan expérimental	399

LISTE DES FIGURES

1. Étapes dans la conception-implementation du SIRS	9
2. La méthode évolutive et le prototypage	10
3. Les 14 TDCN pour un réseau hydrographique de magnitude 5	29
4. Carte de localisation du Costa Rica	69
5. Périodes de récurrence pour les pluies de 200 mm/jour au Costa Rica	78
6. L'effet du séisme du 22 avril de 1991. Côte atlantique du Costa Rica	79
7. Principaux sites affectés par les mouvements en masse au Costa Rica	80
8. Carte des risques naturels au Costa Rica	81
9. Localisation du bassin-versant Uruca	112
10. Carte générale du bassin-versant Uruca	113
11. Carte géologique du bassin-versant Uruca	116
12. Stratigraphie du bassin-versant es des environs	117
13. Modèle effort - déformation pour la Vallée Centrale	124
14. Blocs tectoniques dans l'intrusif d'Escazû	128
15. Système de failles du Cerro Palomas	129
16. Système de failles du Cerro Pacacua	130
17. Unités physiographiques du bassin-versant Uruca	131
18. Stades érosifs dans l'évolution du bassin-versant Uruca	131
19. Reptation au <i>Cerro Las Palomas</i>	135
20. Carte morphodynamique du bassin-versant Uruca	136
21. Failles et fractures du basssin-versant Uruca	138
22. Escarpements du bassin-versant Uruca	139
23. Glissements de terrain du bassin-versant Uruca	141
24. Coulées de débris du bassin-versant Uruca	142
25. Reptation et solifluxion du bassin-versant Uruca	143
26. Érosion laminaire du bassin-versant Uruca	144

27. Érosion linéaire du bassin-versant Uruca	145
28. Glissement de terrain de l'alto Tapezco	151
29. Glissement de Matinilla	153
30. Carte de localisation du glissement de Matinilla	153
31. Ancien glissement de Pacacua	154
32. Topographie ancienne dans le glissement de Pacacua	155
33. Pentcs du bassin-versant Uruca	156
34. Orientation des versants	157
35. Courbure du relief	158
36. Unités topographiques ou "naturelles" du bassin-versant Uruca	159
37. Unités de terrain du secteur Salitral	160
38. Précipitations moyennes annuelles au bassin-versant Uruca	162
39. Précipitations au bassin-versant Uruca	163
40. Précipitations dans les stations sélectionnées	163
41. Répartition spatiale des précipitations du bassin-versant Uruca	164
42. Indice de végétation du bassin-versant Uruca	166
43. Procédure pour compléter la carte d'utilisation du sol	167
44. Végétation "naturelle" du bassin-versant Uruca	167
45. Terres en friche et pâtures	168
46. Distribution du café	169
47. Culture du café	170
48. L'utilisation intensive du sol	170
49. Peuplement du bassin-versant	171
50. Croissance de la population	174
51. Répartition de la population dans les années 1956, 1964 et 1989	175
52. Infrastructure du transport	176
53. Modélisation de données et modélisation des traitements	191
54. Composantes du formalisme individuel	193
55. Exemple du modèle logique de données (MLD)	195
56. Exemple de traduction du MLD en tables relationnelles	195

57. Exemple du diagramme du flux de données	196
58. Soutien institutionnel pour l'organisation responsable du SIRS orienté à l'aménagement des bassins-versants	202
59. SIT et SIRS dans le contexte de la fonction municipale	213
60. Exemple des composantes détaillées des sous-systèmes	214
61. Organigramme général d'ICETEL	215
62. Organigramme général d'ICELEC	217
63. Une structure hiérarchique pour le SIRS de l'Institut Costaricain d'Électricité	218
64. Une structure hiérarchique pour le SIRS de l'Institut Costaricain d'Aqueducs	219
65. Schéma organisationnel de l'école de géographie	221
66. Vue détaillée du Modèle Conceptuel de Données (MCD) ¹	223
67. Extraction d'information en mode matriciel	224
68. Une description hiérarchique du système fluvial au bassin-versant Uruca	225
69. Exploitation des tables relationnelles pour relier les versants et les tronçons	226
70. Vue détaillée du MCD: le système de traitement des eaux résiduelles	228
71. Vue détaillée du MCD: les rapports entre versant et autres descripteurs de l'environnement	229
72. Vue détaillée du MCD: l'organisation hiérarchique des bassins-versants	230
73. Illustration du concept de dictionnaire de données	231
74. Exemple d'une page de méta-données	238
75. Les trois méthodes de découpage du terrain dans les modèles numériques du terrain	248
76. La construction de la grille régulière	253
77. Simulation d'un processus de diffusion contrôlé par l'orientation de la pente	254
78. L'application du critère Delaunay lors de la création d'un nouveau triangle par addition d'un point	258
79. L'interdiction d'interpoler à travers la ligne structurale	260
80. Représentation graphique du processus de construction du RTI	261
81. Représentation graphique du réseau spatial en trapézoïdes	262
82. Morcellement du terrain en trapézoïdes	263

¹ Cette figure est aussi dans l'annexe.

83. Une falaise, exemple de la relativité du concept de continuité spatiale	264
84. Interpolation hasardeuse indésirable	266
85. Estimation de Z^* par triangulation	271
86. Les trois composantes de la variation spatiale	275
87. Carte des points utilisés pour l'essai d'interpolation par <i>Krigeage</i>	277
88. Semi-variogramme expérimentale pour l'exemple de <i>krigeage</i>	279
89. Interpolation spatiale avec <i>krigeage</i> selon un modèle de variogramme gaussien	283
90. Matrice pour l'exemple de calcul manuel des dérivés spatiales	287
91. Grille d'essai pour le calcul manuel des dérivés spatiales	288
92. Loi des signes pour le calcul de l'orientation du relief	290
93. Les courbures dans un profil	290
94. Carte de la courbure en profil pour la zone d'essai	293
95. Physiographie dans le contexte spatial de la petite zone d'essai	294
96. Calcul de la pente avec RTI	295
97. Calcul de la pente avec un découpage en trapézoïdes	297
98. Patrons d'échantillonnage spatial	300
99. Problèmes d'interpolation au long des lignes de crête et des talwegs	305
100. Sélection des zones déficitaires en données topographiques	308
101. Prétraitement des fichiers	308
102. Prétraitement des données : édition manuelle	309
103. Problèmes reliés au <i>krigeage</i>	310
104. Micro-rugosités artificielles avec <i>krigeage</i>	310
105. Artifices avec <i>splines</i>	311
106. Problèmes engendrés par la procédure de courbature minimale	311
107. Zones choisies pour essayer les algorithmes d'interpolation	313
108. Interpolation dans <i>zexpcolo</i>	315
109. <i>Krigeage</i> à rayon elliptique	317
110. Interpolation par <i>krigeage</i>	319
111. <i>Krigeage</i> et <i>splines</i> en mode anisotropique	319
112. Modèles de variogrammes	320

113.	Anisotropie du variogramme : <i>zexpcolo</i>	321
114.	Anisotropie du variogramme : <i>zexprepe</i>	322
115.	Semi-variogramme pour les différences d'altitude dans <i>zexpcolo</i>	323
116.	Semi-variogramme pour les différences d'altitude dans <i>zexprepe</i>	324
117.	Résultats du <i>Krigeage</i> dans <i>zexprepe</i>	326
118.	Résultats du <i>krigeage</i> dans <i>zexpcolo</i>	326
119.	Addition des données issus des échantillonnages photogrammétriques	327
120.	Extrait du fichier de données photogrammétriques	327
121.	Problèmes d'assemblage entre les données extraites des cartes topographiques et des photos aériennes	328
122.	Interpolation utilisant seulement les données photogrammétriques	328
123.	Nouvelle interpolation dans <i>zexprepe</i>	329
124.	Résultats de l'interpolation avec <i>krigeage</i>	330
125.	Résultats de l'interpolation avec les fonctions <i>splines</i>	331
126.	Carte d'inclinaison de la pente dans le bassin-versant Uruca	334
127.	Exposition du relief dans le bassin-versant Uruca	335
128.	Courbure du relief du bassin-versant Uruca	336
129.	Résidus d'interpolation montrant une forte anisotropie	338
130.	Résidus d'interpolation autour du canyon de la rivière Virilla	339
131.	Résidus d'interpolation au long de l'autoroute	339
132.	Échantillon de points de contrôle utilisé pour vérifier la fiabilité du MNT	339
133.	Résidus d'interpolation par rapport à l'échantillon de 500 points de contrôle	340
134.	Utilisation potentielle du sol	352
135.	Carte généralisée de l'utilisation du sol	354
136.	Discordances entre l'utilisation actuelle et l'utilisation potentielle du sol	355
137.	Carte schéma d'aménagement (<i>Plan Régulateur Urbain</i>)	357
138.	Effet prévisible de l'utilisation du sol proposée	358
139.	Utilisation du sol actuelle et proposée	361
140.	Utilisation du sol actuelle et proposée	362
141.	Évaluation du changement d'utilisation proposée	364

142.	L'indice du risque de contamination au bassin-versant Uruca	367
143.	Indice cumulé du risque de contamination par versant	368
144.	Intersection produite par l'exploitation de plusieurs relations N:N	369
145.	Indice normalisé du risque de contamination par versant	371
146.	Indice du risque de contamination par section fluvial et versant contributif	372
147.	La sélection du réseau hydrographique à l'aide du langage SQL et d'un système de codage approprié	373
148.	L'utilisation des fonctions d'agrégation avec jointure relationnelle pour additionner l'indice IRC dans le réseau hydrographique	373
149.	Indice cumulé du risque de contamination par section fluviale	374
150.	Carte des risques et menaces naturelles	376
151.	Les différents échelles dans la recherche, l'analyse, le dessin et l'administration des bassins-versants dans un contexte d'aménagement du territoire	380
152.	Contraintes au développement socio-économique	384
153.	Système de classification et codage des bassins-versants et réseau hydrographique	386
154.	Classification et codage du système de bassins-versants de la rivière Uruca suivant l'approche de Pfafstetter (1989) et Verdin (1997)	388
155.	Exploitation de la base de données permettant d'adapter notre système de codage à celui proposé par Pfafstetter (1989) et Verdin (1997)	389

LISTES DES TABLEAUX

1. Principaux séismes ayant déclenché des glissements de terrain et des "avalanches" de débris au Costa Rica	82
2. Personnel et institutions contactés lors du développement de la recherche	204
3. Données de départ pour l'interpolation avec <i>krigeage</i>	278
4. Matrice des n^2 distances entre les points d'observation	278
5. Vecteur des n distances par rapport au noeud à être interpolé	278
6. Matrice C des covariances spatiales pour l'exemple de calcul manuel avec <i>krigeage</i> ..	280
7. Matrice inverse C^{-1} des covariances spatiales pour l'exemple de calcul manuel avec <i>krigeage</i>	281
8. Vecteur des covariances spatiales d	281
9. Vecteur des poids relatifs w	281
10. Statistiques descriptives des résidus d'interpolation	339
11. Superficie des différentes combinaisons d'utilisation de sol actuelle et proposée	359
12. Extrait des principales transformations d'utilisation du sol proposées	360

PARTIE 1

Résumé:

Cette première partie de la thèse débute avec une discussion des concepts de base en SIG, aménagement du territoire et bassins-versants, suivie par une étude des conditions institutionnelles et juridiques pour l'application effective des SIG dans l'aménagement de bassins-versants au Costa Rica, et se termine par une étude géographique et géomorphologique du bassin-versant Uruca, 5603 Ha, situé à 15 km au nord-ouest de la capitale du pays, qui a été retenu pour l'application prototype.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DU PROJET ET DE SON CONTEXTE

1.1 Mise en situation

Partout sur la planète, l'environnement a connu une détérioration considérable. La révolution industrielle, puis l'économie de consommation, et maintenant la globalisation sont parmi les circonstances ayant facilité cette dégradation environnementale. La croissance exponentielle de la population mondiale, qui a augmenté de 50% pendant la période 1970-98, pour atteindre à l'heure actuelle les six milliards (en juillet 1999) (Internet, World Population Clock, 1998) en est une autre cause.

Cette situation a obligé l'Organisation des Nations Unies (ONU) à ne plus ignorer les pressions des activistes de la conservation, en déclarant la décennie de 1990 comme *la décennie pour la réduction des désastres naturels*. En plus, l'ONU a mis sur pied des projets pour essayer de comprendre le *changement global*. Contrairement au passé, les banques internationales ont mis à la disposition des gouvernements et même des organisations non gouvernementales (ONG) des crédits pour appuyer la gestion et la conservation de l'environnement.

Ces mouvements pro-environnement reconnus par les agences internationales les plus prestigieuses ont stimulé les politiciens locaux qui, de plus en plus, parlent d'aménagement territorial et de gestion du milieu.

Ce changement de perspective pourrait être une base pour atteindre des bénéfices ou progrès profits sociaux très significatifs. Cependant, avant d'y parvenir il faudra surmonter plusieurs problèmes:

1. L'environnement s'est déjà détérioré d'une façon importante à l'échelle planétaire.
2. L'aménagement de l'environnement est encore en forte opposition avec les principes économiques actuels.
3. Il subsiste une grande ignorance par rapport aux problèmes de l'environnement, même chez les politiciens.
4. L'environnement est un écosystème complexe intégré à l'échelle de la planète.
5. On ne connaît qu'insuffisamment le fonctionnement des écosystèmes à l'échelle planétaire.
6. On a besoin de davantage de données sur le milieu (environnement) alors que leur cueillette et leur traitement sont coûteux.
7. On a besoin d'outils performants pour la gestion des données permettant d'appuyer les actions sur l'environnement.

Parmi les efforts faits pour affronter les problèmes et les limitations signalés, nous voulons en souligner deux. D'abord, le concept d'aménagement de bassins-versants et, deuxièmement, le concept de Système d' Information Géographique (SIG).

Le premier est important parce que les bassins-versants sont des systèmes morphologiques du type processus-réponse (Schum,1977), dans lesquels il existe une forte intégration des sous-systèmes. Ce sont des unités naturellement définies et fonctionnellement individualisées, bien qu'intégrées en réseaux, ce qui donne un cadre intégré adéquat pour la mise en place des politiques de gestion et d'aménagement du territoire.

Le deuxième, celui du SIG, a acquis une importance croissante dans la dernière décennie. Les Systèmes d'Information Géographique sont de plus en plus utilisés dans les projets de gestion et d'aménagement du territoire notamment l'aménagement de l'environnement. Les SIG se sont montrés très utiles dans la planification de la saisie des données. Ces mêmes données transformées au format numérique peuvent être emmagasinées, traitées et retransformées pour les représenter sous un environnement digital en 2D et 3D, permettant ainsi leur analyse et leur intégration.

Récemment on a commencé l'exploration des opportunités pour intégrer les outils de modélisation spatiale (notamment environnementale) dans les SIG (Fedra,1993; Steyaert,1993; Goodchild,1993; Nyerges,1993; Maidment,1993), ainsi que les outils d'aide à la décision multicritère sur une base spatiale (Laharibi,1995; Densham,1991; Engel *et al.*,1993; Baskerville,1991; Honea *et al.*,1991). Les SIG deviennent de plus en plus des outils indispensables aux planificateurs, politiciens, décideurs, et bien sûr aux techniciens concernés par la gestion et l'aménagement de l'environnement.

Enfin, il faut signaler que, bien que les problèmes environnementaux les plus graves se trouvent souvent dans les pays du tiers monde, c'est là aussi que les contraintes économiques, politiques, et techniques atteignent leur maximum et compliquent la mise en place de politiques de récupération et d'aménagement de l'environnement.

C'est dans ce contexte de l'environnement technologique et géographique, que nous présentons la *Conception d'un Système d'Information Géographique pour l'Aménagement des Bassins-Versants au Costa Rica*, un projet qui vise à : 1) réviser le potentiel des SIG pour la gestion du territoire (notamment au niveau des bassins-versants), 2) développer une application au bassin-versant Uruca, 3) discuter des avantages et des difficultés d'une telle approche dans les pays sous-développés.

1.2 Problématique

Les SIG et la technologie qui y est rattachée ont déjà fait leurs preuves pour la gestion et le traitement des données de base pour l'aménagement du territoire. Cependant, les applications réussies se limitent le plus souvent aux pays développés possédant des contextes organisationnels, économiques et politiques favorables.

En contrepartie, les applications de SIG dans les pays sous-développés sont beaucoup moins nombreuses, plus modestes, et sont soumises à des contraintes socio-politiques éloignées de la technologie.

Burrough (1992:22-25) signale sept des contraintes pour le développement des SIG dans ces pays: les coûts, l'infrastructure, l'expertise, la mentalité, l'échelle spatiale, la technologie et le temps. Van Koppen (1992:63) résume les résultats des travaux réalisés en Égypte, au Burkina Faso et en Indonésie. À son avis, les principales contraintes trouvées étaient de type institutionnel, éducationnel et financier.

Un problème supplémentaire est celui du manque d'informations bien organisées. Des cartes datant de 1958 sont utilisées au Mali (van Teeffelen et al.,1992:11); au Costa Rica de nombreuses cartes au cinquante millièmes datent de 20 et 30 ans. Une situation analogue existe dans l'ensemble de l'Amérique Centrale.

Cependant, pour un grand nombre de pays non développés, le problème principal réside au niveau du manque d'expertise et non du coût des logiciels et des machines (*hardware*). C'est pourquoi, dans ces pays, les applications des SIG sont limitées aux transformations des cartes sur papier en cartes numériques (van Teeffelen,1992:11). On constate une absence totale de documentation et une mauvaise planification des projets d'implantation d'un SIG. Par exemple, il n'y a pas d'encadrement institutionnel pour le SIG, pas de définition claire des buts,

pas d'inventaire des données, aucune modélisation conceptuelle de la base de données et pas de dictionnaire de données.

Pour éviter des erreurs dispendieuses, il serait approprié, pour ces pays, de débiter avec de petits projets de SIG, pas trop ambitieux, mais bien conçus, en utilisant des logiciels avec une performance propre à la nature des projets. C'est de cette manière que l'on acquerra de l'expérience. C'est l'approche progressive (Al-Ankary,1991; Burrough,1992:23). Meijer et Kuipers (1992:45) proposent aussi un départ dès la base et, en exemple, montrent l'utilité du logiciel MapInfo pour la surveillance de la pauvreté (*slum monitoring*) à Bangalore (Inde).

Suivant ce conseil, nous avons choisi comme sujet de thèse une application prototype qui nous permet de confronter la réalité des applications du SIG dans un pays sous développé. Le Costa Rica a été choisi, évidemment pour des raisons de convenance pour l'auteur. L'étude des bassins-versants a été retenue parce que de plus en plus on croit, au Costa Rica, que ce sont les unités physiques et sociales sur lesquelles doit se baser l'aménagement du territoire (Rodriguez,1997; Quesada,1992:58-63; Brenes,1992:282-85). L'endroit, le bassin-versant Uruca, a été choisi parmi plusieurs options équivalentes, d'une part parce qu'il y existe de sérieux problèmes liés à la mauvaise gestion de l'environnement, et d'autre part parce qu'il existe quelques études préliminaires, et aussi parce que ce bassin-versant coïncide presque en totalité avec les limites de la municipalité de Santa Ana, qui avait déjà entrepris l'implantation d'un SIG. L'approche, c'est-à-dire la conception et le développement d'un SIG, a été choisie, parce que nous croyons vraiment au potentiel des SIG dans le domaine de la gestion territoriale et de l'environnement.

1.3 Objectifs et portée de la recherche

La thèse proposée est la suivante: *"Un SIG bien conçu peut supporter la gestion des données facilitant la prise de décisions, dans le cadre des projets d'aménagement territorial et de gestion de l'environnement, même si le budget est limité, comme c'est souvent le cas des applications dans les pays sous-développés"*.

1.3.1 Objectifs

1.3.1.1 Généraux

- 1- Établir une méthodologie adaptée aux conditions particulières des pays non développés, permettant l'insertion des SIG dans l'aménagement et la gestion des bassins-versants.
- 2- Faire une application pratique de cette méthodologie et montrer son potentiel et ses contraintes.

1.3.1.2 Spécifiques

1. Discuter de l'encadrement des bassins-versants dans les politiques d'aménagement territorial et de gestion de l'environnement.
2. Montrer l'importance de l'information géomorphologique dans le contexte des projets d'implantation d'un SIG appliqué à l'aménagement du territoire.
3. Discuter de la problématique socio-environnementale du bassin-versant Uruca.
4. Discuter de l'encadrement légal - institutionnel d'un SIG orienté vers la gestion des bassins-versants au Costa Rica.
5. Créer les modèles conceptuels et logiques des données (MCD et MLD) visant à créer un SIG capable de répondre aux besoins de gestion sociale et du milieu dans le bassin-versant Uruca.
6. Créer le dictionnaire de données pour documenter le SIG de façon adéquate.
7. Créer le modèle de traitements ou diagrammes du flux de données (DFD) pour le problème et le contexte spécifique de cette recherche.
8. Établir une procédure adéquate pour la création et la validation d'un MNE, de façon à pouvoir dériver des "couches" d'informations difficilement accessibles par des moyens manuels: pente, orientation, courbure du relief, qui seront ajoutées à d'autres informations disponibles dans le SIG.

9. Faire une comparaison entre les différents algorithmes utilisés pour la création d'un MNE pour établir ses avantages et leurs limites.
10. Créer un prototype du Système d'Information à Référence Spatiale visant à gérer, récolter, organiser, manipuler, analyser et se servir de l'information nécessaire à la bonne gestion sociale et du milieu du bassin-versant Uruca.
11. Évaluer et proposer une méthodologie adéquate pour l'étude et la cartographie des risques naturels. Aboutir à une carte des risques naturels pour le bassin-versant Uruca.
12. Créer la carte du potentiel et des contraintes au développement du bassin-versant Uruca.
13. Mettre en rapport les cartes-schémas d'aménagement existantes avec les cartes des risques naturels et des potentiels et des contraintes pour finalement en tirer des conclusions orientées vers l'aménagement intégral du bassin-versant Uruca.

1.3.2 Limites de la recherche

Le sujet de la recherche étant très vaste, nous étions en mauvaise posture pour analyser en détail chacun des aspects couverts par cette thèse. Nous avons cependant essayé de couvrir chaque sujet selon son importance relative pour l'ensemble du travail. Certains concepts sont passés en revue dans le but de clarifier la discussion et non pas dans le but d'établir des démonstrations incontestables.

1.4 Méthodologie de la recherche

D'après plusieurs auteurs (Thériault, 1994; Goodchild *et al.*, 1994; Clarke, 1991), la conception et l'implantation d'un SIG est une démarche complexe qui doit franchir plusieurs étapes pour assurer un maximum de possibilités d'atteindre une réussite. Nous essayerons de passer à travers certains aspects d'une telle démarche (figure 1), mais nous ne pourrons la suivre entièrement, compte tenu de la nature plutôt académique du travail, et du fait que le projet implique plusieurs institutions ayant un faible niveau de compromis.

Nous commencerons d'abord par une discussion conceptuelle sur la fonction des bassins-versants dans l'aménagement du territoire et la gestion de l'environnement. Nous y discuterons aussi des notions de base des SIG. Par la suite, nous verrons les conditions et les opportunités pour le développement d'un SIG spécialisé dans la gestion et l'aménagement des bassins-versants au Costa Rica. En particulier nous ferons une évaluation

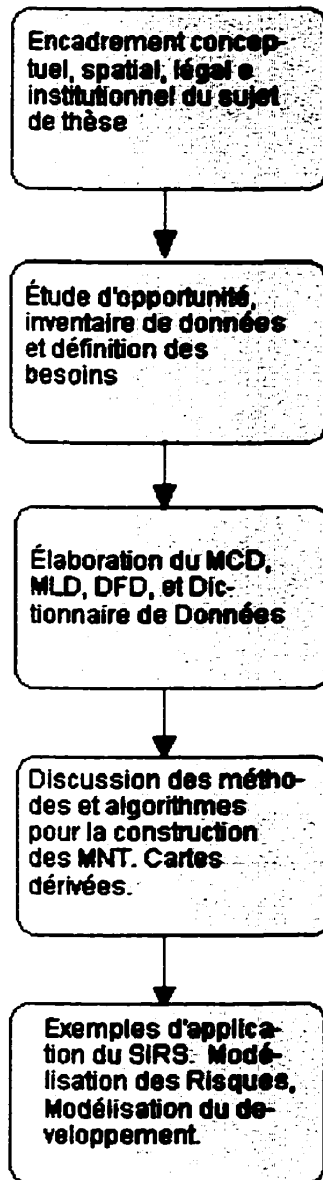


Figure 1. Diverses étapes dans la conception-implantation du SIRS

du cadre général du pays (socio-économique, institutionnel et légal), et des institutions concernées, directement ou non, par la gestion des bassins-versants. La façon dont nous traiterons cette partie est basée surtout sur des entrevues avec des gens clés d'institutions ainsi qu'avec des coordonnateurs et des techniciens travaillant dans des projets ayant un SIG en développement.

En deuxième lieu, nous traiterons de la modélisation du SIG, de sorte qu'il puisse répondre aux besoins en matière d'information d'un nombre réduit d'institutions concernées avec la gestion des bassins-versants. Nous produirons le Modèle Conceptuel de Données (MCD), le Modèle Logique de Données (MLD), la Modélisation des Traitements ou Modèle de Flux de Données (MFD), et le Dictionnaire des Données. Nous suivons la méthode par prototypage évolutif (figure 2) développée et proposée par Doucet *et al.* (1993). Cette approche a pour but principal d'assurer la gestion adéquate des données (entités, attributs et relations), évitant la saisie de données non nécessaires, minimisant leur redondance et maximisant les opportunités d'exploitation selon les buts poursuivis.

Troisièmement, nous discuterons des méthodes et des algorithmes utilisés pour la construction des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et plus particulièrement des Modèles Numériques d'Altitude (MNA). Nous aborderons notamment l'utilisation des techniques géostatistiques, la construction des variogrammes et l'interpolation par krigeage. Enfin, nous discuterons des produits dérivables des MNA, tels que les "cartes" de pente, orientation du relief, courbure, divergence et autres produits.

Finalement, nous discuterons de l'intégration des produits dérivés des MNT avec d'autres cartes numériques par rapport aux applications typiques d'aménagement du territoire: zonage des risques naturels, zonage des potentiels et des contraintes au développement, et plans régulateurs du développement urbain.

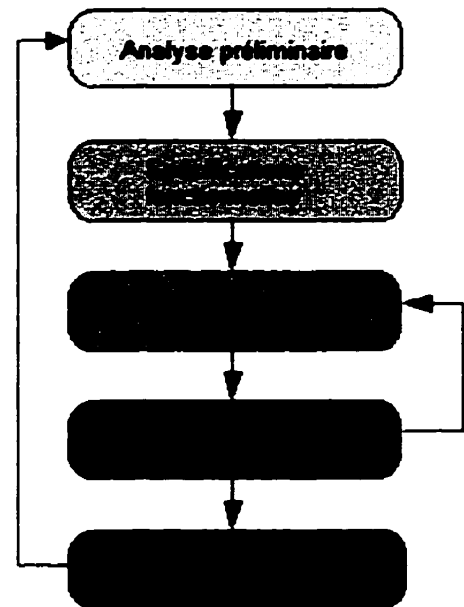


Figure 2. La méthode évolutive et le prototypage (Doucet et al., dans Bedard, 1993).

1.5 Structure de la thèse

Le contenu de la thèse est présenté suivant un ordre correspondant au schéma méthodologique. Dans la première partie nous présentons d'abord la problématique, les objectifs, l'approche méthodologique et les concepts de base. Par la suite, nous faisons l'étude d'opportunité, y inclus une révision des aspects institutionnels, légaux et socio-économiques. Dans ce contexte, nous caractérisons aussi la zone d'étude. Dans la deuxième partie nous développons le modèle conceptuel du SIG, y compris les modèles de données (MCD, MLD et DFD), ainsi que le dictionnaire de données. Dans la troisième partie nous révisons les méthodes de construction des MNT et algorithmes reliés. Enfin, dans la quatrième partie, nous faisons l'intégration des données et présentons des exemples d'applications potentielles (modélisation de scénarios) avec la base de données développée.

Dans le but de montrer les aspects les plus significatifs des processus analytiques, de nombreuses figures et cartes accompagnent le texte. Des cartes et figures montrent aussi les principaux résultats atteints. Des documents cartographiques à des échelles plus grandes ont été placés en pochette, à la fin du document.

Les références bibliographiques ont été placées à la fin de chaque chapitre pour faciliter la tâche du lecteur.

1.6 Références bibliographiques du chapitre

AL-ANKARY, K.M. 1991. An incremental approach for establishing a geographical information system in a developing country: Saudi Arabia. *International Journal of Geographical Information Systems* 5:85-98.

BASKERVILLE, G.L. 1991. GIS and the Decision-making Process. pp.3-5 in HAIT, M. and SHORTREID, A., eds. (1991) *GIS applications in Natural Resources*. GIS World Inc., Fort Collins, Colorado.

BRENES, L.G. 1992. La cuenca hidrográfica como instrumento del ordenamiento territorial. pp.282-285 en MADRIGAL, GONZÁLEZ y MAURÍ, eds. (1992) *I Congreso Nacional de Derecho Ambiental*. UICN, San José, Costa Rica.

BURROUGH, P.A. 1992. Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries. *Nederlandse Geografische Studies* 152, Proceedings of the GISDECO seminar organized by the GIS Working Group of the Faculty of Geographical Sciences, Utrecht niversity (7-8 April 1991). VAN TEEFFELN, VAN GRUNSVEN and VERKOREN, eds. Nederland.

CLARKE, A.L. 1991. GIS specification, evaluation and implementation. pp.477-488 in MAGRUIRE, GOODCHILD and RHIND, eds. (1991) *Geographical Information Systems: principles and applications*. Longman Scientific & Technical, Great Britain.

DENSHAM, P.J. 1991. Spatial decision support systems. pp.389-402 in MAGRUIRE, GOODCHILD and RHIND, eds. (1991) *Geographical Information Systems: principles and applications*. Longman Scientific & Technical, Great Britain.

DOUCET, B.; BÉDARD, Y.; PAQUETTE, F. et BÉLANGER, L. 1993. Utilisation d'outils de modélisation et prototypage pour faciliter le dialogue concepteurs-utilisateurs lors du développement d'un SIRS: application à un cas concret. pp.14p. en BÉDARD, Y., ed. (1993) *Recueil de lectures: hiver 1994*. Vol 1. GMT-18110. Structuration et stockage de données à référence spatiale. Département de Sciences Géodésiques et Télédétection, Université Laval. Québec, Canada.

ENGEL, B.A.; SRINIVASAN, R. and REWERTS, Ch. 1993. A Spatial Decision Support System for Modeling and Managing Agricultural Non-Point-Source Pollution. pp.231-237 in GOODCHILD, PARKS and STEYAERT, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

FEDRA, K. 1993. GIS and Environmental Modeling. pp.35-50 in GOODCHILD, PARKS and STEYAERT, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

GOODCHILD, M.F.; KEMPT, K.K.; THÉRIAULT, M. et ROCHE, Y. 1994. *Systèmes d'Information Géographique: notes de cours*. Vol.1, Chap. 27-30; Vol.2, Chap. 31-35. LATIG, Département de Géographie, Université Laval, Québec, Canada.

GOODCHILD, M.F. 1993. The State of GIS for Environmental Problem-Solving. pp.8-15. in GOODCHILD, PARKS and STEYAERT, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

HONEA, R.B.; HAKE, K.A. and DURFEE, R.C. 1991. Incorporating GISs into Decision Support Systems: Where Have We Come From and Where Do We Need To Go?. pp.39-44 in HAIT, M. and SHORTREID, A., eds. (1991) *GIS applications in Natural Resources*. GIS World Inc., Fort Collins, Colorado.

INTERNET, Word Population Clock, 1998.

LAHARIBI, A. 1995. *Systèmes d'Information Géographique et Analyse Multicritère: Intégration pour l'Aide à la Décision à Référence Spatiale*. Thèse. Département des Sciences Géomatiques, Université Laval, Québec, Canada.

MAIDMENT, D.R. 1993. GIS and Hydrological Modeling. pp.147-167 in GOODCHILD, PARKS and STEYAERT, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

MEIJER and KUIPERS. 1992. Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries. *Nederlandse Geografische Studies* 152, Proceedings of the GISDECO seminar organized by the GIS Working Group of the Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University (7-8 April 1991). VAN TEEFFELEN, VAN GRUNSVEN and VERKOREN, eds. Nederland.

NYERGES, T.L. 1993. Understanding the Scope of GIS: Its Relationship to Environmental Modeling. pp.75-93 in GOODCHILD, PARKS and STEYAERT, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

QUESADA, C. 1992. El Desarrollo Sostenible. pp.58-63 en **MADRIGAL, GONZÁLEZ y MAURÍ**, eds. (1992) *I Congreso Nacional de Derecho Ambiental*. UICN, San José, Costa Rica.

RODRÍGUEZ, A. (ed). 1997. *Políticas Institucionales sobre Cuencas Hidrográficas*. Memoria del I Encuentro sobre Organismos de Cuenca de Centro América y el Caribe. San José, Costa Rica.

SCHUMM, S.A. 1977. *The fluvial system*. John Wiley, New York.

STEYAERT, L.T. 1993. A perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. pp.16-30 in **GOODCHILD, PARKS and STEYAERT**, eds. (1993) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, USA.

THÉRIAULT, M. 1994. *Systèmes d'Information Géographique: Concepts Fondamentaux*. LATIG, Département de Géographie, Université Laval, Québec, Canada.

VAN KOPPEN. 1992. Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries. *Nederlandse Geografische Studies* 152, Proceedings of the GISDECO seminar organized by the GIS Working Group of the Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University (7-8 April 1991). **VAN TEEFFELEN, VAN GRUNSVEN and VERKOREN**, eds. Nederland.

VAN TEEFFELEN et al. 1992. Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries. *Nederlandse Geografische Studies* 152, Proceedings of the GISDECO seminar organized by the GIS Working Group of the Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University (7-8 April 1991). **VAN TEEFFELEN, VAN GRUNSVEN and VERKOREN**, eds. Nederland.

CHAPITRE 2

RÉVISION DES CONCEPTS DE BASE

Nous allons préciser les concepts d'*aménagement*, de *bassin-versant* et de *système d'information géographique* ainsi que leurs interrelations dans le contexte de cette recherche.

2.1 L'aménagement et l'aménagement des bassins-versants

Aménager, c'est préparer et organiser en vue d'une utilisation précise (Dictionnaire du Français Plus, 1988:57). L'*aménagement* est donc l'action d'aménager; le résultat de cette action. C'est organiser en vue d'améliorer les conditions d'utilisation (Op.cit.). Il y a de nombreuses applications pratiques du concept d'aménagement. Aménager un appartement, c'est le rendre habitable; aménager une forêt, c'est réglementer sa coupe et son exploitation; l'aménagement fiscal, c'est rendre plus souple et effective la réglementation fiscale.

Pour mieux distinguer le mot "*aménager*" du terme "*aménager le territoire*", on peut se référer à J. Tricart (1985):

"Rappelons une distinction fondamentale. L'aménagement consiste à intervenir au niveau d'une certaine étendue de territoire, d'une unité naturelle, comme un bassin -

versant, un massif montagneux ou une circonscription administrative (région, département, état). Cela comporte un ensemble d'actions coordonnées de nature différente qui affectent directement ou indirectement l'ensemble de ce territoire, ainsi que, bien souvent, des territoires voisins, que cela soit voulu ou non. Par exemple, l'aménagement d'une région montagneuse influence le régime des eaux, les transports alluviaux, la qualité des eaux, ce qui a des conséquences pour les parties en aval des bassins - versants hors de la montagne. À l'opposé, des interventions ponctuelles, de caractère technique précis, ne sont pas des aménagements, mais des opérations d'équipement. Comme l'est, par exemple: la construction d'un barrage, d'une centrale thermique, d'une route, d'un quartier d'immeubles. Certes, l'aménagement comporte la réalisation d'un certain nombre d'équipements, mais cette dernière est subordonnée à l'aménagement, dans lequel elle s'intègre. Certaines opérations d'équipement répondent, par ailleurs, à un besoin purement technique, comme la construction d'une centrale électrique, et ne sont pas intégrées dans un aménagement. Il arrive même qu'elles aillent à l'encontre d'un plan d'aménagement. Elles peuvent occasionner des troubles sur un territoire plus ou moins vaste: c'est pour les évaluer qu'ont été définies les études d'impact" (Tricart, 1985:107).

2.1.1 L'aménagement du territoire: histoire et concept

L'aménagement du territoire est "*la mise en valeur du territoire national*" (Dictionnaire du Français Plus, 1988:57). Il est défini aussi comme "*la programmation globale et coordonnée d'un ensemble de mesures visant une meilleure répartition spatiale des hommes et des activités, compte tenu des ressources disponibles, et devant contribuer au développement de chaque région*" (Prod'homme, 1985:35). L'aménagement cherche à faire coïncider les intérêts propres de la région et ceux de l'ensemble plus vaste dans lequel elle s'insère. Il peut donc être considéré comme une action volontariste, souvent externe (en dépit des tentatives de concertation), limitée dans le temps (Op.cit.). Pour Blandin et Lamotte (1985:160), "*concevoir un aménagement, c'est mettre en forme un projet social portant sur l'organisation du*

territoire: on se propose de remodeler celui-ci afin d'orienter son fonctionnement en vue de la satisfaction d'un certain nombre d'objectifs".

Une des questions les plus délicates à laquelle est confrontée toute politique d'aménagement est celle de la délimitation des espaces concernés. Fréquemment, les circonscriptions administratives n'ont pas une signification sociologique actuelle et opposent des frictions importantes face aux nouvelles idées et stratégies. Lorsqu'on parle de l'espace, dans l'aménagement du territoire, on ne fait pas référence à la notion abstraite de volume ou de superficie des géomètres; on parle plutôt d'un milieu, d'un lieu de vie, d'un éco - complexe (un système d'écosystèmes sur un espace donné (Blandin et Lamotte,1985:143)) où sont combinés des intérêts opposés d'appropriation, d'utilisation, de transformation, et où s'établissent des relations et des sentiments d'appartenance (Prod'homme,1985:34-35). Donc, la société entière et les écosystèmes biologiques sont compris dans cette notion d'espace.

L'aménagement a une base territoriale, cela va de soi. Cependant, on se pose la question, comment délimiter ces unités territoriales? La réponse varie selon le but du programme d'aménagement, sa nature, son encadrement ou selon d'autres considérations. Un programme d'aménagement forestier utilisera probablement une structure territoriale basée sur la distribution des types forestiers, et peut-être, aussi selon l'état de développement de la forêt (Paquette,1990). Sur ce même espace, on peut avoir un autre programme d'aménagement des ressources hydriques qui utilisera le réseau fluvial comme base pour guider les actions (Schramm,1980; Montgomery *et al.*,1995; Lotspeich,1980). Cependant, ceux qui travaillent en écologie du paysage préféreront les aménagements basés sur un découpage en écosystèmes (Slocombe,1993:612; Omernik *et al.*,1991; Omernik,1987). Finalement, les cellules d'aménagement forestier, celles de gestion des ressources hydriques et celles visant des aménagements paysagers - écologiques, sont toutes incluses dans les régions définies dans les programmes d'aménagement territorial du gouvernement.

2.2.2 La gestion et l'aménagement des bassins-versants

Smith (1969) discute la fonction historique jouée par les bassins hydrographiques en tant que supports des activités humaines. Déjà en 1752, P. Buache, présentait un mémoire dans lequel il soulignait le concept d'unité topographique des bassins-versants. Plus tard, au dix-neuvième siècle, certains géographes ont reconnu le caractère d'unité naturelle des bassins-versants en les proposant pour remplacer les unités politiques dans les études territoriales (Smith, 1969:101). Cette idée s'est propagée jusqu'au début du vingtième siècle, avec les travaux de Jean Brunhes portant sur la géographie humaine, en France, qui ont souligné l'importance des bassins hydrographiques dans l'organisation du territoire. Cet auteur a accordé une grande importance aux réseaux hydrographiques en écrivant "L'eau est le bien souverain d'un état et de son de peuple. Elle est aliment, fertilisant, puissance et transport" (Bruhnes, 1920:93; cité par Smith, 1969:103). Dans sa régionalisation de l'Angleterre, C.B. Fawcett a accordé beaucoup d'importance aux bassins-versants en tant que limites naturelles (Fawcett, 1917; cité par Smith, 1969:103).

Smith (1969) mentionne que le rôle intégrateur attribué aux bassins hydrographiques avant la révolution industrielle s'explique par l'importance des rivières comme moyen de transport, et par le besoin d'eau facilement accessible près des villes. En plus, les activités comme la pêche et l'agriculture dépendaient beaucoup du potentiel naturel et étaient favorisées par le voisinage des cours d'eau.

Smith (1969:107) signale aussi que le concept de bassin-versant en tant qu'unité d'aménagement trouve son origine dans les travaux monumentaux des sociétés organisées autour des systèmes d'irrigation, notamment dans des sociétés comme l'Inde, la Chine, et le Pérou.

Smith (1969:109) écrit:

"Dans une variété de formes, les bassins hydrographiques ont défini une structure (framework) pour les activités humaines: en guidant la direction des premiers peuplements, dans la navigation fluviale et la croissance du commerce et des villes, favorisant l'approvisionnement d'eau pour l'électricité à l'usage des concentrations industrielles, et en fournissant un contexte logique pour les travaux d'irrigation. Cependant, dans de nombreux cas, de telles fonctions n'ont pas créé d'unité pour le bassin hydrologique dans son ensemble, mais plutôt pour une partie, celle qui était particulièrement favorisée par de tels avantages. Très peu ont reconnu, consciemment, l'interrelation du bassin hydrographique entier. Les chinois ne semblent pas avoir reconnu l'interrelation entre le déboisement des hautes crêtes de loess et les inondations, sédimentations et sécheresses des plaines dans le Nord de la Chine (...) En réalité, l'idée des bassins hydrographiques comme une unité d'aire appropriée pour l'organisation de l'activité humaine et pour l'aménagement régional a été reprise très récemment avec la reconnaissance du bassin comme un système inter-relié dans lequel la couverture du sol et de la végétation ainsi que le bilan hydrologique sont combinés, et avec la reconnaissance du besoin pour des plans et politiques intégrés pour combattre les problèmes posés par le contrôle des inondations, la sédimentation, l'érosion du sol, la production d'énergie hydroélectrique, la navigation, le contrôle de la pollution, et encore, la conservation de la nature. Un exemple de cette approche moderne est la création de L'Autorité de la Vallée du Tennessee aux États Unis (dans les années 1930); une autorité régionale, qui allait au-delà des frontières des unités administratives traditionnelles" (traduction libre).

Schramm (1980) place l'aménagement intégré des bassins hydrographiques dans un contexte holistique. Son approche souligne le caractère systémique des bassins-versants, autant du point de vue hydrologique et géomorphologique, que du point de vue de la cohésion infrastructurelle et même sociale. L'auteur souligne, cependant, que cette cohésion peut se voir affaiblie par des échanges économiques extra-bassin; possibilité qui devient plus forte lorsque la dimension du bassin croît. L'aménagement des grands bassins hydrographiques multinationaux, est le cas le

plus complexe; cependant, il existe des exemples réussis, comme celui du Nil (Égypte et Soudan), ou celui du Parana (Argentine, Bolivie, Brésil, Paraguay, et Uruguay) (Smith,1969:109).

Lotspeich (1980) propose un schéma conceptuel permettant de classifier les bassins-versants comme étant des écosystèmes:

"(Les bassins-versants sont classifiés sur la base de leurs attributs naturels). Deux facteurs physiques de l'environnement, le climat et la géologie, sont sélectionnés comme les facteurs d'état (du système). Le climat est le facteur maître qui fournit l'énergie et l'eau à tous les écosystèmes; la structure géologique fournit les matériaux à partir desquels les forces du climat sculptent les bassins-versants pour établir les écosystèmes. Au niveau inférieur, le sol et la végétation agissent en commun dans une succession de transactions pour produire une mosaïque naturelle dans chaque bassin-versant. C'est l'interaction des composantes de cette mosaïque qui modérera le climat et l'emmagasinement d'énergie, facteurs qui influenceront les cours d'eau dans le bassin. Au bas de l'échelle, on a le cours d'eau avec son rôle passif et son inhabilité pour agir avec les plus hauts facteurs de l'écosystème. Ainsi, nous avons une force de contrôle formée de deux éléments (le climat et la géologie), une force de réaction (sol et végétation) qui répond par conditionnement circulaire face aux forces de contrôle, et, au niveau le plus bas, le cours d'eau qui répond à tous les facteurs des systèmes en présence dans le bassin-versant" (Lotspeich,1980:581). -Traduction libre.

Lotspeich (1980:582-583) fait ressortir les attributs des bassins-versants en les identifiant comme des écosystèmes. *"Il s'agit d' unités physiographiques clairement définies, formées par des processus opérant dans leurs vallées respectives et contrôlées par la Loi de Playfair (Strahler,1986:510), où se développent parallèlement, la végétation et la faune en réponse au climat qui domine sur une unité géologique (...)" (Lotspeich,1980:582)". -Traduction libre.*

Schumm (1977:2-15) aborde l'étude des bassins-versants comme des systèmes fluviaux, et établit l'important concept des types d'équilibre dans le temps. Plus loin (pp.18-38), l'auteur mentionne l'interrelation et le degré d'indépendance de chacune des douze variables principales d'un bassin-versant.

Urban *et al.* (1987:121) proposent une structure hiérarchique pour l'analyse du paysage:

"Le paysage, c'est une mosaïque de pièces, qui sont à leur tour, les composantes des patrons (patterns). Les agents responsables de la formation de ces patrons sur les paysages naturels sont les perturbations (disturbances), les processus biotiques, et les contraintes de l'environnement (p.119) (...) la complexité des patrons du paysage est organisée d'une façon spéciale: les événements et les pièces se produisent à des échelles caractéristiques qui sont positivement corrélées dans le temps et l'espace (p.120) (...) la théorie hiérarchique est concernée avec les systèmes qui ont un certain type d'organisation complexe. Les systèmes organisés d'une façon hiérarchique peuvent être divisés, ou décomposés, dans des composantes fonctionnelles discrètes qui fonctionnent sur des échelles différentes". -Traduction libre.

Montgomery *et al.* (1995), font un important effort pour résumer la problématique concernant l'utilisation des bassins-versants comme la structure de base pour développer l'aménagement des écosystèmes. A leur avis,

"la mise en marche d'une approche basée sur le concept d'écosystème, pour l'aménagement et la prise de décisions relatives à l'utilisation de la terre, demande de nouvelles méthodes pour relier la science et l'aménagement. Une intégration plus forte est nécessaire parce que dans la perspective de l'aménagement des écosystèmes, les niveaux soutenables dans l'utilisation des ressources sont déterminés en assemblant (coupling) les objectifs de l'aménagement avec les possibilités et les capacités du paysage. Des propositions récentes concernant la mise en marche de l'aménagement des écosystèmes utilisent l'analyse sur une

échelle hiérarchique. Dans cette hiérarchie, l'analyse des bassins-versants fournit une structure (framework) pour démarquer la distribution spatiale et les liens entre les processus physiques et les communautés biologiques dans un contexte physique approprié: le bassin-versant ..."(Montgomery et al.,1995:369). - Traduction libre.

Même si Urban et al. (1987:122) placent le bassin-versant au deuxième niveau hiérarchique (directement au-dessous du paysage), ils signalent que les différentes hiérarchies peuvent être construites selon le phénomène d'intérêt. Tandis que la hiérarchie *trou* (l'espace ouvert par la chute d'un arbre dans la forêt)- *peuplement* (forestier)- *bassin-versant* - *paysage*, pourrait être appropriée pour étudier la composition des espèces ou le cycle des nutriments dans les forêts; ces niveaux peuvent ne pas être significatifs dans d'autres buts.

Omernik (1987) présente une approche et une classification des "eco - régions" pour l'ensemble des États-Unis. La fonction primaire de cette carte des éco-régions est celle de fournir un encadrement (*framework*) géographique pour organiser l'information relative aux ressources des écosystèmes. Les éco-régions ont une superficie moyenne de 130 000 km², variant entre 15000 et 330 000 km².

Omernik et Griffith (1991) discutent du rôle des régions écologiques et des bassins hydrographiques en tant que structures d'encadrement (*frameworks*) pour l'aménagement de la qualité de l'eau. Leur point de vue est que les études au niveau des bassins hydrographiques, tels qu'elles sont réalisées aux États-Unis, ne contribuent pas à montrer un cadre réel, comparatif, de l'état de la pollution des bassins-versants. A leur avis, à l'échelle nationale et régionale, l'approche basée sur les éco-régions est beaucoup mieux adaptée, tandis qu'à l'échelle locale, l'approche bassin-versant peut rester utile, surtout lorsqu'il s'agit de terrains montagneux, notamment dans les régions à climat humide.

Chang (1982) cité par Fallas et Gutiérrez (1992:342) écrit:

“Un bassin-versant peut être considéré comme une unité géographique naturelle dans laquelle tous les produits (eau, sédiment, matière organique, etc.) s’écoulent sur un lit ou une rivière principale (...) Du point de vue économique, il s’agit d’une unité naturelle pour la planification et la gestion du développement régional et national”. - Traduction libre.

Fallas et Gutiérrez (1992:341) mentionnent:

“Par leur nature intégratrice et multidisciplinaire, l’aménagement des bassins-versants offre un encadrement théorique permettant de faire des inventaires, d’évaluer et de proposer des mesures physiques, légales et administratives portant sur la restauration et la normalisation des processus hydrologiques et socio-économiques dans les bassins”. - Traduction libre.

Donc, tel qu'on l'a vu, les bassins-versants ont joué un rôle historique très étendu dans l'aménagement du territoire. Au départ, d'une façon moins consciente, liée aux besoins élémentaires du transport et aux besoins des aménagements pour la gestion de l'eau (notamment dans les sociétés à climat sec). Plus tard, par des essais conscients de rationalisation où les bassins-versants étaient des unités suffisamment claires sur les cartes et sur le terrain, on reconnaissait leur important rôle cohésif tout au long de l'histoire. Plus récemment, on les a conceptualisés comme de véritables systèmes hydro-géomorphologiques par un encadrement adéquat pour des aménagements intégrés de grande envergure, notamment sur le plan hydraulique. Finalement, le rapprochement de la théorie écologique et de celle de l'aménagement a permis de considérer les bassins-versants comme de véritables écosystèmes, un encadrement tout à fait approprié, bien délimité dans l'espace, pour la pratique de l'aménagement socio-écologique intégré.

2.2 Bassins-versants

2.2.1 Concept

D'après Llamas (1993):

"Un bassin-versant est un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les précipitations et dont les excès en eau ou en matériaux solides transportés par l'eau forment, en un point unique de l'espace, une embouchure ou un exutoire (Llamas,1993:47). "Ainsi défini, il est évident que la limite d'un bassin est le lieu géométrique des points les plus élevés. Le tracé de la limite d'un bassin se fait en commençant par l'embouchure et en suivant les points les plus élevés jusqu'à la fermeture complète du circuit" (Op cit.,p.48).

Dans une approche systémique, Strahler (1950) définit le bassin-versant comme *"un système ouvert tendant à acquérir un état stable de fonctionnement"*. Il applique le concept biologique des systèmes ouverts (von Bertalanffy,1950) aux systèmes hydrographiques en état gradué.

"Un système ouvert importe et exporte de la matière et de l'énergie à travers les frontières du système et doit transformer l'énergie uniformément pour maintenir son fonctionnement. Dans un bassin-versant la surface du terrain à l'intérieur du périmètre du bassin constitue une frontière du système à travers laquelle la précipitation est importée. La matière minérale fournie de l'intérieur du système et la précipitation excédante quittent le système via l'embouchure du bassin. Dans un bassin-versant gradué, l'état stable se manifeste par le développement de certaines caractéristiques topographiques qui acquièrent un état indépendant du temps. Les processus d'érosion et le transport produisent un flux stable (flux moyen sur des périodes annuelles ou des dizaines d'années) d'eau et de déchets provenant du bassin. L'énergie potentielle liée à la position des objets, est transformée en

énergie cinétique de l'eau et des débris en mouvement, ou en chaleur. Considéré sur une très longue période de temps, un réajustement continu des composantes dans un état stable est acquis; pendant ce temp le relief baisse et l'énergie disponible diminue. Les formes topographiques montreront conjointement une lente évolution" (Strahler,1950:676). -Traduction libre.

Le bassin-versant est aussi un écosystème, comme l'a fait voir Lotspeich (1980:582); concept repris par Petts et Foster (1984:8;10) et renforcé par Montgomery *et al.* (1995).

2.2.2 Délimitation, partition, hiérarchisation

La délimitation, partition et hiérarchisation des réseaux hydrographiques ont une énorme importance théorique et pratique en géomorphologie et hydrologie. Du côté théorique, l'analyse géométrique et topologique des réseaux a permis d'établir de véritables lois concernant la nature et le développement des bassins-versants et des cours d'eau. Même si elle précède les travaux formels dans l'analyse des réseaux hydrographiques, la loi de Playfer de 1802 a mis fin à une longue croyance sur la nature catastrophique (diluvienne) de la morphologie fluviale; en accord avec John Playfair,

"Chaque rivière est formée d'un tronc principal alimenté par une série de branches, chacune d'entre elles s'écoulant dans un vallon proportionnel à sa taille, et tous ensembles formant un système de vallons reliés, avec une dénivellation si parfaitement ajustée, qu'aucun d'entre eux ne rejoint la vallée principale à un niveau ni trop haut ni trop bas. Ce fait serait complètement improbable si chacun des vallons n'était le résultat de l'excavation faite par les cours d'eau" (Strahler,1986:510). -Traduction libre.

Strahler parle aussi de la loi du développement allométrique, un principe importé des sciences biologiques mais applicable aux réseaux fluviaux.

"Le développement d'un système d'érosion fluvial est similaire en bonne partie au développement d'un animal ou d'une plante (...) la vitesse relative du développement d'un organe (un cours d'eau, un sous-bassin) est une fraction constante de la vitesse relative du développement de l'individu entier (le réseau)" (Strahler, 1986:35). -Traduction libre.

Les lois *du nombre des cours d'eau et des longueurs des cours d'eau* (Horton, 1945), et leur extension proposée par Strahler (1986:528), *loi de la superficie des bassins-versants*, sont une conséquence de la *loi du développement allométrique*.

Sur le plan pratique, la délimitation, partition et hiérarchisation des réseaux hydrographiques sont importantes en géomorphologie (études morphométriques et modèles de calcul de stabilité de versants) et en hydrologie (calculs de bilan d'eau, calculs des débits, suivi des trajectoires du flux d'eau (*flow paths, cascading flows, kinematic routing*)).

La délimitation des bassins-versants s'avère une tâche relativement facile lorsqu'on utilise une carte en courbes de niveau. Il s'agit simplement de définir la section transversale qui rejoint le point de départ, et de là, suivre la ligne de partage des eaux, celle qui sépare l'écoulement vers l'intérieur et vers l'extérieur du bassin.

Toutefois, dans les détails, cette délimitation demeure très dépendante de l'échelle de la carte. La ligne de partage des eaux souffrira de petits changements sur le plan géométrique lorsqu'on passe de l'échelle 1 : 50 000 à l'échelle 1 : 10 000, par exemple. Étant donné que la précision des relevés topographiques s'améliore de plus en plus, notamment avec l'introduction des Systèmes de Positionnement Global (GPS), la question des limites des bassins-versants reste une affaire de consensus selon les buts et le niveau de précision recherchés.

Plus compliquée est la délimitation des bassins-versants qui devient assez lourde lorsqu'on prend en compte des déversements qui ont lieu, le plus souvent, dans les piémonts couverts par

des cônes de déjection. Costa et Burges (1994) ainsi que Fairfield et Leymarie (1991) ont abordé ce sujet dans le contexte de la hiérarchisation des réseaux hydrographiques.

La délimitation des bassins-versants a connu un changement méthodologique et un intérêt renouvelé depuis les années 1975 (Sekulin *et al.*, 1992:2101), ce qui répond à l'adoption assez généralisée de la modélisation physique, spatialement distribuée, dans le domaine de l'hydrologie. Il s'agit d'obtenir la délimitation des bassins-versants par des moyens automatisés à l'aide des Modèles Numériques de l'Altitude (MNA). Parmi d'autres, on cite les travaux de Jenson et Domingue (1988:1596), Mark (1985), Douglas (1986), Morris et Heerdegem (1988) (cité par McCormack *et al.*, 1993), Zhang *et al.* (1990), Palacios et Cuevas (1986), Mackay *et al.* (1992).

La partition des réseaux hydrographiques est une extension du principe de délimitation des bassins-versants, mais elle va jusqu'au niveau des micro-bassins et des versants. On utilise la jonction de chaque tronçon du réseau des chenaux pour délimiter leur bassin-versant contributif.

En plus des problèmes du traçage des lignes de partage des eaux, on a souvent des difficultés pour localiser les points de départ des chenaux. De même, il semble qu'en agrandissant l'échelle, on découvre d'autres petits cours d'eau, de sorte que la partition du réseau hydrographique, et par conséquent la partition des micro-bassins devient une tâche fort dépendante de l'échelle considérée.

La partition des réseaux hydrographiques (réseaux des bassins-versants et réseaux de chenaux), est un sujet traité depuis longtemps. Jusqu'en 1932, quand R.E. Horton a publié son article "Caractéristiques des bassins-versants" (Horton, 1932), les études de la morphologie hydrographique avaient été très descriptives, suivant la classification en bassins et cours d'eau jeunes, matures, âgés tels qu'ils sont décrits dans le modèle davisien (Davis, 1899).

Après Horton, une quantité importante de travaux ont été réalisés sur le sujet. Horton (1945) présente un important travail sur "le développement érosif des cours d'eau et leurs bassins-versants". De leur côté, Leopold et Miller (1956) ont publié une étude sur "les facteurs hydrauliques des chenaux éphémères et leur rapport avec le réseau hydrographique". On doit à Strahler (1964) une étude assez détaillée, intitulée "Géomorphologie quantitative des bassins-versants et des réseaux de chenaux", alors que Chorley et Dale (1972) ont discuté certains "problèmes cartographiques dans le traçage des chenaux hydrographiques".

Le sujet n'a pas perdu d'intérêt de nos jours. Il s'est plutôt diversifié. Parmi les travaux récents, citons ceux de Marcus (1980), Barbera et Rosso (1989), Mazur et Castner (1990), Werner (1988,1991), Liu (1992), Whiting (1993).

Le développement de la cartographie assistée par ordinateur et des systèmes d'information géographique a donné une impulsion nouvelle au sujet de la partition des réseaux des bassins-versants et des réseaux des cours d'eau. Nous pouvons citer, entre autres, les travaux de Gardiner (1982) (cité par Mazur et Castner), Mark (1984,1985), Douglas (1986), Band (1986), Palacios y Cuevas (1986), Moore *et al.* (1988), Jenson et Domingue (1988), Hutchinson (1989), Dikau (1989), Tribe (1991,1992), Fairfield et Leymarie (1991), Palacios y Cuevas (1992), Chorowicz *et al.* (1992), McCormack *et al.* (1993), Ichoku et Chorowicz (1994), Eash (1994), Dawes ant Short (1994), Tachikawa *et al.* (1994), Costa et Burges (1994), Zhang et Montgomery (1994).

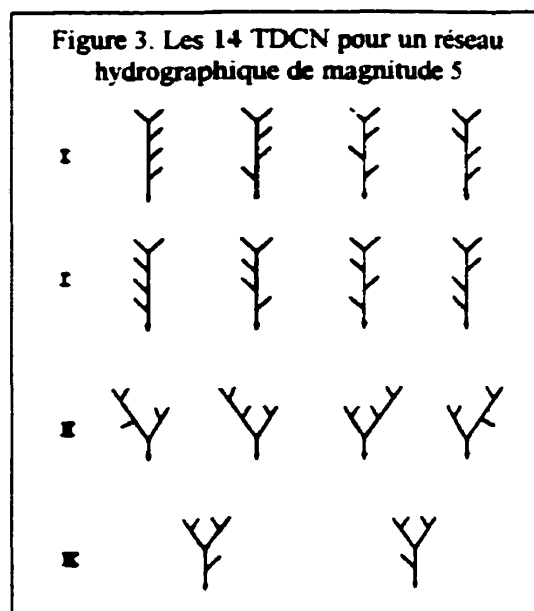
L'étude quantitative, notamment sur une base topologique, des réseaux hydrographiques s'est développée au cours des années, de sorte que plusieurs schémas de hiérarchisation des réseaux hydrographiques ont été proposés. À ce sujet, on peut citer les travaux de Horton (1945), Strahler (1964), Shreve (1966,1967), Liao et Scheidegger (1968), Mock (1971), Smart (1972), Werner et Smart (1973), Jarvis et Werritty (1975), Warntz (1975), Dacey et Krumbein (1976), Kirkby (1976). Pour ce qui est de l'approche SIG, on peut citer, Seemuller (1989), Gandoy et Palacios (1990), Dawes et Short (1994).

Plusieurs essais de classification topologique des réseaux hydrographiques (notamment des cours d'eau) ont été proposés. Parmi les plus utilisées, on peut mentionner celles de Horton (1945), Strahler(1952), Shreve (1957), et Scheidegger (1965). Le but principal d'une telle hiérarchisation a été de montrer qu'il existait une relation entre la similitude topologique et les autres caractéristiques des réseaux hydrographiques. En d'autres mots, le but était de comparer les propriétés des différents bassins-versants en utilisant l'équivalence topologique comme critère de comparaison. Des relations entre l'ordre topologique du bassin et les plus grandes pointes de décharge ont été établies. Il en est de même pour la relation entre le nombre de chenaux de premier ordre et la quantité et l'intensité de la pluie.

Horton prévoyait qu'il y aurait une relation entre l'ordre topologique, notamment les taux de bifurcation et les taux des longueurs des cours d'eau, et les attributs de la topographie, la géologie, le climat et d'autres facteurs de l'environnement. Toutefois, de telles relations n'ont pas été clairement mises en évidence. Des complications additionnelles ont été introduites dans les efforts pour classer les réseaux hydrographiques en fonction des attributs topologiques, lorsque Shreve (1966) et Jarvis (1975) ont montré la croissance exponentielle du nombre des *réseaux hydrologiques topologiquement distincts* (TDCN en anglais):

$$\text{TDCN} = (1/2n-1) ((2n-1)! / ((n-1)! (n)!))$$

De sorte que, pour un réseau de magnitude cinq ($n=5$), comme dans la figure 3, on a 14 différents réseaux hydrographiques distincts du point de vue topologique.



2.2.3 Les bassins-versants et l'analyse du territoire

Nous allons maintenant discuter quelques aspects de ce qu'on appelle l'analyse du territoire, en particulier le problème du découpage des unités de terrain et les différents modèles ou approches dans l'analyse. Nous montrerons dans quelle mesure les SIG sont parvenus à changer les approches dans l'analyse du territoire et des bassins-versants.

2.2.3.1 Le problème du découpage du territoire

L'analyse du territoire (*terrain analysis*) consiste, comme toute autre méthode analytique, à diviser pour simplifier et comprendre. Il s'agit de découper le territoire en unités de gestion relativement uniformes (Cruden and Thomson, 1987:1). Plusieurs sources de données spatiales, telles que des cartes géologiques, topographiques, pédologiques, météorologiques, de couverture végétale et autres sont utilisées pour essayer de découvrir ces unités homogènes. Cependant, ce sont les photos aériennes et plus récemment les images satellites, qui rendent moins abstraits ces schémas de morcellement. L'avenir de la photographie aérienne semble devenir digital et multispectral. Cela rendra l'intégration des images satellites et des photos aériennes très souple et donnera un potentiel énorme pour la mise en pratique de l'analyse de terrain à tous les niveaux de l'aménagement du territoire.

Dans la pratique, l'analyse du terrain est une procédure très connue et diversifiée, qui s'applique dans des domaines de recherche aussi différents que la pollution atmosphérique et l'archéologie. Cependant, la réflexion théorique sur le sujet n'a pas été assez poussée. C'est pour le moins surprenant quand on sait que la sélection de l'unité de terrain a une influence importante sur toutes les analyses ultérieures ainsi que sur l'application des modèles des phénomènes biophysiques.

Diverses méthodes ont été proposées pour définir les unités de terrain (Meijerink, 1988 -cité par Carrara, 1996). Dans les environnements naturels, les interrelations entre matériaux, formes et processus produisent des frontières, qui reflètent fréquemment les différences géologiques et

géomorphologiques. L'avantage de cette méthode est que les unités qui en résultent ont une signification physique. Par contre, elle a le défaut d'être une technique très subjective. En plus, les cartes de base (cartes géomorphologiques) utilisent souvent une série de couleurs, de symboles et des schémas de classification qui sont complexes et parfois inconsistants sur le plan spatial et conceptuel. Dans la perspective de l'usage dans les SIG, ces inconsistances obligent l'utilisateur à faire des re-clasifications et à réviser les données.

La deuxième approche, favorisée notamment par les spécialistes des SIG en mode matriciel, consiste à diviser le territoire en cellules (*pixels*) d'une taille donnée. Cette cellule devient l'unité de terrain de référence et prend des valeurs différentes pour chacun des facteurs considérés dans l'analyse (Bernknopf *et al.*, 1988; Mark and Ellen, 1995). Le format matriciel des données accroît la vitesse des procédures analytiques en réduisant la complexité des algorithmes. Par contre, lorsque l'analyse doit se faire à des échelles très détaillées, le volume de données pose des problèmes de manipulation et crée des instabilités numériques lorsqu'on veut faire des analyses statistiques complexes (Carrara, 1996).

La troisième méthode consiste à délimiter des unités homogènes pour chacun des facteurs et, par la suite, à faire une superposition (intersection mathématique) de tous les polygones des diverses plages. Cette opération permet d'obtenir des unités homogènes selon le type ou des unités à condition unique (zones avec un ou plusieurs polygones qui ont une combinaison unique des facteurs). Préconisée comme une méthode objective, elle l'est peu en définitive, car il existe une subjectivité au moment de choisir le découpage en unités de terrain pour chaque facteur. En plus, la superposition de nombreuses plages (5 ou plus, par exemple) donne comme résultat des milliers de petites unités sans aucune signification physique ou statistique. Au-delà des limitations mentionnées, la méthode reste cependant utile, notamment lorsqu'il est conceptuellement ou opérationnellement difficile ou impossible de pré-définir des unités de terrain ou domaines de signification physique.

La quatrième méthode consiste à diviser la région en sous-bassins aussi appelés des unités de pente. Selon le sujet, l'unité du terrain peut correspondre soit à un sous-bassin *strictu sensu* ou

bien tout juste à une unité de pente de première grandeur. Des phénomènes tels que les glissements de terrains et l'érosion sont conceptuellement bien encadrés dans ces unités spatiales. On a démontré clairement que ces unités ont une grande signification physique (Lotspeich,1980; Urban *et al.*,1987; Carrara *et al.*,1992; Montgomery *et al.*,1995; Carrara 1996). En plus, l'utilisation des ordinateurs a permis le développement des algorithmes permettant d'automatiser la délimitation et la codification topologique des sous-bassins et des versants (unités de pente), comme on l'a déjà mentionné en haut. Toutefois, il subsiste certaines erreurs dans les algorithmes et la définition des procédures pour établir les tailles minimale et maximale des unités de pente. Ceci est en relation avec le phénomène étudié ainsi qu'avec l'échelle d'étude.

2.2.3.2 Les modèles physiques (distribués) dans l'étude des bassins-versants

Depuis quelques années, notamment avec l'amélioration de la technologie informatique, des scientifiques dans diverses disciplines ont développé des modèles d'analyse des phénomènes spatiaux beaucoup plus complexes et plus proches de la réalité, modèles que l'on a appelés "modèles physiques" ou "modèles (a variables) distribués".

Ces modèles ont pour but de comprendre, d'analyser, d'expliquer, et parfois de prévoir le comportement de phénomènes aussi divers que l'érosion des versants, la distribution des polluants ou des nutriments, la dilution des substances chimiques dans le milieu, la concentration d'eau sur un versant, les écoulements, etc..

Une discussion sérieuse sur les avantages et les limitations des modèles distribués, par rapport aux modèles dits "*lumped*", ou concentrés, est présentée par Grayson, *et.al.* (1992). Ces modèles, en décrivant dans l'espace tous les facteurs du phénomène complexe étudié, ont une puissance explicative supérieure aux modèles concentrés qui donnent des valeurs moyennes pour l'influence de tel ou tel facteur spatial intervenant. Le défaut, cependant, est la complexité

du modèle et, parfois, ses limitations dans la qualité et la résolution spatiale des données disponibles, ce qui conduit à des prévisions trompeuses.

L'importance des modèles distribués, dans le contexte de cette recherche est que souvent ils utilisent le bassin-versant comme unité spatiale de base pour l'analyse. C'est aussi une confirmation du pouvoir intégrateur des bassins-versants dans divers domaines d'étude. O'Loughlin (1986) a montré qu'il était possible de prévoir les zones de saturation superficielle dans un versant naturel à l'aide d'un modèle hydrologique et des paramètres dérivés d'un modèle numérique d'altitudes. Grayson, *et.al.* (1992) ont, de leur côté, montré la possibilité d'utiliser un modèle hydrologique superposé au MNA pour prévoir la profondeur et la vitesse d'écoulement diffus, sous-superficiel, sur les versants, ainsi que le débit des petits bassins-versants. Panuska *et.al.* (1991) ont utilisé un modèle de la pollution produite par des sources non ponctuelles des terres agricoles, qui, superposé au MNA, a permis d'estimer la quantité de sédiments transportés lors d'une crue. Dikau (1990) a calculé des paramètres distribués du facteur courbure du relief et a montré que ce facteur avait une corrélation importante avec la susceptibilité des versants aux glissements de terrain.

Montgomery et Dietrich (1994) ont souligné l'importance des MNA en combinaison avec un modèle hydrologique pour prédire des zones susceptibles de glissements de terrain superficiels. Dawes et Short (1994) ont analysé l'importance de la topologie dans la création de MNA et son effet sur la modélisation hydrologique et des paysages. Zhang et Montgomery (1994) ont étudié l'effet de la résolution des MNA (grandeur du "pixel") dans la représentation du paysage et dans la modélisation hydrologique. Dans leur essai, ils ont utilisé des données topographiques de haute résolution et fidélité. On s'est aperçu que pour de nombreux reliefs, une résolution de l'ordre de 10m était un bon compromis entre la qualité du MNA et le volume de données.

2.3 Système d'information géographique (SIG)

2.3.1 Concepts de SIG

Des définitions des SIG ont été proposées entre autres par Dueker (1979), Ozemoy *et al.* (1981), Burrough (1986), Bédard (1987), Cowen (1988), Dickinson et Calkins (1988), Aronoff (1991), Carter (1989), Koshkariov *et al.* (1989) et Thériault (1992).

Thériault (1992) discute ces définitions et note une grande diversité attribuable à la jeunesse de la méthode et à son caractère interdisciplinaire. A son avis, l'utilisation inconsistante des termes dans une ou plusieurs langues a contribué à obscurcir le concept de SIG. C'est le cas de l'utilisation du concept *system* plutôt que *software* en référence aux logiciels permettant le développement informatisé des *systèmes d'information géographique*. Ces logiciels devraient s'appeler *geographic information softwares* (GISoft) et non *geographic information systems* (GIS) pour la simple raison que les données ne sont pas incluses.

D'après Thériault (1992), un SIG est "*un ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale utilisées pour saisir, conserver, extraire, mesurer, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique*".

Thériault (1994:15-16) note que la définition de SIG proposée par plusieurs auteurs intègre les personnes et les institutions qui utilisent les SIRS dans la définition du **système**. Ceci le conduit à proposer un concept de SIG basé sur les composantes structurelles du SIRS: le *système informatique*, les *utilisateurs*, les *projets* à évaluer et les *décisions* à prendre:

"Les utilisateurs poursuivent des objectifs, élaborent des scénarios et évaluent les impacts prévus sur les environnements naturels et humains. Le SIG (ou SIRS) informatisé comporte des données descriptives sur les activités économiques, les équipements et les milieux régionaux. Il effectue des

traitements d'analyse, de modélisation et de simulation, en tenant compte du potentiel du milieu, des normes et des contraintes, afin de produire des évaluations quantitatives, qualitatives ou cartographiques des divers scénarios" (Thériault, 1994:17).

"La partie informatisée du SIRS comporte deux ensembles complémentaires: les données et les traitements. Les données associent une description géométrique du territoire (appelée géobase) et une description thématique des phénomènes qu'on y retrouve. La nature des traitements est complexe et diversifiée. Un SIG complet doit être capable d'accomplir des centaines, voire des milliers de traitements différents. La gamme des services requis est si étendue qu'il n'existe pas d'inventaire complet des traitements requis pour construire des logiciels de SIG utilisables dans tous les domaines. Dans un but de simplification, on peut identifier six modules de traitement qui assument des rôles complémentaires: le système de gestion de bases de données (SGBD), le système de gestion de données localisées (SGDL), les modules de traitement d'images, d'analyse statistique, d'analyse spatiale et de cartographie" (Thériault, 1994:17-18).

"Le projet est vu comme une entité séparée parce qu'il correspond à des impératifs qui ne sont habituellement pas traités par le système et parce qu'il est présenté par un promoteur qui n'est pas nécessairement un utilisateur du SIRS. La même règle s'applique pour la décision qui doit être prise en dehors du SIRS, par des intervenants qui ne sont pas nécessairement des utilisateurs, et qui peuvent de plus considérer les facteurs complémentaires pour arrêter leur choix définitif" (Thériault, 1994:17).

Maguire (1991) et Thériault (1992) ont contribué à éclaircir le concept de SIG en le situant dans son contexte disciplinaire et opérationnel. La télédétection, le dessin assisté par ordinateur CAD, la cartographie numérique, les systèmes de gestion de base de données SGBD, la géodésie, la photogrammétrie, la géométrie, la géographie, la cartographie, la statistique et

géostatistique, les outils d'aide à la décision, les systèmes experts, l'intelligence artificielle, l'informatique, la mathématique, entre autres sont concernés.

Thériault (1994:8-11) propose de définir les SIG à partir de leur paradigme, c'est-à-dire de l'ensemble des problèmes à étudier et des techniques propres à leur étude. Il s'agit d'abord d'*observer* et de *mesurer* la réalité pour obtenir des données, celles-ci sont *intégrées* et *organisées* en bases de données qui seront la matière première pour construire des modèles de la réalité. L'*analyse* et le *traitement* faits sur la base de données permettra de faire des simulations qui seront *évaluées* et *comparées* à la réalité. Lorsqu'il y a des correspondances entre les simulations et la réalité, on en tire une *information* valable soit pour des fins pratiques, soit pour améliorer la théorie scientifique. Les SIG servent enfin à *communiquer* les informations extraites, qui seront finalement utilisées comme aide à la décision dans un contexte de planification et de gestion à référence spatiale.

Il est évident que le paradigme des SIG, tel qu'il est présenté par Thériault, n'est pas loin de la démarche analytique suivie par l'ensemble des domaines de la connaissance. Thériault (1994:9) souligne que "*l'apport spécifique des SIG consiste à utiliser les formalismes développés dans l'ensemble des disciplines scientifiques pour construire des versions informatisées des différents modèles de la réalité. Le but ultime de ces systèmes consiste à prendre en charge la réalisation (non pas la conceptualisation ni la prise de décisions) des traitements requis pour transformer les données initiales afin de produire une information significative et faciliter la prise de décision*". Les étapes du traitement de l'information, dans ce contexte, consistent en des processus d'observation, d'intégration, de sélection, d'analyse, de synthèse, de comparaison, d'évaluation et de communication.

2.3.2 Diverses approches dans les SIG

Au-delà des concepts, certaines approches des SIG ont été favorisées par les usagers. Nous les présentons brièvement.

Dans les SIG en mode matriciel domine l'approche par *modélisation des traitements*. Ceci consiste à décrire la démarche analytique nécessaire pour aboutir à des produits cartographiques (modèles) par dérivation ou intégration. La démarche suggérée consiste à bien spécifier le produit résultant (dérivé) et par la suite à déterminer la séquence d'opérations et de données nécessaires pour l'obtenir. Certaines des séquences étant usuelles et bien connues on peut les intégrer dans des opérations synthétiques connues comme l'*algèbre des cartes*. (Tomlin, 1983a,b; Burrough, 1986; Tomlin, 1991; Berry, 1993; van Deursen, 1995).

Au contraire, dans les SIG vectoriels, on privilégie l'approche par *modélisation de données*. La modélisation de données permet de comprendre et de re-analyser l'ensemble des données avec lesquelles travaille l'organisation. Elle aide à la communication entre les intervenants, facilite la programmation de la base de données et permet de bien documenter le système (Bédard, 1994:23). Une fois que les données nécessaires sont identifiées, on se sert des formalismes graphiques pour exprimer les entités, attributs, relations et cardinalités qui définissent la structure et la fonctionnalité du système d'information (Bédard *et al.*, 1994; Frank, 1988).

L'approche de la *science de l'information spatiale* (Goodchild, 1990; Openshaw, 1991 (dans Maguire, Goodchild et Rhind, 1991); Maguire, 1991 (dans Maguire, Goodchild et Rhind, 1991)) considère les SIG comme une science transdisciplinaire dont le but fondamental serait l'analyse et la modélisation spatiale alors que les techniques feraient appel à la géostatistique, modélisation de données, modélisation cartographique, structures de données, traitement d'images, entre autres. Cette approche reste encore peu développée, mais semble tout à fait nécessaire, si l'on veut évoluer au delà de l'approche "technologie-logiciel" dominant le marché commercial.

L'approche par *intégration de données* perçoit les SIG comme des intégrateurs de données multisources rapportées à la réalité géographique. Dangermond (1989:25) signale: "*Un SIG regroupe, unifie et intègre des informations. Il met à notre disposition des informations auxquelles nous n'avions pas d'accès dans le passé, et donne un nouveau contexte pour les informations disponibles dans le passé. Il est capable de réunir des informations qui ne l'ont*

jamais été ou que l'on n'a pas pu réunir dans le passé" (Sheperd, dans: Maguire 1991). Department of the Environment (1987:2) mentionne les bénéfices de cette intégration, tandis que Shepherd (1991:337) signale ses limitations et son potentiel.

Selon Cowen (1988) un SIG peut être un *Système d'Aide à la Décision à Référence Spatiale* (SADRS) (*Spatial Decision Support Systems*). Pour cela, on doit élever le concept et la fonctionnalité des logiciels SIG en les rapprochant des planificateurs et des décideurs. Une telle approche demande plus de capacités analytiques des SIG, ainsi que des bases de données plus flexibles. Openshaw (dans Maguire *et al.*, 1991:408-409) propose la création d'un Système d'Aide à la Décision à Référence Spatiale qui, en plus d'un Système de Gestion de Base de Données plus flexible que les systèmes actuels, intègre aussi un Système de Gestion d'une Base de Modèles (*Model Base Management System*). Ce système serait le support principal pour la modélisation des problèmes décisionnels complexes aux niveaux tactique et stratégique dans les organisations. Des efforts pour intégrer les SIG avec les outils d'aide à la décision sont illustrés par les travaux de Richer (1992) et Laaribi (1995).

2.3.3 Les logiciels et la machinerie des SIG

2.3.3.1 Les logiciels

Les fonctions des logiciels SIG se comptant par centaines voire, par milliers, il est impossible de trouver un logiciel les offrant toutes. Cependant, certaines fonctions de base sont communes à tous ceux que nous appelons des SIG. Une liste des logiciels SIG avec la spécification des fabricants, prix, degré de diffusion, et fonctionnalité est compilée dans le *GIS Sourcebook* qui est publié de façon périodique.

L'édition du *GIS Sourcebook* de 1989 recensait plus de 60 logiciels différents de "SIG", tandis que l'édition de 1991-92 proposait la description de 178, et celle de 1994 contenait plus de 200 références (Goodchild *et al.*, 1994:4; GIS sourcebook, 1994). Cette augmentation n'est pas

seulement quantitative mais aussi qualitative. Plusieurs logiciels de SIG de 1989 n'avaient pas de fonctions d'analyse spatiale et plusieurs SIG vectoriels n'utilisaient pas de structure topologique. A partir de 1989 plusieurs logiciels SIG furent conçus pour des stations de mini-ordinateurs, en travaillant dans l'environnement UNIX. La plupart des SIG actuels fonctionnent dans plusieurs environnements informatiques, notamment dans l'environnement Windows.

Le coût de tels logiciels se situe entre 1 000 \$ et 20 000 \$ et plus.

2.3.3.2 La machinerie

Les SIG ont toujours été assez exigeants en matière de support informatique, ce qui explique en partie leur développement tardif, notamment dans les années 80. Au début, ils étaient développés pour les gros systèmes opérant dans l'environnement Unix. Récemment, cependant, on a vu la tendance vers un développement orienté du côté des utilisateurs des PC. Au mois d'août 1997, on pouvait dire qu'une machine dotée d'un processeur Pentium ou équivalent (Cyrex, AMD, etc.), avec une vitesse supérieure à 100 Mhz, 32 Mbytes de mémoire RAM, disque dur de 2 Gbytes, écran couleur SVGA, et carte graphique de 2 Mbytes, suffisait aux besoins des projets de SIG au niveau local. Le prix d'un tel équipement peut atteindre 2 000 \$. Des périphériques de stockage additionnels, tels que les C.D. Rom d'environ 650 MBytes (à lire et écrire) ou des items de disques amovibles de 100 MB à 2000 MB sont très recommandés et représentent un investissement additionnel de 200 \$ à 2 000 \$. Pour la saisie des données, on utilise le plus souvent des tablettes numérisantes, le standard étant celles de 18x24 ou 24x36 pouces, ce qui coûte environ 1 000 \$ supplémentaires.

Prenons comme exemple une petite application de SIG comme dans le cas de notre recherche. On s'est servi pour l'essentiel d'un ordinateur de type P.C., ayant un coût de 1500 \$. S'y ajoutent les logiciels MapInfo, Idrisi, Surfer, R2V, Zapper, Lambert, Dbase, et l'ensemble Office, pour un coût global de 4 000 \$. Plus un dispositif de stockage du type Iomega Zip de 100 MBytes et une tablette numérisante; soit 1 500 \$. Donc, pour un petit projet de SIG, on doit prévoir environ 7 000 \$ pour l'installation (prix de 1997).

2.3.4 Les données

Évidemment, les données sont des composantes essentielles de tout SIG. Bergeron (1993:16) les a définies comme *"la valeur correspondant à une information et représentée sous une forme conventionnelle convenant à une communication, une interprétation ou un traitement soit par l'utilisateur, soit par des moyens automatiques"*.

En vue de leur exploitation dans un SIG, les données sont entreposées dans une base de données, qui constitue *"un ensemble structuré de données pouvant servir dans différentes applications"* (Op.cit.). Plusieurs structures de données ont été conçues afin de pouvoir exploiter l'information contenue dans les données emmagasinées. Parmi elles, on signale, les structures hiérarchiques, les structures en réseau, les structures *relationnelles* et les structures orientées vers l'objet. Jusqu'à maintenant, c'est la structure *relationnelle* qui s'est imposée dans la plupart des SIG, tandis que la structure orientée vers l'objet semble fort utile pour l'avenir (Healey,1991:265).

La plupart des SIG actuels sont du type dit "hybride", dans lequel la gestion de la base de données se fait par les voies d'un Système de Gestion de Base de Données SGBD qui s'occupe des données attributives, et d'un Système de Gestion de Données Localisées SGDL qui s'occupe des données cartographiques.

"La composante centrale d'un SGBD est le programme de base ("kernel software"), généralement écrit en C ou FORTRAN, qui contrôle le traitement des interrogations, les voies d'accès aux données, la manipulation du stockage, l'indexation et les opérations de lecture et la mise à jour à utilisateur multiple. Enchaînées avec ce programme, on trouve une série d'interfaces avec les utilisateurs. Cela inclut les langages d'interrogation, les outils d'importation des données brutes, la gestion de fenêtres, la manipulation des menus, la génération et l'impression de rapports et les

langages de programmation de haut niveau ..." (Healey,1991:252). -Traduction libre.

La façon dont on conçoit l'espace géographique a conduit à définir deux modèles de données pour gérer l'aspect géométrique de la Base de Données: le modèle matriciel et le modèle vectoriel. Le premier propose de découper le territoire selon une grille régulière qui tiendrait compte de la localisation et de la résolution. Le deuxième propose un découpage en objets d'après l'un de leurs attributs. Tandis que le premier modèle semble bien adapté à la modélisation des phénomènes continus de la surface terrestre (température, altitude, précipitation, etc.), permettant de garder leur hétérogénéité (i.e. leur variance), le deuxième paraît mieux adapté à la représentation des entités géographiques bâties par la société, telles que les réseaux routiers, les bâtiments, les lots, et autres. Dans ce dernier cas, on ne peut pas décrire toute la *variance* interne des objets linéaires et zonaux, mais on peut garder certaines des propriétés dans des tables attributives que l'on peut consulter avec efficacité. (Burrough,1986; Gutierrez et Gould, 1994).

D'après Burrough (1986:33) la séparation entre l'approche "raster" et l'approche vectorielle, qui a été considérée comme irréconciliable dans le passé, n'était pas vraiment un problème conceptuel, mais plutôt, un problème technique. Une structure de base de données *relationnelle*, par exemple, pourrait servir autant à une représentation vectorielle que matricielle. Il reste quand même vrai que certains traitements sont mieux adaptés aux structures vectorielles et d'autres aux matricielles.

2.3.5 Fonctions de base dans les logiciels SIG

Les SIG comptent des centaines de fonctions élémentaires, qui peuvent être combinées pour atteindre les résultats voulus. Cependant, le propos fondamental étant l'analyse spatiale, les SIG sont encore très limités. Aronoff (1991:196) résume les fonctions analytiques des SIG en quatre groupes: *d'analyse et de traitement des données spatiales* (transformations géométriques, conflation, généralisation des lignes, etc.), *d'analyse et de gestion des données attributives*

(fonctions d'interrogation et d'édition des attributs), d'*analyse intégrée des données attributives et spatiales* (superposition, re-classification, opérations de voisinage, fonctions de connectivité, etc.), et de *formatage d'impression* (définition des symboles graphiques, placement du texte, styles de remplissage, etc.).

2.3.6 Les applications des SIG

Les applications actuelles des SIG sont si diverses qu'on n'est même pas capable de les inventorier au complet. C'est pour cela que l'approche SIG-boîte à outils a gagné de nombreux adeptes dans leur conceptualisation. Rhind, Maguire et Goodchild (1991:3,vol.2) signalent : "en réalité, les applications des SIG sont limitées juste par la conscience des possibilités, l'imagination des responsables de leur application, et les coûts concernés". Nous mentionnons ici une simple liste des applications concernées par notre sujet de recherche.

Les SIG ont trouvé une terre fertile dans les domaines des sciences du sol (Burrough, 1991 (dans Goodchild, Maguire et Rhind, vol.2, cap.46); Best and Westin, 1984; Burgess et Webster 1980a et 1980b; Burgess, Webster et McBratney, 1981; Burrough, 1980; Burrough, 1982; Burrough,1987; Burrough,1989; Burrough,1990; Burrough and Veer,1984; Giltrap,1984; McBratney et Webster,1981; McBratney et Webster,1983a,b; Roo, Hazelhoff et Burrough,1989). L'utilisation des SIG fut faite à trois niveaux principaux: l'analyse, la représentation cartographique et la gestion de données. L'estimation de l'auto-corrélation au travers des paramètres des variogrammes et l'interpolation spatiale par krigeage a été bien exploitée et documentée dans de nombreuses publications. Cela a abouti à une nouvelle cartographie des sols, plus analytique, utilisant divers critères de régionalisation (segmentation ou morcellement) du territoire en fonction des propriétés du sol. L'un des avantages des SIG, dans les sciences du sol, est de pouvoir retenir l'information originale dans les bases de données, permettant de réaliser des modélisations multiples. Avec les SIG on garde toute la *variance* des paramètres du sol, tout en gardant la possibilité de faire des représentations simplifiées et réalistes d'utilité générale.

Depuis quelques années, la modélisation hydrologique des débits est passée des modèles synthétiques (*lumpen models*) aux modèles distribués de base physique. (Grayson, Moore et McMahon, 1992a,b; Goodrich et Woolhiser, 1994; Smith *et al.*, 1994; Maidment, 1993 (dans Goodchild, Parks et Steyaert, 1993); Gao, Sorooshian et Goodrich, 1993 (dans Goodchild, Parks et Steyaert, 1993); Drayton, Wilde et Harris, 1993 (dans Beven et Moore, 1993); Jensen et Mantoglou, 1993 (dans Beven et Moore, 1993); Bathurst et O'Connell, 1993 (dans Beven et Moore, 1993); Beven et Binley, 1993 (dans Beven et Moore, 1993). Dans ces modèles distribués, les paramètres dans les équations de production, d'accumulation et de transfert d'eau sur les bassins-versants et dans le réseau hydrique, ont incorporé les propriétés spécifiques de chaque cellule du terrain, et n'ont plus seulement un coefficient unique caractérisant la topographie, les sols, la végétation et autres propriétés qui, évidemment, ont un effet considérable dans la production hydrique particulière de chaque bassin-versant.

Dans ce contexte, les SIG ont été couplés avec des modèles mathématiques dynamiques pour produire des représentations réalistes de l'état d'humidité des versants, des interconnexions des lignes de flux d'eau, des fonctions d'accumulation à des moments et/ou à des endroits précis, des fonctions de décharge et des simulations des zones à risque d'inondation. (Durand *et al.*, 1992; Zhang et Montgomery, 1994; Montgomery et Dietrich, 1994; Palacios et Cuevas, 1992; Wigmosta, Vail et Lettenmaier, 1994; Smith et Vidmar, 1994; Wolock, 1995; Tachikawa, Shiiba et Takasao, 1994; Johnson, 1989; Goodrich, Woolhiser et Keefer, 1991; Garrote et Bras, 1995; Gandoy et Palacios, 1990; Suwanwerakamtorn, 1994).

Les SIG ont aussi trouvé une application pour classer et décrire de façon analytique et automatique les réseaux hydriques et les systèmes de versants. (Ichoku et Chorowicz, 1994; Werner, 1991; McCormack *et al.*, 1993; Hutchinson, 1989; Dawes et Short, 1994; Zhang, Campbell et Haralick, 1990; Palacios et Cuevas, 1986; Eash, 1994; Costa et Burges, 1994; Montgomery et Foufoula, 1993; Sekulin, Bullock et Gustard, 1992; Chorowicz *et al.*, 1992; Seemuller, 1989; Mark, 1984; Fairfiel et Leymarie, 1991; Douglas, 1986; Tribe, 1992; Band, 1986; Donker, 1992).

L'analyse de l'érosion, de la pollution et de la qualité d'eau est aussi très répandue dans les SIG (Srinivasan et Arnold,1994; Beasley, Huggins and Monke,1980; Hamlett *et al.*,1992; Wu et Sidle,1995; Wu,1993; Vieux,1993 (en Beven et Moore,1993); Panuska, Moore et Kramer,1991; Engel, Srinivasan et Rewerts,1993 (dans Goodchild, Parks et Steyaert,1993).

En géomorphologie, notamment en géomorphométrie, les SIG ont trouvé aussi des adeptes (Moore, Grayson et Ladson,1993 (dans Beven et Moore,1993); Eash,1994; Desmet,1993; Jenson et Domingue, 1988; Tribe,1991; Ichoku et Chorowicz,1994; Dikau,1989; Dikau,1993; Dikau,1990; Outcalt et Melton,1992; Gardner,1990; Chou,1992; Zhang et Montgomery,1994; Montgomery et Dietrich,1994; Shasko et Keller,1991 (dans Heit et Shortreid,1991).

L'analyse du paysage a aussi bénéficié de l'apport des SIG (Ranzi et Rosso,1995; Scott *et al.*,1991 (dans Heit et Shortreid,1991); Smart, Mason and Corrie,1991(dans Heit et Shortreid,1991); Haines, Green et Cousins,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Stow,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Bridgewater,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Pérez,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Aspinall,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Lavers et Haines,1993 (dans Heines, Green et Cousins,1993); Dubayan et Rich,1995; Gessler *et al.*,1995; Carver, Cornelius et Sear,1995).

Enfin, nous mentionnons quelques applications des SIG pour la gestion de données et l'étude des risques naturels (Carrara,1991,1992,1996; Ohmori et Shimazu,1994; Leenaers,1989; Mejia, Wohl et Oaks,1994; Pachauri et Pant,1992; Gupta et Joshi,1990; Claire *et al.*,1994; van Westen,1993; Bisci et Dramis,1992; Bocco, Palacios et Valenzuela,1990; Niemann et Howes,1991; Rejeski,1993 (dans Goodchild, Parks et Steyaert,1993); Wadge, Wislocki and Pearson,1993 (dans Goodchild, Parks et Steyaert,1993)).

2.4 Références bibliographiques du chapitre

ASPINALL, R. 1993. Use of geographic information systems for interpreting land-use change. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems. Part V: Applications*. Taylor & Francis. London. pp:223-235.

ARONOFF, S. 1991. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications. Ottawa, Canada.

BAND, L. 1986. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*. 22(1):15-24.

BAND, L. 1986. Analysis and Representation of Drainage Basin Structure with Digital Elevation Data. *Proceedings on Spatial Data Handling*:437-450.

BARBERA, P. et ROSSO, R. 1989. On the fractal dimension of streams networks. *Water Resources Research*. 25(4):735-741

BATHURST, J. C. et O'CONNELL, P. E. 1993. Future of Distributed Modelling: The système hydrologique européen. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section III: Future of Distributed Modelling*. John Wiley & Sons. England. pp:213-225.

BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. et MONKE, E.J. 1980. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 1980. pp 939-944

BÉDARD, Y. 1987. Sur les différents types de systèmes d'information à référence spatiale. *Actes du congrès conjoint de Carto-Québec et de l'Association canadienne de cartographie*. Québec, Canada. pp 73-87.

BÉDARD, Y. 1994. Recueil de lectures: Hiver 1994. Vol 1.. Structuration et stockage de données à référence spatiale. Département de Sciences Géodesiques et Télédétection. Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec. Canada.

BÉDARD, Y. et PAQUETTE, F. 1989. Extended entity / relationship formalism for spatial information systems. Ninth International Symposium on Automation in Cartography (AUTO-CARTO 9). *American Congress on Surveying and Mapping*, 2-7 april, Baltimore. pp 818-827.

BERGERON, M. 1993. Vocabulaire de la géomatique. Les publications du Québec. Canada.

BERNKNOFF, R.L., CAMPBELL, R.H., BROOKSHIRE, D.S. et SHAPIRO, C.D. 1988. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. *Bull. Ass. Eng. Geol.* 25(1):39-56..

BERRY, J. K. 1993. Distinguishing data from information and understanding. *GIS World.* 6(10):22-24.

BEST, R.G. et WESTIN, F.C. 1984. GIS for soils and rangeland management. Cité par: Burrough, P. 1991. Soil information systems. *IEEE. Pecora 9 Proceedings Spatial Information Technologies for Remote Sensing Today and Tomorrow. 2-4 October, 1984. Sioux, Falls.* IEEE, Sioux Falls. pp 70-74.

BINLEY, A. et BEVEN, K. 1993. Three dimensional modelling of hillslopes hydrology. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section II: Distributed Hydrological Modelling.* John Wiley & Sons. England. pp:107-119.

BEVEN, K. J. et MOORE, I. D. (eds). 1993. *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology.* John Wiley & Sons. England.

BISCI, C. et DRAMIS, F. 1992. Geomorphologic-seismic zonation of the Marche Region (Central Italy) using computer-assisted techniques: preliminary considerations. *ITC Journal*. 1992-2:196-201

BLANDIN, P. ET LAMOTTE, M. 1985. Écologie des systèmes et aménagement: fondements théoriques et principes méthodologiques. Dans: M. Lamotte (directeur). *Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire*. Mason S.A. Paris.

BOCCO, G., PALACIO, J. et VALENZUELA, C. 1990. Gully erosion modelling using GIS and geomorphologic knowledge. *ITC Journal*. 1990-3:253-261.

BRIDGEWATER, P. B. 1993. Landscape ecology, geographic information systems and nature conservation. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems*. Part II: Overviews. Taylor & Francis. London. pp:23-36.

BRUNHES, J. 1920. Géographie humaine de la France. Dans: *Histoire de la France*. Vol 1. Paris.

BURGES, T.M. et WEBSTER, R. 1980 a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties:1. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*. 31:315-331.

BURGES, T.M. et WEBSTER, R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 2. Block kriging. *Journal of Soil Science*. 31:333-341.

BURGES, T.M. et WEBSTER, R. et MCBRATNEY, A.B. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 4. Sampling Strategy. *Journal of Soil Science*. 32:643-659.

BURROUGH, P. 1990. Sampling designs for quantifying map unit composition. Dans: Mausbach M.J. et Wilding, L.(eds). *Spatial Variability and Maps Units for Soil Surveys*. International Soil Science Society Working Group of Soil and Moisture Variability in Time and Space / American Society of Agronomy, the Crop Science Society of America and the Soil Science Society of America.

BURROUGH, P. 1989. Matching spatial databases and quantitative models in land resource assessment. *Soil Use and Management*. 5:3-8.

BURROUGH, P. 1987. Natural resources databases: conceptual units data structures and natural variation. Dans: Beck, K. J., Burrough, P. et McCormack, D. (eds). *Quantified Land Evaluation*. Proceedings of a Joint Meeting of ISSS Working Groups on Land Evaluation and Soil Information Systems. *Washington 25 april- 2 may 1986*. ITC. Enschede. pp 60- 65.

BURROUGH, P. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford, Clarendon Press. Chap 3: 39-56 pp.

BURROUGH, P. 1982. Computer assistance for soil survey and land evaluation. *Soil Survey and Land Evaluation*. 2: 25-36.

BURROUGH, P. 1980. The development of a landscape information system in the Netherlands, based on a turnkey graphics system. *Geoprocessing*. 1(3):257-274.

BURROUGH, P. 1991. Soil information systems. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons Inc. New York. Vol.2- cap.46.

BURROUGH, P. et De VEER, A. A. 1984. Automated production of landscape maps for physical planning in the Netherlands. *Landscape Planning*. 11:205-226.

CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. et REICHENBACH, P. 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Process and Landforms*. 16:427 - 445.

CARRARA, A. 1992. Landslide hazard assessment. Proceeding. Ier Simposio Internacional de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica para el Estudio de Riesgos Naturales. Marzo 10-12, 1992. Bogotá, Colombia: 329-355.

CARRARA, A., CARDINALI, M. et CUZZETTI, F. 1992. luncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC. Journal*. 1990-2:172-183.

CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F. et REICHENBACH, P. 1996. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. Dans: Internet: <http://158.deis.unibo.it/gis/chapt1.htm>.

CARTER, J. R. 1989. On defining the geographical information systems. Dans: Ripple W. J. (ed.). *Fundamentals of Geographic Information Systems. A Compendium*. ASPRS / ACSM, Falls Church, Virginia.

CARVER, CORNELIUS et SEAR. 1995 . Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographic Informatioon Systems*. 9(4):475-486.

CHANG, M. 1982. Laboratory Notes Forest Hydrology. The School of Forestry. Stephen F. Austin State University. Texas, U.S.A

CHORLEY, R. J. et DALE, P. F. 1972. Cartographic problems in stream channel delineation. *Cartography*. 7:150-162.

CHOROWICZ, J., ICHOKU, CH, RIAZANOFF, S., KIM, Y., et CERVELLE, B. 1992. A combined algorithm for automated drainage network extraction. *Water Resources Research*. 28(5):1293-1302

CHOU, Y. 1992. Slope-line detection in a vector-based GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensings*. 58(2):227-233

CLAURE, B., MALDONADO, J., VARGAS, O. et VALENZUELA, C. 1994. A conceptual approach to evaluating watershed hazards: the Tunari watershed, Cochabamba, Bolivia. *ITC Journal*. 1994-3:283-291.

COSTA, M. et BURGESS, S. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*. 30(6): 1681-1692.

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

CRUDEN, D. M. et THOMPSON, S. 1987. Exercises in Terrain Analysis. The Pica Pica Press. Edmonton, Alberta. Canada.

DACEY, M. et KRUMBEIN, W. C. 1976. Three growth models for stream channel networks. *Journal of Geology*. 84:153-163.

DANGERMOND, J. 1989. The organizational impact of GIS technology. *ARC News*. Summer:25-26.

DAVIS, W.M. 1909. The geographical cycle. *Geographical essays*. Ginn and Co. Boston. Réimpression en 1954. Dover Publications. New York. pp 249-278.

- DAWES, W. et SHORT, D.** 1994. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes. *Water Resources Research*. 30(4):1045-1055
- DESMET, P.** 1993. The use of digital elevation models in geomorphology. *Bulletin de la Société belge d'études géographiques (SOBEG)*. 1:47-66
- DEURSEN, W.P.A. van.** 1995. *Geographical Information Systems and Dynamic Models*. Editorial Board. Utrecht, Netherlands.
- DICKINSON, H. J. et CALKINS, H. W.** 1988. The economic evaluation of implementing a GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*. 2:307-327.
- DICTIONNAIRE DU FRANÇAIS PLUS.** 1988. Centre Éducatif et Culturel, inc. Montréal, Canada.
- DIKAU, R.** (1993). Geographical information systems as tools in geomorphology. *Z. Geomorphology*, 92:231-239
- DIKAU, R.** 1990. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. *Z. Geomorphology*, 80:45-55
- DIKAU, R.** 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: *Three dimensional applications in geographical information systems*, Johathan Raper, ed. Taylor and Francis, London.
- DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT.** 1987. *Handling Geographic Information*. Report of the Committee of Enquiry chaired by Lord Chorley. HMSO. London.
- DONKER, N.** 1992. Automatic extraction of catchement hydrologic properties from digital elevation data. *ITC Journal*. 1992-3:257-265.

DOUGLAS, D. 1986. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model. *CARTOGRAPHICA*, 23(4):29-61

DRAYTON, R. S., WILDE, B. M. et HARRIS, J. H. K. 1993. Geographical information system approach to distributed modelling. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section II: Distributed Hydrological Modelling. John Wiley & Sons. England. pp:193-200.

DUBAYAN, R et RICH, P. M. 1995. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographic Information Systems*. 9(4):405-419

DUEKER, K. J. 1979. Land resource information systems: A review of fifteen years experience. *Geo-Processing*. 1:105-128.

DURAND, P., ROBSON, A. et NEAL, C. 1992. Modelling the hydrology of submediterranean montane catchments (Mont-Lozère, France) using TOPMODEL: initial results. *Journal of Hydrology*. 139:1-14

EASH, D. 1994. A geographic information system procedure to quantify drainage-basin characteristics. *Water Resources Bulletin*. 30(1):1-8

ENGEL, B., SRINIVASAN, R. et REWERTS, C. 1993. A spatial decision support system for modeling and managing agricultural non-point-source pollution. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). *Environmental Modeling With GIS*. Oxford University Press. New York. Chap 20:231-237.

FALLAS, J. et GUTIÉRRES, M. 1992. Manejo de Cuencas Ante Desastres Naturales: Cuenca Alta del Río Reventado, Cartago. *Revista Geográfica de América Central*. (25 y 26) I-II Semestres de 1992: 341-353

- FAIRFIELD, J. et LEYMARIE, P.** 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27(5):709-717
- FRANK, T.** 1988. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(12):1727-1734
- FAWCET, C.B.** 1917. The Natural Divisions of England. *Geographical Journal*. 49:124-41.
- GANDOY, W. et PALACIOS, O.** 1990. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*. 112: 375-393.
- GARDINER, V.** 1982. Stream Networks and digital cartography. *Cartographica*. 19(2):38-44.
- GARDNER, T. CONNORS, K. et DAY, R.** (1990). Automated extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. *Z. Geomorphology*. 80:57-68
- GAO, X., SOROOSHIAN, S. et GOODRICH, D.** 1993. Linkage of a GIS to a distributed rainfall-runoff model. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). *Environmental Modeling With GIS*. Oxford University Press. New York. Chap. 17:182-187.
- GARROTE, L. et BRAS, R.** 1995. An integrated software environment for real-time use of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*. 167:307-326.
- GESSLER, P. E, MOORE, I. D., MCKENZIE, N. J. et RYAN, P. J.** 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographic Information Systems*. 9(4):421-432.

GILTRAP, D. J. 1984. *MIDGE - a microcomputer soil information system*. Cité par: Burrough, P. 1991. *Soil Information Systems*. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons Inc. New York. Vol.2- cap.46. GIS sourcebook, 1994

GOODCHILD, M. 1990. *Spatial information for undergraduate geography. A contemporary dilemma*. *The Operational Geographer*. 8:34-38.

GOODCHILD, M., KEMP, K., THÉRIAULT, M. et ROCHE, Y. (eds) 1994. *Systèmes d'information géographique. Notes de cours. Vol. 1. LATIG. Département de géographie. Université Laval, Québec. Canada.*

GOODRICH, D. et WOOLHISER, D. 1994. Comment on "Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain-based model for investigative purposes". *Water Resources Research*. 30(3):845-847.

GOODRICH, D., WOOLHISER, D. et KEEFER, T. 1991. Kinematic routing using finite elements on a triangular irregular network. *Water Resources Research*. 27(6):995-1003

GRAYSON, R. MOORE, I. et MCMAHON, T. 1992 a. Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*. 28(10):2639-2658

GRAYSON, R. MOORE, I. et MCMAHON, T. 1992 b. Physically based hydrologic modeling, 2. Is the concept realistic?. *Water Resources Research*. 26(10):2659-2666

GUTIÉRREZ, J. et GOULD, M. 1994. *SIG: Sistemas de informacion geográfica*. Editorial Sintesis. Madrid.

GUPTA, R. P. et JOSHI, B. C. 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach - A case study from the Ramganga Catchement, Himalayas. *Engineering Geology*.1990-28:119-131.

HAINES, R., GREEN, D. et COUSINS, S. 1993. Landscape ecology and geographic information systems. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems*. Part I: Introduction . Taylor & Francis. London. pp: 3-8.

HAINES, R., GREEN, D. et COUSINS, S. (eds). 1993. Landscape ecology and geographic information systems. Taylor & Francis. London.

HAMLETT, J.M., MILLER, D.A., DAY, R.L., PETERSON, G.W., BAUMER, G.M. et RUSSO, J. 1992. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention. *Journal of Soil and Water Conservation*. 47(5):399-404.

HEALEY, R. G. 1991. Database Management Systems. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 1-Chap 18. John Wiley & Sons Inc. New York.

HORTON, R. 1932. Drainage basin characteristics. *American Geophysics Union*. 13: 350-361.

HORTON, R. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America Bulletin*. 56-1945:274-370.

HUTCHINSON, M. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. 106:211-232

ICHOKU, CH. et CHOROWICZ, J. 1994. A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns. *Water Resources Research*. 20(2): 161-174.

JARVIS, R.S. et WERRITY, A. 1975. Some comments on testing random topology stream network models. *Water Resources Research*. 11:309-318.

JENSEN, K. H. et MANTOGLOU, A. 1993. Future of distribute modelling. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology*. Section III: Future of Distributed Modelling. John Wiley & Sons. England. pp:203-212.

JENSON, S et DOMINGUE, J. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(11):1593-1600

JOHNSON, L.E. 1989. MAPHYD - A Digital Map-Based Hidrologic Modeling System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(6):911-917.

KIRKBY, M. J. 1976. Test of the random network model, and its application to basin hydrology. *Earth Surface Processes*. 1:197-212.

KOSHKARIOV, A., TUKINUV, V. et TROFIMOV, A. 1989. The current state and the main trends in the development of geographical information systems in the USSR. *International Journal of Geographical Information Systems*. 3(3):257-272.

LAARIBI, A. 1995. Systèmes d'information géographique et analyse multicritère: intégration pour l'aide à la décision à référence spatiale. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D). Département des Sciences Géomatiques. Faculté de Foresterie et Géomatique. Université Laval. Québec, Canada.

LAVERS, C. J. et HAINES, R. H. 1993. Equilibrium landscape and their aftermath: spatial heterogeneity and the role of the new technology. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems*. Part III: Conceptual Issues. Taylor & Francis. London. pp:57-74.

LEENAERS, H. et OKX, J. P. 1989. The use of digital elevation models for flood hazard mapping. *Earth Surface Processes and Landforms*. 14-1989:631-640.

LEOPOLD, L. et MILLER, J. 1956. Ephemeral streams - Hydraulic factors and their relation to the drainage net. *U. S. Geological Survey*. Paper 282-A.

LIAO, K. H. et SCHEIDEGGER, A. E. 1968. A computer model for some branching-type phenomena in hydrology. *International Association of Hydrological Sciences Bulletin*. 13-1968:5-13.

LIU, T. 1992. Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resources Research*. 28(11) :2981-2988.

LOTSPEICH, F. 1980. Watersheds as the Basic Ecosystem: This Conceptual Framework Provides a Basis for a Natural Classification System. *Water Resources Bulletin*. 16(4):581-586.

LLAMAS, J. 1993. Hidrologie générale: principes et applications. 2^{ème} édition. Gaëtan Morin (ed). Québec, Canada.

MCBRATNEY, A. B. et WEBSTER, R. 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables: 2. Program and examples. *Computers & Geosciences*. 7:335-365.

MCBRATNEY, A. B. et WEBSTER, R. 1983 a. How many observations are needed for regional estimation of soil properties?. *Soil Science*. 135: 177-183.

MCBRATNEY, A. B. et WEBSTER, R. 1983 b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Co-regionalisation and multiple sampling strategy. *Journal of Soil Science*. 34:137-62.

MAIDMENT, D. 1993. GIS and hydrologic modeling. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). *Environmental Modeling With GIS*. Oxford University Press. New York. Chap 14:147-167

MACKAY, D., ROBINSON, V. et BAND, L. 1992. Classification of higher order topographic objects on digital terrain data. *Comput. Environ. and Urban Systems*, 16:473-496.

MAGUIRE, D., GOODCHILD, M. et RHIND, D. (eds) 1991. *Geographical Information Systems - Principles and Applications*. Longman Scientific & Technical.. London. Vol 1.

MAGUIRE, D., GOODCHILD, M. et RHIND, D. (eds) 1991. *Geographical Information Systems - Principles and Applications*. Longman Scientific & Technical.. London. Vol 2.

MAGUIRE, D. 1991. An Overview and definitions of GIS. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 2-Chap 1. John Wiley & Sons Inc. New York.

MARCUS, A. 1980. First-order drainage basin morphology - definition and distribution. *Earth Surface Process and Landforms* 1980-5: 389-398.

MARK, D. (1984). Automated detection of drainage networks from digital elevation models. *CARTOGRAPHICA*. 21:168-178

MARK, D. (1985). Automatic detection of drainage networks from digital elevation models. *AutoCarto*. 6(2):288-298

MARK, R.K. et ELLEN, S.D. 1995. Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. Dans: **CARRARA, A. et al.** 1996. *GIS-based techniques for mapping landslide hazard*. Internet: <http://158.deis.unibo.it/gis/chapt1.htm>.

MAZUR, E. R. et CASTNER, H. W. 1990. Horton's ordering scheme and the generalisation of river networks. *The Cartographic Journal*. 27:104-112.

McCORMACK, J. GAHEGAN, M., ROBERTS, S., HOGG, J. et HOYLE, B. 1993. Feature-based derivation of drainage networks. *International Journal of Geographical Information Systems*. 7(3):263-279

MEIJERINK, A.M.J. 1988. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal*. 1988-1:23-44.

MEJIA, M., WOHL, E. et OAKS, S. 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*. 10-1994:331-354.

MOCK, S. 1971. A classification of channel links in stream networks. *Water Resources Research*. 7:1558-1566.

MONTGOMERY, D., GORDON, E. et SULLIVAN, K. 1995. Watershed Analysis as a Framework for Implementing Ecosystem Management. *Water Resources Bulletin*. 31(3): 369-386.

MONTGOMERY, D. et DIETRICH, W. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. 30(4):1153-1171

MONTGOMERY, D. et FOUFOULA, E. 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *American Geophysical Union*:3925-3934.

MOORE, I., O'LOUGHLIN, E. et BURCH, G. 1988. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13:305-320

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. et LADSON, A. R. 1993. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological application. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology*. Section I: Digital Terrain Analysis. John Wiley & Sons. England. pp:7-34.

MORRIS, D. G. et HEERDEGEN, R. G. 1988. Automatically derived catchment boundaries and channel network and their hydrological application. *Geomorphology*. 1:131-141.

NIEMANN, K. et HOWES, D. 1991. Applicability of digital terrain models for slope stability assessment. *ITC journal*. 1991(3) :127-137.

O'LOUGHLIN, E. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*. 22(5):794-804

OHMORI, H. et SHIMAZU, H. 1994. Distribution of hazard types in a drainage basin and its relation to geomorphological setting. *Geomorphology*. 10-1994:95-106.

OMERNIK, J. 1987. Map Supplement: Ecoregions of the Conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*. 77(1):118-125.

OMERNIK, J. et GRIFFITH, G. 1991. Ecological regions versus hydrologic units: Frameworks for managing water quality. *Journal of Soil and Water Conservation*. September-October, 1991: 335-340.

OPENSHAW, S. 1991. Developing appropriate spatial analysis methods for GIS. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 2-Chap 1. John Wiley & Sons Inc. New York.

OUTCALT, S. et MELTON, M. 1992. Geomorphic application of the Hausdorff-Besicovich dimension. *Earth Surface Processes and Landforms*. 17:775-787

OZEMOY, V. M., SMITH, D. R. et SICHERMAN, A. 1981. Evaluating computerized geographic information systems using decision analysis. *Interfaces*. 11:92-98.

PACHAURI, A. et PANT, M. 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*. 32:81-100

PALACIOS, O. et CUEVAS, B. 1986. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. *Journal of Hydrology*. 86:299-314

PALACIOS, O. et CUEVAS, B. 1992. SHIFT: a distributed runoff model using irregular triangular facets. *Journal of Hydrology*. 134:35-55

PANUSKA, J., MOORE, I. et KRAMER, L. 1991. Terrain analysis: Integration into the agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model. *American Journal of Alternative Agriculture (AJAA)*. January-February.

PAQUETTE, F. 1990. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion et l'aménagement de la forêt Montmorency. Mémoire présenté pour l'obtention du

grade de maître ès science (M.Sc.). Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval. Québec, Canada.

PÉREZ, F. 1993. Landscape response units: process-based self-organising systems. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems*. Part III: Conceptual Issues.. Taylor & Francis. London. pp: 87-98

PETTS, G et FOSTER, I. 1984. *River and Landscape*. Edward Arnold.

PROD'HOMME, J.P. 1985. Sciences humaines et aménagement du territoire. Dans: M. Lamotte (directeur). *Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire*. Mason S.A. Paris.

RANZI, R. et ROSSO, R. 1995. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin. *Journal of Hydrology*. 6:461-478.

REJESKI, D. 1993. GIS and risk: A three-culture problem. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). *Environmental Modeling With GIS*. Oxford University Press. New York. Chap 30:319-331.

RICHER, O. 1992. Données spatiales et décisionnelles pour la planification d'interventions sur le territoire. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc). Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec. Canada.

RHIND, D., MAGUIRE, D. et GOODCHILD, M. 1991. Introduction. Section III: Applications. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons Inc. New York. Vol.2:3-10.

ROO, A de., HAZELHOFF, L. et BURROUG, P. 1989. Soil erosion modelling using ANSWERS and geographical information systems. *Earth Surface Processes and Landforms*.

SCHEIDEGGER, A. E. 1967. On the topology of river nets. *Water Resources Research*. 10(6):1167-1177.

SCHRAMM, G. 1980. Integrated River Basin Planning in a Holistic Universe. *Natural Resources Journal*. 20(4):787-806.

SCHUMM, S .A. 1977. The fluvial system. John Wiley & Sons. Great Britain.

SCOTT, J.M., ESTES, J.E., SCEPAN, J., DAVIS, F.W. et STOMS, D.M. 1991. An information systems approach to the preservation of biological diversity. Dans: Heit, M et Shortreid, A. (eds). *GIS applications in natural ressources*. GIS World, Inc.:

SEEMULLER, W. 1989. The extraction of ordered vector drainage networks from elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*. 47:45-58

SEKULIN, A., BULLOCK, A. et GUSTARD, A. 1992. Rapid calculation of catchment boundaries using an automated river network overlay technique. *Water Resources Research*. 28(8):2101-2109.

SHASKO, M.J. et KELLER, C.P. 1991. Assessing Large Scale Slope Stability and Failure Within a Geographic Information System. Dans: Heit, M et Shortreid, A. (eds). *GIS applications in natural ressources*. GIS World, Inc.:267-275.

SHEPHERD, I. D. H. 1991. Information Integration and GIS. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons Inc. New York. Vol.1-cap.22.

SHREVE, R. 1966. Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology*. 74-1966:17-37.

- SHREVE, R.** 1967. Infinite topologically random channel networks. *Journal of Geology*. 75-1967:178-186.
- SLOCOMBE, D.S.** 1993. Implementing Ecosystem-based Management. *BioScience*. 43(9): 613-622.
- SMART, J.S.** 1972. Quantitative Characterization of Channel Network Structure. *Water Resources Research*. 8(1972) :1487-1496.
- SMART, M., MASON, M. et CORRIE, G.** 1991. Assessing the visual impact of development plans. Dans: Heit, M et Shortreid, A. (eds). *GIS applications in natural resources*. GIS World, Inc.:295-303.
- SMITH, C.T.** 1969. The Drainage Basin as an Historical Basis for Human Activity. Dans: Chorley, R (ed). *Water, Earth, and Man*. Methuen & Co. Ltd.
- SMITH, R., GOODRICH, D., WOOLHISER, E. et SIMANTON, J.** 1994. Comment on "Physically based hydrologic modelling, 2, Is the concept realistic?". *Water Resources Research*. 30(3):851-854.
- SMITH, M. et VIDMAR, A.** 1994. Data Set Derivation for GIS-Based Urban Hydrological Modeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 60(1)67-76.
- SRINIVASAN, R. et ARNOLD, J.G.** 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*. 30(3):453-462.
- STOW, D. A.** 1993. The role of geographic information systems for landscape ecological studies. Dans: Haines, R., Green, D. et Cousins, S. (eds) *Landscape ecology and geographic information systems*. Part II: Overviews. Taylor & Francis. London. pp:11-21.

STRAHLER, A. N. 1986. *Geografia Física*. 8a. Edicion. Ediciones Omega. Barcelona.

STRAHLER, A. N. 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. Dans: *Network Hydrology*

STRAHLER, A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society American Bulletin*. 63:1117-1142

STRAHLER, A. N. 1950. Equilibrium Theory of Erosional slopes approached by frequency distribution analysis. *American Journal of Science*. 248:673-696 / 800-814.

SWANWERAKAMTORN, R. 1994. GIS and hydrologic modelling for the management of small watersheds. *ITC Journal*. 1994-4:343-347.

TACHICAWA, Y., SHIIBA, M. et TAKASAO, T. 1994. Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure. *Water Resources Bulletin*. 30(1):9-17

THÉRIAULT, M. 1992. Les systèmes d'information géographique, entre le mythe et l'utopie. *Journées d'études SIG et gestion des sols: potentialités et limites d'application*. Institut d'aménagement des terres et des eaux - Société Suisse de pédologie. EPFL. Lausanne, 6 et 7 juillet, 1992.

THÉRIAULT, M. 1994. *Systèmes d'information géographique. Concepts fondamentaux*. Département de Géographie. Université Laval, Québec. Canada.

TOMLIM, C.D. 1983 a. Digital cartographic modelling techniques in environmental planning. Ph.D. dissertation. Yale University, Connecticut.

TOMLIM, C.D. 1983 b. A map algebra. Dans: *Proceedings Harvard Computer Conference*. 1983. 31 juillet-4 août, Cambridge, Massachusetts.

TOMLIN, C.D. 1991. Cartographic Modeling. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 2-Chap 1. John Wiley & Sons Inc. New York.

TRIBE, A. 1991. Automated recognition of valley heads from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*. 16:33-49.

TRIBE, A. 1992 a. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*. 139:263-293.

TRIBE, A. 1992 b. Problems in automated recognition of valley features from digital elevation models and a new method toward their resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*. 17:437-454.

TRICART, J. 1985. L'apport de la géomorphologie à l'aménagement d'un territoire. Dans: M. Lamotte (directeur). *Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire*. Mason S.A. Paris.

URBAN, D. et al. 1987. Landscape Ecology: A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *BioScience*. 37(2): 119-127.

van DEURSEN, W.P.A.. 1995. *Geographical Information Systems and Dynamic Models*. Editorial Board. Utrecht, Netherlands.

van WESTEN, C. 1993. Remote sensing and geographic information systems for geologic hazard mitigation. *ITC Journal*. 1993-4:393-399

- VIEUX, B. E.** 1993. Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modelling. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section II: Distributed Hydrological Modelling. John Wiley & Sons. England. pp:169-181.
- von BERTALANFFY, L.** 1950. The theory of open systems in physics and biology. *Science*. 111:23-28.
- WARNTZ, W.** 1975. Stream ordering and contour mapping. *Journal of Hydrology*. 25:209-227.
- WADGE, G., WISLOCKI, A. P. et PEARSON, E. J.** 1993. Spatial analysis in GIS for natural hazard assessment. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). Environmental Modeling With GIS. Oxford University Press. New York. Chap. 31:333-338.
- WERNER, C.** 1988. Formal analysis of ridge and channel patterns in maturely eroded terrain. *Annals. of the Association of American Geographers*. 78(2):253-270.
- WERNER, C.** 1991. Several Duality Theorems for Interlocking Ridge and Channel Networks. *Water Resources Research*. 27(12):3237-3247.
- WERNER, C. et SMART, J. S.** 1973. Some new methods for topologic classification of channel networks. *Geographical Analysis*. 5: 271-295.
- WHITING, P. et BRADLEY, J.** 1993. A process-based classification system for headwater stream. *Earth Surface Processes and Landforms*. 18:603-612.
- WIGMOSTA, M., VAIL, L. et LETTENMAIER, D.** 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*. 30(6):1665-1679.

WOLOCK, D.M. 1995. Effects of subbasin size on topographic characteristics and simulated flow paths in Sleepers River watershed, Vermont. *Water Resources Research*. 31(8):1989-1997.

WU, W. 1993. Distributed slope stability analysis in steep, forested basins. Ph.D. dissertation. Utah State University, Logan.

WU, W. et SIDLE, R. 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*. 31(8): 2097-2110.

ZHANG, W., CAMBELL, J. et HARALICK, R. 1990. Automatic delineation of drainage basins within digital elevation data using the topographic primal sketch. *Mathematical Geology*. 22(2):189:209

ZHANG, W. et MONTGOMERY, D. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*. 30(4):1019-1028.

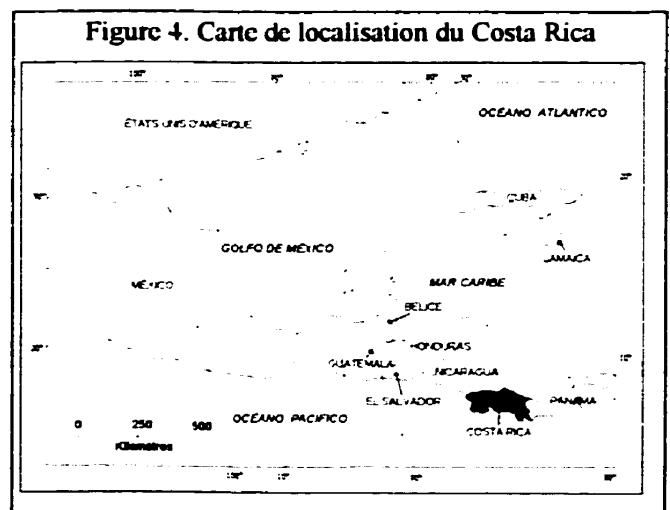
CHAPITRE 3

CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET

Au-delà d'une description sommaire de la géographie costaricienne, le but principal de ce chapitre est de donner un aperçu des aspects fondamentaux de la géographie et de l'organisation politico-administrative du pays qui pourraient affecter n'importe quel projet de SIG en développement ou prévu.

3.1 Aspects biophysiques

Le Costa Rica est situé à 10° de latitude et 84.5° de longitude ouest, en l'Amérique Centrale, entre le Nicaragua et le Panama (figure 4). Sa superficie territoriale est de 51 000 km², et sa population actuelle est estimée à 3.5 millions. C'est un pays montagneux dont la plupart de la population (70%) habite dans le fossé tectonique central, à environ mille mètres d'altitude. Séismes, volcanisme, déformations et néotectonisme caractérisent



la structure géotectonique du pays. Son climat est chaud et humide, bien que beaucoup plus humide sur la côte des Caraïbes (ou Atlantique) par rapport à la côte du Pacifique. D'imposants stratovolcans et des chaînes montagneuses supportées par des poches intrusives montent jusqu'à 3 820 m. d'altitude. Alimentées par des précipitations très abondantes atteignant 9 000 mm par année, les rivières ont entaillé profondément les chaînes montagneuses et déposé les matériaux prélevés par érosion dans les piedmonts et les plaines littorales. Une forêt tropicale, riche et à structure complexe s'est développée dans tout le pays, bien que dans la région du Pacifique Nord, elle reflète une adaptation à 5 mois de sécheresse. Cette forêt couvre des sols souvent squelettiques, légèrement acides, qui reposent sur un substrat rocheux altéré d'une profondeur de 10 m et plus.

3.2 Aspects humaines, sociaux et économiques

Le Costa Rica fait partie du groupe des pays pauvres, dits "en voie de développement". Son fondement économique a toujours été faible. Avant l'arrivée des européens (notamment les espagnols), les peuples indiens qui habitaient la région étaient assez dispersés et la concentration de population était faible. Son économie était basée sur la production du maïs (*Zea mays*), du yuca (le manioc) (*Manihot utilissima*), du tiquisque (*Xanthosoma violaceum*), du ñampí (*Dioscorea trifida*), du cacao (*Theobroma cacao*) et du pejiballe (*Gulielma utilis*) (Hall, 1984:62-64).

La colonisation européenne n'a pas changé la situation économique. Les espagnols sont venus avec l'idée d'exploiter les ressources minérales et non avec l'intention d'un établissement permanent. Les minéraux faisant défaut, les aventuriers espagnols ont dû se mettre au travail de l'agriculture de subsistance eux aussi. Pendant plus de trois siècles de vie coloniale, la province de Costa Rica a été la plus isolée et la moins intéressante de tout le Royaume espagnol. Le seul produit d'échange fut le tabac.

Après l'indépendance, c'est d'abord le café et plus tard les bananes, qui ont été la base de l'économie du Costa Rica. En 1950, ces deux produits constituaient 50% des exportations.

L'élevage, un produit d'exportation plus récent, n'a jamais été important. Néanmoins, il est responsable de la destruction d'une bonne partie des meilleures terres et sols du pays.

Les bas prix du café à la fin du décennie de 1970 se sont conjugués avec la crise pétrolière pour créer une crise économique sérieuse. L'inflation s'est accrue de cent pour cent; l'endettement externe a doublé, et la parité avec le dollar a chuté de 700% (Ramírez et Maldonado, 1988:22-24). Ceci explique la faiblesse de l'économie actuelle du Costa Rica.

Au cours des dernières années, soit après 1990, le tourisme est devenu le "principal produit d'exportation". L'exportation de produits non traditionnels a aussi gagné une place importante. Le gouvernement actuel a parié sur la technologie de haut niveau, notamment sur les "microchips" d'INTEL, les ordinateurs d'ACER, et autres transnationales.

Les principales acquisitions culturelles du pays ont été effectuées durant le XIX^e siècle (conscience et participation politique, indépendance, conscience individuelle et de groupe, initiation à l'éducation universitaire) (Hartshorn et al., 1982:34). Malheureusement cette évolution positive a été interrompue au cours du vingtième siècle. À partir de 1950, il y a eu un processus d'acculturation et de perte d'identité nationale au profit des idées "américanisées". Le Costa Rica est devenu alors un pays économiquement très dépendant, sa culture s'appauvrissant et les costariciens devenant de simples imitateurs et consommateurs de la culture américaine.

La politique des dernières années n'a pas favorisé du tout le développement d'un esprit créatif chez les costariciens. Au contraire, des campagnes politiques populistes, offrant des donations (habitation populaire et subventions d'études entre autres) pour à peu près tout le monde, ont créé de fausses attentes rarement ou jamais remplies, de sorte que les costariciens ont de moins en moins confiance dans leurs politiciens et même dans leur système politique qui, malgré tout, jouit d'une grande reconnaissance au niveau international. Les substitutions de personnel dans les institutions publiques, liées aux changements de gouvernements ont aussi marqué la façon

d'être de nombreux costariciens qui, dans les années 70 et 80, ne pensaient qu'à s'engager dans les institutions gouvernementales pour avoir un bon salaire et un travail peu exigeant.

Sur le plan plus psycho-sociologique on nous caractérise par l'attitude de remettre "à plus tard" la résolution des problèmes, de manière à éviter de s'engager et à ne pas se compromettre. Cette attitude date même de l'époque coloniale (Tijerino, J.M.,1992:145. Dans: Primer Congreso Nacional de Derecho Ambiental).

La population costaricaine jouit d'un bon niveau d'éducation. Une bonne proportion a suivi des études secondaires et, depuis quelques années, avec l'apparition des universités privées qui se sont ajoutées au groupe d'universités étatiques, beaucoup des costariciens poursuivent des études supérieures. Cela facilite sans doute les opportunités de réussite des projets de SIG. Une telle population ne devrait pas avoir trop de difficultés à comprendre et à utiliser les manuels des logiciels SIG écrits exclusivement en anglais jusqu'à récemment.

Quoi qu'il en soit, ces avantages ne s'avèrent positifs qu'au niveau des techniciens chargés de la compilation, saisie numérique, entrée des données de base et application de certaines fonctions analytiques de base. Par contre, en se considérant comme des experts en SIG (en raison de l'orientation logicielle dominant notre marché des SIG), ces techniciens contribuent à créer un climat de méfiance chez les gestionnaires chargés des institutions. Enfin, signalons que le pays compte peu de personnel qualifié en SIG. Même ceux qui travaillent depuis des années avec cet outil souffrent d'une formation insuffisante rendant difficiles les opérations d'intégration des données (analyse spatiale, statistique et mathématique, programmation, bases de données, projections cartographiques, etc.).

3.3 Risques, vulnérabilité et risques socio - environnementaux

Les risques naturels au Costa Rica sont vraiment importants. Aucune région n'en est exempte alors que certaines présentent un taux élevé de risques naturels.

D'abord la tectonique et les séismes occasionnés par l'interaction des plaques Nazca, Caraïbes et Cocos représentent une menace sérieuse dans tout le pays. Des failles actives ayant produit des tremblements d'intensité VIII (échelle de Mercali) se situent juste à quelques kilomètres de la capitale, San José.

En second lieu, plusieurs volcans actifs se trouvent assez proches des villes et villages et menacent la population et les activités économiques. Le volcan Irazú, par exemple, est situé à environ 20 kilomètres au nord-est de San José. Les éruptions de cendres, comme cela est arrivé en 1963, peuvent perturber complètement la vie dans la capitale. Cela pourrait-il affecter les *microchips* d'INTEL?

On doit considérer ensuite les menaces liées aux débordements des rivières. Chaque année les dégâts produits par les inondations atteignent plusieurs millions, alors que les pertes en vies humaines sont importantes.

L'abondance des reliefs montagneux abrupts et les sols squelettiques qui les caractérisent créent autant de zones instables. Lors des pluies torrentielles, des mouvements de terrain de toutes sortes affectent les pentes raides. Ils représentent aujourd'hui le principal risque naturel pour la population.

Faute de véritables plans de gestion urbaine (*Planes Reguladores Urbanos, Plan Director, Planes Maestros, etc.*), l'expansion territoriale de la population a débordé les espaces sûrs, pour aller s'installer sur des versants instables ou potentiellement instables; ce phénomène est particulièrement remarquable aux environs des quatre principales villes: San José, Alajuela, Heredia et Cartago.

Il n'y a pas encore de cartes d'estimation des risques sociaux et du milieu au Costa Rica. Ce type de carte est difficile à produire. On doit tenir compte du risque physique, du taux d'activité, de la magnitude, de la récurrence, et d'autres paramètres. Il faut aussi évaluer le

degré de vulnérabilité des populations exposées et de la nature de telles expositions. On peut alors distinguer plusieurs types de vulnérabilité: naturelle, physique, économique, sociale, politique, culturelle, etc. (Wilches-Chaud (dans Makrey (comp.), 1993:23-44; Meléndez, 1996:19). Cependant, il est évident qu'il y a un haut degré d'exposition physique et de vulnérabilité socio-économique face aux périls mentionnés.

3.3.1 Risques sismiques et tectoniques

Au Costa Rica, la répartition de l'activité sismique est clairement rapportée aux unités morphotectoniques (Morales, 1987:34-37; Paniagua et Morales, 1987:13-16; Mora, 1981); et celles-ci à la structure géologique (Dengo, 1968; Weyl, 1971; Kuypers, 1979; Alvarado, 1984).

La côte du Pacifique fait partie de la section du fossé méso-américain - arc interne. Elle est soumise à des efforts compressifs intenses qui l'ont basculée vers le nord-est. Cette section est composée principalement de basaltes, de radiolarites et de séquences sédimentaires de mer profonde, allant du Jurassique au Crétacé. Il s'agit d'un morceau de croûte océanique mis en place par la tectonique de compression-subduction de la plaque des Cocos plongeant sous la plaque des Caraïbes. Elle est caractérisée par des séismes de grande magnitude ($M_s \geq 6.75$; maximum de 7.5 Richter (Morales y Aguilar, 1994:234) produits directement dans la zone de Benioff, mais à des profondeurs supérieures à 30 km. (Montero, 1994:147-48). Ces séismes secouent tout le pays, mais ils ne sont pas très dangereux pour les villes principales de la Vallée Centrale (Morales, 1987:34). Leur magnitude typique est VII-IX sur l'échelle Mercalli Modifiée (MM), avec des accélérations du sol de 20 à 50% de la pesanteur (g).

L'intérieur du pays est formé principalement par trois chaînes montagneuses: la cordillère de Talamanca (plutonique, avec une couverture sédimentaire); la cordillère Centrale (volcanique; âge $\leq 1/2$ MA) et la Cordillère de Guanacaste (volcanique; âge ≤ 1 MA). La première a été mise en place pendant le Pliocène comme résultat de la collision de la Crête Aiséismique des Cocos avec la plaque des Caraïbes. Les deux dernières se sont formées lors du relâchement d'efforts après le rétablissement de la subduction "normale" au sud du pays. Dans cette section

les séismes sont produits dans des failles locales permettant des événements de magnitude modérée ($M_s \leq 6.5$) à hypocentre superficiel (Montero,1994:154). Avec des intensités MM entre VII et IX (Montero,1985; Morales,1987) et des accélérations du sol supérieures à 50% de la pesanteur (Morales y Aguilar,1994:237; maxima enregistrés de 84%g (Mora *et al.*,1991:4)), ces événements ont produit des dégâts matériels et des pertes humaines (Morales,1987).

La zone arrière de l'arc des Caraïbes est caractérisée par des reliefs allant de plats à ondulés, constitués de dépôts Quaternaires, ainsi que de petites collines volcaniques d'âge allant de l'Oligocène à l'Holocène, associées au volcanisme explosif se produisant sur les marges du *graben* du Nicaragua (axe de la rivière San Juan). Jusqu'à récemment, on avait considéré cette zone du pays comme la moins exposée à la menace sismique (Morales,1987:37). Bien que cela soit encore vrai en général, le séisme de 1991 (7.7 Richter, MM max = X dans la zone épiscopale et IX dans la ville de Limón (Denyer et Arias,1991:20)) a montré que des événements de grande magnitude peuvent se produire dans le piémont nord-est de la cordillère de Talamanca et affecter aussi la plaine littorale voisine dont la composition sableuse peut en augmenter significativement l'intensité (Denyer et Arias,1991) et la vulnérabilité.

3.3.2 Risques volcaniques

Au Costa Rica, on a identifié plus de deux cents foyers volcaniques ayant été actifs dans les derniers deux millions d'années. Seulement six ont connu une activité au cours de la période historique: Poás, Barva, Irazú et Turrialba (cordillère Centrale, au nord de San José), ainsi que Rincón de la Vieja (cordillère de Guanacaste) et Arenal (La Fortuna, San Carlos) (Paniagua et Morales,1987:16). Les événements volcaniques les plus catastrophiques des dernières années ont été les émissions de cendre du volcan Irazú (1963-65), qui ont perturbé l'activité économique et la vie générale des citoyens dans la capitale; les coulées de débris ou *lahars* de la rivière Reventado (coté sud-ouest du volcan Irazú, décembre 1963) ont tué une vingtaine de personnes et détruit des centaines de maisons (Mora et Asté,1990:1664); et l'activité explosive

du volcan Arenal (1968) avec une éruption initiale de type "nuage ardent" qui, a tué 78 personnes et éliminé toute forme de vie dans une aire d'environ 15 km².

Jusqu'à présent on ne possède pas d'évaluation exhaustive et documentée concernant les risques volcaniques et par conséquent sur la vulnérabilité des aires caractérisées par des volcans. La plupart des travaux dans ce sens concernent la cordillère Volcanique Centrale (Alvarado,1987; Alvarado et Boschini,1988; Jerez et Cline eds.,1989; Paniagua et Soto 1986, 1988). Encore là, on a souvent mis l'accent sur la détermination des zones d'affectation directe sans une évaluation des retombées régionales ou nationales, par exemple, sur le plan économique. Les éruptions de cendre volcanique dans le piémont sud-ouest du volcan Irazú, qui sont considérées comme un risque modéré (Paniagua,1994:223), pourraient devenir un risque grave si l'activité volcanique se prolongeait sur plusieurs mois, parce que cette région agricole de Tierra Blanca est une zone d'agriculture intensive d'importance nationale.

3.3.3 Risques d'inondation

Un premier travail compréhensif, à petite échelle, de couverture nationale, sur les risques liés aux inondations a été fait par Vahrson et collaborateurs dans l'école de géographie de l'Universidad Nacional. Il s'agit d'une carte à l'échelle 1:500 000. Arroyo (1992) a aussi réalisé un inventaire des inondations historiques sur la base d'informations parues dans les journaux. On y trouve une liste partielle des bassins-versants inondables par province. Dans la Grande Aire Métropolitaine (conurbation des villes de San José, Alajuela, Heredia et Cartago), Meléndez (1996) a recensé les inondations historiques et récentes. Ce travail souligne à quel point les inondations ont pris de l'importance suite à l'urbanisation.

Les inondations causent des pertes considérables dans l'ensemble du pays. Par exemple, en août 1996, les inondations indirectement liées au passage de l'ouragan *César*, ont produit sur la côte du Pacifique (à Guanacaste, Parrita et zone sud), des pertes estimées à 40 000 millions de colons (230 millions de dollars); il y a eu plus de 100 ponts endommagés, 3 000 habitations détruites et au moins 34 morts (La Nación, 28 juillet au 7 août, 1996).

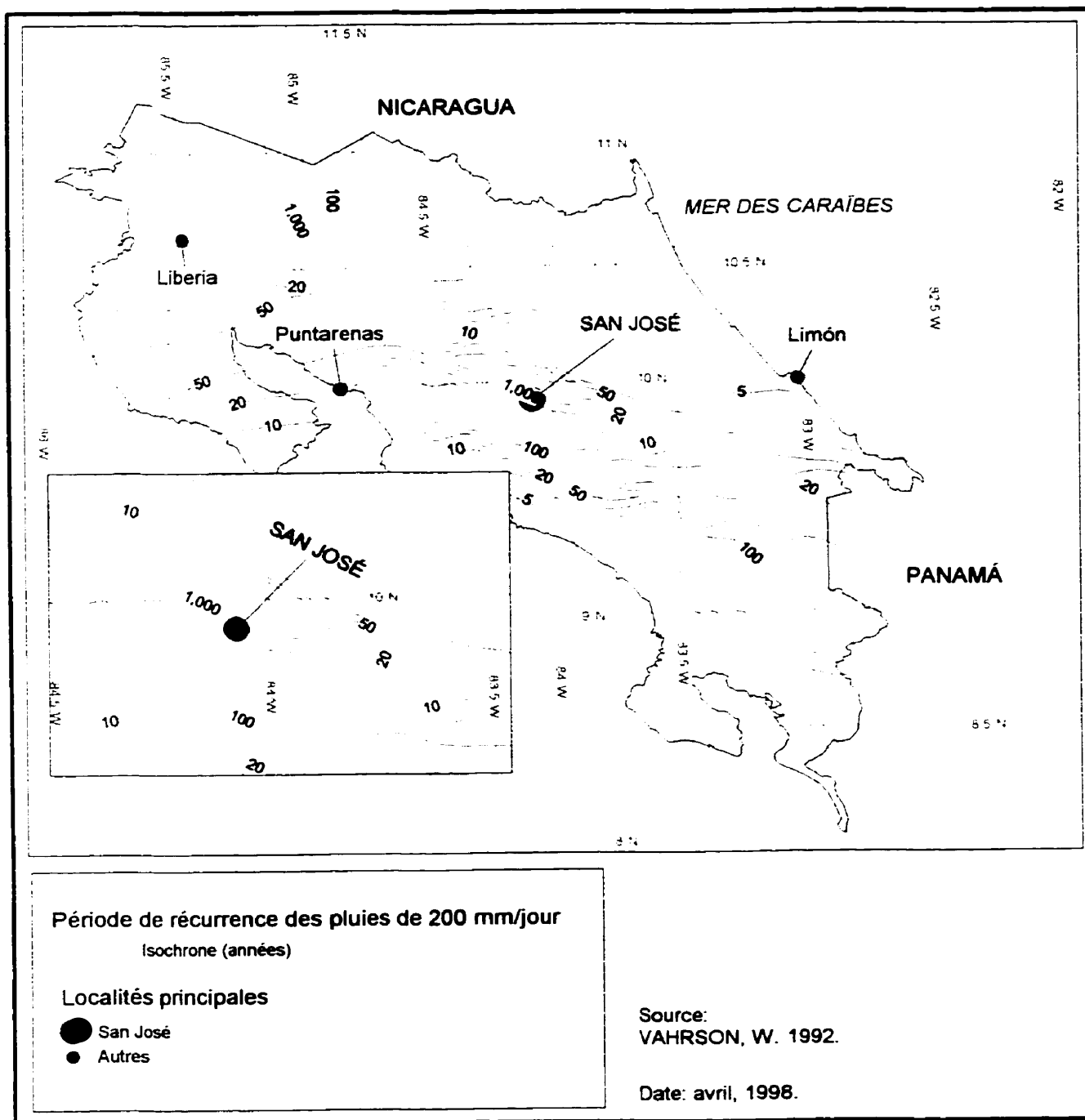
Au Costa Rica, la plus grande partie des inondations se produisent lors de perturbations cycloniques provenant des Caraïbes (ouragans, tempêtes tropicales, dépressions), cependant leurs effets se font sentir le plus souvent sur la côte du Pacifique, conséquence de l'advection d'air humide du Pacifique sur la façade sud-ouest des massifs montagneux (Zárate,1992:121). Les inondations liées aux systèmes des Caraïbes ont lieu généralement durant l'hiver boréal, à cause de l'intensification du vent alizé et de l'advection d'air humide des Caraïbes sur la façade nord-est du système montagneux (Grandoso *et al.*,1982). Dans la vallée centrale s'établit un "front" d'interaction entre *l'alizé du nord-est* (système dominant) et les vents *ouest tropicaux* renforcés par la *brise marine* locale, ce qui donne des pluies de courte durée, mais de forte intensité en fin de journée, pendant la saison pluvieuse (notamment entre août et octobre) (Zárate,1974;1992). Tous ces mécanismes et leurs fréquences sont bien connus; cependant, on n'a pas établi d'estimations de probabilité pour pouvoir leur associer un degré de risque.

Vahrson (1992) a analysé la distribution spatiale des intervalles de récurrence pour les événements de 100, 200 et 300 mm/jour affectant le Costa Rica. La vallée du Général, la vallée Centrale et le piémont (versant) est de la Cordillère de Guanacaste sont favorisés par des périodes de récurrence de 100 années pour les événements de 200 mm/jour (fig.5). Au contraire, dans la zone de Quepos, du côté du Pacifique, et sur la côte des Caraïbes, les périodes de récurrence sont très courtes; seulement 10 ans pour les orages de 200 mm/jour et 30 ans pour ceux de 300 mm/jour.

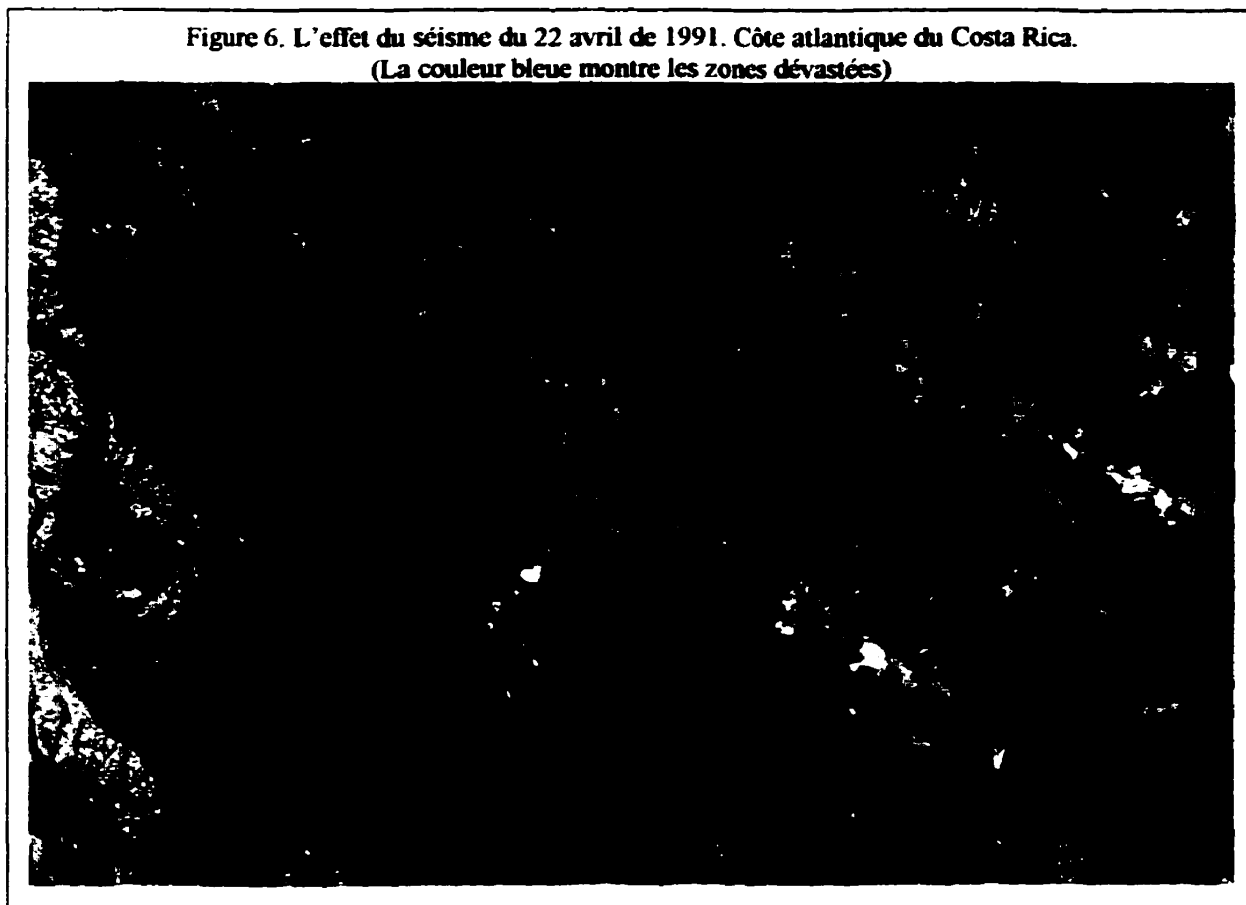
3.3.4 Risques liés aux glissements de terrain et aux coulées de débris

La conjugaison d'une topographie accidentée, des fortes pentes, de sols squelettiques, de la sismicité et de pluies intenses confère à la majeure partie du Costa Rica une grande susceptibilité aux mouvements de terrain. D'autres facteurs jouent aussi un rôle; c'est le cas du déboisement, de la construction de routes et de l'exploitation des carrières. Les terrains dépourvus de couverture végétale importante, caractérisés par des sols ayant une granulométrie fine et une humidité élevée sont susceptibles de produire des coulées de débris.

Figure 5. Périodes de récurrence pour les pluies de 200 mm/jour au Costa Rica.

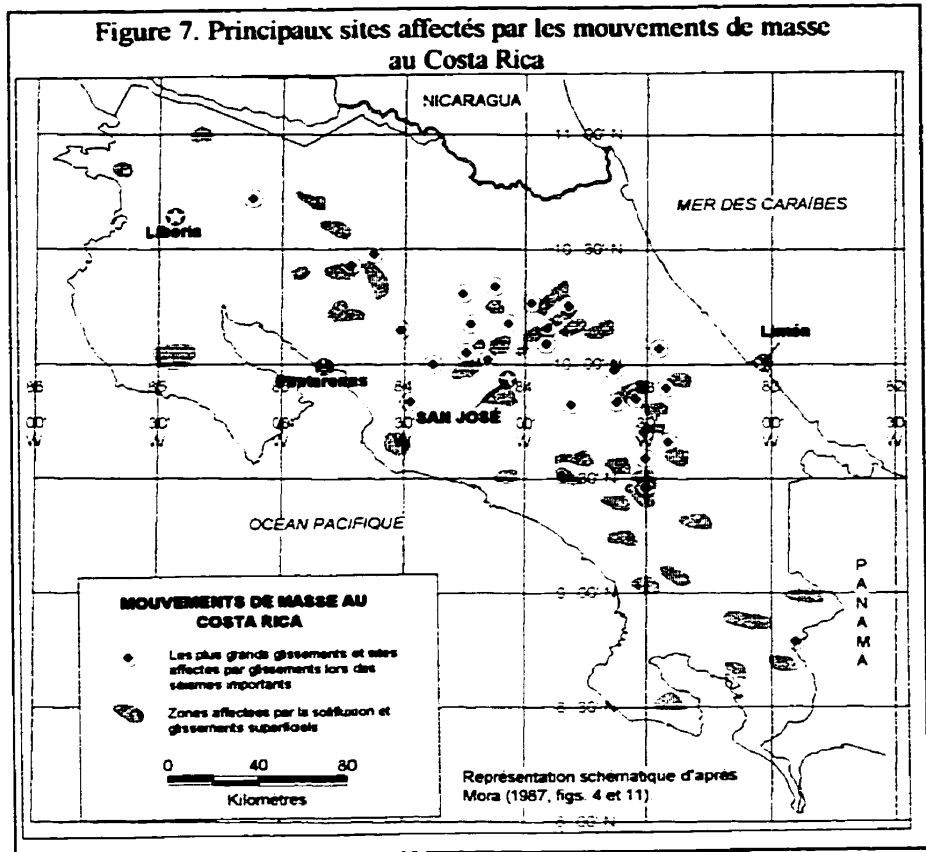


Un bon exemple d'interaction des facteurs d'instabilité s'est présenté à Pérez Zeledón (juillet, 1983) lorsqu'un séisme ($ML=6.1$) a dévasté 25 km^2 provoquant des centaines de glissements superficiels, la plupart dans des aires déboisées (Mora,1989:93). De même, l'importance des séismes dans le déclenchement des glissements de terrain peut se voir directement sur les images satellites. La figure 6 montre la zone déboisée par le tremblement de terre de Limón (le



22 avril 1991). Lors de l'orage de Pejibaye - El Humo (juillet 1987; 270 mm en 4 heures), au moins 25 km^2 ont été affectés par des glissements, des coulées de débris et des inondations. Les dégâts (14 ponts, 11 km de routes, 26 maisons et 2 500 ha de café et canne à sucre détruits et 20 jours de perte de production dans la centrale hydroélectrique de Cachí (110 MW) et au moins 3 personnes décédées) ont atteint la valeur de \$12.5 millions.

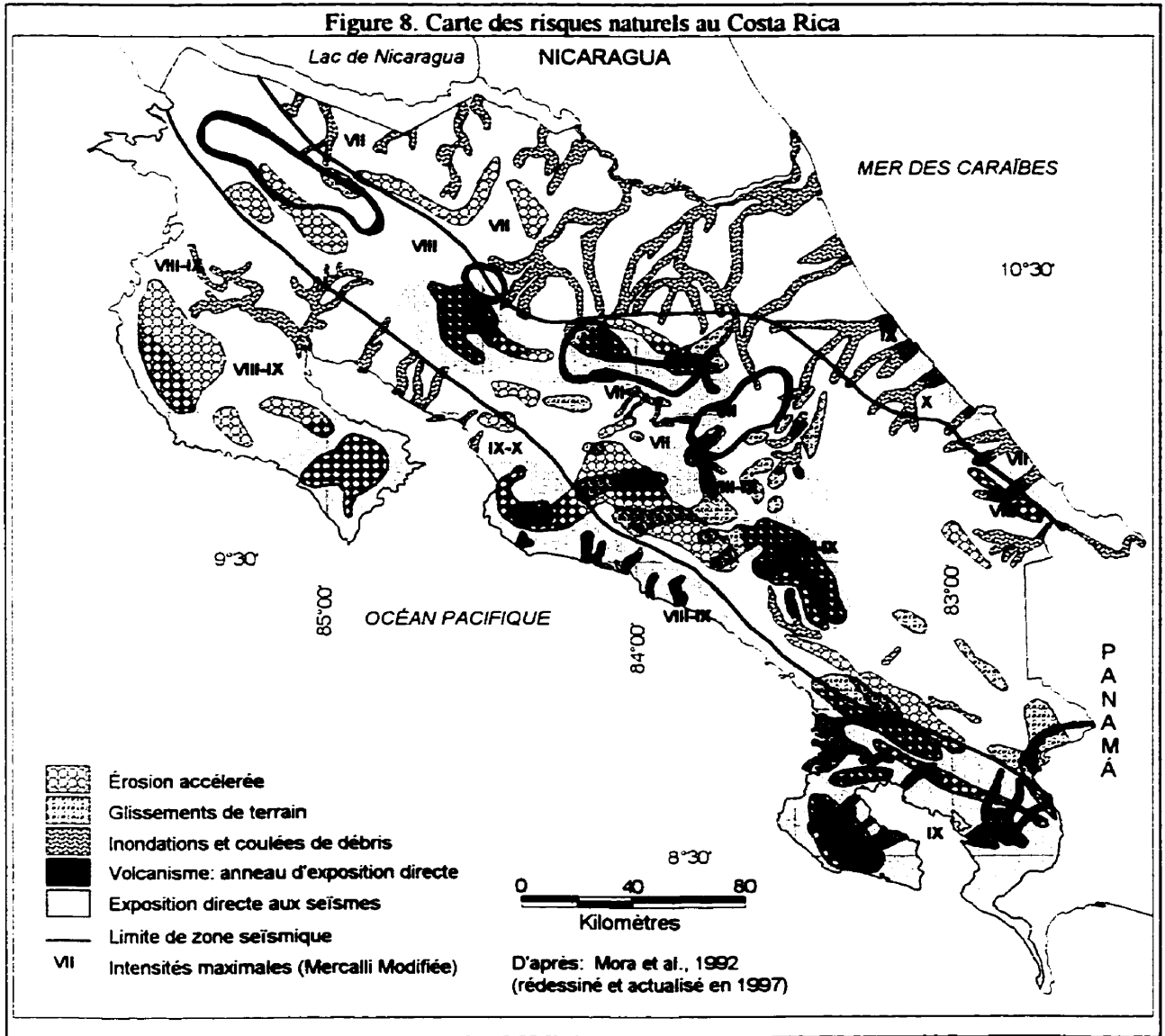
Mora (1985,1986,1989) a analysé la problématique des glissements de terrain au Costa Rica. Les cartes - schémas produites (Mora,1989) montrent la distribution généralisée des glissements de terrain dans la zone montagneuse du pays (fig.7). Les plus grands et plus dramatiques des glissements connus à ce jour sont ceux de Puriscal (ce village de 15 000 habitants glisse doucement vers le précipice); San Blas (50 millions de mètres cubes instables et le danger permanent des coulées boueuses sur une population d'environ 25 000 habitants dans le



nord-est de la ville de Cartago); Tapezco (7 millions de mètres cubes instables et le danger de coulées boueuses pour une bonne partie des 10 000 habitants de la ville de Santa Ana). Plusieurs autres glissements dangereux dépassent le million de mètres cubes instables (Mora,1989:97-98).

Mora *et al.* (1992:355-371) ont réalisé une première carte synthèse des risques géologiques au Costa Rica (fig.8). Ils ont considéré seulement les phénomènes d'érosion intensive, les risques volcaniques et les risques sismiques. Une fois complétée, cette carte deviendra un instrument utile pour l'aménagement au niveau national.

Figure 8. Carte des risques naturels au Costa Rica



La relation entre séismes, glissements et coulées de débris a été étudiée par Mora et Morales (1986) (tableau 1). Il s'agit dans ce cas là des coulées de débris de grande ampleur.

TABLEAU 1. PRINCIPAUX SÉISMES AYANT DÉCLENCHÉ DES GLISSEMENTS DE TERRAIN ET DES AVALANCHES DE DÉBRIS AU COSTA RICA			
DATE	LOCALITÉ	INTENSITÉ MAX. (MM)	OBSERVATIONS
30-12-1888	Fraijanes	VII-VIII	Glissements et coulées de débris ("avalanches") dans les rivières Poás et Tambor. Cinq personnes décédées.
29-08-1911	Bajos del Toro I.	VII+	Glissements de terrain et coulées de débris ("avalanches") dans Fila Gorrión, Colonia del Toro et Grecia.
10-10-1911	Guatuso	VIII+	Glissements de terrain et détachements dans la cordillère de Tilarán.
06-06-1924	Sarchi	VII	Glissements de terrain et coulées de débris ("avalanches") dans Fila Gorrión, Bajos del Toro, Grecia et Sarchi. Quatre personnes décédées..
04-03-1924	Orotina	IX-XX	Glissements dans Aguacate et Turrubares. Dommages causés aux routes et à la voie ferrée.
30-12-1952	Patillos	VII-VIII ¹	Grands glissements de terrain et coulées de débris ("avalanches") dans les rivières Blanco et Sucio, ainsi que à Rancho Redondo, Tierras Morenas, et Bajo Máquina. Vingt et une personnes décédées.
01-09-1955	Bajos del Toro II	VIII	Glissements de terrain et coulées de débris ("avalanches") dans la Río Segundo. Dix personnes décédées.
14-04-1973	Tilarán	VIII-IX	Glissements de terrain et destruction de routes à Río Chiquito, El Libano, et Tilarán. Vingt trois personnes

			décédées.
03-07-1983	División	VIII-IX	Glissements de terrain couvrant 175 km ² , dommages sérieux à la route Interaméricaine et aux routes secondaires, ainsi qu'à des résidences à Pérez Zeledón, Buenavista, Alaska, Siberia, Chimirol, Rivas, etc. Une personne décédée.
22-04-1991	Limón ²	X	Glissements de terrain couvrant plusieurs km ² , soulèvements maximaux de 1.9 m sur le littoral; enfoncement à la Boca de Matina causé par le phénomène de liquéfaction; plusieurs ponts et routes détruits le long de la côte. Cent-trois personnes décédées au Costa Rica et au Panama.
22-12-90	Puriscal	VI	Glissements de terrain près de Santiago, Mercedes Sur, Desamparaditos et Fila Picagres. Profondeur de seulement 5.7 km, avec des accélérations du sol maximales de 84% de la pesanteur. Résidences endommagées à Puriscal et Alajuela.

Les coulées de débris et de boue sont fréquentes dans les terrains montagneux. Cependant, on ne dispose pas de cartes permettant d'étudier leur répartition exacte. Tandis que des grandes coulées sont produites en association avec les violents tremblements de terre, des coulées plus modestes sont liées aux fortes précipitations. Il existe une association étroite entre les glissements massifs, les coulées de débris et les cônes de déjection. (Voir chapitre 4).

3.3.5 Autres risques

La sécheresse, notamment celle qui affecte la côte du Pacifique, et qui est plus prononcée lors des années soumises à l'effet du "Niño", constitue une menace très grave mais peu étudiée (Ramírez, 1983; Zárate, 1992).

Les vents forts reliés aux cumulus développés au "front de brise", dans la vallée centrale, sont une source de danger et provoquent chaque année des dégâts. Les forts vents "catabatiques" qui affectent l'ouest de la cordillère de Guanacaste constituent un risque pour l'agriculture, les conducteurs et, surtout pour les pêcheurs artisanaux du golfe de Papagayo.

Les éruptions volcaniques produisant des cendres donnent naissance à des coulées de débris ou *lahars* notamment pour le volcan Rincón de la Vieja et le volcan Irazú.

La reptation, la solifluxion, l'érosion laminaire, et autres manifestations mineures, affectent les terrains déboisés et menacent la productivité des terrains situés dans le haut des versants dans l'ensemble du pays.

3.4 Contexte politique, juridique et institutionnel

Déjà lors des nos premiers cours en géographie, en 1980, il était question de l'aménagement intégré du territoire, d'aménagement des bassins-versants, de la conservation des ressources naturelles et d'autres concepts qui y sont liés. Parallèlement, à l'*Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados* ou AyA, institution chargée fondamentalement de l'approvisionnement en eau pour les communautés, on a créé le Département des bassins-versants en 1979 (Ramírez, 1996). Depuis 1985, le *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza* ou CATIE maintient un projet régional (centraméricain) de gestion des bassins-versants et offre un diplôme de maîtrise dans ce domaine (CATIE, 1989: 14).

Cependant, il s'est écoulé une bonne dizaine d'années avant que les premières idées d'intégration institutionnelle autour des problèmes de gestion de l'eau et des ressources naturelles n'apparaissent. Encore là, ces initiatives sont nées dans les cadres techniques et souvent par l'intermédiaire d'individus oeuvrant hors des principales institutions chargées de l'utilisation des ressources. Quant au gouvernement central, c'est tout récemment qu'il s'est intéressé à la gestion de l'environnement, surtout en regard des profits potentiels que le pays pouvait en tirer. Le Costa Rica a été le premier pays au monde à signer un accord de vente de

“services de l’environnement” avec les pays développés, grâce à la vente pour une valeur de 2000000\$ des services de fixation de CO₂ à la Norvège, au début de 1997 (Miranda, 1997: 194).

On a dû attendre 1992 pour voir apparaître la “*Comisión Coordinadora de la Cuenca del rio Grande de Tárcoles*” (Comité pour la coordination du bassin-versant Tárcoles), initiative institutionnelle officialisée par le Ministère de Ressources Naturelles, Énergie et Mines (MIRENEM) en 1993. En même temps, on réalisait le Premier Congrès National en Droit de l’Environnement. Depuis ces événements, l’intérêt pour l’aménagement du territoire et la gestion des bassins-versants a fortement augmenté. Il y a donc, maintenant, un cadre propice au développement d’un SIRS pouvant servir à l’aménagement des bassins-versants, tel que nous le proposons.

3.4.1 Contexte politique

Le système politique costaricien fait preuve d’une grande stabilité depuis la “guerre civile” de 1948 motivée par des fraudes électorales. Depuis cet événement, on a éliminé les forces armées, on a déclaré l’école primaire gratuite et couverte par l’état, et on a accordé le droit de vote aux femmes. Tout ceci semble constituer des mesures très positives pour le développement socio-économique du pays.

En regardant de plus près, on constate certaines limitations qui pourraient affecter les projets de SIG et autres. Les élections présidentielle, législative et municipale se font en même temps et pour une période de quatre ans. Cela a comme conséquence que la plupart des politiciens de tous les niveaux ne désirent pas assumer la responsabilité de projets à moyen et long termes (d’une à quelques dizaines d’années), ceci ne représentant aucun avantage politique lors des campagnes successives.

Bien que le système politique soit du type démocratique, il est plutôt du type bureaucratique. Cela se traduit par un excès de réglementations; des duplications de postes dans la fonction publique; peu de stimuli pour les travailleurs honnêtes du secteur public et aucune surveillance

ni sanction pour les irresponsables; et une tendance généralisée au laisser-faire, au delà des mandats existants. Voilà des raisons qui expliquent pourquoi les projets pluri-institutionnels et multidisciplinaires, comme les grands projets de gestion de l'environnement et de la création des SIRS, ne sont apparus que tardivement.

Le pouvoir et les ressources semblent être trop concentrés au gouvernement central. Le régime municipal, par exemple, n'a qu'un financement très réduit, équivalent à 1% des dépenses totales du gouvernement central (Miranda, 1997:201).

Les politiciens font preuve d'un manque de sérieux face aux graves problèmes requérant toute leur attention. C'est par exemple le cas de la fameuse croissance de 10% dans la couverture forestière du pays (décennie de 90) que le ministre de l'environnement voulait faire croire, et qui a motivé toute une confrontation avec les organismes de conservation de la nature du pays. Cela représente un gaspillage d'énergies et de ressources, si l'on tient compte que, probablement, cette croissance (si elle est vraie) serait le résultat de l'abandon de l'agriculture extensive à cause de l'instabilité des prix du marché national et, surtout, à cause des pressions spéculatives générées par l'industrie touristique; et non nécessairement la conséquence des campagnes d'éducation de l'environnement et autres.

Tout projet de SIG ou d'aménagement, si petit soit-il, risque d'être utilisé comme une plateforme politique, ce qui mine sa crédibilité et crée plus d'ennemis que de partisans.

Au-delà de ces aspects politiques traditionnels, on doit considérer la conjoncture politique et économique actuelle. Nous vivons dans un monde dominé par les concepts de globalisation et ce monde là nous oblige à être compétitifs et très efficaces. Les institutions nationales ont été obligées alors de développer des stratégies de survivance, surtout de changer la politique protectionniste de l'état, par une politique nettement commerciale. Le stade dynamique créé par cette situation facilite l'incorporation des SIG/SIRS dès la base de l'institution réorganisée. Comme nous le verrons plus loin, c'est le cas de l'Instituto Costarricense de Electricidad -ICE- (*l'Institut Costaricien d'Électricité*) une sorte d'Hydro-Québec (mais étatique) au Costa Rica.

Cependant, cette conjoncture peut poser des problèmes reliés aux renvois de personnel, changements de fonctions, variation des objectifs, abandon de certaines tâches, etc. Le SIRS doit donc avoir une structure suffisamment flexible pour répondre à ces contraintes.

3.4.2 Contexte juridique

En ce qui concerne les SIG/SIRS, il n'existe pas de législation particulière. Le Costa Rica a signé les accords internationaux sur les droits d'auteurs et la propriété intellectuelle qui servent à protéger les logiciels SIG, mais ces accords ne sont pas très efficaces pour la protection générale des SIRS (dessins, modèles conceptuels et produits, droits d'accès, droits de privatisation, etc.).

Une législation particulière donne l'autorité exclusive à l'Institut Géographique National (IGN) dans le cas de la production des cartes officielles. Toutefois, une autre institution, le Cadastre National fait aussi des cartes qui, pour les cas particuliers de la gestion cadastrale, constituent les cartes officielles.

Comme on l'a déjà dit, l'existence de réglementation n'est pas un obstacle au Costa Rica. On peut donc constater que des entreprises privées utilisent l'information de base de l'IGN et, en l'éditant, produisent leurs "propres" cartes pour les vendre au grand public. Le problème est devenu important depuis de l'introduction des logiciels CADs. En plus, l'information de base des cartes topographiques de l'IGN est numérisée dans chaque projet d'application utilisant la cartographie assistée par ordinateur ou les SIGs. Aucune reconnaissance, même pas une simple mention de la source de la carte de base, n'est faite dans la présentation finale des produits cartographiques.

Depuis quelque temps l'IGN s'est préoccupé de réglementer ces anomalies. L'institution semblerait prête à autoriser la production de cartes "officielles" par les particuliers, moyennant le respect des normes de qualité ainsi qu'une entente sur les frais d'une telle authenticité.

(Bedoya, com. pers¹). Cependant, un premier problème à résoudre est celui des normes ou *standards* de qualité. Celles-ci se rapportent à la précision géométrique de la carte et non pas à sa qualité comme document thématique, responsabilité qui devrait être assumée entièrement par l'auteur. En tout cas, l'IGN ne dispose pas de normes adaptées à la production des cartes numériques et ne possède pas l'expertise pour les vérifier (Elizondo, com. pers²).

Par ailleurs, notre projet de SIRS étant orienté vers la gestion des bassins-versants (toutes les ressources confondues), il est hautement souhaitable de connaître les aspects juridiques dont on peut se servir, ainsi que les limites qui doivent être respectées.

À ce sujet, le point de départ est, évidemment, la constitution (politique) du pays. Prenant en compte que la constitution costaricienne date de 1949, il est normal de ne pas y trouver de références explicites sur la gestion environnementale. Cependant, l'article 50, ajouté en 1994 au chapitre des droits et garanties sociales dit "... Toute personne a droit à un environnement sain et écologiquement équilibré. En conséquence, elle est autorisée à dénoncer les actes contrevenant à ce droit et à réclamer la réparation des dommages faits ..." (Investigaciones Jurídicas, 1995:17). Cet article est le seul point de référence pour toute la législation sur l'environnement du pays.

L'article 7, concernant "La République" signale: "Les traités publics, les conventions internationales et les accords, formellement approuvés par l'Assemblée Législative (le parlement), auront une autorité supérieure aux lois communes" (Idem., p.8). Le Costa Rica a signé et ratifié une série de conventions semblables: Convention sur la Protection de la Nature et la Préservation de la Vie Sylvestre dans l'Hémisphère Occidental (Washington, 1942); Convention Internationale pour la Prévention de la Pollution de la Mer avec des Hydrocarbures (Roma, 1952); Convention pour la Protection de la Flore, de la Faune et des Beautés Scéniques Naturelles dans les Pays Américains (Costa Rica, 1966); Traité International sur les Espèces de la Flore et de la Faune en Danger (Washington, 1975), et autres (Zeledón, 1992: VIII).

¹ Bedoya, E. Director. Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. 1998.

Enfin, l'article 169 concernant "le régime municipal" signale: "L'administration des intérêts et services locaux dans chaque municipalité sera à la charge du Gouvernement Municipal ..." (IJSA, 1995:52). C'est le fondement légal pour inclure la municipalité dans notre projet de SIRS.

Si l'on examine maintenant le "Code Municipal" (loi municipale), c'est l'article 4 qui concerne notre recherche. On y signale les secteurs d'intérêt de la gestion municipale (culture, sciences, arts, éducation technique, santé, bibliothèques publiques, concours artistiques et littéraires, expositions, bourses, réparation d'écoles, lutte contre les maladies infectieuses, centres de nutrition, cliniques publiques, etc.); l'obligation d'établir "*Une Politique Intégrale d'Aménagement Urbain*" (services d'électricité, de communication, d'eau potable, des égouts, d'illumination publique, d'ornement, de construction, réparation et nettoyage des voies publiques, d'entretien des jardins et parcs publics, de construction de maisons d'intérêt populaire, etc.); de formuler "*Une Politique de Développement Rural Intégrée*"; de stimuler et de protéger le développement agro-alimentaire, industriel et commercial; de protéger les ressources naturelles; de stimuler le tourisme et de veiller à la sécurité des habitants (IJSA, 1994).

Malheureusement, le Code Municipal datant de 1970 définit les fonctions municipales d'une façon très vague et, comme on le voit dans le contexte actuel, bien des mandats sont entièrement pris en charge par d'autres institutions étatiques. C'est le cas de l'éducation, de la santé et de la sécurité, couvertes par les Ministères concernés. D'autres services, comme l'eau potable, l'électricité, et la construction/réparation de chemins sont à peine partagés avec, ou relèvent de la compétence exclusive d'autres institutions publiques d'envergure nationale.

Pire encore, l'article 5 (révisé en 1983) limite le droit municipal en disant que sa compétence n'affecte pas les attributions conférées aux autres entités de l'administration publique. C'est pourquoi Miranda (1997:201) dit: "Le régime municipal costaricain joue une fonction strictement marginale dans la vie du pays, puisqu'il a un faible niveau de compétence réelle et

² Elizondo.C. Sub-director. Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. 1998.

une base de ressources encore plus faible. L'état costaricain, réputé être une démocratie centenaire, est probablement le plus centralisé du continent ... Costa Rica est une preuve évidente qu'un régime de démocratie représentative, consolidé, prestigieux et volontairement désarmé, n'est pas nécessairement un régime décentralisé avec une large participation des citoyens".

Malgré ces contraintes, il semble y avoir une ouverture du gouvernement central pour conférer plus de pouvoir économique aux municipalités. La "Loi des Impôts sur les Biens Immeubles (7509, du 30 avril 1995)" a transféré les impôts fonciers aux municipalités. Cette mesure était tout à fait logique étant donné la couverture très partielle et non actualisée du cadastre et des valorisations des propriétés, lorsque le travail était fait par le "*Ministerio de Hacienda*". Cependant, à l'inverse, le gouvernement a transféré aussi l'obligation de valoriser et de recueillir les impôts, ce qui a causé un impact sur le marché des SIG parce que les vendeurs de logiciel, ainsi que certains professionnels du secteur, ont voulu profiter de l'occasion en essayant de pousser les municipalités à la création de SIRS; tout ça, bien sûr, sans une réflexion méthodologique préalable. Très rapidement quelques-unes ont reculé, tandis que d'autres progressent avec beaucoup de difficultés.

Le "Code des Mines et sa Réglementation" (IJSA, 1993) qui date de 1982 possède quelques articles qu'il convient de signaler. L'article 4 déclare que les eaux du pays sont la propriété de l'état. L'exploitation particulière peut se faire seulement par concession. L'article 8 signale que "La *Asamblea Legislativa* (le parlement) pourra réserver l'exploration ou l'exploitation de certaines zones pour des raisons de protection des ressources forestières, hydrologiques, édaphiques, culturelles, archéologiques, zoologiques ou urbanistiques. Dans de telles zones, l'exploitation sera interdite aux particuliers au profit de l'état ... Il est interdit d'exploiter les zones déclarées des Parcs Nationaux ou Réserves Biologiques ... dans les réserves forestières, il faudra obtenir un permis d'exploitation émis par la *Dirección Forestal* (Direction des Forêts)". Les articles 98 à 103 établissent l'obligation de ne pas endommager l'environnement et de présenter avant le début de l'exploitation une "Étude d'Impact sur l'environnement" qui

peut même être refusée par l'organisme en charge (actuellement, le Secrétariat Technique National de l'Environnement ou SETENA).

La *Loi des Eaux (Ley de Aguas)* de 1942 signale que c'est le Service National d'Électricité ou SNE (aujourd'hui Département des Eaux du Ministère de l'Environnement) qui doit "disposer et résoudre sur le domaine, profit, utilisation, administration et surveillance des eaux de caractère public" (AMBIO,1993:10). L'article 148 de la dite loi "oblige" les propriétaires des terrains traversés par des rivières, et des ravins, ou des terrains avec des sources d'eau, dont la forêt a été détruite dans la zone de protection (définie dans la Loi des Forêts; voir plus bas), à reboiser ladite zone de protection (Zeledón,1992:184). Si l'on n'est jamais arrivé à arrêter les processus de déboisement des berges des rivières et des sources, l'article 148 n'a aucune chance d'être appliqué.

D'après la "*Loi de la Conservation de la Vie Sylvestre*", il est interdit de jeter les eaux d'égouts, les déchets, et n'importe quelle autre substance polluante, dans les rivières, ravins (permanents ou non), lacs, tourbières, barrages, et toute autre superficie d'eau libre. (AMBIO,1993:44). La sanction maximale considérée dans ce cas-là est de 100 000 colones (soit quelques 400 dollars). Dans la pratique cependant, les eaux d'égout de la communauté urbaine de San José déchargent sans traitement dans les rivières.

L'article 33 de la "*Loi des Forêts*" de 1997 (souvent modifiée dans les dernières années) signale que les zones de protection forestière sont: "Les zones autour des sources permanentes, dans un rayon de 100 m mesuré sur le plan horizontal. Une zone de 15 m dans le milieu rural et 10 m dans le milieu urbain, mesurée horizontalement à partir des deux berges des rivières et ravins, lorsque le terrain est plat, et de 50 m horizontaux si le terrain est abrupt. Une zone de 50 m mesurée horizontalement tout autour des lacs et des barrages naturels en domaine public ou privé, ainsi que dans les lacs et barrages artificiels en domaine public. Les zones de recharge des aquifères alimentant des sources, d'après des délimitations faites par les dépendances établies dans le règlement de la loi des forêts". (IJSA,1997:26-27).

Compte tenu la grande dispersion des lois de gestion de l'environnement, lois perdues dans des règlements complexes orientés vers la mise en pratique, et non pas sur la philosophie de fond, l'*Asamblea Legislativa* (le parlement) a créé la "Loi Organique de l'Environnement", en 1995. Le but principal était d'encadrer les autres lois et de donner un aperçu plus global. Quelques énoncés pourraient être importants dans le cadre de notre recherche.

L'article 12 signale que "l'état, les municipalités et les autres institutions publiques et privées, stimuleront l'inclusion permanente de la variable environnementale dans les processus d'éducation, formels ou non, des programmes à tout niveau. L'objet sera d'adopter une culture de l'environnement pour atteindre un développement soutenu" (IJSA, 1996:11)

Dans l'article 17, on lit : "les activités humaines produisant des altérations ou destructions des éléments de l'environnement ou produisant des résidus, des matériaux toxiques ou des matériaux dangereux, seront l'objet d'une *évaluation d'impact de l'environnement*, de la part du secrétariat de l'environnement (*Secretaría Técnica Nacional Ambiental* ou SETENA) qui est créé comme partie de la présente loi ..." (IJSA, 1996:12-13).

Dans la *Loi Organique de l'Environnement*, on parle, pour la première fois dans une loi, de l'aménagement du territoire (ceci en 1995). L'article 28 mentionne: "c'est la fonction de l'état, des municipalités et des autres entités publiques de définir et d'exécuter les politiques nationales d'aménagement territorial, tendant à réglementer et promouvoir les emplacements humains et les activités socio-économiques de la population, ainsi que le développement de l'espace physique, afin d'obtenir un rapport harmonieux entre un meilleur bien-être de la population, le profit des ressources naturelles et la conservation de l'environnement" (IJSA, 1996:16).

Dans la stratégie suggérée par loi dans le but d'obtenir le développement harmonieux (articles 29, 30 et 31), on ne mentionne nulle part les bassins-versants. Ceci contraste notamment avec l'ampleur des mouvements pro-aménagement des bassins-versants discutée plus haut. C'est évidemment un aspect à retenir lors de la conception du SIRS proposé.

La *Loi Organique de l'Environnement* mentionne, pour une première fois parmi les lois de l'environnement, le besoin de protéger et de récupérer les sols, d'éviter la pollution visuelle, et de favoriser la conservation du paysage.

Enfin, mentionnons que lors du Premier Congrès National du Droit sur l'Environnement (17-21 août, 1992), on a abordé d'une façon assez sérieuse cette problématique. L'UICN (1992) a publié en entier les discussions; on peut donc en tirer certaines appréciations d'importance pour le sujet de la thèse.

D'après Ricardo Zeledón³, le droit écologique à un environnement sain et équilibré est un *droit humain* et se place au-dessus de la constitution comme instrument juridique. Il signale aussi que parfois ce droit est contradictoire par rapport à d'autres garanties constitutionnelles, comme celle de la *propriété privée*. Il doit cependant prévaloir sur celui-ci, étant donné son caractère de *droit collectif*.

Marta Vinocour⁴, qui a analysé le droit de l'environnement dans le contexte de la *théorie des intérêts diffus*, montre que dans le pays, jusqu'à ce jour, on fait prévaloir le respect des droits individuels au détriment des droits collectifs. Le droit de l'environnement étant nettement un droit collectif, il faudra alors prendre les actions nécessaires pour le mettre en valeur.

Rodolfo Piza⁵, a adopté une position différente. À son avis, le droit à un environnement sain est un droit humain individuel, qui n'a pas besoin d'être défini dans la constitution et qui doit pouvoir être exigé pour chacun des habitants du pays. Lui aussi croit que les *intérêts diffus* sont un encadrement juridique permettant d'inculper tous ceux qui agressent l'environnement.

Enfin, signalons que lors de ce congrès, on a laissé la place à la discussion sur l'importance des bassins-versants comme *instrument* pour l'aménagement territorial. Même si le sujet a été traité de façon très générale dans ses aspects juridiques et institutionnels, ce fut une première

³ Magistrat de la Court Suprême de Justice de Costa Rica.

⁴ Enseignante en Droit Administratif. Université de Costa Rica.

⁵ Directeur du programme de Transformation de l'État. PhD. en droit et maîtrise en droits humains.

reconnaissance publique de l'importance potentielle d'une approche *bassins-versants* pour la gestion intégrée du territoire. Même si cela ne s'est pas traduit dans la *Loi Organique de l'Environnement* (publiée trois ans plus tard), c'est l'un des points d'ancrage soutenant l'approche adoptée dans cette thèse.

3.4.3 Contexte institutionnel

Un projet de SIG orienté sur la gestion des bassins-versants requiert bien plus que les bonnes intentions de chercheurs universitaires comme nous, à l'école de géographie de l'Université de Costa Rica. Il faut faire participer et essayer de relier les institutions ayant un intérêt dans l'aménagement des bassins-versants. Mais avant ceci, on doit s'efforcer de les comprendre et examiner leurs mandats, leurs intérêts, leurs approches et leurs possibilités réelles de participation conjointe. Ceci permettra, en fin de compte, de créer un schéma organisationnel qui devrait déboucher sur un essai valable.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, nous avons choisi de travailler en consultation avec quelques-unes des institutions nationales qui ont un fort rapport avec l'utilisation, la gestion et l'aménagement des bassins-versants. Des visites, entrevues et une enquête ont été conduites dans ce but. Nous les décrivons brièvement.

1. Le *Ministerio de Energía y Recursos Naturales* (MINAE). C'est l'institution directrice des politiques et règlements concernant la gestion de l'environnement. Ce Ministère a englobé le Département des Eaux du SNE (*Servicio Nacional de Electricidad*), qui était le responsable de l'administration des eaux et de la concession des permis d'utilisation. Pendant son rattachement au SNE, le Département des Eaux a toujours été un bureau faible, manquant de ressources techniques, économiques et humaines (Porras, Alvaro, com.pers⁶). Un problème fondamental fut toujours l'impossibilité de faire la moindre planification stratégique; son action était limitée à faciliter les permis d'utilisation par les

⁶ Alvaro Porras. Géographe. Département des eaux du service national de électricité.

entreprises et individus publics et privés. Depuis son intégration au MINAE, il y a un véritable désir de planification.

2. *L'Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)*. Institution responsable de définir, d'étudier, de concevoir et de construire des projets (et applications) de captage des eaux superficielles et souterraines, pour satisfaire la demande en eau potable autant dans les zones urbaines que rurales dans tout le pays. Cette institution est exemptée de solliciter le permis de concession au SNE, ce qui entraîne une certaine confusion, étant donné l'ampleur de sa participation dans l'utilisation des eaux. L'institution compte un département de bassins-versants chargé des études de base de tout projet de captage et de transport d'eau. Il semble y exister assez d'expérience empirique dans l'étude et la gestion des bassins-versants, mais on reconnaît le besoin d'une plus grande intégration inter-institutionnelle.

3. *L'Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)*. Cette institution a pour but de développer la génération d'énergie électrique pour l'ensemble du pays. Créé en 1949, à un moment où la production énergétique au pays était faible, le ICE n'a pas respecté l'autorité du SNE et a développé d'importants projets sans trop se préoccuper de la gestion intégrée d'autres ressources dans les bassins-versants. À la différence des projets de l'AyA, ceux de l'ICE affectent les grands bassins du pays. La contribution de l'ICE dans l'économie nationale a été bien reconnue; maintenant l'institution passe par un processus de révision d'efficacité et d'adaptation à l'économie de marché globalisée. Traditionnellement l'institution a stimulé la protection des ressources dans les bassins ayant des projets hydroélectriques et a investi aussi dans des études et produit des plans de récupération. L'institution compte un Département de l'Environnement qui utilise des SIG depuis quelques années, quoique d'une façon plus intensive depuis cinq ans (Javier Saborio⁷, communication personnelle.).

4. *Les municipalités*. Ce sont les responsables de l'administration des services et des intérêts locaux; elles doivent favoriser le progrès général des communautés et promouvoir le

⁷ Javier Saborio. Ingénieur. Spécialiste en SIG. Institut Costaricien d'Électricité

développement intégral sur ses territoires établissant des plans d'aménagement et de développement: *Plans Régulateurs Urbains et Plans de Développement Rural Intégré*. Malgré leurs nombreuses attributions, les municipalités ont toujours été des institutions très faibles d'un point de vue économique et organisationnel. L'ensemble des municipalités du pays reçoit moins de un pour cent du budget global du gouvernement (Miranda, 1997:201) et la plus grande partie d'entre elles n'engagent aucun professionnel et n'ont pas de département de planification. Pire encore, leur participation en gestion sociale et territoriale consiste en une simple approbation des formalités. Souvent il n'y a pas de plans d'aménagement et aucune surveillance des actions particulières.

5. *Le Centre National de Géoinformation*. C'est une initiative qui est apparue tout récemment, quoique lancée par ce que l'on appelait la *Comisión Terra* depuis 1995. Le but du centre sera "d'appuyer les activités nationales en matière d'aménagement du territoire et dans le développement des applications des SIRS" (*La Nación*, 5 mai, 1998:26A). L'organisme comptera sur la participation des universités publiques, et les ministères de la Planification, de l'Environnement, des Oeuvres Publiques et de la Justice. D'après le ministre de la Planification, L. Garnier, "L'idée est de disposer de divers indicateurs en cartes qui, par la suite, pourraient se superposer pour obtenir de l'information valable ..." " (*La Nación*, 5 mai, 1998:26A). Malheureusement, un tel projet se développe complètement en dehors des autres initiatives d'aménagement du territoire et a un teinte politique trop marquée. Des erreurs remarquables ont déjà été commises lorsque l'initiative était à la *Comisión Terra*. On a par exemple acheté dix-sept machines de haute performance ainsi que des logiciels SIG coûteux, avant même d'avoir du personnel connaissant les SIG. Les machines sont restées une année sans utilisation avant que l'on commence la saisie des données. On n'a pas développé un véritable modèle conceptuel de données, et les objectifs demeurent vagues. C'est pourquoi, le ministre Garnier voit encore les SIGs comme *une simple compilation de cartes que l'on doit faire pour déterminer après, à quoi elles servent*.

D'après nos recherches, quelques autres institutions et organismes costariciens concernés par les différents aspects de l'utilisation des bassins-versants et, en principe, intéressés directement ou indirectement à leur aménagement sont:

1. SENARA (*Servicio Nacional de Riego y Avenamiento*)
2. CNE (*Comisión Nacional de Emergencias*)
3. CEDARENA (*Comisión Especial de Derecho Ambiental y Recursos Naturales?*)
4. JASEC (*Junta Administradora de los Servicios Eléctricos de Cartago*)
5. MIDEPLAN (*Ministerio de Planificación*)
6. CRGT (*Comisión para la Gestión de la Cuenca del Río Grande de Tarcoles*)

La complexité du sujet s'accroît si l'on tient compte des organisations et des projets régionaux; citons par exemple:

1. CAPRE (*Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centro América, Panamá y República Dominicana*), organisation apparue en 1979, reconnue par l'OEA en 1989 et consolidée lors de la création du Système d'Intégration Centraméricaine (SICA).
2. CRRH (*Comité Regional de Recursos Hidricos*)
3. CEPREDENAC (*Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central*)
4. CEAC (*Consejo de Electrificación de América Central*)
5. CORECA (*Consejo Agropecuario Centroamericano*)
6. PACADIRH (*Plan de Acción Centroamericano para el Desarrollo Integrado de los Recursos Hidricos*), projet intégré dans l'ALIDES (*Alianza para el Desarrollo Sostenible de Centroamérica*), qui est "le guide pour le développement économique, social, d'environnement et politique de l'Amérique Centrale", et faisant partie du SICA (*Sistema de Integración Centroamericana*).
7. CCAD (*Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo*)
8. PARLACEM (*Parlamento Centroamericano*)

Lors de l'atelier "*I Encuentro sobre Organismos de Cuenca en Centro América y el Caribe*", tenu à San José, en mai 1997, on a présenté le Plan d'action pour les ressources hydriques centraméricaines nommé le PACADIRH. Nous mentionnons quelques-uns des principes sur lesquels repose ce plan:

1. L'eau est une ressource économique, sociale et de l'environnement, essentielle pour maintenir la vie ainsi que le développement socio-économique; elle doit être considérée à la fois comme une ressource limitée et vulnérable autant dans le temps que dans l'espace.
2. Le bassin-versant est l'unité spatiale naturelle pour l'aménagement et la planification du développement des ressources naturelles, en général, et des ressources hydriques, en particulier. Pour les fins d'administration des ressources, il faudra considérer les unités politiques, administratives et sectorielles.
3. La participation des institutions qui agissent sur les bassins-versants, ainsi que des communautés qui y sont établies doit être considérée comme un facteur déterminant pour la formulation et l'exécution des plans hydriques en harmonie avec les autres ressources.
4. Besoin de formuler des plans, programmes et projets de gestion intégrée de bassins-versants en constituant des équipes multidisciplinaires et inter-institutionnelles en assurant un processus interactif et multisectoriel permettant d'harmoniser les intérêts des divers secteurs dans une gestion technique capable de répondre aux besoins économiques et sociaux de la population humaine ainsi qu'aux besoins de la conservation, de la récupération et de la protection des ressources hydriques.
5. Stimuler la conservation et la gestion des bassins-versants au niveau local, national et régional.
6. Promouvoir l'aménagement territorial comme stratégie pour le développement intégré et durable des ressources eau, forêt et sol.

Tel que reconnu dans le même Plan d'Action (PACADIRH), "*aucune activité du gouvernement concernant les ressources hydriques serait effective sans une organisation institutionnelle*

adéquate” (CRRH,1997:123; en *Políticas Institucionales sobre Cuencas Hidrográficas*, Alejandro Rodriguez, ed.).

Le PACADIRH mentionne comme *programme prioritaire* le développement des bassins-versants. L'objectif serait “d’initier un processus systématique de développement durable des bassins permettant de répondre aux principes du Plan d'action tout en mettant en pratique les propos d’ALIDES en matière de développement durable” (CRRH,1997:128 en *Políticas Institucionales sobre Cuencas Hidrográficas*, Alejandro Rodriguez, ed.). La stratégie consistera à “*développer et à consolider un processus de systématisation et d’aménagement des bassins-versants dans chaque pays et de donner la priorité à l’élaboration de projets pour le développement de leurs ressources hydriques, en sélectionnant des projets pilotes pour la formation et la préparation des équipes techniques nationales ainsi que des habitants des bassins-versants*” (Op cit.). -Traduction libre.

Dans un premier temps, on perçoit le besoin de divers niveaux de coparticipation institutionnelle. Par exemple, il doit y avoir une organisation supérieure, politique, spécifiquement constituée pour tout ce qui concerne l'identification des besoins dans la gestion des bassins-versants et des nombreux conflits d'intérêt. Cette commission doit connaître toutes sortes de projets en développement qui puissent s'intégrer dans le projet aménagement de chaque bassin-versant. Il s'agit d'identifier toutes les voies institutionnelles par lesquelles doivent passer ces projets, qu'elles soient publiques ou privées. Ceci implique la création d'un puissant réseau d'informations qui nourrirait en fin de processus un système d'information de haut niveau, concernant tous ces projets. Ce système sera la plate-forme d'opérations de cette organisation politique supérieure. Les SIG ne sont utiles à ce niveau là que pour montrer des aspects très généraux, comme la zone d'affectation de chaque projet. Évidemment il faudra une géobase de référence générale. Cela peut s'obtenir facilement à partir de la documentation déjà existante, par exemple au SISVAH, CNE et autres institutions. Un nom pour cette organisation pourrait être: COMISION NACIONAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS (CONACUH). Une telle commission, en plus de son personnel politique, devrait compter sur du personnel administratif et technique, notamment pour maintenir à jour la base d'informations et pour tirer

de l'information utile répondant aux besoins du comité politique. Celui-ci devrait se réunir au moins une fois par mois (1 ou 2 journées) pour discuter de tout ce qu'il y a de nouveau concernant la gestion des bassins-versants.

Deuxièmement, il faut créer une commission technique opérationnelle, pour l'étude et la gestion des bassins-versants. Cette commission serait composée par des techniciens provenant des diverses institutions qui ont à leur charge des projets ou la supervision de projets qui affecteront les bassins-versants. On y trouvera des représentants de AyA, ICE, MINAE, MIDEPLAN, etc. Il doit y avoir une représentation des entreprises privées ou autres, qui font des recherches ou proposent des applications au niveau des bassins-versants. Le représentant de chaque institution a la responsabilité d'établir un aperçu général de ce qui se passe dans le domaine de son institution et de transmettre au sein de la commission technique toutes sortes de problématiques. La commission technique analysera ensemble les conflits d'intérêt, ainsi que les problèmes exogènes détectés. Les solutions de consensus, ainsi que les contradictions non résolues au niveau technique seront présentées, par consensus, à la commission politique, qui devrait prendre une résolution lors de la réunion suivante. La commission politique pourra inviter des représentants de la commission technique à ces réunions, notamment lorsque des problèmes techniques complexes leur sont posés. Le technicien représentant chaque institution aura droit à l'appui d'un technicien et d'une secrétaire afin de pouvoir récolter toute la documentation concernant les points de conflit. Lorsque le problème à résoudre a une composante spatiale, on doit présenter des cartes numériques signalant les zones de conflit. On utilisera dans ce but un format d'échange de données cartographiques normalisé. La commission technique doit se réunir au moins une fois par mois (1 à 2 journées), avec un décalage de 2 semaines par rapport à la réunion de la commission politique. L'école de géographie, peut-être avec un financement pluri-institutionnel, pourrait prendre en charge la gestion d'un SIG permettant d'intégrer l'information digitale concernant tous les problèmes identifiés au sein des institutions, projets, entreprises privées et autres. Cette information sera transmise à la commission politique qui discutera des solutions politiques aux problèmes techniques.

Enfin, il doit exister un comité d'appui technique, professionnel, scientifique, gestionnaire, communal, qui doit se réunir une fois par trimestre pour analyser les problèmes détectés et les solutions proposées par les deux comités mentionnés, ainsi que pour analyser d'autres problèmes non soulignés par ces comités. Ce comité d'appui transmettra ses inquiétudes aux autres, afin de créer un esprit d'amélioration permanent de la gestion des bassins-versants. La transmission de l'information discutée par les comités technique et politique vers le comité d'appui se fera par l'intermédiaire de l'Internet ou par la poste régulière. Afin d'assurer la participation démocratique, ce dernier comité pourrait inclure assez de gens intéressés par la problématique des bassins-versants.

Enfin, ce que l'on perçoit de loin c'est le besoin de coparticipation institutionnelle dans le développement du pays. Chacune des institutions requiert différents besoins d'information, souffre de lacunes sérieuses pour la trouver, et des projets intéressants pour l'acquérir. L'information est la base de toute planification. Donc, il faut trouver une forme organisationnelle pour pouvoir partager ces besoins, limitations et initiatives, de façon à minimiser les efforts redondants et maximiser les profits. La conception d'un SIG pour répondre aux besoins combinés de plusieurs institutions, bien évidemment, est une tâche lourde, mais notre intention n'est que de proposer un cadre conceptuel général. Chaque institution devra le développer d'après ses besoins et ses possibilités particulières.

3.5 Projets de SIG au Costa Rica

Les applications des SIG au Costa Rica se sont multipliées et diversifiées sensiblement pendant les cinq dernières années. La majeure partie, cependant, reste au niveau de la saisie de cartes, certains vont jusqu'à la création de bases de données attributives reliées mais très peu atteindront le *statut* de SIGs fonctionnels. Dans la majeure partie des cas, la définition du projet a été faible et aucune modélisation des données n'a été faite.

3.5.1 Les SIGs dans l'enseignement

1. Au CATIE, depuis les années 80, on se sert des programmes SIGs pour l'enseignement et la recherche académique. ERDAS, IDRISI, ARCINFO sont parmi les "SIGs" les plus utilisés. Cette institution ayant un caractère multinational a disposé d'un budget suffisant pour soutenir un laboratoire de géoinformatique pendant plusieurs années.
2. À l'école de géographie de l'Université Nationale (UNA). Là aussi, les SIGs sont arrivés depuis les années 80. Ils ont débuté avec le logiciel ARCINFO et ils maintiennent un laboratoire de SIG jusqu'à ce jour. Récemment (1996), ils ont signé des ententes avec le projet IDRISI et ils ont créé un centre régional pour l'enseignement et le développement des applications avec IDRISI.
3. À l'école de géographie de l'Université de Costa Rica, des cours de cartographie assistée par ordinateur se donnaient depuis les années 1985; toutefois la disponibilité de logiciels, machines et personnel spécialisé était toujours très faible. Il y a eu un progrès important depuis mon arrivée, en 1996, grâce à l'investissement de quelques milliers de dollars, notamment en machinerie.
4. À l'*Instituto Tecnológico de Costa Rica*, on s'est orienté plutôt vers l'enseignement des logiciels CADs, notamment l'AUTOCAD.
5. Les *universités privées*, souvent bien adaptées aux besoins du marché ont aussi initié l'enseignement des SIGs; citons par exemple l'UACA.

3.5.2 Les SIGs dans la recherche

1. Au *Centro Científico Tropical*, on fait de la recherche sur l'environnement en se servant des SIGs et des images satellites.
2. Au *Centro de Investigaciones en Desarrollo Sostenible (CIEDES)*, à l'Université de Costa Rica, on fait de la recherche appliquée en télédétection en utilisant ERDAS et ARCINFO.
3. Au TELESIG dans le département de vie sylvestre de l'Université Nationale, on fait de la recherche appliquée en télédétection et SIGs.
4. À FUNDECOR on utilise régulièrement des images satellitaires et logiciels SIGs.

5. Au PROIGE, à l'école de Géographie de l'Université de Costa Rica, on fait de la recherche appliquée en gestion de ressources naturelles en utilisant des logiciels SIGs pour la production cartographique.

3.5.3 Les SIGs dans l'entreprise privée

1. *Geocad* est une petite entreprise privée qui fait de la numérisation de cartes, et qui possède plusieurs traceurs HP de grand format pour l'impression.
2. *Sistemas Analíticos* commercialise le logiciel INFOCAD et offre des services de scannage et vectorisation de cartes.
3. *Continex* commercialise le logiciel et machines INTERGRAPH ainsi que le logiciel MAPINFO. Il offre des services de scannage (balayage) et de numérisation.
4. *Geotecnologias* est l'entreprise responsable de la commercialisation des produits d'ESRI (ArcInfo, ArcView, etc.) et des produits d'ERDAS.
5. *Proambiente* est une boîte spécialisée en études de l'environnement qui offre aussi des services d'impression sur des traceurs HP de grand format.

3.5.4 Les SIGs dans les organisations non gouvernementales (ONGs)

1. Au *Parc National Manuel Antonio* fonctionne une application de SIG pour suivre la piste des déplacements des singes et étudier leurs habitudes alimentaires.
2. Le *Projet du Río San Juan, Costa Rica - Nicaragua*, développe une application de SIG pour la gestion des données spatiales et dispense un entraînement aux fonctionnaires des institutions liées au projet.
3. À l'INBIO fonctionne un SIG qui semble très efficace, il s'agit d'un des rares SIRS opérationnels au pays.
4. Le projet ACA (*Área de Conservación Arenal*) développe un SIRS pour la gestion de cette zone protégée.

3.5.5 Les SIGs dans les institutions publiques

1. Au SISVAH fonctionne l'un des plus vieux projets de SIRS au pays.
2. Au département de l'environnement de l'ICE fonctionne un laboratoire de SIG assez bien équipé et ayant du personnel spécialisé. Des projets importants d'aménagement des bassins-versants sont en développement.
3. Quelques municipalités ont fait leurs débuts dans les SIGs: San José, Heredia, Alajuela, Santo Domingo, San Antonio, Santa Ana, Puriscal, Colón, Coronado, etc. La plupart se sont limitées à la compilation de données et à la numérisation de cartes. Aucune ne possède un SIG fonctionnel et quelques-unes ont abandonné temporairement leurs initiatives d'informatisation.

3.6 Références bibliographiques du chapitre

ALVARADO, G. 1987. El Volcán Irazú: Síntesis Geológica, Actividad Eruptiva y Peligro Volcánico Preliminar. Informe Interno, Departamento de Geología. ICE. 46p.

ALVARADO, G. 1984. Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Geología. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

ALVARADO, G et BOSCHINI, I. 1988. Evaluación Preliminar de las Amenazas eológicas y Periodos de Recurrencia en el Valle del Guarco, Cartago: Su Eventual Incidencia en el Deslizamiento de San Blas. IV Seminario Nacional de Geotecnia. 14 y 15 de Abril, 1988. San José, Costa Rica.

ARROYO, N. 1992. Riesgos Por Inundaciones en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central.* (25-26) I-II Semestres de 1992:373-384.

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. **Ley Forestal y su Reglamento.** 1997. Investigaciones Jurídicas S.A. 2da. Ed. Año VIII, N° 102. San José, Costa Rica

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. **Loi Organique de l'Environnement / Ley Orgánica del Ambiente.** 1996. 1a. Ed. Investigaciones Jurídicas S.A. Año VII, N° 97. San José, Costa Rica.

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. **Constitución Política de la República de Costa Rica.** 1995. 6ta. Ed. Investigaciones Jurídicas S.A. Año VI, N° 30. San José, Costa Rica.

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. **Código Municipal.** 1994. 3a. Ed. Investigaciones Jurídicas S.A. Año V, N° 11. San José, Costa Rica,

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. 1993. **Código de Minería y su Reglamento.** 1a. Ed. Investigaciones Jurídicas S.A. Año IV. N° 50. San José, Costa Rica

CATIE. 1989. Manejo de Cuencas: Una nueva filosofía en Centroamérica. En: Boletín Informativo. Proyecto Regional de Manejo de Cuencas-Programa de Manejo Integrado de Recursos Naturales. Julio-Diciembre. 1989:14

COMITÉ REGIONAL de RECURSOS HIDRAULICOS. 1997. Plan de Acción Centroamericano para el Desarrollo Integrado de los Recursos Hídricos. En: *Políticas Institucionales sobre Cuencas Hidrográficas.* Alejandro Rodríguez, Ed. San José, Costa Rica.

DENGO, G. 1968. Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central. Centro Regional de Ayuda Técnica (AID). México. 52 p.

DENYER, P. et ARIAS, O. 1991. Efectos geológicos del terremoto de Limón, Costa Rica. *Geostmo.* V(1 y 2) :13-32.

GRANDOSO, H., ZÁRATE, E. et VEGA, N. 1982. *Análisis en la Escala Sinóptica y la Mesoescala de un Frente Frio Sobre América Central.* Instituto Meteorológico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

HALL, C. 1991. *El Café y el Desarrollo Histórico-Geográfico de Costa Rica.* 2da Reimpresión. Editorial Costa Rica. San José, Costa Rica.

HARTSHORN, G., HARTSHORN, L., ATMELLA, A., GOMEZ, L., MATA, A., et al. 1982. *Perfil Ambiental de Costa Rica.* Centro Científico Tropical Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos. San José, Costa Rica.

JERÉZ, D. et CLINE, M. (Eds). 1989. *Preliminary hazard map of Poás and Barva volcanoes, Costa Rica.* Compilado y preparado por Weston, Inc. en colaboración con CNE, UCR, ICE, UNA, Proyecto Mirvys (Mapa 1: 50 000).

JOURNAL LA NACION. 1998. Édition du 5 mai. San José, Costa Rica. p. 26A.

JOURNAL LA NACION. 1996. Édition du 28 juillet. San José, Costa Rica: 1A, 4A et 5A.

JOURNAL LA NACION. 1996. Édition du 30 juillet. San José, Costa Rica: 1A, 4A, 5A, 6A et 8A.

JOURNAL LA NACION. 1996. Édition du 2 août. San José, Costa Rica: 1A, 4A, 5A et 6A.

JOURNAL LA NACION. 1996. Édition du 4 août. San José, Costa Rica: 1A et 5A.

JOURNAL LA NACION. 1996. Édition du 7 août. San José, Costa Rica: 1A, 4A et 5A.

- KUYPERS, E.** 1979. La geología del complejo ofiolítico de Nicoya, Costa Rica. *Informe Semestral*. 1981. Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Publicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- MASKREY, A.** (compilador). 1993. **Los Desastres No Son Naturales.** Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Tercer Mundo Eds. Colombia.
- MELÉNDEZ, S.** 1996. Diagnóstico de Amenazas Naturales y Vulnerabilidad Física de la Población en el Area Metropolitana, San José, Costa Rica. Tesis de Maestría en Geografía. Sistema de Estudios de Posgrado en Geografía. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- MIRANDA, F.** 1997. El Programa de Planes Voluntarios para el Control de Efluentes Industriales en el Gran Area Metropolitana de San José, Costa Rica. En: Políticas Institucionales sobre cuencas Hidrográficas. Alejandro Rodríguez, Ed. San José, Costa Rica.
- MONTERO, W..** 1994. Sismicidad y Neotectónica. En: Atlas Geológico. Gran Area Metropolitana. 1a. Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica :147-160.
- MONTERO, W.** 1986. Periodos de Recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central.* (5):35-72
- MORA, S.** 1989. Extent and social-economic significance of slope instability in Costa Rica. Dans: Landslides: Extent and Economic Significance. Brabb et Harrod (eds):93-99.
- MORA, S.** 1986. Comentarios Acerca de la Problemática Generada por las Amenazas Geológico-Antropicas en la Cuenca del Río Reventado. Cartago, Costa Rica. Informe para el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. Departamento de Geología, ICE. 22p.

MORA, S. 1985. Las Laderas inestables de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. No. 3:131-161

MORA, S. 1981. Clasificación Morfotectónica de Costa Rica. *Informe Semestral, julio a diciembre*. 1981. Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Publicas y Transportes. San José, Costa Rica.

MORA, S., ALVARADO, G., et MORALES, L. D. 1992. Mapa Preliminar Sintético de Amenazas Geológicas de Costa Rica. Su Importancia en el Desarrollo de la Infraestructura Civil. *Revista Geográfica de América Central*. (25-26) I-II Semestres de 1992:355-371.

MORA, S., LEANDRO, G. et LEÓN, C. 1991. La Dinámica del Deslizamiento de Puriscal, Costa Rica. V Seminario Nacional de Geotecnia. San José, Costa Rica

MORA, S. et ASTÉ, J.P. 1990. Cartago Non Delenda Est -Pour une politique de prévention des risques générés par les mouvements de terrain à Cartago (Costa Rica). 6^{ème} Congrès International de l'Association international de génie-geologique. Balkema, Rotterdam. 1663-1667.

MORA, S. et MORALES, L.D. 1986. Los Sismos Como Fuente Generadora de Deslizamientos en Costa Rica y su Impacto en las Lineas Vitales e Infraestructura. Primer Simposio Latinoamericano de Riesgo Sísmico. CFIA. San José, Costa Rica. 8p.

MORALES, L. D 1987. Regionalización de la Sismicidad de Costa Rica y la Crisis Sísmica del Año 1983. *Geoistmo*. 1(1):33-49.

MORALES, L. D. et AGUILAR, A. 1994. Amenaza Sísmica. En: Atlas Geológico. Gran Area Metropolitana. 1a. Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica : 234-244

- PANIAGUA, S.** 1994. Amenaza Volcánica. En: Atlas Geológico. Gran Area Metropolitana. 1a. Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica : 221-131.
- PANIAGUA, S. et MORALES, L.D.** 1987. Peligro Sísmico y Volcánico en Costa Rica: Consideraciones para su Prevención. *Geoistmo*. 1(2):11-24.
- PANIAGUA, S et SOTO, G.** 1988. Peligros Volcánicos en el Valle Central de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*. 12 (1-2):145-156.
- PANIAGUA, S. et SOTO, G.** 1986. Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica, América Central. *Ciencia y Tecnología*. 10(2):49-72.
- RAMIREZ, G.** 1996. Desarrollo, Control y Manejo de Cuencas Hidrográficas y Areas de Recarga Para Abastecimiento de Agua Potable en Costa Rica. Conferencia. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Oficina Rectora. Proceso de Cuencas Hidrográficas. San José, Costa Rica.
- RAMIREZ, P.** 1983. Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Notas de Investigación N°. 5. San José, Costa Rica.
- RAMIREZ, A. et MALDONADO, T. (Eds.).** 1988. Desarrollo Socioeconómico y el Ambiente Natural de Costa Rica. Situación Actual y Perspectivas. 1a. Edición. Ed. Heliconia. Fundación Neotrópica. San José, Costa Rica.
- SALAZAR, R.** 1993. Normativa Ambiental Sobre la Contaminación de las Aguas. 1a. Ed. Euroamericana de Ediciones (C.R.). S.A. Fundación Ambio. San José, Costa Rica.
- TIJERINO, J. M..** 1992. **La Protección Penal del Ambiente.** En: Primer Congreso Nacional de Derecho Ambiental. Unión Mundial para la Naturaleza -UITCN. San José, Costa Rica. p.145.

UNION MUNDIAL PARA LA NATURALEZA -UICN- .1992. I Congreso Nacional de Derecho Ambiental. San José, Costa Rica.

VAHRSON, W. 1992. Distribución Espacial de los Periodos de Retorno de Tres Eventos de Lluvias Extremas en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central.* (25-26) I-II Semestres de 1992:193-207.

WEYL, R. 1971. La Clasificación Morfotectónica de Costa Rica. En: Informe Semestral, julio-diciembre (1971), Instituto Geográfico Nacional. San José, Costa Rica.

ZARATE, E. 1992. Clasificación de Fenómenos Meteorológicos Causantes de Desastres Naturales Segun Escalas Temporales y Espaciales. *Revista Geográfica de América Central.* (25-26) I-II Semestres de 1992:115-131.

ZARATE, E. 1974. La Convergencia de la Brisa de Mar del Océano Pacífico con el Flujo Alisio, Dentro del Valle Central. Instituto Meteorológico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

ZELEDON, R. 1992. Código Ecológico. Editorial Porvenir S.A. San José, Costa Rica.

CHAPITRE 4

ASPECTS BIOPHYSIQUES ET SOCIAUX DU BASSIN-VERSANT URUCA

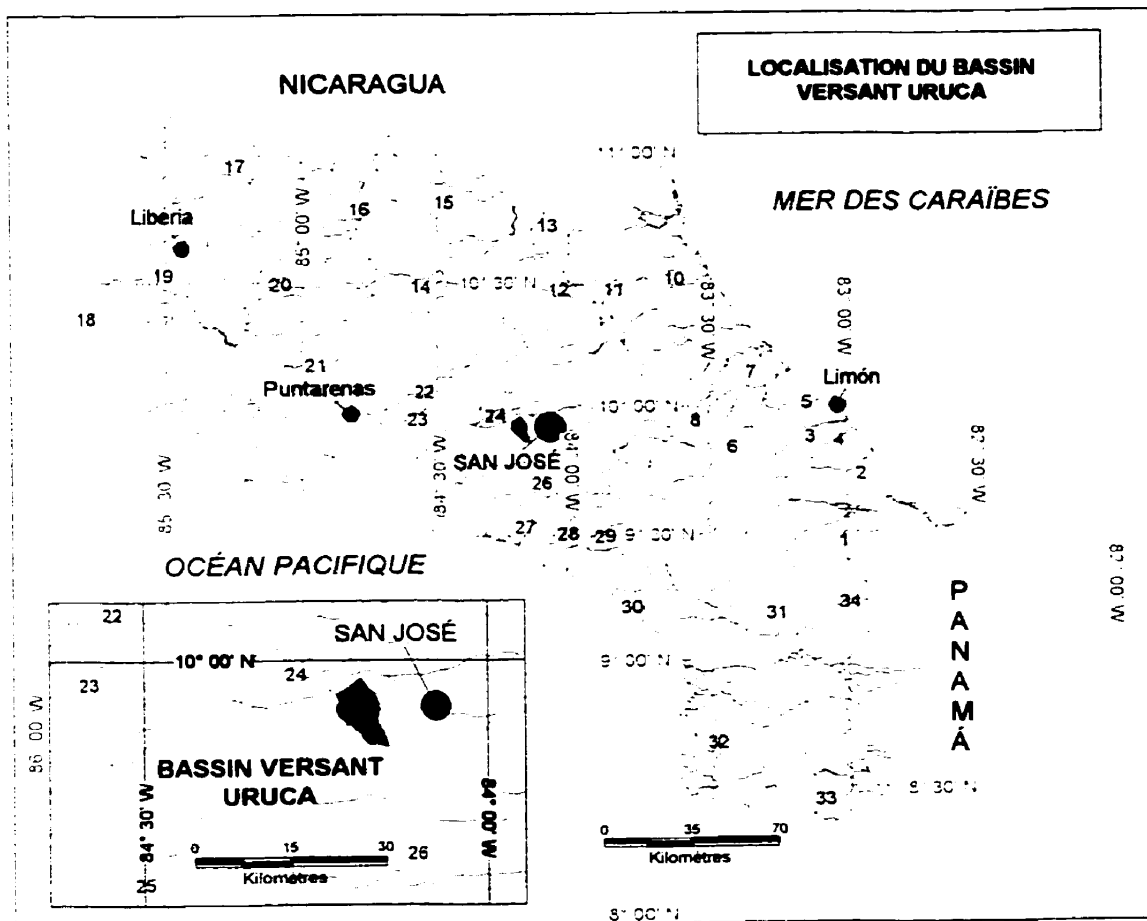
Au-delà de la caractérisation biophysique du pays, présentée dans le chapitre précédent, nous jugeons nécessaire d'effectuer une étude géographique plus particulière et détaillée pour le bassin-versant Uruca, l'endroit choisi pour développer notre SIG prototype. En commençant par une description de la géologie et de la tectonique, nous passerons en revue les autres composantes du milieu naturel, pour aboutir à la problématique sociale, à la croissance de la population et, finalement, à l'exposition aux risques et à la vulnérabilité des habitants du bassin.

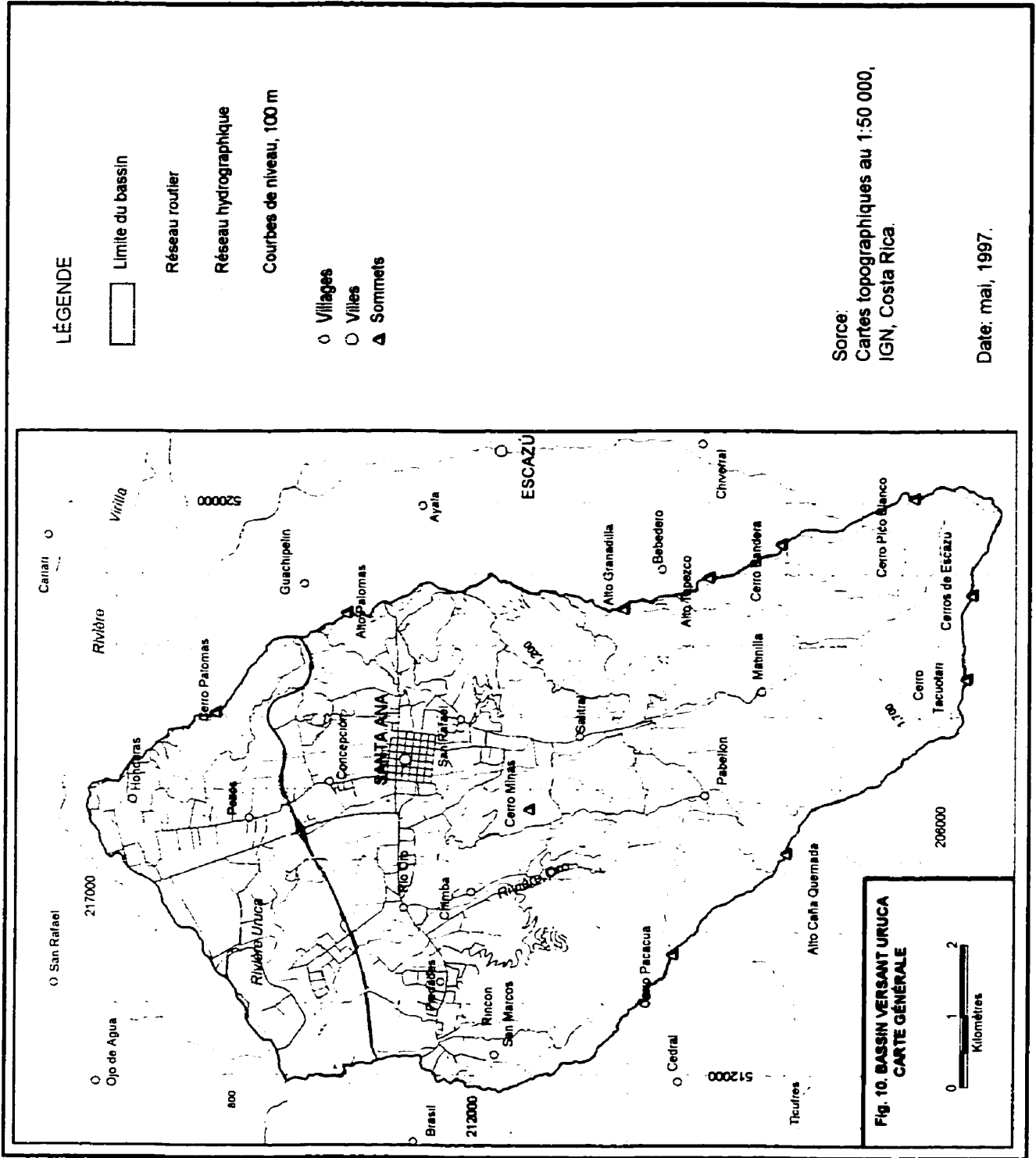
4.1 Introduction

Située au centre du Costa Rica, la Vallée Centrale est une grande dépression remplie par une épaisse séquence volcanique sise au milieu de la Cordillère Volcanique Centrale (au nord) et la Cordillère de Talamanca (au sud). L'origine et la structure de la Vallée demeurent controversées. On l'explique par l'existence d'un système de failles sénestres, par la présence d'une marge de compression rapportée d'une part à la collision de la "Dorsale Aséismique des Cocos", d'autre part à l'évacuation du magma et à la subsidence postérieure, ou tout simplement au fait de se trouver au milieu de deux arcs magmatiques actifs à des périodes géologiques différentes (Denyer et Kussmaul, 1994: 14).

Sis aux coordonnées $84^{\circ}11'O - 9^{\circ}55'N$, le bassin-versant Uruca (figs. 9 et 10) est situé sur le versant sud de la Vallée Centrale du Costa Rica. Ce petit bassin a une surface de 56 km^2 dont 36.5 sont des terrains montagneux à très montagneux. Les limites du bassin sont la rivière Virilla (au nord) qui est le collecteur de la grande vallée; l'axe des sommets Cedral - Pico Blanco - Tapezco - Palomas au sud-est, et l'axe des sommets Cedral - Tacuotari - Caña Quemada - Pacacua au sud-ouest. La principale ville est Santa Ana (10000 habitants), chef-lieu de la municipalité du même nom. Les autres villages sont Concepción, Pozos, Río Oro, Piedades, Salitral. Sauf pour un petit secteur situé à l'extrémité nord-ouest, les limites de la municipalité de Santa Ana coïncident exactement avec le bassin-versant Uruca.

Figure 9. Localisation du bassin-versant Uruca.





4.2 Histoire tectonique

Arias et Denyer (1991:72-73) ont reconstitué l'évolution tectonique de la Vallée Centrale du Costa Rica. En voici les principaux aspects ayant un intérêt dans le cadre de notre étude. Pendant le Crétacé, le mouvement relatif des masses d'Amérique du Nord et du Sud a eu une composante nord - sud (Baumgartner et al., 1984), ce qui a produit la compression de la croûte océanique entre les deux masses continentales et la montée des premiers hauts fonds sur lesquels se sont installées des colonies de récifs. Cette compression nord - sud a créé des failles transversales¹ NE-SO, NO-SE et inverses E-O. Les failles NO-SE ont probablement évolué pour créer le fossé Méso-américain et enclenché le processus de subduction de la paléo - plaque Farallon en-dessous de la plaque des Caraïbes.

La sédimentation postérieure correspond à une période de calme tectonique: L'évolution du processus de subduction est mise en évidence par l'apparition d'un volcanisme en arc d'îles dans le sud et sud-ouest de la région centrale du Costa Rica. Ceci fut suivi par un soulèvement isostatique qui a permis la formation des plates-formes calcaires de l'Eocène et a défini les limites des futurs bassins de sédimentation néogènes, y compris le **bassin de Candelaria**.

Durant le Miocène inférieur, une distension régionale a produit une augmentation considérable de l'émission volcanique (**formation Pacacua**) et des failles du type gravitationnel E-O. La compression N-S dans la limite Miocène inférieur - Miocène moyen a produit une érosion tectonique et une forte production de sédiments (Brechas Verdes de Coyolar). Comme conséquence de l'activation des mouvements transversaux (p.e. faille Candelaria) et de la perte de chaleur post-tectonique, s'est produit la subsidence du bassin de Candelaria (Pittman III & Andrews, 1985), ce qui favorisa la mise en place de la **formation Peña Negra**. Un nouveau volcanisme lié aux mouvements d'extension s'est manifesté durant le Miocène supérieur.

La collision postérieure Miocène - Pliocène des monts de Cocos avec le fossé méso-américain a produit la déformation de Panama, la fermeture des centres d'émission volcanique et la

réactivation des failles transversales NO-SE et NE-SO. Cet événement a produit le basculement du bassin Candelaria entre un système de failles principales ainsi que le plissement des zones avoisinantes.

Pendant le Pliocène, s'est déclenché la migration de l'arc volcanique vers le NE, s'accompagnant d'une diminution de l'angle de subduction de la plaque Cocos au-dessous de la plaque des Caraïbes, conséquence de la réactivation de la subduction dans ce secteur. Ceci fait croire à la coexistence de deux arcs volcaniques, l'un en extinction et l'autre en développement.

4.3 Constitution géologique

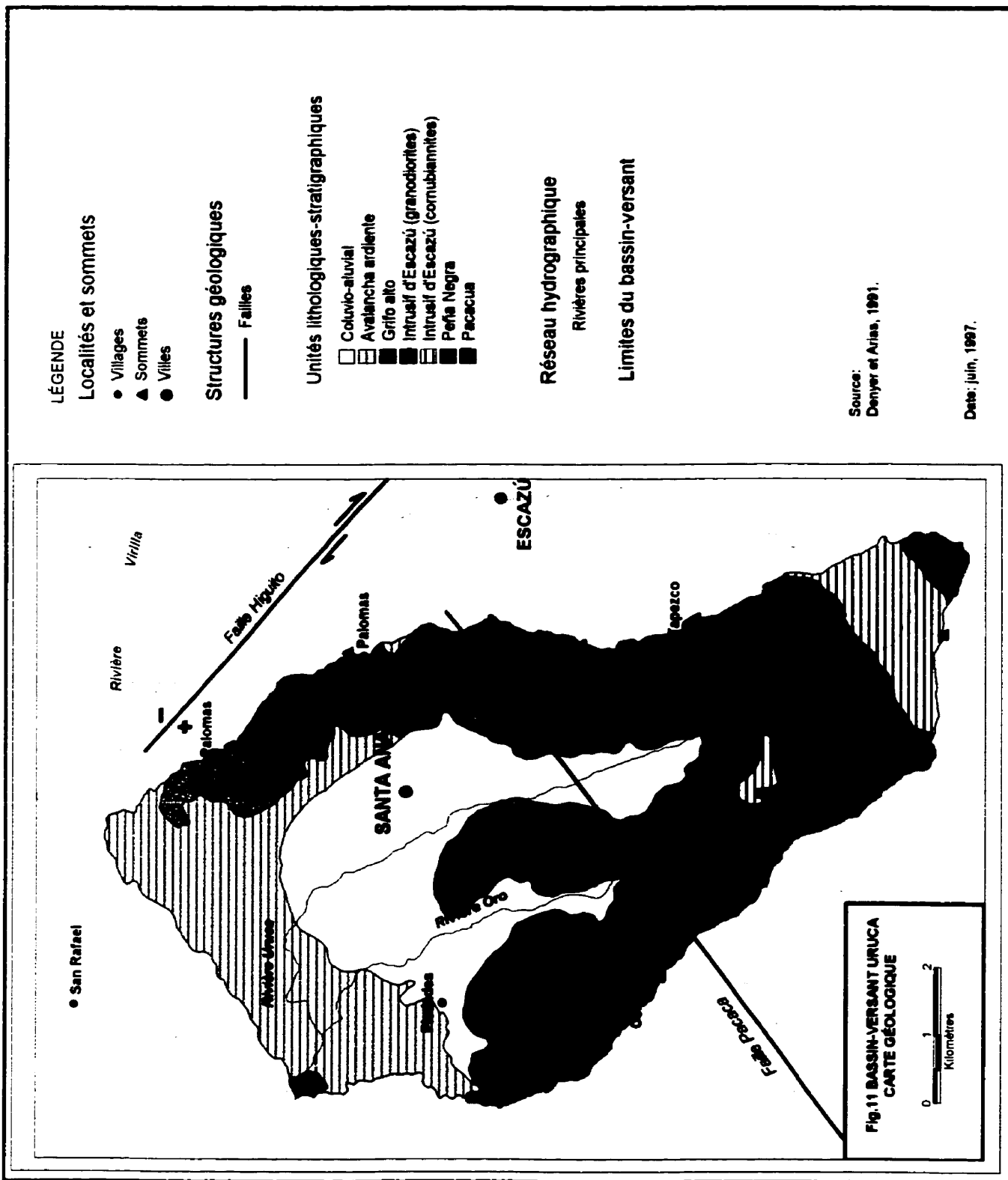
Le bassin d'Uruca est composé à la fois de roches sédimentaires et de roches volcaniques et métamorphiques (fig. 11).

Les roches sédimentaires comprennent des grès, argiles, brèches et roches calcaires mises en place dans le bassin de sédimentation de Candelaria, entre l'Éocène supérieur (env. 40 MA) et le Miocène supérieur (env. 5 MA) (Denyer et Arias, 1994). Plusieurs formations ont été mises en place dans ce bassin de sédimentation (fig. 12), mais seulement celles de Pacacua et de Peña Negra ont un intérêt pour cette recherche.

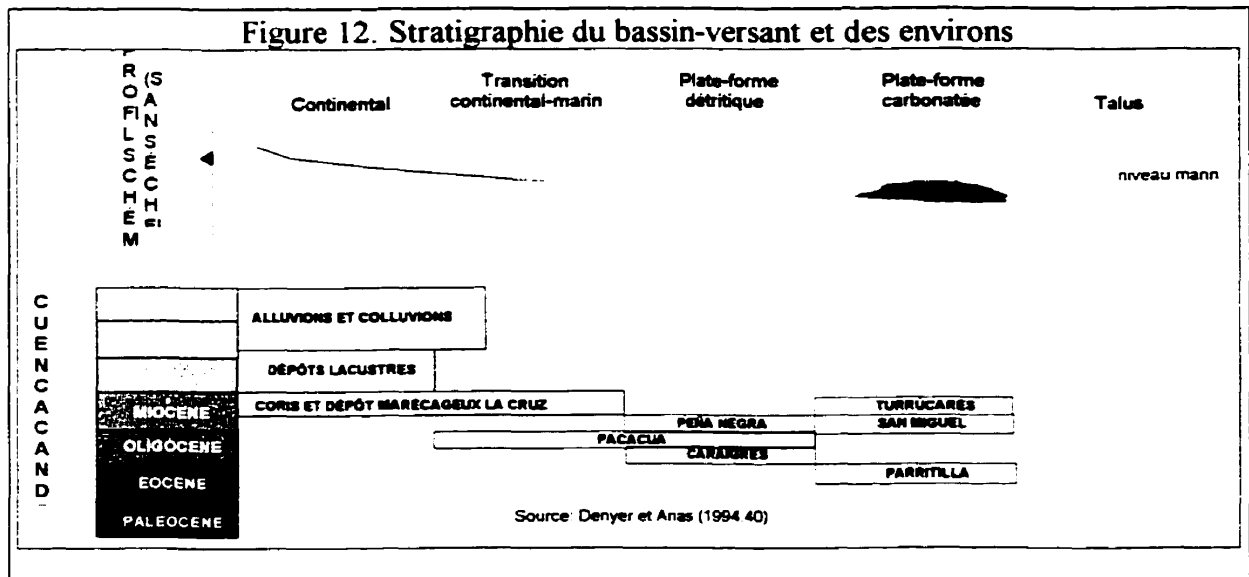
1. La Formation de Pacacua

Romanes (1912, cité par Denyer et Arias, 1991:16) l'a décrite comme un "*tuf fossile*" (pyroclastiques avec des fossiles; vocable imagé) évocant parfaitement le concept d'une séquence rocheuse dont le processus de sédimentation fut influencé par un volcanisme contemporain intense.

¹ Une *faille transversale* est une faille dont le mouvement est sensiblement horizontal et orienté le long du plan de faille.



La formation de Pacacua est constituée par des volcanoclastites à granulométrie variée. Il y a des stratifications décimétriques à métriques de grès vulcaniclastiques, tufs, tobitas et brèches fines et grossières. Vers la partie supérieure, il y a des troncs fossiles mesurant jusqu'à un mètre. Les dykes et les sills de diabase d'une épaisseur allant jusqu'à un mètre sont fréquents. L'épaisseur totale de la formation atteint entre 1200 et 2000 mètres et sa forme est tabulaire. Stratigraphiquement, elle se place en dessus et en contact graduel avec la formation des Carraiges. Ceci indique que le volcanisme a débuté sous forme de pulsations. La formation de Pacacua est recouverte (avec un contact net et de façon brusque), par la formation de Peña Negra. Les critères stratigraphiques situent la formation de Pacacua dans le Miocène inférieur. La sédimentation s'est produite dans un environnement marin superficiel (sous-littoral) influencé par un volcanisme continental actif, de type explosif, contemporain aux dépôts et avec une activité plutôt épisodique (en forme de pulsation), qui a permis la survivance des organismes endoventoniques. La subsidence et l'apport sédimentaire furent constants et rapides. Il existe des structures sédimentaires de type laminaire, parallèle et ondulé, à gradation positive et inverse, des stratifications massives et quelques stratifications entrecroisées. La faune principale incluait des bivalves et gastéropodes (Denyer et Arias, 1991:16-17).



2. La Formation de Peña Negra

Dans le passé, cette unité fut appelée formation de Terraba ou encore, Unité Supérieure de la formation de Pacacua (Rivier, 1979). Toutefois elle possède plusieurs caractéristiques lithologiques distinctes. *“Elle représente une période de calme tectonique et volcanique relatif où la subsidence fut constante, résultat de la perte de chaleur, après la période de mouvements intenses représentés par les brèches vertes de Coyolar (plus au sud)”* (Denyer et Arias, 1991:19).

L'unité inférieure (200 m) est une séquence de grès moyens et fins de couleur brune (couleur de terre), avec des strates décimétriques. La section moyenne (500 à 700 m) comprend des lutites et des grès fins de couleur noire (à pyrites) avec des strates centimétriques et décimétriques, et des niveaux de concrétions. Parfois sont intercalées des strates minces (10 à 20 cm) de tufs. Dans l'unité supérieure (200 à 300 m), on observe des couches caillouteuses et des strates calcaires isolées, tandis que les grès deviennent bruns, de grains fins à grossiers, mal stratifiés (dm à m) et avec une importante influence volcanique (Denyer et Arias, 1991:19).

Cette formation, d'une épaisseur de 1200 m, disparaît vers l'ouest. Stratigraphiquement, elle se place au-dessus, en concordance et en contact graduel avec les brèches vertes de Coyolar (au sud), ou en concordance mais en contact net (brusque) avec la formation Pacacua. Sa position stratigraphique est un équivalent latéral de la formation San Miguel (calcaires bioclastiques). Elle est placée en dessous et/ou latéralement aux formations de Coris (ortoquartzites ou grès de quartz) et de Turrúcares (des grès bioclastiques et volco - clastiques). Elle est surmontée en discordance et en discontinuité lithologique par les formations volcaniques de Grifo Alto, de *“Lavás Intracañón”* (laves qui se sont déposées entre les canyons) et de *“Depósitos de Avalancha Ardiente”* (Dépôts d'avalanches ardentes) (Denyer et Arias, 1991:20).

La sédimentation, notamment dans la partie centrale, fut dominée par des périodes anoxiques (manquant d'oxygène), dans un bassin marin protégé (plate-forme interne) et une faible amplitude des marées. Il y a des structures sédimentaires, par exemple des laminages parallèles,

des structures de charge (unité supérieure), des concrétions avec des matériaux bitumineux dans les fractures, du laminage incliné à faible pendage (unité supérieure) et des stries causées par les vagues (à la base). La faune inclut des foraminifères et des radiolaires, des bivalves, des gastéropodes, des oursins (fragments), des poissons fossiles, et des dents de requins. L'âge est du Miocène moyen. (Denyer et Arias, 1991:20).

Les roches ignées de la Vallée Centrale de Costa Rica comprennent deux séries: la série du Pliocène et la série du Quaternaire. Quatre séries ignées se rencontrent dans le bassin-versant Uruca (fig. 13, ci-dessus), soit des roches intrusives et des cornubianites d'Escazú, la formation Grifo Alto, la formation Lavas Intracañón, et la formation *Depósitos de Nube Ardiente* (de Dépôts de nuée ardente).

1. Roches intrusives et cornubianites d'Escazú

Il s'agit d'un *stock* affleurant dans une zone de quelques 15 km², dans la partie culminante sud-est du bassin. Sa composition lithologique inclut des monzonites, des granodiorites, des monzogabros, des monzodiorites, des gabros et des syénites (Obando, 1983; Denyer et Arias, 1991). La formation de Peña Negra a été traversée par ce corps igné. La mise en place fut un processus lent de filtration le long des failles préexistantes. La perturbation tectonique est minimale. Autour de l'intrusion s'est développé un anneau métamorphique, dont les roches typiques sont les cornubianites, résultant de l'altération des grès et des lutites de la formation de Peña Negra. L'horizontalité des roches cornéennes dans la chaîne d'Escazú indique que l'intrusif était déjà assez développé lorsque le basculement Miocène - Pliocène est survenu. L'intrusion a fonctionné alors comme un barrage structural évitant la déformation au nord de l'intrusif, l'énergie étant donc dispersée dans les failles situées au sud et sud-ouest.

2. La formation de Grifo Alto

C'est une série de roches volcaniques andésitiques et pyroclastiques qui ont couvert les séquences sédimentaires et volcaniques postérieurement au basculement. On y inclut les dépôts du *cerro Mina* (fig. 13). Denyer et Arias (1991:35) croient même que le *cerro Mina* a pu être le foyer d'émission de la formation "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente) (voir ci-dessous). Des dépôts d'ignimbrite de cette formation recouvrent l'intrusif d'Escazu près du *cerro Cedral*, à des altitudes maximales de 2420 mètres au-dessus du niveau marin, donc bien au-dessus des possibles foyers d'émissions de l'époque. C'est pourquoi on présume que cette formation s'est mise en place après l'érosion de l'intrusif. L'âge de cette formation remonte au Pliocène < 4 MA et semblerait s'étendre jusqu'au Pléistocène.

3. La formation de "*Lavas Intracañón*" (laves déposés entre les canyons)

Il s'agit de flux andésitiques provenant des fissures, représentant les premières émissions du volcanisme associé à la Cordillère Centrale. Ce sont des coulées de lave, de 20 à 30 m d'épaisseur intercalées par des tufs et quelques brèches (Echandi, 1981 cité par Denyer et Arias, 1991:39). Cette formation est exposée seulement dans les vallons les plus profonds des rivières de la Vallée Centrale. Son épaisseur est variable atteignant un maximum de 270 m. Elle occupe une position horizontale en discordance et/ou en discontinuité lithologique avec les formations de La Cruz, de Pacacua, de Grifo Alto et de Peña Negra. Elle est recouverte de façon concordante par les "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente). Des datations de 1 à 1.67 MA. ont été obtenues.

4. La Formation "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente)

La Formation "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente) comprend à sa base un dépôt de ponces (3 m) (Echandi, 1981; cité par Denyer et Arias, 1991:39) surmonté d'un dépôt de cendres, de lapilli et de blocs. Au-dessus, on observe des ignimbrites grises avec des inclusions d'obsidienne et de ponces (mm à cm). Des dépôts de cendres couronnent la

séquence. La topographie caractéristique est plane, mais dans les vallons étroits, où le flux a pu pénétrer, il a abandonné une mince couche d'ignimbrites des deux cotés des talwegs. L'étendue longitudinale de la Formation "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente) atteint quelques 40 km et son épaisseur est de 150 m. Au maximum (SENARA-BGS, 1985). Le dépôt a débuté après un brève période (environ. 0.3 MA) qui a permis la formation d'un sol dans les *Lavas Intracañón* (Laves déposées entre les canyons), ainsi que le dépôt de minces couches de sédiments fluviaux. Elle se place en discordance et/ou en discontinuité lithologique sur les formations des *Lavas Intracañón* (Laves déposées entre les canyons), de Pacacua, de Peña Negra, de Grifo Alto, et de La Cruz. Elle est recouverte par des alluvions, des lahars, des cendres et par la formation de Barva. L'origine de cette formation est en discussion. Williams (1952) et Protti (1986) signalent un origine probable par des fissures à la base des stratovolcans actuels. Cependant, Denyer et Arias (1991:42) supposent qu'il y a eu plusieurs centres d'émission (caldeiras) localisés dans une zone d'orientation nord-ouest - sud-est, se prolongeant dans l'axe San Gabriel-cerro Minas-Atenas. Il s'agirait, dans ce dernier cas, d'émissions tardives, résiduelles, d'un arc magmatique localisé dans cette position.

Alvarado (1986:19) mentionne l'existence de dépôts fluviaux inclus de façon lenticulaire dans deux unités différentes d'ignimbrite de la formation "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente). Ces dépôts ont été vus à 2.5 km vers le nord-ouest de la ville de Santa Ana, sur l'axe de la rivière Uruca. Ce dépôt particulier montre une grande quantité de matières organiques et des restes d'un mastodonte. Ce dépôt fluvial a été daté au ^{14}C entre 35 000 et 43 000 ans BP.

Enfin, soulignons les dépôts récents. Il s'agit de dépôts de colluvions et d'alluvions liés aux processus d'érosion et de sédimentation actifs pendant le dernier millénaire et jusqu'à nos jours. Ils sont répartis un peu partout dans le piémont des *cerros de Escazú*, adoptant la forme générale de cônes de déjection (alluvions et colluvions) ayant des épaisseurs maximales de quelques dizaines de mètres. On peut mentionner notamment ceux de Aserri, de Alajuelita, de Escazú, de Colón, de Piedades et de Santa Ana. Les deux derniers sont coalescents et liés au transport et à la sédimentation des rivières Oro et Uruca.

Alvarado (1986:21) a signalé que le cône de déjection de Santa Ana est formé par des lentilles de sable, interstratifiées avec des graviers, des cailloux et du sable. Ces matériaux sont mal triés, avec des structures imbriquées locales et peu développées. Vers la partie supérieure du dépôt, on trouve des blocs allant jusqu'à 1 m de diamètre, montrant une augmentation progressive de la taille des grains de la base vers le haut. Dans la partie supérieure du dépôt, on observe un sol du type limo-argileux et organique de couleur gris foncé, avec quelques fragments de roche. L'épaisseur maximale de ce dépôt de piémont atteint 7.5 m. Etant donné que l'unité surmonte une séquence d'ignimbrites de 18 m et que celles-ci incluent des dépôts fluviaux lenticulaires datant d'au moins 35 000 années, l'âge du cône doit être de quelques milliers d'années seulement.

D'après Mora (1985), la formation du cône de déjection de la rivière Uruca (ou de Santa Ana) est associée à des phénomènes de glissements-barrages causant des coulées de débris (debris flows). Ce phénomène est encore actif.

Denyer et Arias (1991:47) mentionnent que les dépôts correspondant aux maxima glaciaires du Quaternaire, lorsqu'ils se trouvent au pied des montagnes de 1300 m et plus, ont pu être influencés par des phénomènes de gélifluxion. Même si cette situation n'affecte pas notre zone d'étude, il est évident que des changements pluviaux, notamment des extrêmes plus marqués, ont pu favoriser des événements catastrophiques dans le passé.

Arias et Denyer (1991) présentent un modèle interprétatif de la déformation tectonique qui a affecté la région centrale du pays (San José et les environs). L'analyse statistique des pendages a permis de définir cinq ensembles structuraux, deux parmi eux sont reliés à la présence de l'intrusif d'Escazú qui couronne le bassin-versant Uruca. Arias et Denyer ont distingué des styles tectoniques différents pour le secteur nord-ouest et sud-ouest de l'intrusif. L'ensemble nord-ouest montre une grande dispersion de pendages par l'influence du corps intrusif. Il existe toutefois une prédominance des directions nord-est - sud-ouest avec des pendages de 20-30° au nord-ouest. L'ensemble sud - sud-est montre aussi une grande dispersion, quoique inférieure à

celle du secteur nord-ouest, associée aussi à l'effet de l'intrusion. Dans ce dernier cas, dominent les rhumbs est-ouest avec des pendages de 20-30° dirigés principalement vers le nord. Dans cette zone l'interaction entre la compression vers le nord et le corps intrusif a produit des failles inverses ainsi que des plissements et des chevauchements (Arias et Denyer, 1991:63).

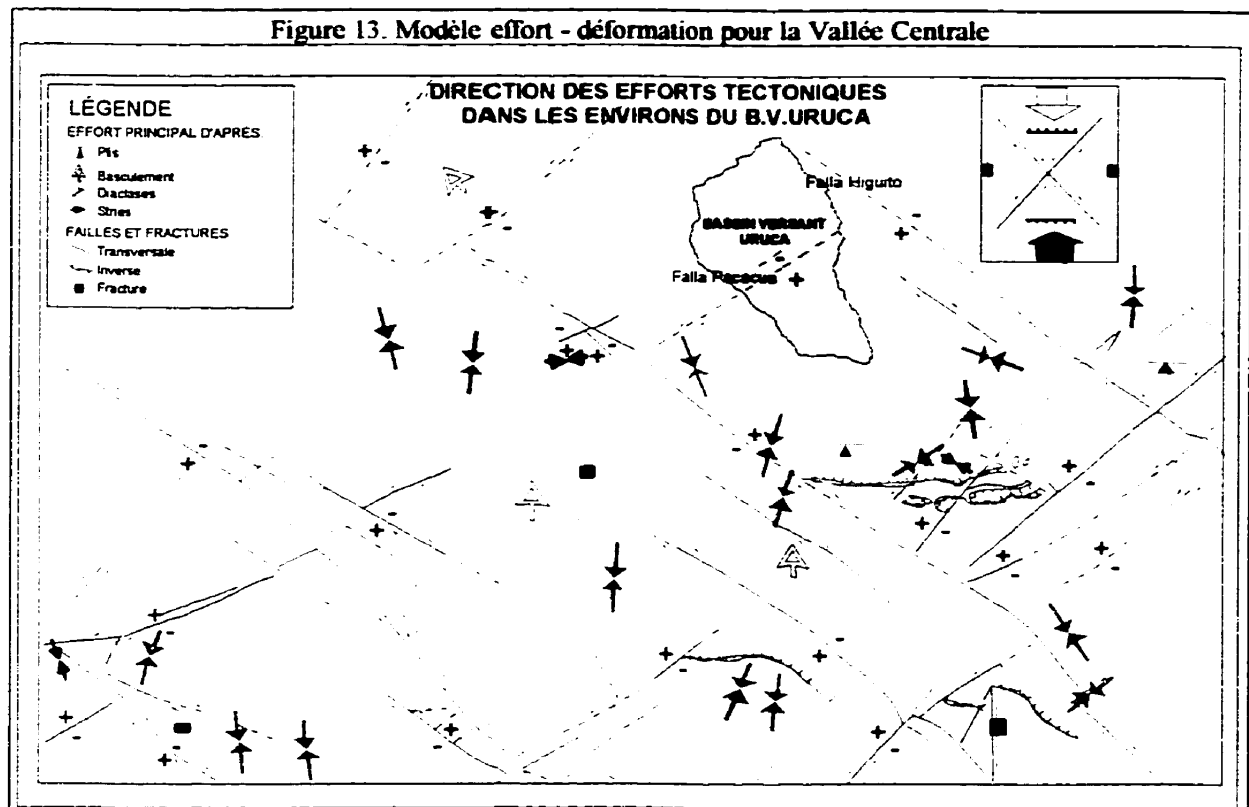
Arias et Denyer (1991:69) ont réalisé une synthèse des failles cartographiées par divers auteurs, énoncé les critères pour leur reconnaissance, et précisé les mouvements relatifs. Prenant en compte la morphologie des traces de failles et leur comportement mécanique pendant le Néogène et le Quaternaire, on estime qu'en général les plans de faille sont sous-verticaux et que le mouvement principal s'est effectué le long du rhumb; les mouvements verticaux furent alors subordonnés aux horizontaux. Les failles NO - SE sont des failles de rhumb (transversales), dextres et trans-comprimées. Les failles NE - SO sont des failles de rhumb, sénestres et leur comportement se montre plus transtensionnel que l'antérieur. Il y a très peu de failles N-S et elles sont de type gravitationnel.

On peut trouver une correspondance entre l'organisation géométrique du système de failles et les orientations des efforts principaux mesurés dans différentes localités, de sorte que la déformation de la région correspond à une compression nord-sud, plus probablement du sud au nord, suggérée par la disposition de l'homoclinal du bassin sédimentaire de Candelaria (au sud). Le modèle effort-déformation développé par Arias et Denyer (1991:70, fig.9) est présenté dans la figure 13.

Cette figure montre que le bassin-versant Uruca est coupé par la faille Pacacua, une faille de rhumb, sénestre, qui aurait provoqué le soulèvement du bloc sud-est et l'enfoncement du bloc nord-ouest. D'autres failles voisines d'importance régionale sont celles de Ciruelas (NO), de Salitral (SE), de Jaris (SO) et de Higuito (NE). En utilisant des photos aériennes et un modèle numérique de terrain, l'auteur a identifié un système de failles et de fractures à caractère local (figures 17 et 18). Ce patron de fractures locales coïncide parfaitement avec le patron micro-régional décrit par Arias et Denyer (1991) et peut s'interpréter comme le résultant des mêmes circonstances tectoniques.

4.4 Géologie structurale

Arias et Denyer (1994:91-93) considèrent que la principale déformation tectonique affectant la *Gran Área Metropolitana* s'est produite à la fin du Miocène - début du Pliocène (env. 5 MA). Ils ont distingué huit domaines structuraux dans cette région, comprenant le bassin-versant Uruca, dont nous parlerons brièvement.



1. Pli - faille du bord sud-ouest de la Cordillère volcanique centrale

Le pli - faille du bord sud-ouest de la Cordillère volcanique centrale correspond à l'escarpement d'Alajuela, zone plissée à cause du soulèvement de la Cordillère volcanique centrale (Borgia et al., 1990) causé par l'intrusion du magma ainsi que par la déformation Miocène-Pliocène.

2. Distension de la Cordillère volcanique centrale

Dans la Cordillère volcanique centrale, les centres d'émission sont alignés selon des orientations N-S et/ou NE. Ceci correspond à l'orientation des failles de distension.

3. Aire d'influence de l'intrusif d'Escazú

L'intrusif d'Escazú a dissipé les efforts compressifs d'orientation nord, mais il y a eu aussi des efforts résiduels mineurs, qui se sont traduits par une orientation nord-ouest.

4. Plis et failles inverses au sud et sud-est de l'intrusif d'Escazú

Dans cette zone, l'interaction entre la compression vers le nord et le corps intrusif a produit des plis, des failles inverses et des chevauchements.

5. Pli de Patarrá

L'anticlinal de Patarrá est un pli fermé, orienté $N75^{\circ}O$, de 5 km de longueur et 1 à 1.5 km d'ampleur. L'asymétrie du pli et la direction de ses axes indique que le vecteur résultant des efforts compressifs a une orientation $N25^{\circ}E$.

6. Homoclinal du bassin Candelaria

Cette structure a une longueur E-O de 30 km et une largeur de 10 km. Elle est limitée au nord-est par la faille Candelaria et au sud-ouest par la faille de Jaris. Les pendages montrent des angles de 25 à 30° comme orientation prédominante N0°-10°O. Ceci traduit une compression générale vers le nord.

7. Pli du sud et sud-ouest du promontoire de Herradura

Ce sont des plis doux et irréguliers, avec des flancs inclinés entre 25 et 30°, résultat de la faible épaisseur de la séquence sédimentaire et de la faible résistance mécanique, par rapport au soubassement compétent du Complejo de Nicoya. L'orientation générale des efforts est nord et nord-est.

8. Pli de l'est de l'intrusif de Tapanti

Ce pli a des axes ouest - nord-ouest, traduisant une compression nord - nord-est. Probablement, c'est le résultat de la décomposition d'efforts entre des failles très importantes comme celles d'Atirro et l'intrusif qui affleurent dans le refuge de vie sylvestre de Tapanti.

Arias et Denyer (1991:69) ont présenté un résumé des failles cartographiées par divers auteurs, les critères pour leur identification, et leurs mouvements relatifs. Tenant compte de la morphologie des lignes (trazas) de faille et de leur comportement mécanique pendant le Néogène et le Quaternaire, on considère que, en général, les plans de faille sont sub-verticaux et leur mouvement principal est transcurrent, les mouvements verticaux étant subordonnés aux premiers. Les failles NO-SE sont de translation, dextres et transcompressives; les failles NE-SO sont de translation sénestres et leur comportement montre une tension plus forte que les premières. Il y a très peu de failles N-S et elles sont de type gravitationnel. Il y a une forte correspondance entre le système de failles d'Arias et Denyer (fig.15) et les directions d'effort principal mesurées en différentes localités, de sorte que la déformation de la région correspond

à une compression N-S, probablement orientée vers le nord, comme le laisse supposer la disposition de l'homoclinal de Candelaria.

Ce modèle tectonique, basé sur la compression sud-nord proposée par Baumgartner *et al.* (1984) est considéré actif depuis le Miocène. Toutefois, quelques failles auraient débuté leur activité au Crétacé et au Paléocène. D'autre part, l'activité néotectonique a été détectée dans les failles de Candelaria, de Delicias et de Tulín.

Pendant les étapes d'activité des failles soumises aux efforts compressifs sud-nord, les intrusifs d'Escazú et de Tapantí ont agi comme des barrières, provoquant la libération d'énergie dans les failles situées au sud. L'autre effet provoqué par les intrusifs est le mouvement vertical le long des failles pré-existantes causé par le soulèvement isostatique de la masse ignée.

Des failles inverses ont été identifiées en regard de la distribution spatiale des unités géologiques et de leur distribution par rapport à la stratigraphie établie dans les localités-types.

Plus particulièrement pour le site étudié, Rivier (1979:123-126), signale que les affleurements de roches ignées du stock de Escazú ont un alignement SE-NO, allant des *cerros d'Escazú*, à l'est, jusqu'au *cerro Pacacua*, à l'ouest.

Par ailleurs, les roches sédimentaires de la formation de Pacacua ne présentent aucun pli bien défini et l'interprétation des structures dans la formation Pacacua est rendue difficile parce que les couches superficielles ont souvent glissé sur les fortes pentes topographiques. La discontinuité des expositions, les glissements anciens et récents, et l'absence de couches guides, ne permettent pas une interprétation structurale précise (Rivier, 1979).

Un système de failles NE-SO, généralement injectées avec des roches intrusives et contournées par les faciès de cornubiannites, découpe la zone sud (montagneuse) de l'intrusif d'Escazú en plusieurs blocs parallèles (fig.14). Il semblerait que les déplacements verticaux n'ont pas été importants.

Fig. 14 Blocs tectoniques dans l'intrusif d'Escazú

LÉGENDE

Failles et fractures

- Secondaire
- Principale

Courbes de niveau (contours)

- Isoligne de 20 m

- Vue détaillée

A, B, C Blocs tectoniques



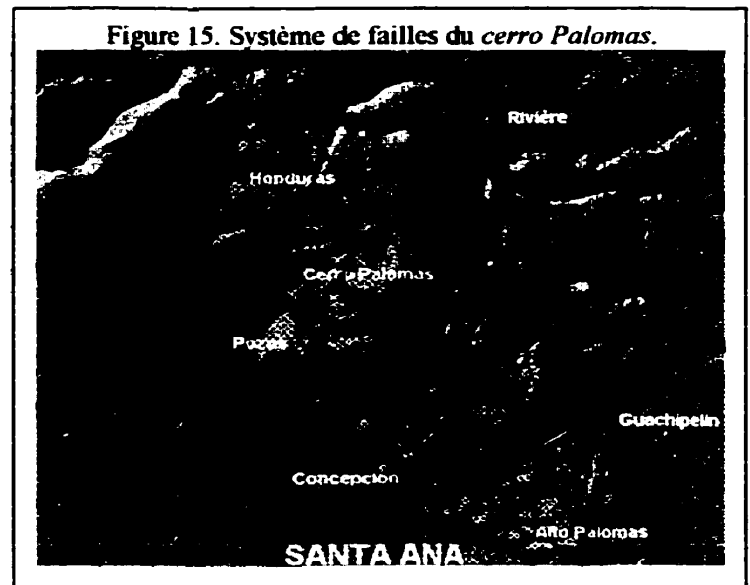
Source:
 Modèle Numérique de Terrain et
 Carte géologique (dans cette thèse)

Date: juillet, 1998.

Un système de failles E-O, plus ancien, affecte la limite nord de l'intrusif ainsi que leur couverture de cornubianites. Ces failles disparaissent vers l'ouest dans la formation de Pacacua où les glissements anciens et récents cachent leurs traces.

Une faille plus hypothétique, la faille de Palomas, d'orientation NO-SE interrompt la continuité du *cerro Las Palomas* sur l'axe marqué par le ruisseau qui traverse la vieille route menant à Santa Ana et continuant jusqu'à 100 m au sud de l'*alto de las Palomas*. Cette faille est injectée de roches volcaniques (andésites) qui affleurent sur l'axe du ruisseau. Au sud-est d'Escazú, la même faille hypothétique interrompt le sommet au nord de Belo Horizonte. Rivier (1979) l'interprète comme une faille normale, avec son compartiment NE affaissé.

Du côté NE du sommet de Las Palomas, les "tufs soudés" du Quaternaire, apparaissent à une altitude supérieure (1000 m) par rapport au côté sud-ouest (900 m). Cette différence pourrait être le résultat d'un mouvement tardif de la faille Palomas, mouvement qui se serait traduit par un basculement vers le NE des tufs soudés du bloc soulevé.



Dans toute la zone sud, du *cerro Pacacua* jusqu'au *cerro San Miguel*, la présence de failles, les changements brusques de pendage et l'absence de plis cohérents semble traduire la proximité du soubassement plutonique manifesté par des intrusions de roches ignées en forme de *sills*, de diques et de corps massifs, ce qui indique une tectonique de tension en blocs basculés (Rivier, 1979).

Dans cette recherche, nous avons décrit un patron de fractures d'orientation dominante NO, ainsi qu'un patron secondaire d'orientation NE, lequel est assez bien développé dans le *cerro Palomas* (fig. 15).

Nous avons aussi cartographié des fractures correspondant au patron d'orientation E-O décrit par Rivier (1979). Effectivement, ces fractures disparaissent à l'ouest *du cerro Pacacua*, où la surface a été affectée par plusieurs glissements de nature et de dimension variées (fig. 16).



4.5 Géomorphologie

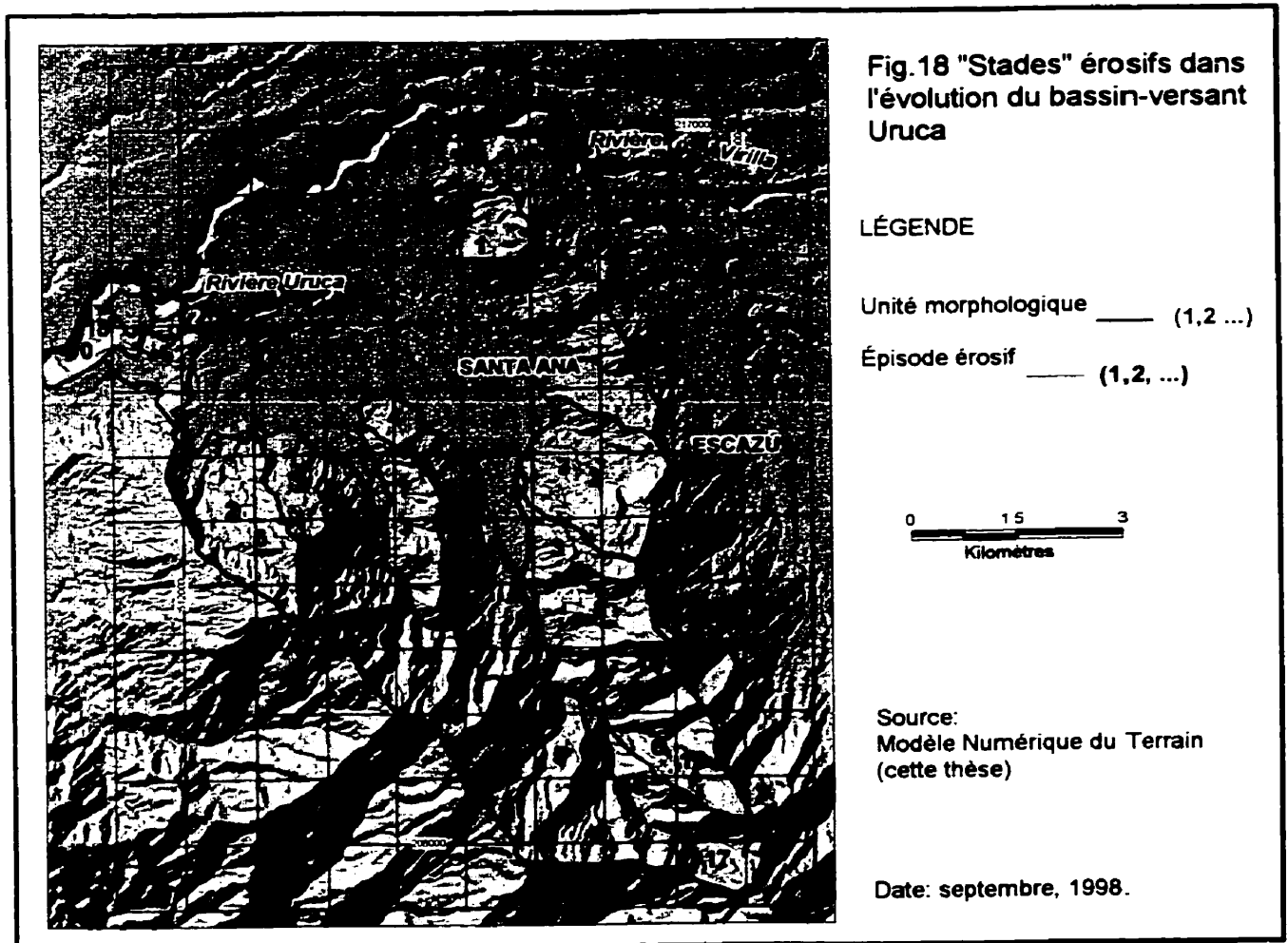
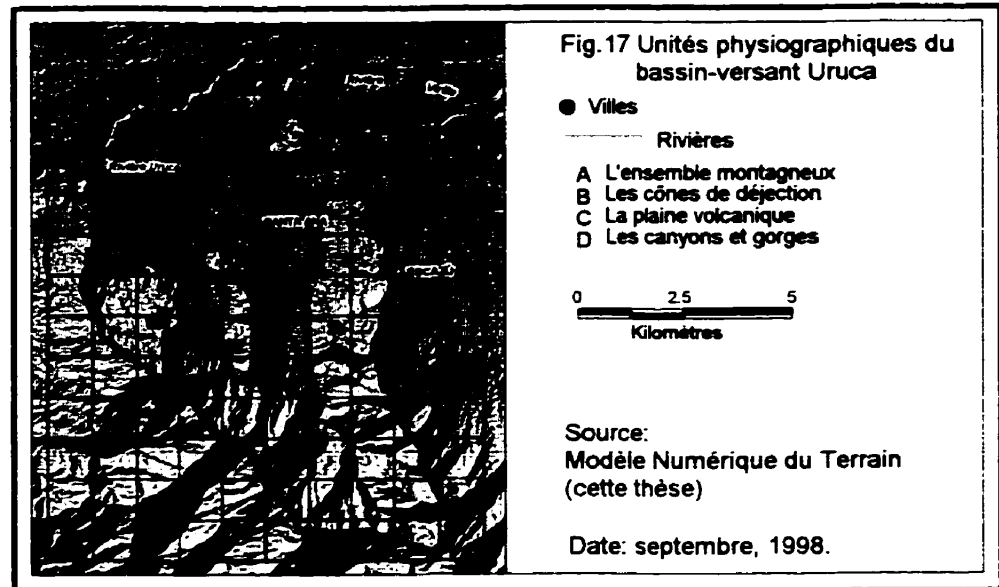
Du point de vue physiographique, on trouve quatre unités géomorphiques dans le bassin-versant Uruca (fig. 17).

a) *L'ensemble montagneux*. Il est caractérisé par des pentes fortes, et un relief multiforme assez découpé par le réseau

hydrographique et fortement façonné par les mouvements de remuement massifs.

- a) *Les cônes de déjection*. La rivière Uruca et la rivière Oro sont des torrents de montagne qui coulent dans des vallées dont le fond est remblayé par des dépôts chaotiques dus à des glissements de terrain et à des coulées de débris.
- b) *La "plaine" volcanique*. C'est la plate-forme d'ignimbrite (formation d'*avalancha ardiente*) recouverte par des dépôts fluviaux torrentiels.
- c) *Les canyons et ravins fluviaux*. Il s'agit d'un réseau d'entailles fluviales rattaché à la rivière Virilla et ses tributaires. Ce système fluvial a entaillé très vite la plate-forme d'ignimbrites et de laves.

Nous avons aussi essayé de faire une interprétation géomorphologique du processus d'érosion pour comprendre le rapport entre les "stades" d'érosion et la morphologie actuelle. Pour ceci nous nous sommes servi des photos aériennes au 1:80 000 et du MNA. Le schéma interprétatif est illustré par la figure 18.



L'état érosif du bassin-versant, notamment dans la partie aval, est assez avancé et témoigne d'un développement millénaire. Il ne nous est pas possible, cependant, de connaître quelle était la paléo-topographie avant les coulées de lave connues comme les "*Lavas de Intracañón*" (laves déposées entre les canyons). Mais comme celles-ci datent de 1 MA et plus, nous pouvons fixer cette date comme point de départ de notre analyse.

Il semblerait qu'après le dépôt de la plate-forme de lave, l'érosion fluviale et l'altération ont prédominé, ce qui a donné lieu à la formation d'un sol ainsi qu'à l'accumulation des dépôts fluviaux. Fort probablement, pendant ce stade, l'érosion fluviale a affecté les unités 1 et 2. La paléo-morphologie de l'unité 1 est inconnue, tandis que la morphologie actuelle de l'unité 2 semble trop découpée pour le faible pouvoir érosif des cours d'eau actuels. Donc, une bonne partie du façonnement des unités 1 et 2 aurait eu lieu au cours des derniers 700 mille ans.

Par la suite, les apports des "*Depósitos de Avalancha Ardiente*" (dépôts d'avalanche ardente) ont dû modifier l'essentiel de la topographie pré-existante. L'érosion fluviale aurait attaqué, lors de cette période, les unités 3 à 6 (fig. 18). Ceci constituerait le deuxième épisode érosif. Les unités 3, 5 et 6 de la formation Pacacua ont été façonnées par les mouvements de masse. Au contraire, l'unité 4 de la formation de Grifo Alto serait peu dégradée.

Le troisième épisode est à l'origine des unités 7, 8 et 9 concernant les formations de Pacacua et de Grifo Alto. Dans l'unité 7, le versant montre un processus érosif avancé, avec une forte dissection fluviale et des mouvements de masse. Ceci correspond aux domaines de la formation de Pacacua. Le versant ouest montre moins de mouvements de masse et plus de dissection fluviale. Celle-ci correspond à la formation de Grifo Alto. Dans l'unité 7 domine la formation de Grifo Alto modérément affectée par les mouvements de masse. L'unité 9, rattachée à la formation Pacacua, correspond à un épisode que nous supposons assez court, mais durant lequel s'est produit une série de glissements de terrain totalisant une superficie d'environ 1.7 km² (voir section 4.7.3).

Durant le quatrième l'épisode, les unités 10, 11 et 12 se seraient formées. Elles correspondent à une érosion fluviale accrue associée à l'érosion de masse modeste. Les unités 10 et 11 contiennent principalement des roches sédimentaires de la Formación Peña Negra, tandis que l'unité 12 comprend des roches intrusives et métamorphiques.

L'épisode 5 est représenté par les unités 13 (formation de Peña Negra) et 14 (formation de Pacacua). Dans les deux cas, les mouvements de masse ont été très actifs, mais, l'unité 13 montre un degré d'évacuation plus élevé. Dans l'unité 14 les processus de mouvements de masse sont encore actifs, comme en témoigne le glissement du *alto Tapezco*.

Durant l'épisode 6, les unités 15 et 16 sont caractérisées par des épisodes érosifs. Les cours d'eau ont creusé de nombreuses entailles dans les matériaux de la formation de Peña Negra.

Enfin, au cours de l'épisode 7, l'érosion a affecté la partie amont du bassin-versant constitué de roches métamorphiques et façonné un type de relief particulier.

4.6 Dynamique des versants

D'après Mora et Mora (1994:256) "*les glissements de terrains ont été la principale cause de pertes sociales et économiques pour les habitants du Costa Rica depuis le tremblement de terre de Fraijanes en 1888*".

Mora et Mora signalent l'existence de 365 glissements importants de terrain dans la Vallée Centrale et les montagnes environnantes. Ceci donne une densité moyenne de 0.06 glissements par kilomètre carré et quelques 3200 glissements importants pour l'ensemble du pays. Ce dernier chiffre devrait être révisé pour tenir compte des terrains plats littoraux où ces mouvements sont beaucoup moins fréquents.

D'après ces auteurs, les glissements du type rotationnel et translationnel sont les mouvements de terrains les plus fréquents dans la Vallée Centrale (45.8%), suivis par les coulées de débris

(43%), les glissements rocheux (8.8%) et les phénomènes de reptation (2.5%) (Mora et Mora, 1994:246).

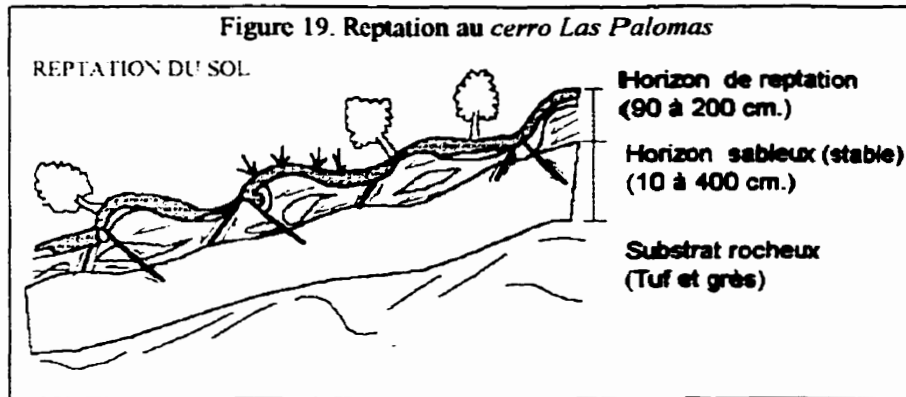
Ces auteurs indiquent que les formations géologiques les plus affectées par des glissements sont celles de **Grifo Alto** (20%), des **Andesites du Poás** (17.8%), de **Doan** (13.2%), de l'intrusif de **Talamanca** (8.2%), de **Peña Negra** (7.1%), et de **Complejo de Nicoya** (6.3%). (Mora et Mora, 1994:250). Toutefois ces auteurs n'indiquent pas si les données ont été ajustées pour tenir compte de la superficie d'exposition des diverses formations. D'après nos observations et celles de Rivier (1979), la formation de **Pacacua** aurait une valeur supérieure à 1.8%.

Mora et Mora (1994:46) mentionnent l'existence de phénomènes de type "bascullement de colonnes de roche", évidents dans les canyons des rivières **Alajuela**, **Virilla** et **Uruca**, sur des laves et ignimbrites très fracturées. Ils mentionnent aussi des chutes gravitationnelles de blocs sur les versants de la rivière **Virilla**, ainsi que des glissements de plaquettes de roches dans l'*alto de las Palomas*. La formation d'**Avalancha Ardiente** totalise 53.1% de tous les glissements rocheux.

Mora et Mora (1994 : 253-254) décrivent la reptation du sol (phénomène affectant une épaisseur maximale de 10 m), qui prédomine dans les formations de **Pacacua** (33%), de **Grifo Alto** (33%) et de **Peña Negra** (11.1%).

Rivier (1979:122) signale de nombreux glissements de terrains dans la formation de **Pacacua**, ce qui s'explique par la composition hétérogène de la série lithologique, comprenant une alternance de conglomérats, d'arènes (grès) et de lutites. Il mentionne des glissements à l'ouest de l'*Alto Tapezco*, au nord de l'*Alto Granadilla*, à l'ouest d'**Escazú** et ceux du côté sud du *cerro Pacacua*. Des glissement anciens sont aussi évidents à plusieurs endroits. Ceux au nord du *cerro Pacacua*, près de **Vista de Oro** sont notables. Il s'agit d'un glissement de grandes dimensions, impliquant de grands blocs de terrain. Rivier mentionne aussi les glissements de l'*Alto las Palomas* (formation de **Pacacua**), provoqués par la construction d'une autoroute. Dans le même site, Mora (1985) a décrit en détail des processus de reptation actifs (fig. 19).

Pour cette recherche nous avons préparé une carte morphodynamique, à l'échelle 1:20 000.



Cette carte (fig. 20) a été dressée principalement à partir de la photointerprétation en utilisant des outils traditionnels ainsi que des techniques informatisées. Cette carte contient les éléments

suivants:

- a) *Failles et fractures* ; ce sont des éléments pouvant appuyer l'interprétation des formes et des processus des versant identifiés.
- b) *Lignes d'escarpement* ; ce sont des rebords approximativement linéaires délimitant des escarpements ;
- c) *Versants escarpés* ; ce sont les surfaces fort inclinées au pied des escarpements ; des phénomènes de chute de roches et des détachements massifs peuvent se produire.
- d) *Cicatrices de glissement* ; ce sont les rebords arqués délimitant les dépressions concaves résiduelles après qu'une bonne partie de la masse a été évacuée; on y a distingué deux stades: cicatrices nettes et cicatrices diffuses.
- e) *Masses glissantes et glissées*; ce sont les superficies contenues (approximativement) à l'intérieur des cicatrices ou allant plus loin, vers le bas, mais qui peuvent être reconnues comme faisant partie de la masse glissante ou glissée.
- f) *Coulées de débris*; ces phénomènes sont cartographiés distinctement (point et polygones) pour satisfaire nos intérêts de présentation cartographique à des échelles différentes.
- g) *Zones d'affectation des coulées de débris*; cette représentation permet d'exprimer d'une façon généralisée l'aire de couverture des événements ponctuels concernés.

LÉGENDE

- Villes
- Érosion linéaire
- Ligne d'escarpement
- Couronne diffuse
- Couronne nette
- ▨ Versant escarpé
- Faille secondaire
- Faille primaire
- Rivières
- ▨ Masse glissée
- Coulée de débris

Source:
Photointerprétation et travail du terrain
(cette thèse)

Date: novembre, 1966.

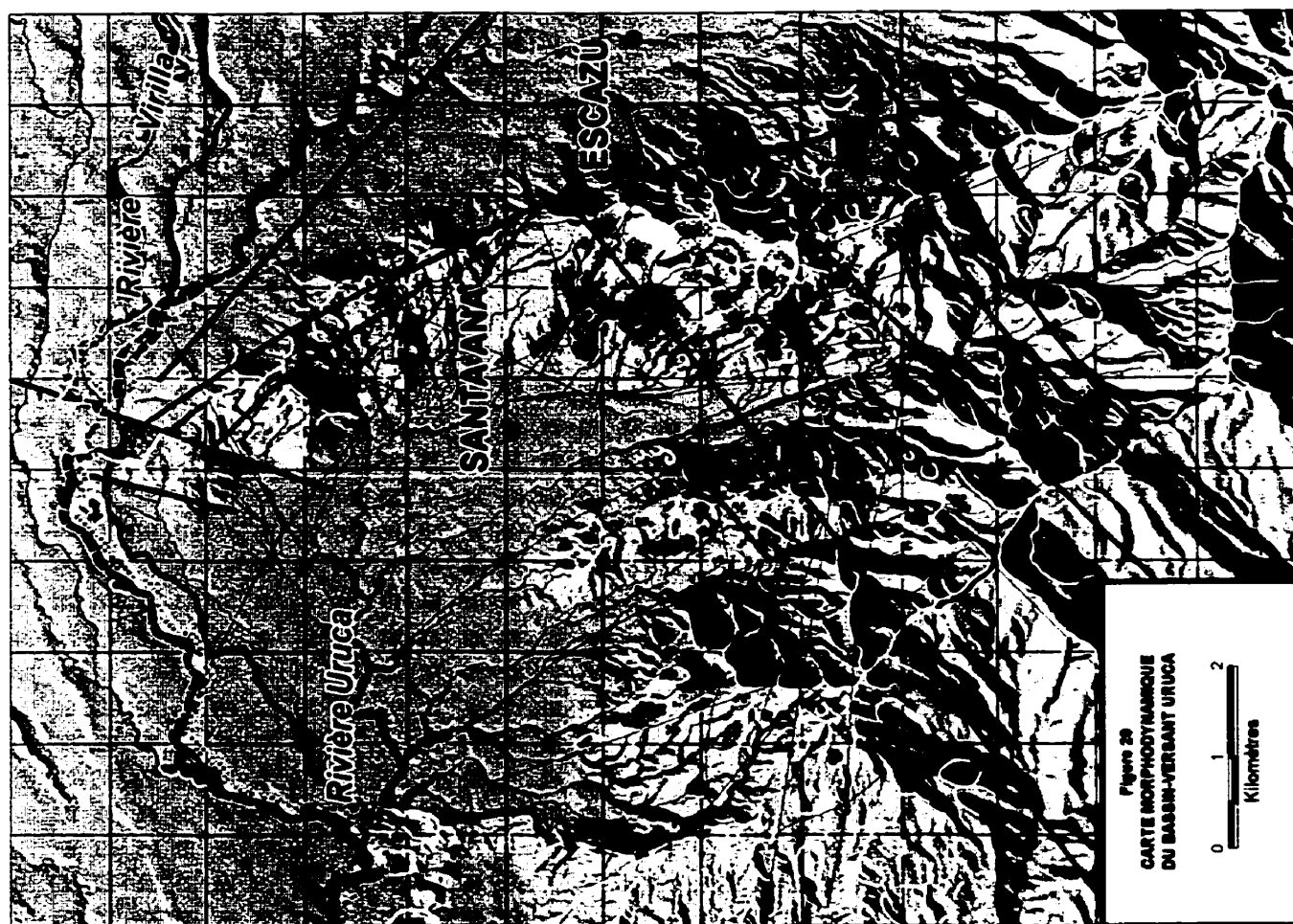


Figure 29
CARTE MORPHODYNAMIQUE
DU BASSIN-VERSANT URUCA

0 1 2
Kilomètres

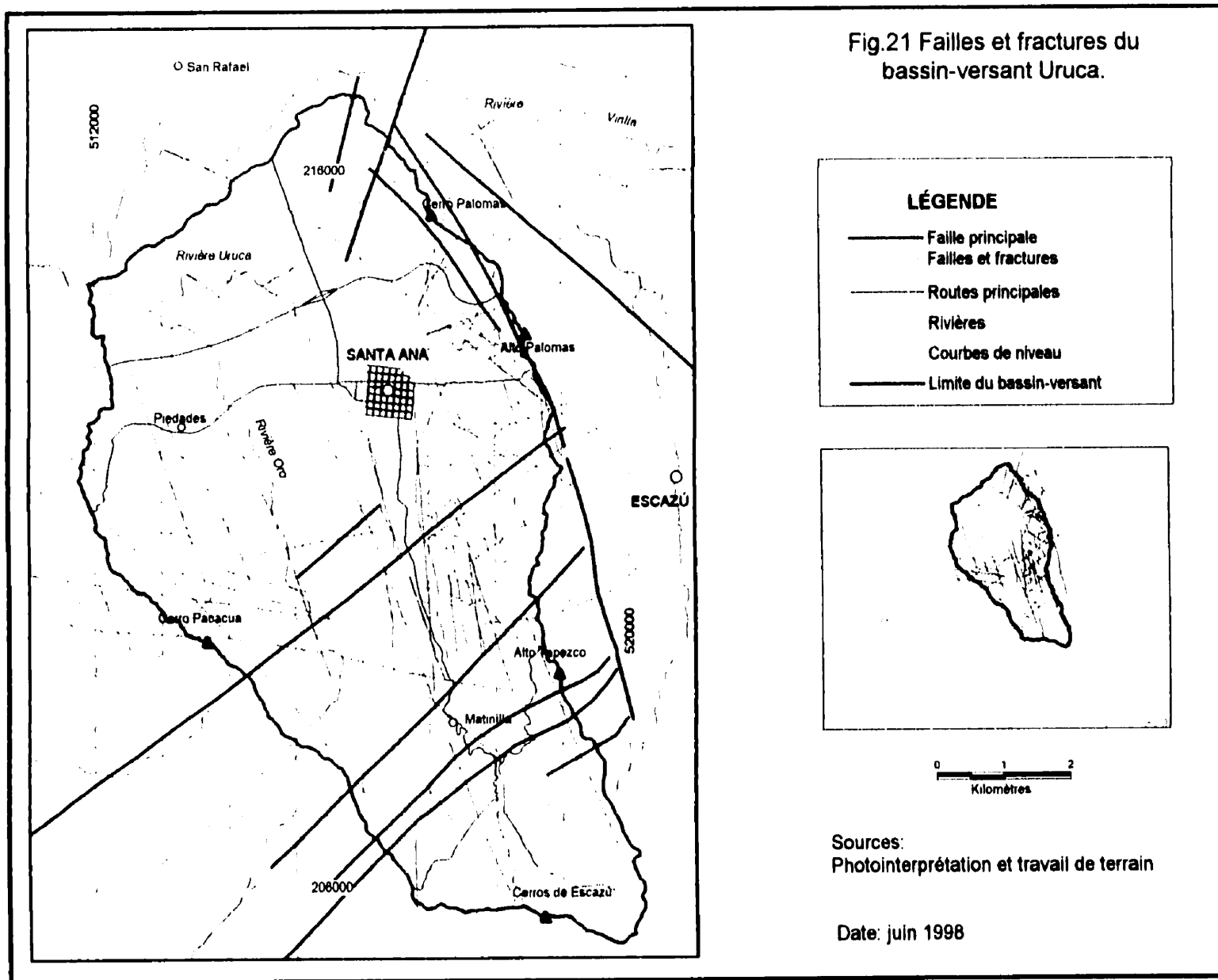
- h) *Zones d'affectation de la reptation-solifluxion*; à l'échelle de travail choisie, il n'était pas possible de distinguer la morphologie en loupes et autres des terrains affectés par la solifluxion ni les terrassettes souvent liées à la reptation. On s'est alors contenté de délimiter les zones d'occurrence des deux phénomènes.
- i) *Zones fortement affectées par l'érosion laminaire*; surfaces fortement érodées par l'écoulement superficiel non concentré.
- j) *Axes de forte érosion linéaire*; lignes fortement érodées par l'écoulement superficiel concentré et le ravinement.

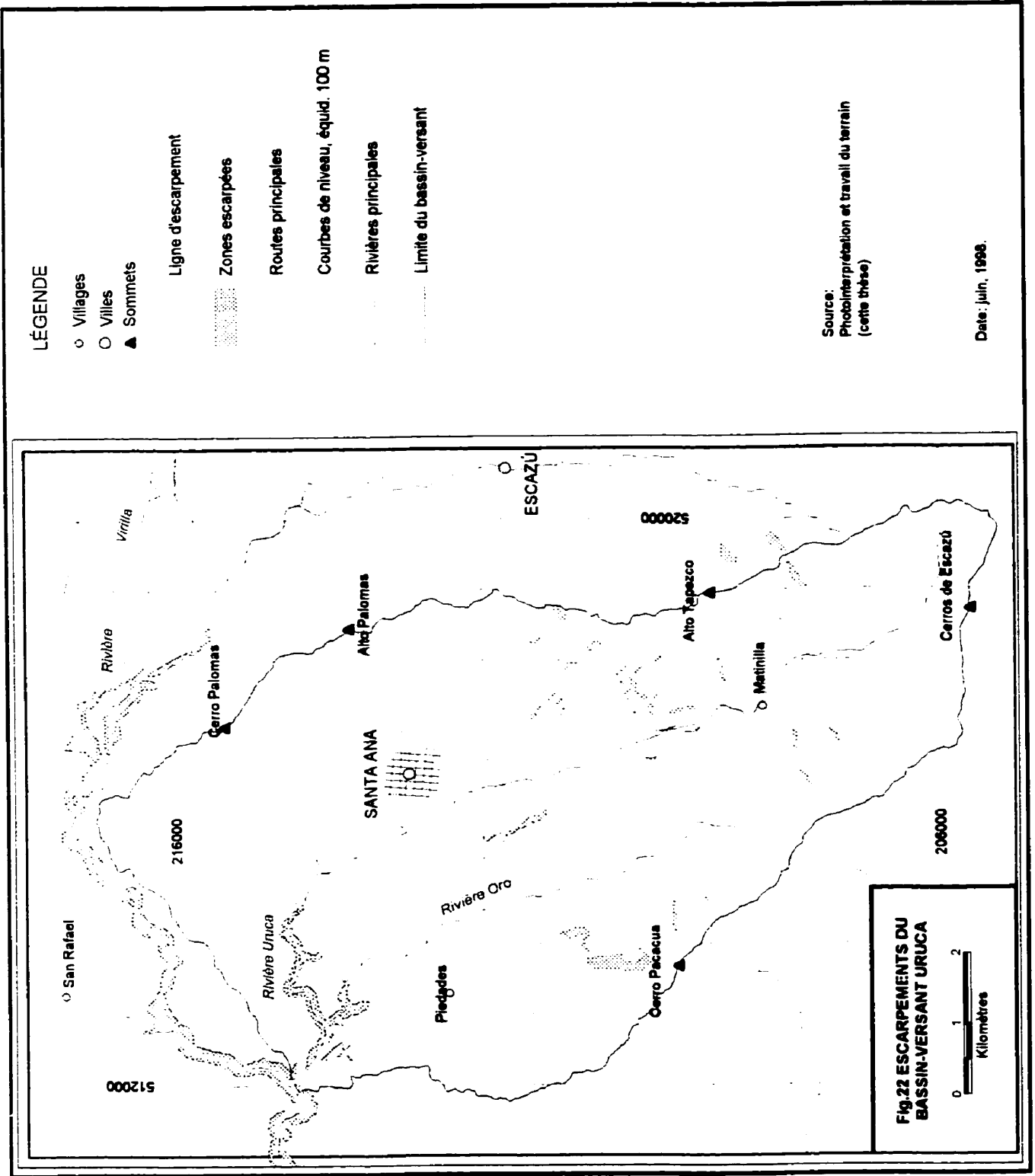
Par défaut, on doit supposer que les surfaces non affectées par aucun des phénomènes indiqués sont soumises à des conditions d'érosion "normales". C'est-à-dire, taux d'érosion modérés dans un milieu moyennement pluvieux, avec couverture forestière suffisante et topographie modérée. Un milieu biostasique, d'après la terminologie de Derruau (1983).

La figure 20 est une version réduite de la carte morphodynamique du bassin-versant Uruca.

Failles et fractures. La figure 21 est une carte générale des failles et des fractures. Nous y avons souligné les failles confirmées dans d'autres travaux, ainsi que celles qui ont un caractère morphologique distinctif. Dans l'ensemble, on note la prédominance des failles d'orientation NO-SE et NE-SO, interprétées ailleurs (Arias et Denyer, 1991:70) comme un système transversal dû à la compression dominant du sud au nord.

Escarpements. Ceux-ci sont particulièrement importants tout autour des canyons des rivières Virilla et Uruca. La profondeur des canyons atteint 40 et 100 mètres. Taillés dans des roches volcaniques (laves, piroclastes et ignimbrites), les versants des canyons sont instables; on y observe des chutes de blocs rocheux. Une autre ligne d'escarpement, d'origine anthropique, se situe en haut de la carrière Mina (figure 22).

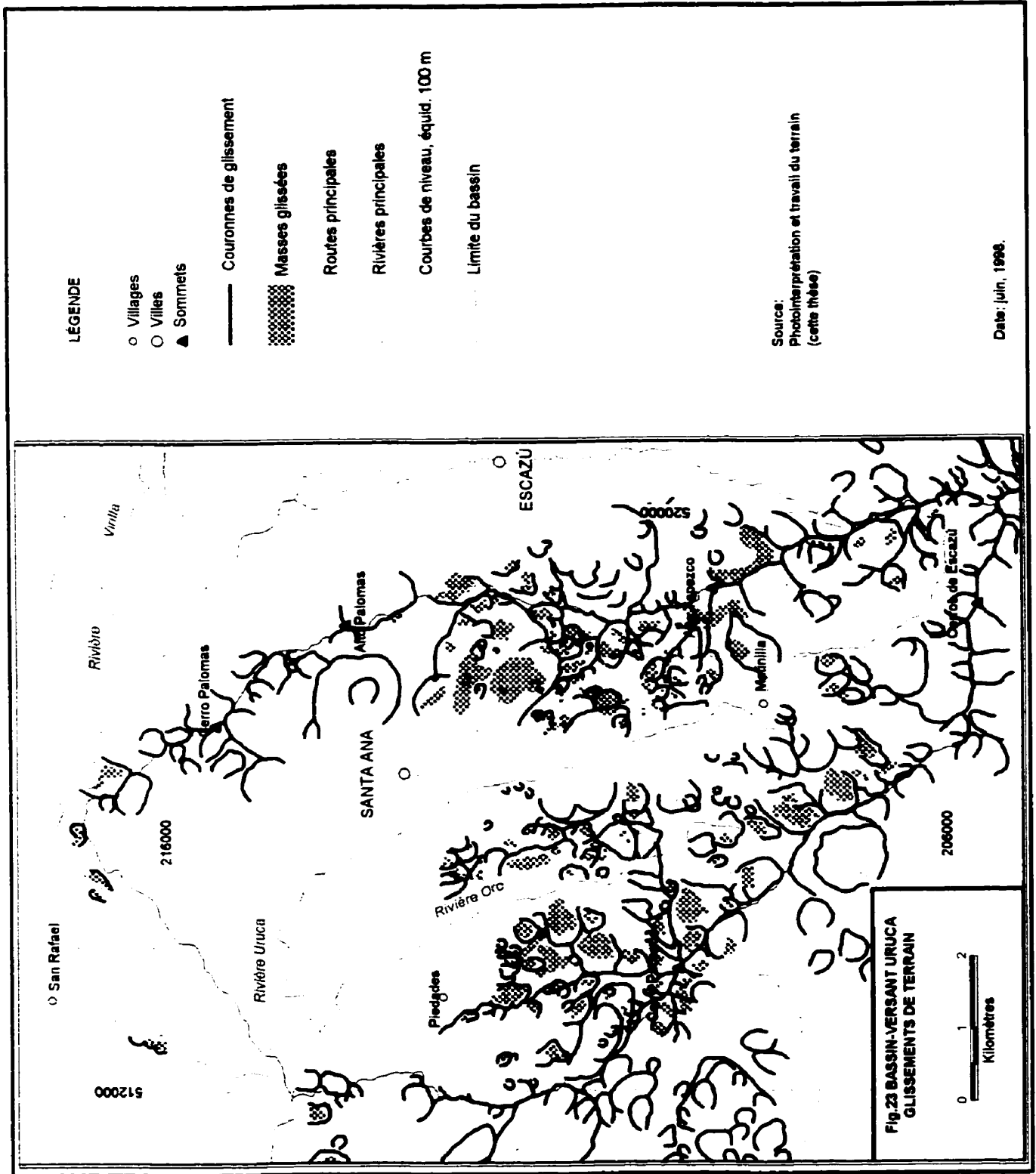


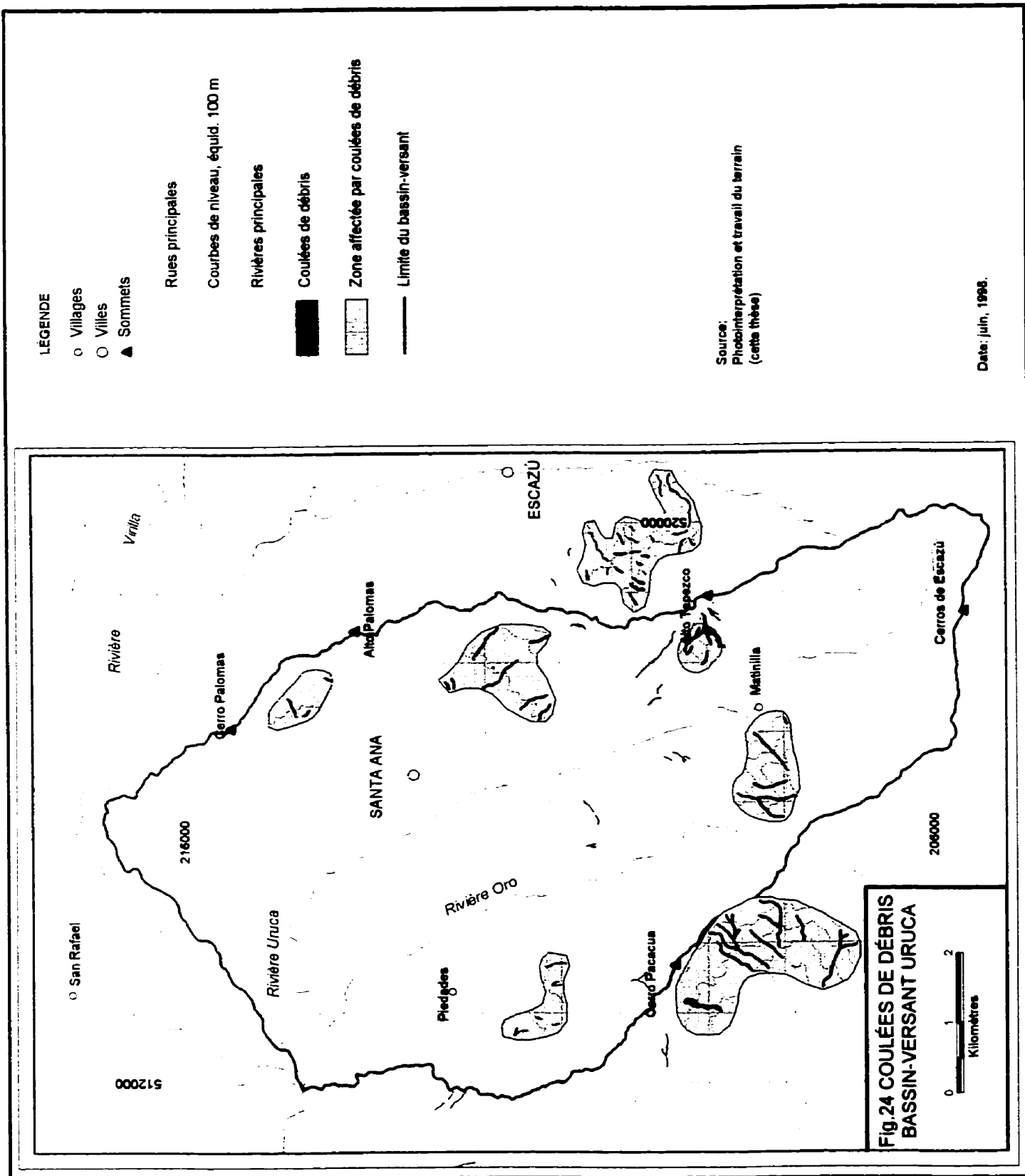


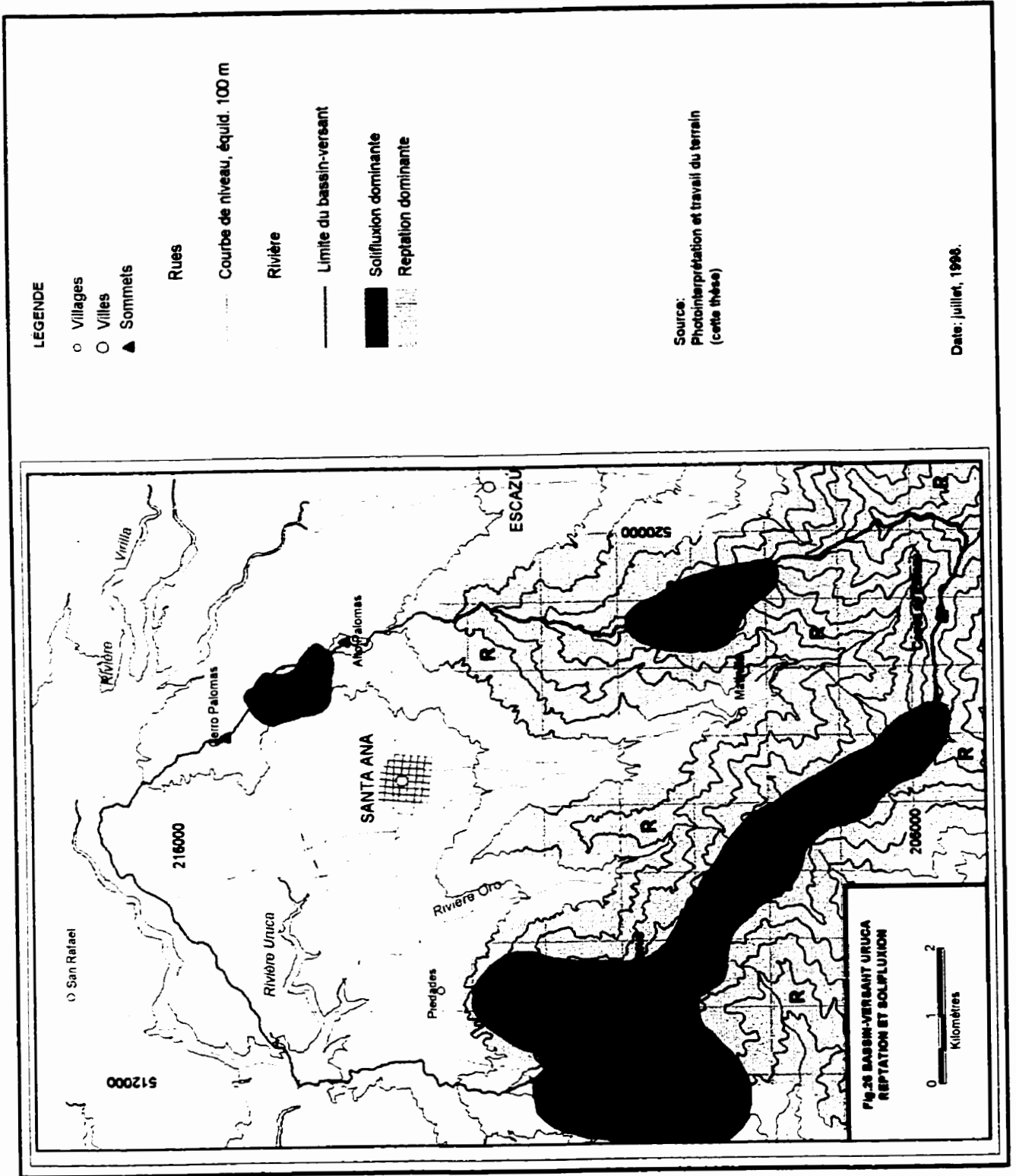
Cicatrices et glissements. Ce sont les caractères morphodynamiques les plus notables. On en trouve partout dans les terrains montagneux. La morphologie étant souvent très nette, on peut penser qu'il s'agit d'événements récents. La plupart sont des glissements composites et massifs, couvrant entre 10 et 130 ha, avec une moyenne d'environ 20 ha. Nous examinerons plus loin quelques-uns des ces glissements.

Coulées de débris. Un aspect particulièrement intéressant au Costa Rica est le fait que malgré l'énorme quantité de cicatrices des glissements anciens et récents, les coulées de débris récents ne sont pas fréquentes. Ceci peut s'expliquer parce que le plus souvent on garde une ligne d'arbres au fond des ravins ainsi qu'autour des sources naturelles dans les bassins de réception (voir figure 44: l'indice de végétation). Quoi qu'il en soit, sur les versants qui ont été complètement dépourvus de végétation naturelle, les coulées de débris sont apparues rapidement. Les secteurs touchés se trouvent à l'est et au sud du *cerro Pacacua*, à l'est de *Matinilla* (fig 26), à l'ouest du *alto Tapezco* et au nord-ouest de *l'alto Las Palomas*.

Reptation et solifluxion. La reptation et la solifluxion sont des phénomènes assez généralisés dans la partie montagneuse du bassin-versant. Tandis que la reptation s'accroît sur les pentes convexes, notamment au pied des versants, la solifluxion prévaut sur les sommets déboisés. Elle est remarquable sur la ligne de crête entre *l'Alto Caña Quemada* et le *cerro Pacacua*, et dans le secteur de *l'Alto Las Palomas*. Il faut signaler, en tout cas, que les deux phénomènes se superposent dans l'espace et dans le temps. Il est donc difficile de les isoler et de fournir une cartographie exacte.

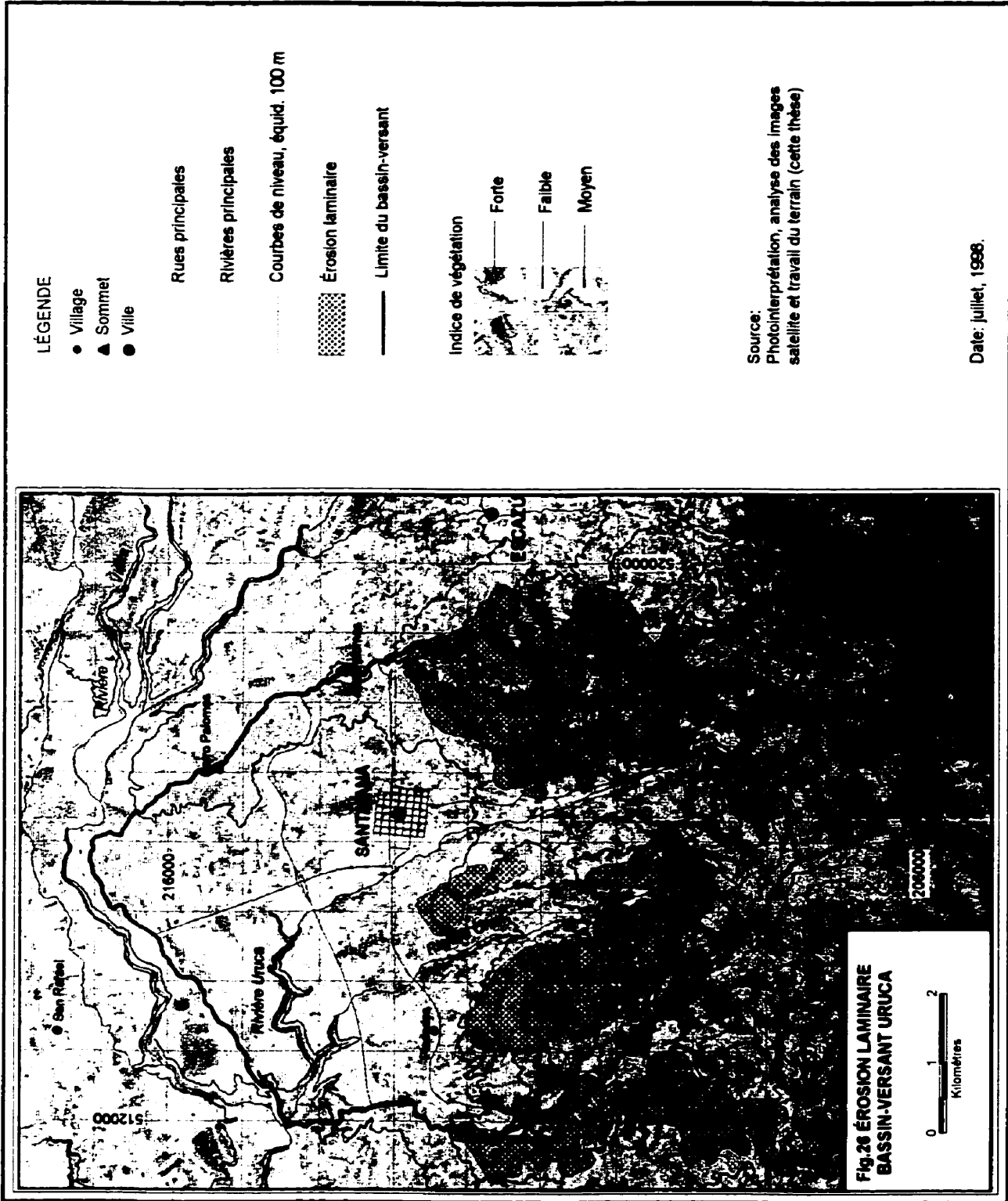


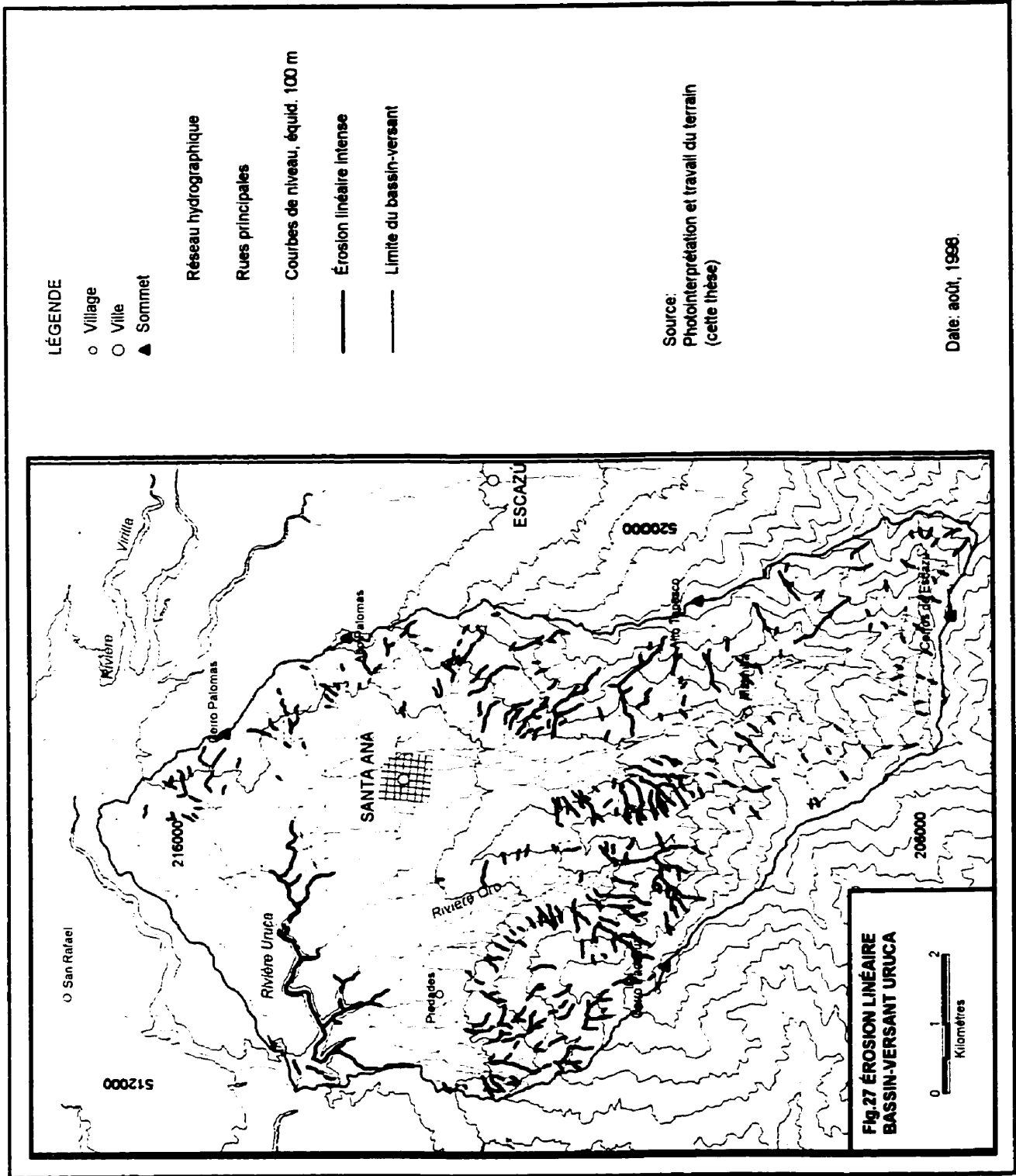




Érosion laminaire. L'érosion laminaire est directement liée aux fortes pentes, à l'énergie du flux laminaire d'eau, et au degré d'exposition du sol. Les deux derniers facteurs sont fortement reliés à la couverture végétale. Ceci nous a amené à utiliser l'image satellite comme base pour définir les zones d'érosion. L'image de l'indice de végétation ainsi qu'une composition en fausses couleurs ont été utilisés dans ce but. Comme résultat nous avons déterminé que l'érosion laminaire est concentrée sur les versants moyens, où se pratique une agriculture plus intensive suite à un déboisement quasi total.

Érosion linéaire. Elle est directement visible sur les photos aériennes à des échelles de 1:20 000 ou plus grandes. En général nous avons noté que ce type d'érosion est plus fort dans les formations géologiques de Pacagua et de Grifo Alto, notamment sur les sites affectés par des glissements relativement récents.





4.7 Glissements de terrain

Trois thèses ont été consacrées à deux des principaux glissements de terrain affectant le bassin-versant d'Uruca. C'est vraiment un cas singulier au Costa Rica, parce que le plus souvent on manque de données. Nous ferons un résumé de ces travaux et, en plus, nous présenterons quelques exemples de glissements anciens. Ce dernier aspect semble important parce qu'il peut illustrer des événements probablement catastrophiques² qui se sont déjà produits et qui présentent un certain risque de récurrence.

Au Costa Rica, trois glissements de terrain sont déjà très célèbres: celui de Santiago de Puriscal (195 millions de mètres cubes impliqués), celui de San Blas de Cartago (60 millions de mètres cubes) et celui de l'Alto Tapezco de Santa Ana (7 millions de mètres cubes) (Leandro, 1977; Ureña, 1983; Mora, 1988; Estrada, 1987; Molina, 1990; et autres). Ces glissements ont été attribués au déboisement, aux pluies intenses, à la rupture de l'angle de repos, à l'altération hydrothermale, et aux tremblements de terre (Mora et Mora, 1994; Bergoeing et Malavassi, 1982; Rivier, 1979; Molina, 1990).

Dans la zone d'étude, le glissement le plus souvent mentionné est celui de l'Alto Tapezco, connu depuis au moins les années 70. Il a été étudié par Leandro (1977), Ureña (1983) et Molina (1990). Le glissement de Matinilla a attiré l'attention au cours des dernières années; il fut étudié dans le cadre d'une thèse de maîtrise (Högberg et Lindskog, 1995). Outre les nombreuses cicatrices, il existe des glissements plus ou moins actifs dans le bassin-versant d'Uruca.

4.7.1. Le glissement de l'Alto Tapezco

D'après Mora (1988), *«Ce glissement de terrain couvre environ 25 ha, avec un volume disponible de 7 millions de mètres cubes. Il pourrait former un barrage dans la rivière Uruca, et créer une menace grave pour la ville de Santa Ana (au moins 10 000 habitants), ainsi que*

pour une grande superficie en cultures, pour les infrastructures et les voies vitales (aqueducs, électricité et routes, par exemple) ”.

Leandro (1977) a signalé que dans la zone de l'*Alto Tapezco*, on peut observer de nombreuses cicatrices de glissements ainsi que des crevasses perpendiculaires à la direction du matériel déplacé. Le glissement de Tapezco affecte une épaisseur de terrain de 60 m, dans la formation de Pacacua; son origine semble être une surface de rupture profonde au contact entre la roche altérée (en surface) et la roche saine (en profondeur).

Les résultats des sondages géoélectriques indiquent que le profil du glissement de Tapezco inclut trois horizons (Leandro, 1977:78-84). La première couche correspond à la partie superficielle d'un sol peu compact; la deuxième contient des roches altérées définissant un contact net avec la roche saine sous-jacente (troisième horizon). L'auteur signale que la deuxième couche comprend deux unités: une altérée et une roche très altérée. Il semblerait que le contact entre ces deux sous couches correspond à la surface de glissement. Celle-ci se trouve souvent entre 10 et 20 mètres en-dessous de la surface topographique.

En surface, dans l'amphitéâtre le glissement présente de nombreuses ruptures en échelons de 10 à 20 m de hauteur. Dans plusieurs des blocs fissurés, on observe une roche très altérée ainsi que des sources d'eau hypodermique. D'après Leandro (1977:90), une masse estimée à 12 millions de tonnes reste en position instable, plusieurs centaines de mètres en haut d'un talus presque vertical qui domine l'étroit vallon de la rivière Uruca.

D'après Molina (1990:62), le glissement de l'*Alto Tapezco* est un glissement multiple ou composite, débutant vers 1760 m. (dans la couronne) et descendant jusqu'à 1500 m. Il s'est développé dans une zone affectée par des fluides hydrothermaux et un fort intempérisme. D'une superficie de 25.8 ha, il se présente comme un glissement plongeant à environ 350 m au-dessus du fond de la vallée de la rivière Uruca.

² Nous utilisons le mot catastrophique pour faire référence à un événement de magnitude extraordinaire. même

D'après Badilla (1989, cité par Molina, 1990), les précipitations moyennes dans cette zone sont estimées à 1600 mm par année, ce qui est très modeste pour le Costa Rica. En conséquence, la météorisation intense observée dans le secteur du glissement doit être expliquée en supposant l'existence d'injections hydrothermales ayant un grand pouvoir corrosif.

Ureña (1983) a réalisé une analyse de la stabilité du glissement; il le classe comme un glissement de translation lente, avec une vitesse moyenne inférieure à un mètre par an et avec un plan de faille situé à environ 20 m en-dessous de la surface topographique.

Mora (1988, cité par Molina, 1990:6-7) mentionne que des coulées de débris peuvent se former au front de la surface de glissement. Une de ces coulées de débris (90 000 m³) s'est produite en octobre 1988 lors des pluies occasionnées par l'ouragan Gilbert.

Molina (1990:8-29) fait une interprétation des changements morphologiques du glissement *d'alto Tapezco*, à partir de l'étude systématique de 12 ensembles de photos aériennes prises entre 1945 et 1989. Il note que les secteurs qui ont montré le plus d'activités ont été le front, la couronne nord, la couronne principale et le centre géométrique du glissement (voir fig.2.13, p.22 en Molina, 1990). L'auteur mentionne des coulées de débris en 1956 et 1988. L'étude de la série de photos aériennes ainsi qu'un simple traitement statistique de régression (superficie occupée vs. Temps), ont permis à Molina (1990) d'estimer le moment de mise en mouvement, soit il y a 66 ans ou vers 1924. De façon intéressante, cette date coïncide avec le tremblement d'Orotina, épicentre situé à 30 km de distance, et d'une intensité MM de VI.

L'extension du glissement de Tapezco a été mise en rapport avec les pluies intensives et les tremblements de terre. On estime que lors des années avec une haute fréquence d'orages de 50 mm à l'heure et/ou avec des tremblements de terre d'intensité MM égale à quatre ou plus, le nombre de glissements a connu une croissance significative (Molina, 1990:29). Dans tous les cas, l'effet de la pluie est maximal durant les mois de mai-juin et septembre-octobre, parce que la nappe phréatique monte beaucoup, créant de fortes pressions intersticielles.

si cet événement n'a pas causé de perte de vie ni de dommage à la propriété.

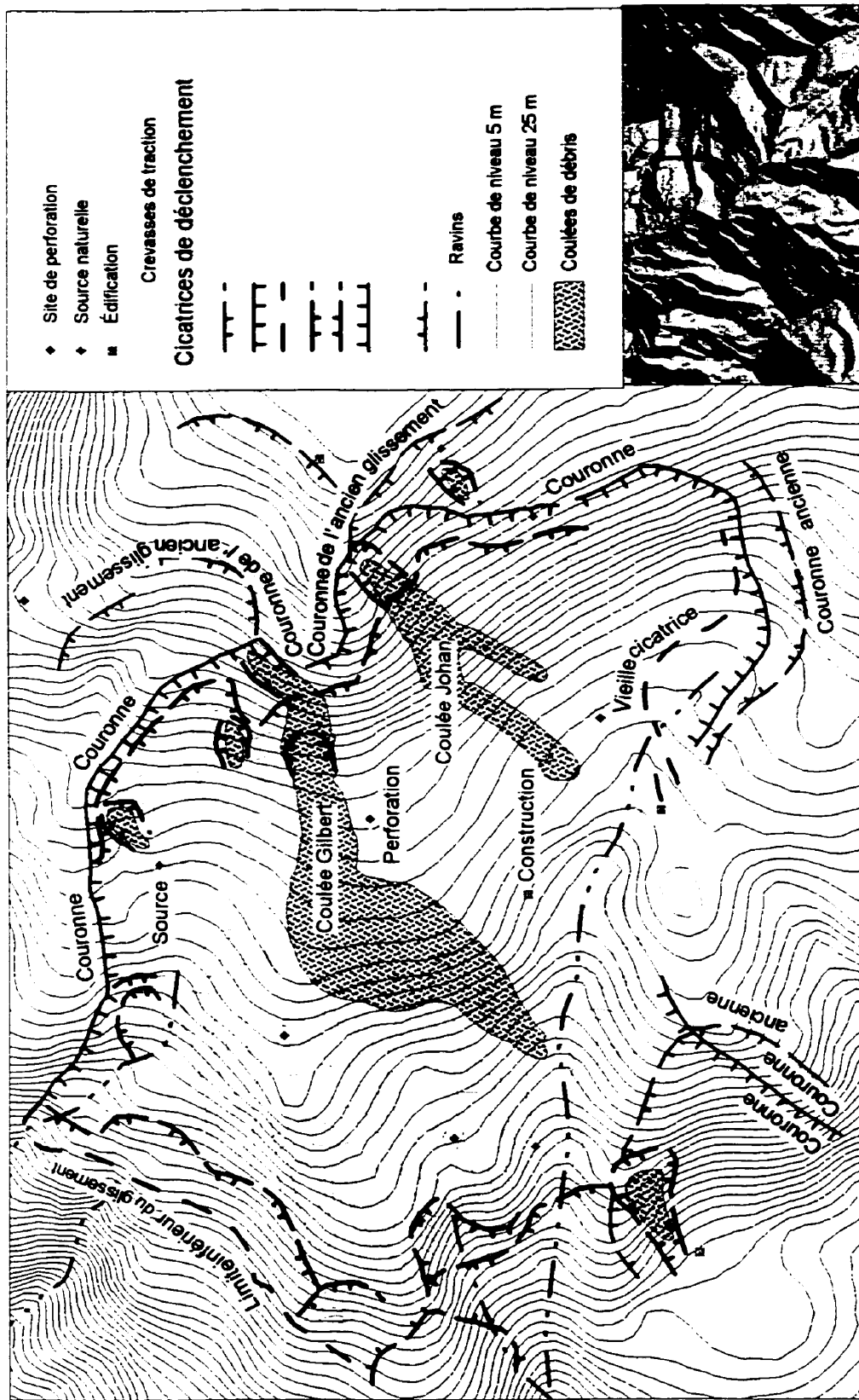
A partir des figures 3.4 et 4.1 de Molina (1990), nous avons construit la figure 28. Les contours ont été dérivés de notre **Modèle Numérique de Terrain** et quelques détails ont été ajoutés.

Pour l'ensemble, on note la présence de plusieurs cicatrices actives et anciennes avec des déclenchements mineurs à l'intérieur de la zone délimitée par la grande couronne externe. La carte montre aussi les coulées de débris survenues lors des pluies intenses produites par le passage des ouragans Gilbert et Johan en 1988. La grande quantité de crevasses qui morcellent en blocs la masse en mouvement est l'une des principales caractéristiques de ce glissement. Enfin, mentionnons la présence de plusieurs sources d'eau qui confirme la position élevée de la nappe phréatique.

Molina (1990) a réalisé de nouveaux profils géoélectriques dans le glissement de Tapezco qui viennent compléter ceux réalisés par Leandro (1977). Il distingue cinq horizons dans le profil vertical. Le premier est constitué de sols et de matériaux non consolidés atteignant une profondeur et une épaisseur maximale de 10 m. Les deuxième et quatrième niveaux sont formés par une roche météorisée avec des épaisseurs variables selon l'origine de l'agent de météorisation (l'eau). La profondeur d'altération augmente lorsque la météorisation a été causée par des injections de gaz hydrothermal. L'horizon deux atteint une profondeur maximale de 46 m tandis que son épaisseur atteint 43 m. L'horizon quatre atteint 77 m de profondeur, avec une épaisseur maximale de 43 m. Le troisième horizon présente les valeurs de résistance les plus faibles se rapportant aux matériaux argileux complètement altérés et saturés. Cette couche présente donc un potentiel élevé d'instabilité. Sa profondeur maximale est de 53 m et son épaisseur atteint 43 m. D'après la position des valeurs minimales de résistance électrique, une surface de glissement potentielle a été localisée à une profondeur maximale de 40 m. Enfin, la cinquième couche est celle de la roche saine, à la base du glissement.

Molina (1990) a interprété les résultats des contrôles topographiques faits par Jiménez (1989a, 1989b, 1990a, 1990b). En termes généraux, on observe que dans la période d'un an et demi (fin

Fig.28 Glissement de terrain de l'alto Tapezco.



1988, moitié de 1990), il y a eu des périodes de stabilité et de mouvements alternés. Le mouvement n'est toutefois pas uniforme dans toute la masse en mouvement. Le front du glissement accuse un déplacement cumulé de 5.1 m, tandis que la section moyenne nord s'est déplacée de 3.5 m et la section moyenne sud de 1.85 m seulement. On note des périodes de stabilité même durant la saison des pluies ainsi que des déplacements, par influence sismique, durant la saison sèche. C'est le cas du séisme du 25 mars 1990 (intensité de VII à VIII dans l'échelle de Mercalli).

À partir, de son analyse géotechnique et des simulations associées, Molina (1990:79) en est arrivé aux conclusions suivantes: a) le glissement de l'*alto Tapezco* est un glissement de faille composée, rotationnel dans la partie supérieure et translatore dans la partie frontale; b) l'instabilité potentielle majeure se situe dans la partie l'amont du glissement ; c) la zone au pied du glissement présente un facteur de sécurité plus élevé, ce qui semble indiquer que le glissement débute dans le haut du versant et produit un effet de poussée mécanique sur le pied; d) un séisme produisant des accélérations du sol de 10 à 20% de la pesanteur fait descendre le facteur de sécurité jusqu'à 0.87 et 0.72 respectivement; ceci peut produire une situation d'instabilité critique donnant lieu à des mouvements massifs; e) pendant les pluies intenses et prolongées, le facteur de sécurité peut diminuer jusqu'à 0.91. Nous ajoutons que la combinaison de pluies intenses et de longue durée avec des secousses sismiques de forte intensité pourrait être vraiment catastrophique.

4.7.2. Le glissement de *Matinilla*

Högberg et Lindskog (1995) ont étudié le glissement de *Matinilla* (figs. 29 et 30) survenu pendant la saison des pluies de 1994 (septembre). Le volume total de la masse déstabilisée fut estimé à 4 000 000 m³, quoique le volume mis en mouvement en 1994 fut plutôt de 2 000 000 m³. Le plan de glissement fut de type planaire.

Les auteurs ont estimé que la couverture végétale existante (notamment une forêt secondaire, fig. 30) augmentait la résistance au cisaillement $k_v = 7.4 \text{ kN m}^{-2}$, pour un facteur de sécurité, $F = 1.00$. Cette résistance, cependant, fut incapable d'éviter la formation de failles qui, elles, ont déstabilisé le versant. Pour ce qui est de la masse non déplacée, les auteurs estiment une valeur $k_v = 7.0 \text{ kN m}^{-2}$ pour le type de végétation présente, ce qui permet d'estimer un facteur de sécurité $F = 1.489$. Au contraire, en l'absence de la couverture végétale, le facteur F est réduit à une valeur dangereuse de 1.133 (Högberg et Lindskog, 1995:39), ce qui augmente significativement la menace pour les localités voisines directement ou indirectement exposées.

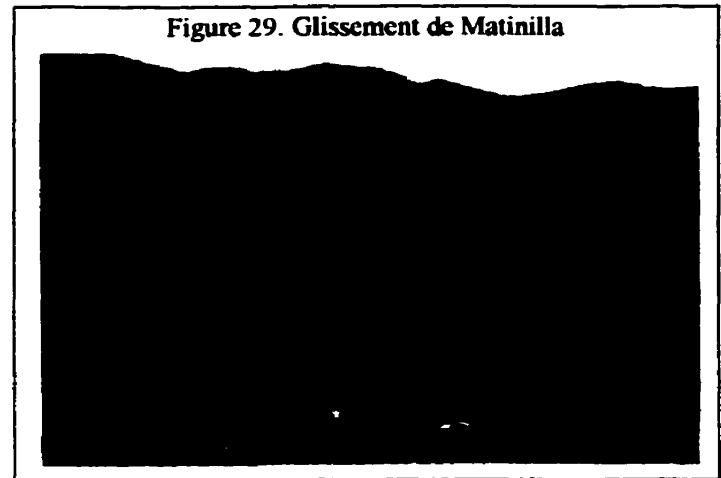
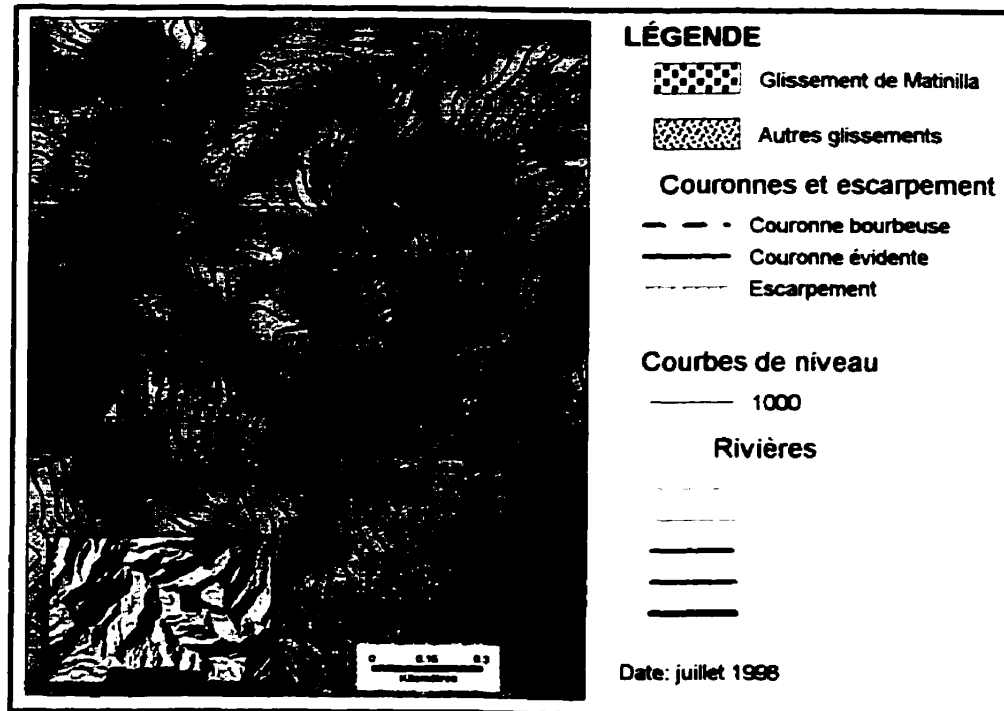


Figure 30. Carte de localisation du glissement de Matinilla.



4.7.3. Les glissements anciens

On a observé plus d'une centaine de cicatrices de glissements d'âges variés et plus ou moins actives sur le bassin-versant Uruca. Cette situation n'est pas exceptionnelle sur les versants montagneux du Costa Rica. Un seul exemple, quoi que assez particulier, suffira pour montrer le taux de risques élevé lié aux processus de mouvements de masse. Cet exemple sera repris lorsque nous évaluerons le risque géomorphologique dans la zone étudiée ainsi que la façon de l'intégrer dans le modèle de données du SIRS.

Il existe une cicatrice de glissement assez spectaculaire au nord-est du sommet de Pacacua. Ce glissement, que nous appellerons le *Glissement de Pacacua*, s'est développé entièrement dans



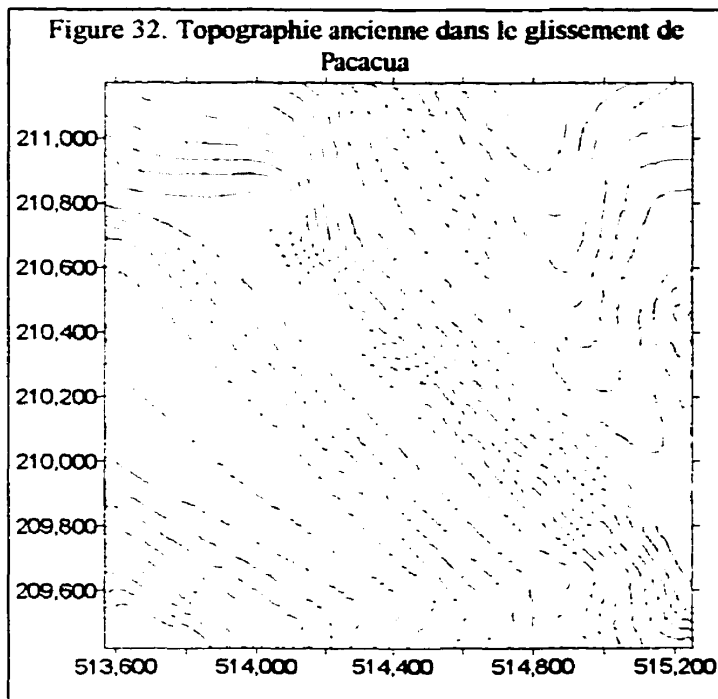
la formation de Pacacua, qui, comme nous l'avons vu est susceptible d'être affectée par de gros décrochements massifs. Cette évaluation diffère de celle de Mora et Mora (1994), qui placent la formation de Pacacua comme l'une des moins affectées par les mouvements de masse.

Sur l'image détaillée (fig.31), on peut constater qu'il s'agit en réalité d'un ensemble de décrochements qui laissent voir une forte interdépendance,

étant donné la symétrie globale de la cuvette d'érosion. Cette évaluation est encore plus facile à faire si l'on examine l'encadré. Si l'on tient compte uniquement de la cuvette

principale, le glissement affecte une surface de 1.53 km^2 , c'est-à-dire, six fois la surface affectée par le glissement de Tapezco.

D'autre part, si l'on crée un modèle de la topographie ancienne, en utilisant la topographie actuelle des contreforts du glissement (fig. 32), ce qui est une approximation très conservatrice pour estimer le volume évacué, on arrive à la somme de $157 \times 10^6 \text{ m}^3$, ce qui correspond à une profondeur d'évacuation moyenne supérieure à 100 m.



Avec un taux d'érosion très élevé, de 1 mm/an, l'évacuation de tout ce matériel prendrait 100 000 ans. Toutefois la morphologie des couronnes est si saine que l'on croit que l'âge de ce glissement ne dépasse pas quelques milliers d'années.

En conséquence, tenir compte de la grande quantité de ces événements passés (nous en avons recensé plus de 100) (figs. 20 et 23), semble une donnée utile pour tout projet de développement

ainsi que pour la prévention des risques, comme nous le verrons au chapitre 7.

4.8 Sols

La seule carte des sols couvrant la zone étudiée est la carte des "Sous-Groupes de Sol", à l'échelle 1 : 200 000. Trois groupes de sol existent dans le bassin-versant Uruca: les *vertisols* dans la zone d'accumulation des argiles allochtones (nord du bassin); les *inceptisols* développés sur les dépôts colluvio-alluviaux (piedmont), et un autre type *d'inceptisol* développé dans la haute montagne (sud du bassin).

4.9 Relief

Tel que nous l'avons mentionné, 36.5 km² sur un total de 56 km² compris dans le bassin-versant sont composés de terrains montagneux, soit 65% de terrains montagneux contre 35% de terrains relativement plats. L'altitude maximale atteint 2347 m, la minimale 710 m, et la moyenne est de 1172.5 m. La pente maximale (donnée pas toujours fiable lorsqu'elle est extraite d'un modèle d'altitudes) a été estimée à 73.2° ; la moyenne est de 18.2° (celle-ci est beaucoup plus fiable que la première), et la minimale est de 0.1°. Enfin, les orientations prédominantes sont vers le nord et le nord-ouest, tandis que les moins fréquentes sont dirigées vers le sud-est.

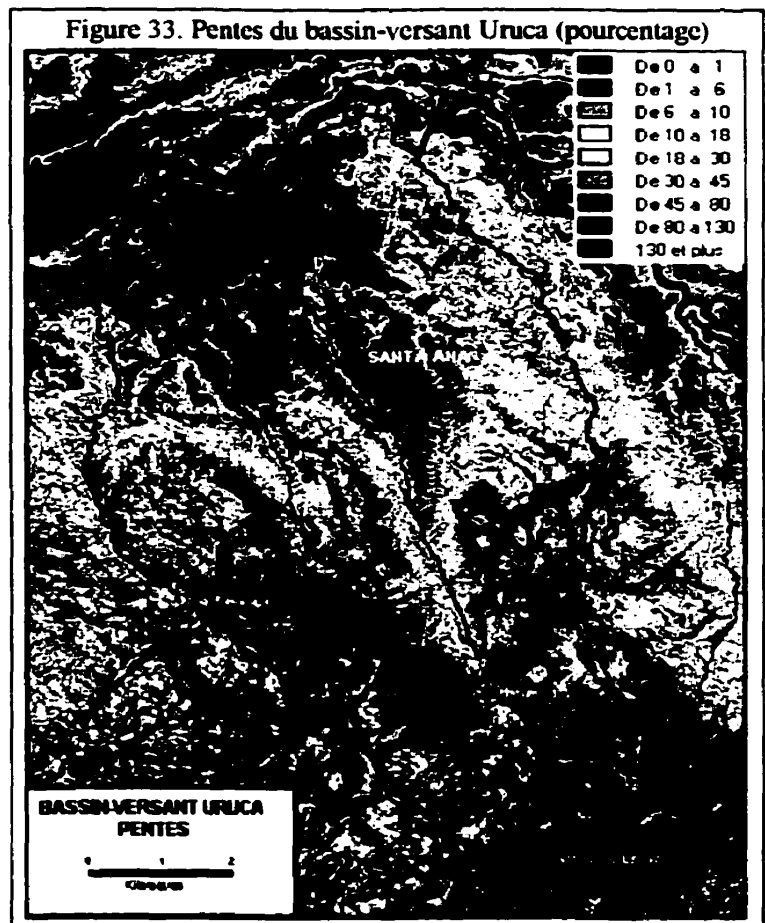
	ALTITUDE	PENTE	ORIENTATION
Minimale	710	0.1	SE
Moyenne	1172.5	18.2	Sans objet
Maximale	2347	73.2	N-NW
Écart type	334	13.3	Sans objet

4.9.1 L'inclinaison des pentes

L'ensemble du bassin-versant Uruca est caractérisé par de fortes pentes: 18° ou 32% en moyenne (fig.33); mais si l'on examine les valeurs dans la partie amont du bassin, les pentes moyennes atteignent 35° (70%) et plus. Sur la carte, les pentes fortes sont concentrées au sud du bassin.

4.9.2 L'orientation des pentes

Un autre document intéressant pour

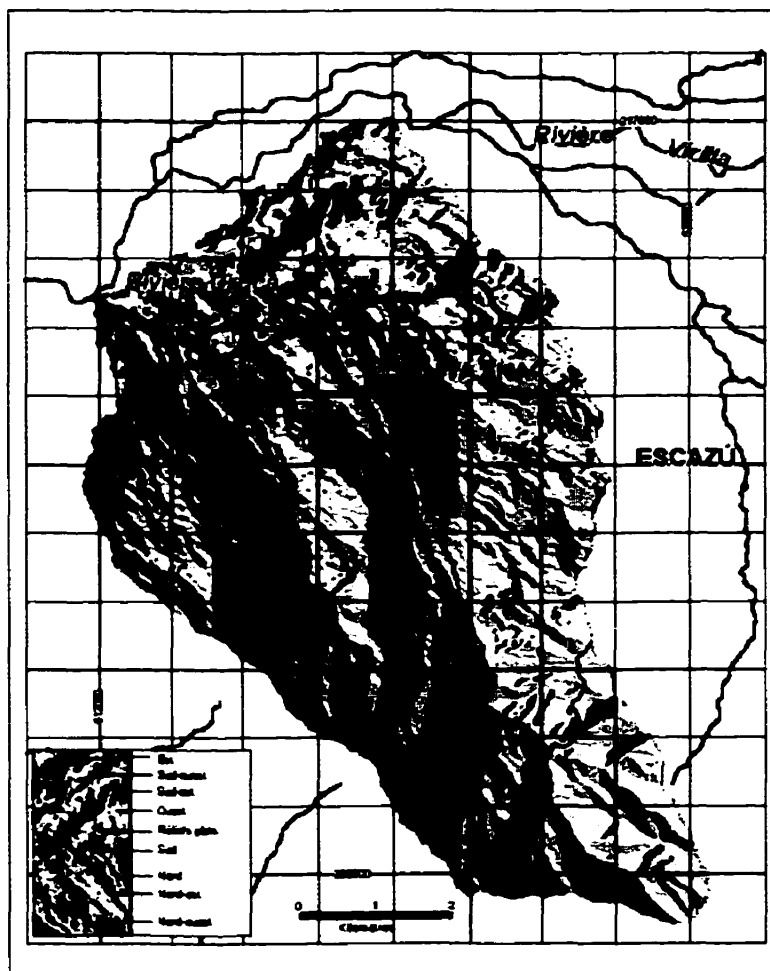


la description physiographique du bassin est la carte d'orientation des versants. En combinaison avec la carte d'inclinaison de la pente, ces données peuvent produire une carte très utile pour de l'aménagement: la *carte du potentiel d'ensoleillement*.

Figure 34. Orientation des versants

Étant donné que l'humidité du bassin vient du Pacifique (soit, de l'ouest), on peut penser que les versants les plus fréquents (ouest, nord-ouest et sud-ouest) (couleurs vertes sur la figure 34) sont aussi les plus exposés aux vents humides.

Au contraire, ils ont plus de potentiel d'ensoleillement l'après-midi, ce qui n'est pas garanti pendant la saison des pluies (mai-octobre) si l'on tient compte de la nébulosité créée par l'advection d'air humide du Pacifique.



4.9.3 Courbure du relief local

Cette donnée se révèle d'une grande utilité pour visualiser la répartition probable des flux d'eau superficiels et hypodermiques. Les concavités négatives (pentes convexes) seront alors des zones de diffusion, alors que les concavités positives (pentes concaves) seront les zones d'accumulation d'eau. Sur les pentes rectilignes, les lignes de flux sont supposées parallèles.

La façon dont nous avons traité les données de courbure pour aboutir à cette carte sera expliquée dans le chapitre 6. Pour l'instant, il suffit de mentionner que la valeur des catégories de courbures est plutôt qualitative et que leur validation s'est faite par inspection visuelle en superposant d'autres données, en particulier les courbes de niveau et les vecteurs des orientations.

En général, on note que les pentes rectilignes dominent la zone d'accumulation, tandis que les pentes concaves et convexes sont beaucoup plus importantes dans les terrains montagneux.

Dans ce cas particulier (fig.35), on note l'effet introduit par la résolution des données topographiques de base. Une ligne de séparation assez claire semble montrer que de l'*alto Tapezco* vers le sud, il y a plus de pentes rectilignes que dans les terrains de montagne au nord. C'est en réalité la ligne de séparation des données de base à des échelles différentes (1:10 000 au nord contre 1:50 000 au sud). Ce effet sera discuté et corrigé au chapitre 6.

4.9.4 Unités de terrain

Étant donné la faible résolution spatiale

de la carte des sols disponibles pour le bassin Uruca, et devant la difficulté, dans le cadre de cette recherche, de faire un relevé plus précis, nous avons considéré utile de réaliser une carte des unités physiographiques ou des *unités de terrain* (fig.36).

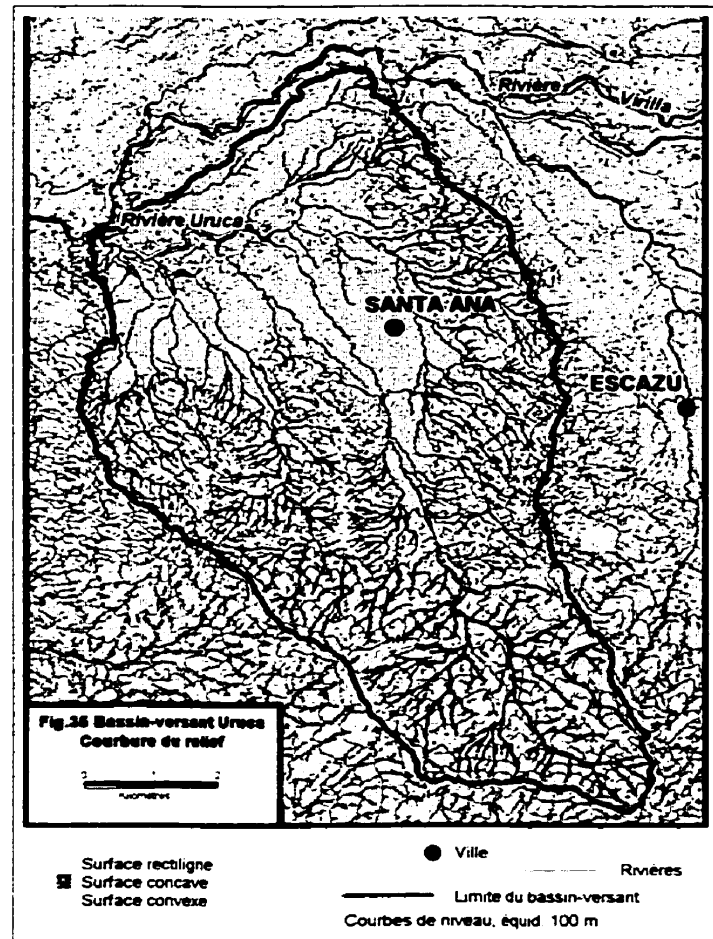


Fig. 36 Unités topographiques ou "naturelles" du bassin-versant Uruca

Unités topographiques

Régulière : 0 à 6° : 290 à 360°

Régulière : 6 à 15° : 210 à 290°

Régulière : 15 à 30° : 0 à 70°

Concave : 15 à 30° : 0 à 70°

Concave : 30 à 360° : 210 à 290°

Convexe : 15 à 30° : variée



Rivières principales

Autoroute

Route principale

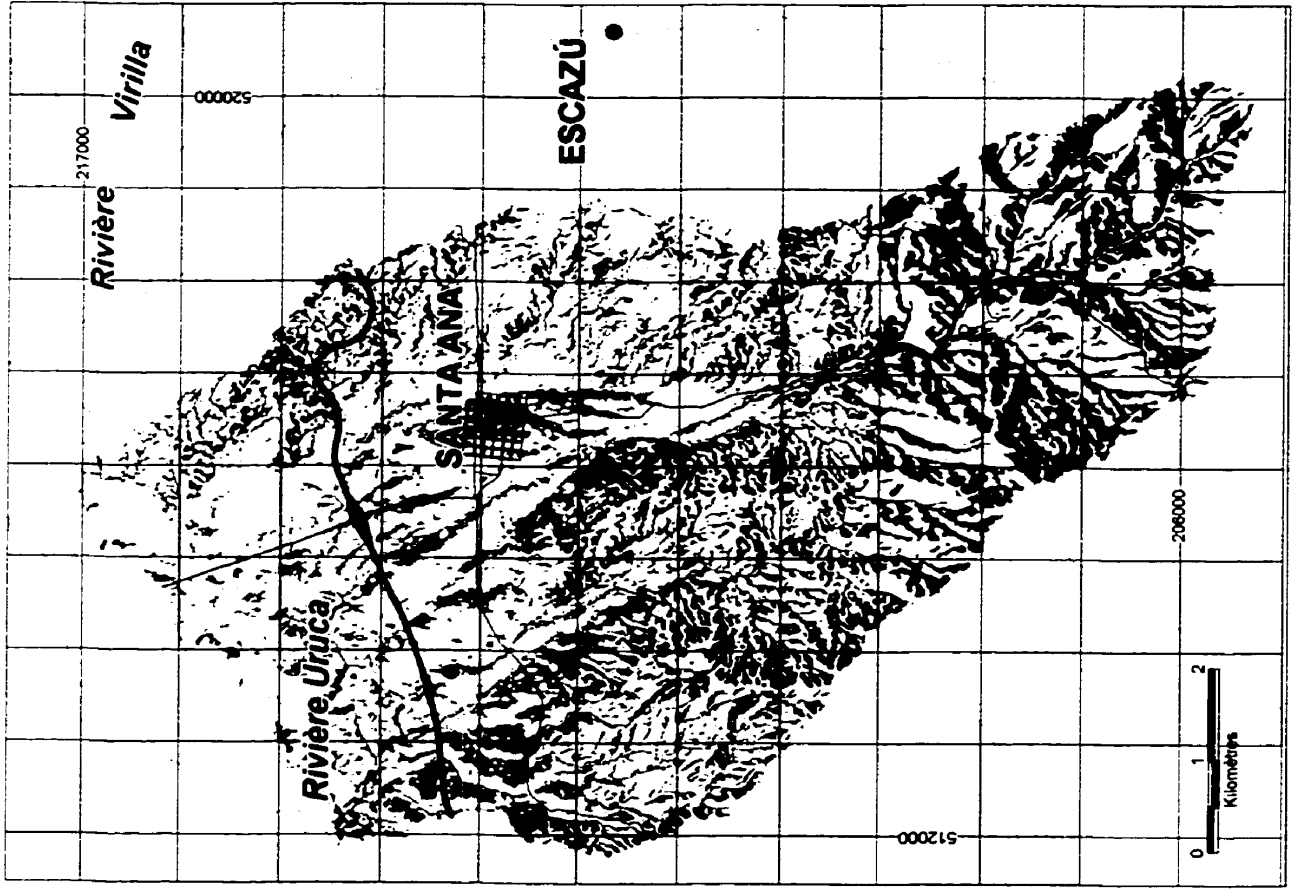
● Villes

ESCAZÚ

Rivière Virilla

Rivière Uruca

SANTA ANA



Source: Modèle Numérique de Terrain. Cartes topographiques au 1:50 000 et 1:10 000 du IGN, et photos aériennes au 1:20 000 et 1:40 000 de l'IGN.

Date: mars, 1999.

Sur cette carte, nous avons combiné les trois principaux critères de la topographie, soit l'orientation, l'inclinaison et la courbure (chapitre 6). D'après les nouvelles approches en sciences du sol (Arnold et Wilding, 1991; Hall et Olson, 1991; Burrough, 1986; Burrough, 1991), ces critères devraient être pris en compte dans la délimitation des unités de sol.

D'après Hall et Olson (1991:21) “... *si possible, une unité particulière sur la carte des sols, devrait se limiter à une position sur la carte des unités de terrain (“landform”)*”.

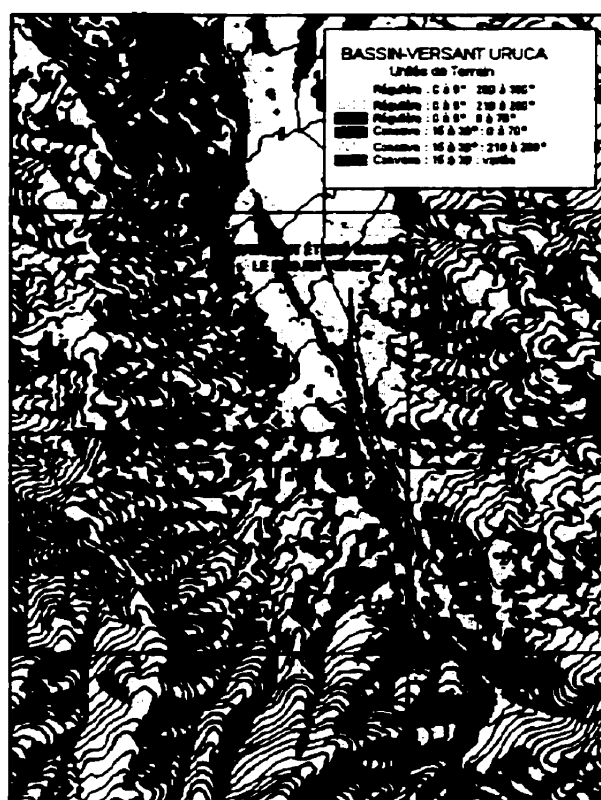
D'après Forbes (1986:49), “*L'association d'une série de sols particulière dans deux ou trois positions différentes dans le paysage suggère que ni les relations génétiques ni les interrelations entre les sols n'ont été suffisamment étudiées*”.

C'est dans cet esprit que nous avons réalisé la présente carte, qui pourrait être utilisée comme un schéma aidant à l'insertion et à la délimitation des unités de sol.

En fait, elle a déjà été utilisée pour un secteur du bassin-versant (fig. 37) dont des études d'érosion et des indices de productivité sont faits par une équipe multinationale (Sancho³, communication personnelle).

Dans l'ensemble, nous observons certainement une hétérogénéité remarquable, mais tout à fait adéquate pour la complexité du relief du bassin et son effet sur la formation des sols. Dans la

Figure 37. Unités de terrain du secteur Salitral



³ F.Sancho. Ingénieur. Centre des Recherches Agronomiques. Université de Costa Rica.

plaine, où les pentes sont toujours régulières et doucement inclinées (trois premières catégories de la figure 34), le principal critère de séparation est alors l'orientation (ou l'exposition⁴). Dans les terrains montagneux, les pentes sont le plus souvent concaves-convexes, fortement inclinées, et orientées plutôt vers le nord, ouest et nord-ouest. Les pentes concaves (catégories 4 et 5) sont associées, évidemment, au fond des vallées, réparties en orientations séparées, en moyenne, de 135°. Bien que dominées par des inclinaisons dominantes similaires à celles des pentes concaves, les pentes convexes (catégorie 6) montrent bien plus de dispersion, autant dans l'orientation que dans l'inclinaison. C'est-à-dire que la valeur moyenne des pentes dans cette catégorie est inférieure à la valeur moyenne de la pente dans les catégories 4 et 5.

4.10 Climat

Quelques travaux de référence fournissent des renseignements utiles pour comprendre le climat du bassin-versant Uruca. Zárate (1974) a étudié ce qu'il a appelé le "*front de brise*", une ligne de convergence entre le flux de l'ouest (air humide du Pacifique) et le vent de l'est (l'alizé des Caraïbes, moins humide et moins chaud), ligne qui s'établit justement dans la vallée centrale, et produit la plupart de la pluie à San José et aux environs (y compris dans notre zone d'étude).

Zárate (1977) a étudié aussi les principaux systèmes de vents qui affectent le Costa Rica et leurs relations avec les précipitations. Dans ce travail, il analyse les stations météorologiques de San José et de l'aéroport Juan Santamaria (Alajuela) pour montrer comment les précipitations associées au *front de brise* débutent dans les premières heures de l'après-midi (saison des pluies) à San José (pénétration maximale du front) pour, par la suite, descendre doucement vers le Pacifique, affecté dans les premières heures de la nuit.

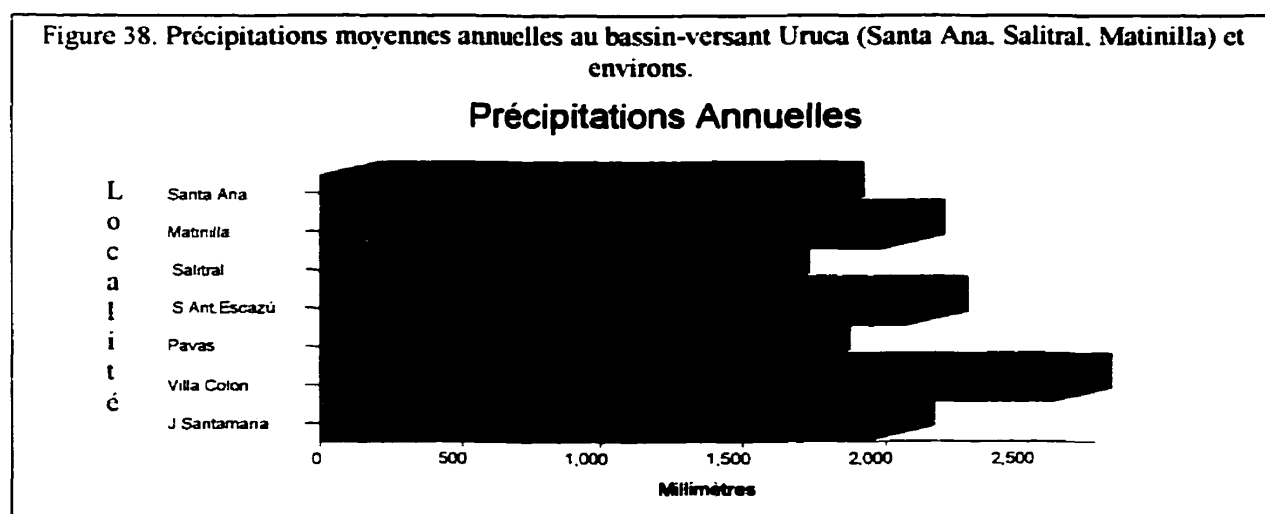
Utilisant des données fournies par Liao⁵, Arce (1988) a montré que les données journalières des précipitations entre la station San José et celle de Turrubares (au sud-ouest, sur l'axe du

⁴ Contrairement à la croyance assez répandue que ce critère n'a de l'importance que dans les pays nordiques, il est également pertinent dans les pays tropicaux pour des raisons d'exposition différentielle aux systèmes de vent, aux conditions d'insolation et aux pluies.

⁵ A. Liao. Météorologiste. Institut Météorologique National de Costa Rica.

parcours du *front*), séparées de plusieurs dizaines de kilomètres, ont une meilleure corrélation que les données concernant San José et Tres Ríos (quelques kilomètres à l'est, et généralement non atteintes par l'incursion du *front*).

Zárate et Ramírez (1983) ont fait une étude assez détaillée de la climatologie du bassin de Tárcoles (y compris le bassin-versant Uruca). Nous en tirons quelques éléments. Selon eux, a) l'axe Santa Ana - Alajuela est la zone la plus sèche de la Vallée Centrale et l'une des plus sèches du pays (moins que 1700 mm par année); b) le bassin-versant Uruca se trouve en arrière du *front de brise*, principal mécanisme de production des pluies dans la Vallée Centrale, de sorte qu'il ne reçoit que l'effet atténué lors de la descente du front affaibli vers le Pacifique; c) notre zone d'étude fait partie d'un foyer de fort ensoleillement⁶ (6.5 heures par jour, en moyenne annuelle); d) la zone d'étude se caractérise par les hautes températures (18°C pour le minimum moyen; 22.5°C pour la moyenne; et 27.5°C pour le maximum moyen).

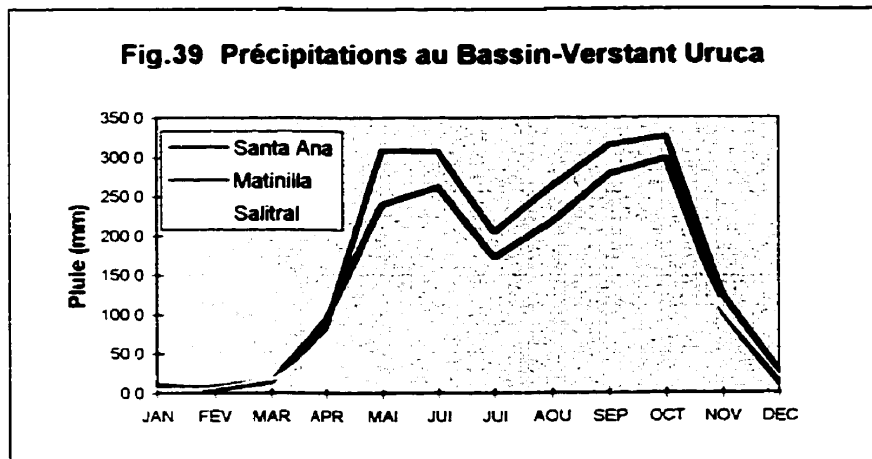


Dans un travail plus détaillé, nous avons utilisé les données pluviométriques des stations à l'intérieur du bassin (Santa Ana, Salitral, et Matinilla) ainsi que des stations voisines (Colón, Escazú, Santamaria, et Pavas) (fig. 38). On note la valeur minimale des pluies à la station de Salitral (1512 mm dans la période considérée), et la valeur maximale à Villa Colón (2587.5 mm).

⁶ Il s'agit de l'ensoleillement réel, c'est-à-dire, au niveau du sol, compte tenu de l'effet d'atténuation du flux énergétique exercé par la nébulosité. Le maximum théorique pour la zone est de 12 heures.

Pour la représentation en histogramme, les données des stations Santa Ana, Salitral et Matinilla ont été normalisées pour les années 1974-1985, à l'exception de l'année 1977 qui n'était pas disponible à la station de Salitral. La similitude des trois stations est remarquable, même si Matinilla reçoit entre 25 et 75 mm de pluies de plus que Santa Ana et Salitral pendant toute la période sèche.

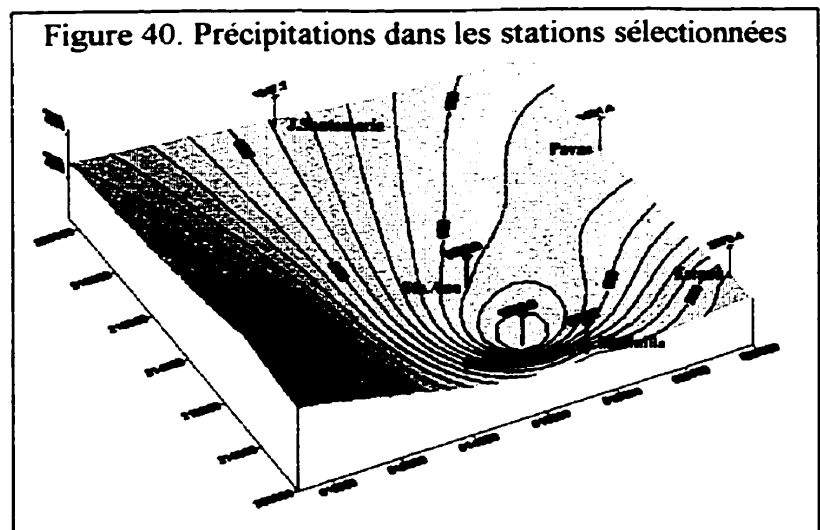
La saison des pluies débute en avril (mois de transition avec 60-100 mm), se prolonge durant 6



mois, et se termine en novembre (mois de transition avec 100-125 mm). Entre décembre et mars (5 mois) prévaut une saison sèche assez forte, pendant laquelle il n'y a souvent pas de pluies (fig.39). Il existe une

diminution des pluies assez marquée et consistante en juillet. Cet effet, connu comme le petit été de San Juan ("*veranillo de San Juan*") (Ramírez, 1982), se manifeste dans tout le versant Pacifique du Costa Rica. Ce petit été est produit par le déplacement de la circulation générale vers le sud, ce qui éloigne temporairement la zone de convergence inter-tropicale.

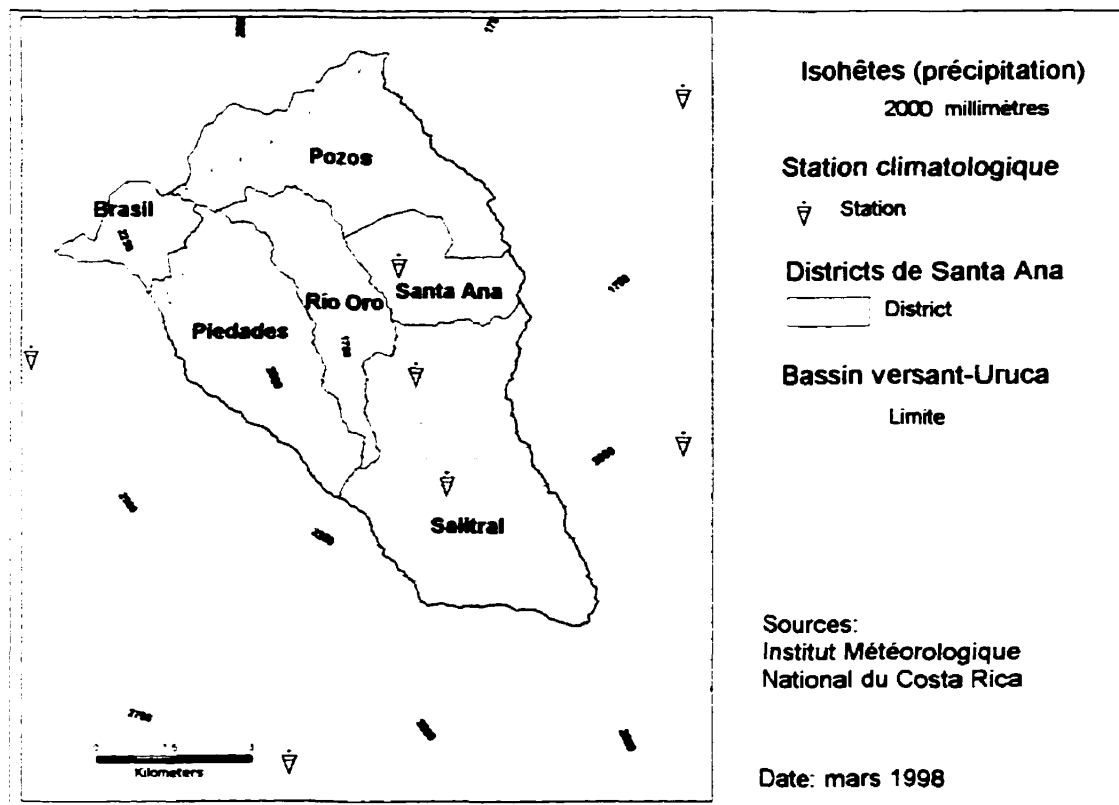
Quant à la pluie, elle est principalement convective, la plupart du temps causée par l'activité du *front de brise*, en réalité un front de convergence entre l'Alizé du nord-est et les



vents synoptiques appelés “Ouest équatoriaux” (ayant pour origine les cellules de haute pression du Pacifique Sud). Pendant la saison des pluies (mai-octobre), les “Ouest équatoriaux” sont renforcés par la “*Brise du Pacifique*”, système de vent de méso-échelle, et, ensemble, ils s’opposent au vent Alizé qui domine la circulation régionale. Une autre bonne partie de la pluie a comme origine l’influence des perturbations organisées (ouragans, tempêtes et dépressions tropicales) qui créent un champ de basse pression dans les Caraïbes et génèrent un flux advectif du Pacifique, lequel produit des pluies orographiques lors de leur passage sur la façade Pacifique du Costa Rica.

La répartition spatiale de la pluie moyenne (figs. 40-41) suit un patron similaire à celui défini par Zárate et Ramírez (1983), c’est-à-dire l’axe SO-NE sur lequel les valeurs sont minimales. On notera que l’image ne couvre pas l’ensemble du bassin. Ceci est dû au manque de données spatialement corrélées au sud de Matinilla.

Figure 41. Répartition spatiale des précipitations du bassin-versant Uruca



4.11 La couverture végétale

4.11.1 L'indice de végétation

L'image de l'indice normalisé de végétation ou NDVI (voir chapitre 6) (fig. 42) montre, mieux qu'une carte de l'utilisation du sol, l'importance relative de la couverture végétale présente dans le bassin-versant Uruca

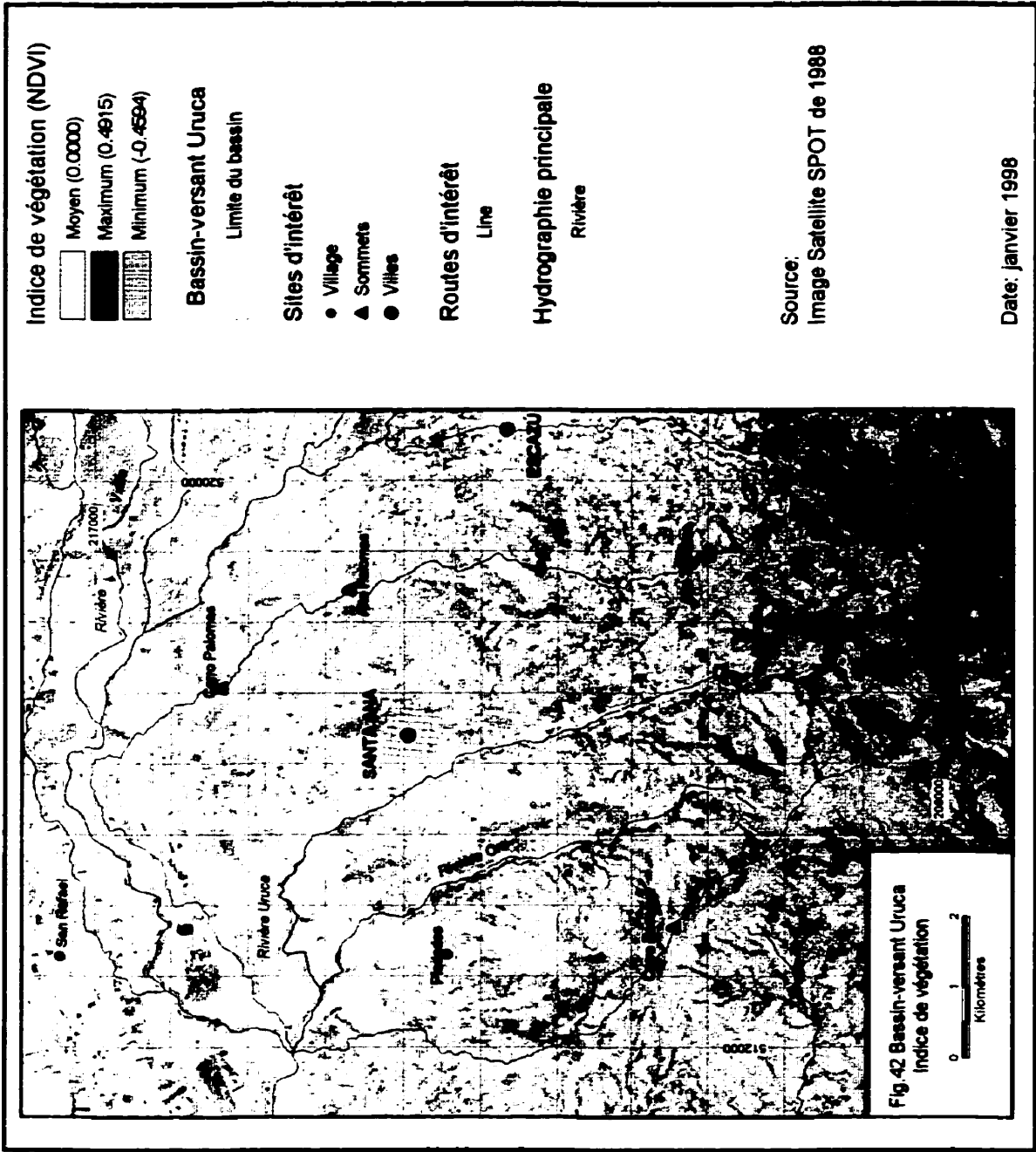
Les couleurs vert foncé, indiquant la présence de *forêts* et de *forêts secondaires* apparaissent très fragmentées, mais concentrées dans la zone de protection des *cerros de Escazú* (au sud du bassin), dans les talwegs des vallées encaissées (sur les axes du drainage) et dans les escarpements verticaux.

La couleur vert pâle, associée aux *pâturages* et aux terres en friche ("*charrales*") domine dans tout le secteur montagneux.

Dans le jaune-café apparaissent les zones soumises à l'agriculture, pâturages à faible couverture végétale, et zones urbaines de haute densité de construction.

4.11.2 L'utilisation du sol

La carte d'utilisation du sol a été réalisée directement à partir des cartes spécialisées créées par l'Institut Géographique National à l'échelle 1 : 10 000. Ces cartes, datant de 1989, ont été complétées (pour le haut versant) par un examen assez détaillé des photos aériennes disponibles (notamment celles de 1989). Ne disposant pas de logiciels spécialisés en photogrammétrie, au Costa Rica, le transfert a été fait "*à l'oeil*" mais en utilisant soigneusement le modèle d'ombres (*shaded model*) (fig. 43).

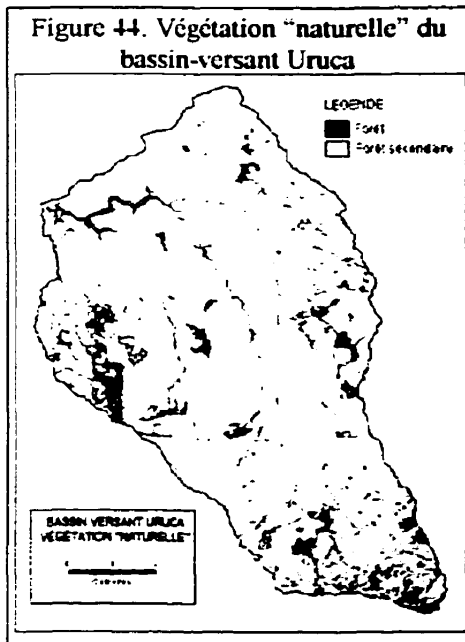


Ces cartes ont été révisées en utilisant l'image LANDSAT de février 1996. Cependant, les limites de cette technique empêchent de l'utiliser pour d'autres fins plus spécifiques que celles poursuivies dans cette recherche.

La figure 44 montre la répartition des types d'utilisation dits "naturels", c'est-à-dire les territoires qui gardent une bonne partie de la couverture végétale originale (i.e., non perturbée). Cette image fait voir à la fois la classe nommée forêt et la classe nommée "forêt secondaire" (altérée et/ou en reconstitution). Il



faudra prendre en compte que cette dernière catégorie n'a pas été utilisée sur les cartes de l'IGN couvrant la partie inférieure du bassin. Pour conserver une certaine logique, cette catégorie devrait être combiné avec la première si l'on n'a pas besoin de cette distinction..

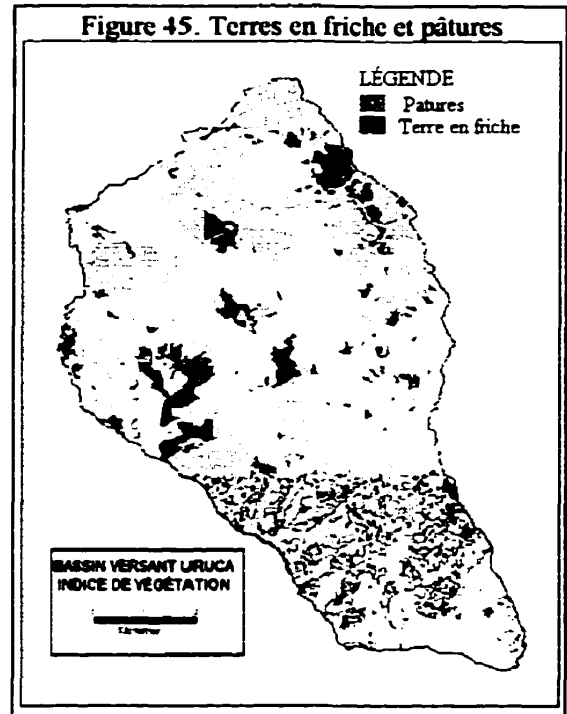


D'après l'image, les principaux îlots de végétation naturelle se trouvent au sud du bassin, dans la zone de protection des *cerros d'Escazú*, créée pour assurer l'approvisionnement en eau à plusieurs communautés du piémont, Santa Ana étant l'une d'elles. D'autres îlots de forêts se trouvent au nord et à l'est du cerro Pacacua, à l'ouest du bassin. Enfin, quelques îlots subsistent à l'est du bassin, dans la zone de l'*alto Granadilla*. Les photos aériennes montrent aussi des lignes d'arbres en bordures des rivières. Celles-ci sont protégées par les différentes lois forestières promulguées au cours des dernières années,

bien qu'on peut difficilement croire que cela représente la vraie raison pour leur conservation. Ce serait plutôt relié à une croyance culturelle enracinée chez la plupart des paysans.

Quelques îlots de forêt se trouvent aussi dans le *cerro Palomas* au nord-est du bassin. Même si la forêt dans ce secteur n'est pas soumise au régime de protection, elle l'est par le *Plan Régulateur Urbain de la Municipalité de Santa Ana*. Ceci est très souhaitable, si l'on tient compte de la grande instabilité du terrain (Mora,1985; Rivier,1979). Malheureusement la protection réelle de la couverture forestière de ce secteur ne peut pas être assurée par la municipalité qui devrait négocier et même exproprier ces terrains qui sont très convoités en raison d'un développement résidentiel très cher provenant de la municipalité d'Escazú (F.Alvarado⁷, communication personnelle).

La figure 45 montre la distribution spatiale des terrains couverts par les classes de *terres en friche* et en *pâturage*. Les terres en friche incluent les terrains abandonnés, les terrains non cultivés et / ou les terrains incultes. De même, il faudra tenir



compte que les pâturages ne sont pas sélectionnés ni soumis à la gestion, et qu'ils servent à une production extensive de faible rentabilité.

Les îlots de *terres en friche* d'une certaine importance se trouvent: a) du côté est du *cerro Pacacua*; b) au nord de la rivière Oro; c) et autour de la rivière Oro; au *cerro Mina*; au *cerro Palomas - alto Las Palomas*. Vers l'amont, les îlots de *terres en friche* ne couvrent pas de grandes superficies ; ils sont plutôt parsemés ici et là avec des zones un peu plus grandes qui sont en pâturages. Dans ce secteur, les *terres en friche* occupent les versants rectilignes à forte inclinaison, tandis que les pâturages couvrent le secteur culminant et la partie supérieure convexe des versants. Ceci est un patron typique dans tous les terrains montagneux du Costa

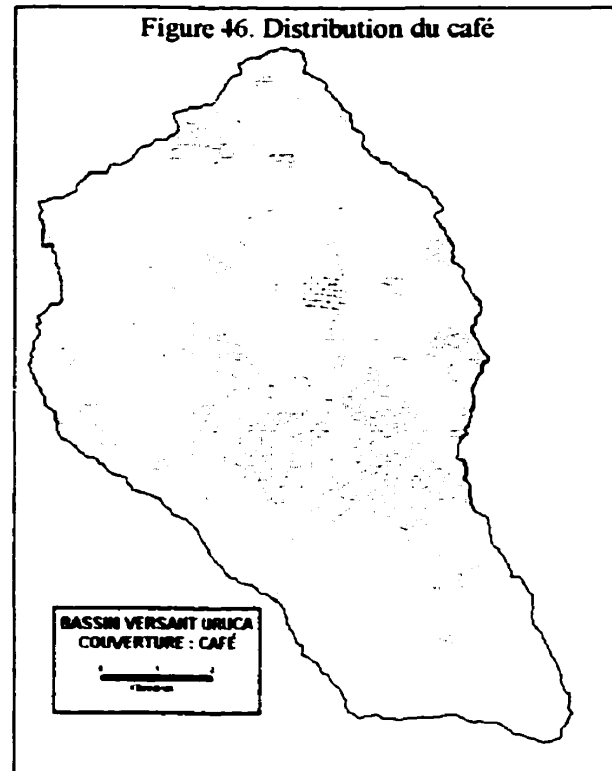
⁷ Florentino Alvarado. Chargé du SIG, municipalité de Santa Ana.

Rica, directement relié au développement des voies d'accès ("chemins"), le long des lignes de partage des eaux.

Il est étonnant de constater que la construction de tous ces "chemins" n'a pas rencontré d'opposition chez les institutions gouvernementales ; au contraire, elle fut objet d'offres lors de campagnes politiques pendant les années 1960-70. On trouve une situation similaire actuellement dans le développement domiciliaire (logements populaires) autorisant la construction de quartiers domiciliaires sur des terrains en pente et potentiellement dangereux. La conservation de la qualité du paysage est un sujet à part. Cette question n'est pas prise en considération dans la législation et les costariciens (notamment les investisseurs) ne s'en préoccupent pas.

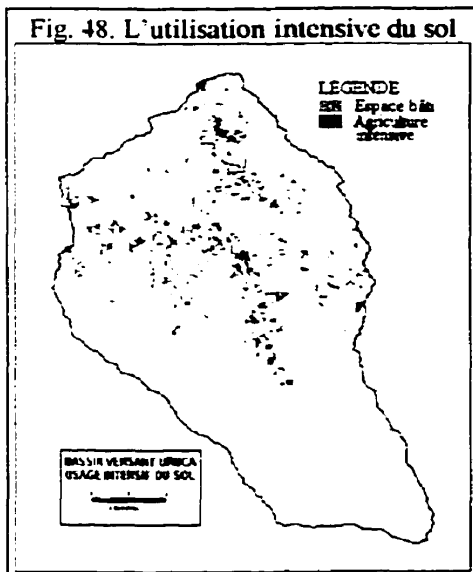
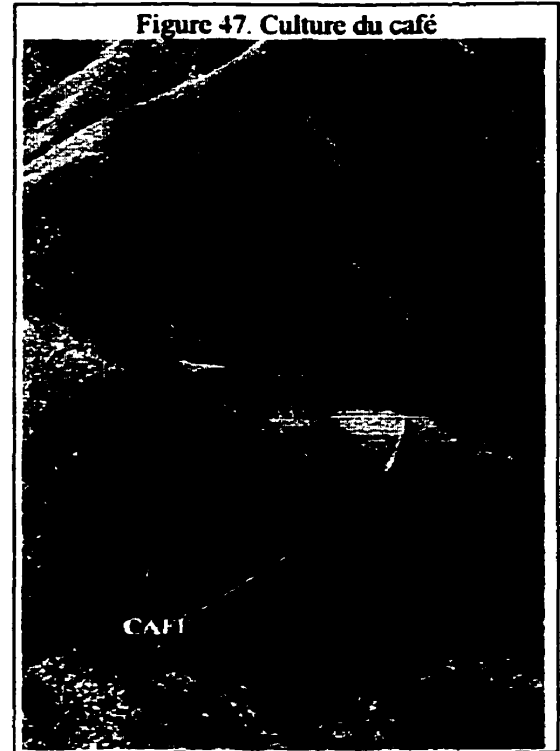
À propos des pâturages, signalons que les principaux profits proviennent des fermes situées en terrains plats ou ondulés, dans le secteur aval du bassin-versant Uruca. Il s'agit de zones relativement grandes et compactes, complètement consacrées à l'élevage. D'autre part, dans les terrains montagneux du secteur amont, les îlots de pâturages sont moins étendus et de faible rentabilité.

La figure 46 montre la distribution de l'activité caféière dans le bassin-versant. En général le café est cultivé sur des pentes fortes et moyennes (15° et plus). La production principale est localisée à Salitral - Matinilla - *alto Tapezco*; sur la marge droite dans le haut versant de la rivière Oro; Corrogres; au sud de Rincón San Marcos. En terrain plat, le café est cultivé à l'est de Lindora.



Durant les dernières années, l'activité caféière a gagné de l'importance à Santa Ana. Ceci s'est traduit par des exploitations sises dans la partie supérieure des versant, sur des terrains très inclinés, comme on peut le voir sur la figure 47. Les risques d'érosion accélérée sont évidents.

La distribution spatiale des cultures qui nécessitent une utilisation plus intensive du sol, ainsi que l'espace bâti, apparaissent sur la figure 48. Parmi les activités intensives, Santa Ana est reconnue au niveau national pour sa production d'oignons. La production de tomates et de plantes ornementales est importante aussi, ainsi que l'élevage de poulets pour la consommation sur le marché national.



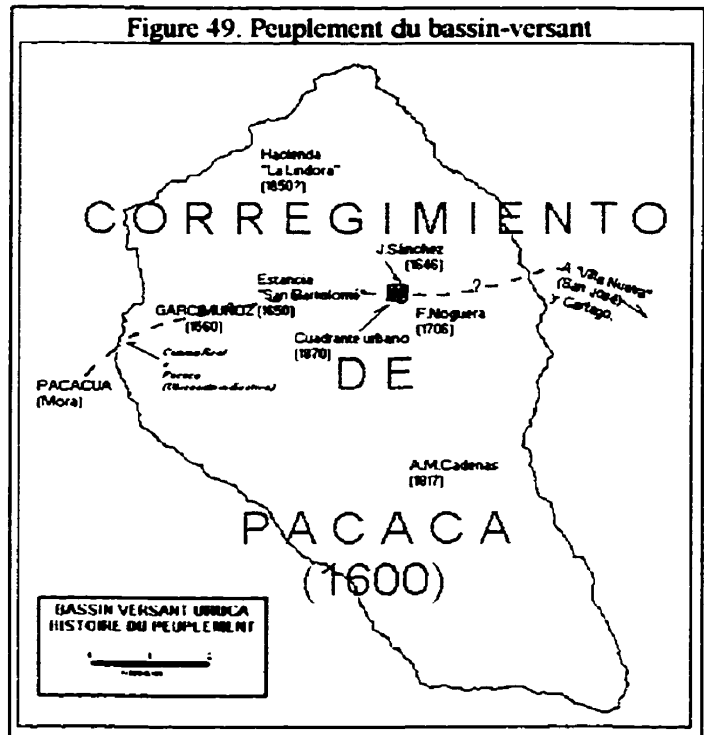
Quant à l'espace bâti, il y suit pour l'essentiel le tracé des routes principales (figs.51-52). D'abord, on note l'axe est-ouest, qui est le plus ancien et qui fut le plus important en terme de volume du flux. C'est la vieille route vers San José, toujours la plus courte et encore très utilisée. Ensuite, on note l'axe nord-sud, qui met en communication Santa Ana avec la municipalité de Belén (au nord), ainsi que avec plusieurs villages construits le long de la rivière Uruca. Un autre développement nord-sud suit le cours de la rivière Oro. L'effet de l'autoroute vers Colón ne s'est pas encore traduit par une croissance résidentielle importante en raison de la valeur élevée de ces terrains.

4.12 Peuplement

La fondation de la ville de Garcimuñoz (fig.49) par le conquistador espagnol Juan de Caballón, située, d'après les historiens, dans la plaine de Turrúcares (à l'ouest du bassin-versant), ou dans les environs de Piedades de Santa Ana (Meléndez, C.; cité para Jiménez,A.,1967:1), est à l'origine de la colonisation de la Vallée Centrale de Costa Rica. Cet événement s'est produit vers les années 1560-70.

Peu de temps après, une nouvelle ville fut établie à Cartago (elle deviendra la capitale du pays pendant toute l'époque coloniale). Cartago fut le centre de population européenne le plus important à l'intérieur du pays.

Les espagnols ont réparti les aborigènes du centre du pays en trois "corregimientos", celui du Pacaca coïncidait à peu près avec l'actuel territoire de Santa Ana et ses environs. Ce



"corregimiento" incluait, en 1607, les territoires de Curridabat, Aserri et Barga, entre autres. "Obligatoirement, le Gouverneur de la Province, ainsi que le "Corregidor" concerné, étaient obligés de visiter la localité de Pacaca. C'est pourquoi, ce territoire fut relié très tôt avec la capitale provinciale. Un "chemin royal" fut ouvert qui facilitera la migration humaine vers l'ouest. Le long de la vallée d'Aserri (aujourd'hui la capitale du Pays, San José), s'établissaient des troupeaux. Déjà, en l'an 1629, les veuves de Luis Cascante et Cristobal Chaves avaient hérité de propriétés à Mata Redonda (La Sabana, San José), ce qui indique que les troupeaux s'étaient déjà reproduits ainsi que les basses-cours" (Jiménez, 1967:2).

Le peuplement non aborigène de la région de Santa Ana date d'environ 370 ans, soit peu après l'arrivée des européens sur les terres costariciennes. La population a commencé à s'établir sur une grande étendue de terres dont le premier propriétaire a dû être le capitaine Jerónimo de Retes, alguacil principal de Cartago, qui probablement a obtenu ses terres par donation de la Couronne d'Espagne. Ana de Retes, fille du capitaine Retes, a vendu, en 1646, la partie des terres où se situe l'actuelle ville de Santa Ana (Jiménez, 1967:2). Quatre ans plus tard (en 1650), Juan Sánchez Crespo, qui avait acheté les terres de Ana Retes, a vendu (à Juan de Vida Martel) leur ferme ("*estancia*"), appelée San Bartolomé; celle-ci incluait des maisons, du bétail, des basses-cours et était située en aval du río Oro, sur le "chemin royal" qui conduisait à Pacaca (aujourd'hui, ville de Colón).

Le nom de Santa Ana apparaît pour la première fois dans un document officiel, dans une lettre de donation datée du 1 décembre de 1658, dans laquelle José de Alvarado donnait à son épouse Petronila de Retes, une partie du site connu sous le nom de Santa Ana.

"Ana de Retes donnait, en 1705, une "caballería" de terres située dans le cerro de los Coyotes à son beau fils José Pérez de Muro. Un an plus tard, elle vendit une autre "caballería", située à Corrogres, à Francisco de Noguera y Moncada" (Jiménez, 1967:3).

"Dans un document datant de 1729, on mentionne un site de la Mata Redonda, appelé Santa Ana de las Pavas. Ces noms, encore en usage, suggèrent que le chemin de Cartago à Santa Ana passait par Las Pavas, et que la vallée de Santa Ana était considérée comme faisant partie de la Mata Redonda" (Jiménez, 1967:3).

"Vingt-cinq ans plus tard (vers 1754), les voisins d'Escazú ont refusé d'émigrer vers la localité de la Villa Nueva (aujourd'hui San José, capitale du pays). On a respecté leur décision qui était bien fondée. Cette expression d'enracinement aidait à consolider et à accroître la population d'Escazú jusqu'à un point tel que, vers l'année 1779, cette paroisse devint indépendante de celle de San José. Une église fut construite, ce qui voulait dire que la communauté comptait déjà deux ou trois mille âmes" (Jiménez, 1967:3).

“ Vers l’année 1817, Mme. Ana Maria de Cadenas, résidente de San José, était la propriétaire de presque toutes les terres de l’actuelle municipalité de Santa Ana. Mme. Cadenas donna des parcelles de terrains dans une tranche qui allait du “chemin royal”, entre les rivières Uruca et Corrogres jusqu’au quartier de Matinilla, dans le but que cette zone fut peuplée et cultivée. Plusieurs colons sont alors descendus d’Escazú vers Salitral. Leur propriétés allaient jusqu’à Corralar, Cedral et Matinilla” (Jiménez, 1967:4). Deux ans plus tard, Mme. Cadenas vendit douze “caballerias” et un quart de ses terres situées entre les rivières Corrogres et Oro. Deux ans après, elle vendit aussi, une “caballeria” de terre située entre le “chemin royal” et la rivière Virilla. Cette propriété englobait le territoire actuel du district de Pozos.

La première référence au secteur de Lindora est apparue vers la moitié du dix-neuvième siècle, et l’on remarque l’existence de l’hacienda “La Lindora”.

Le 7 décembre 1848 fut créée la municipalité d’Escazú, qui incluait les juridictions d’Escazú, de Santa Ana, de Mora et de Puriscal. Cette dernière juridiction incluait tout le territoire de l’actuel Turrubares.

La population de l’actuel district central de Santa Ana commença avec un hameau autour de la rivière Uruca. Les colons, qui se sont établis en groupes depuis 1819, devraient être nombreux vers 1850, lorsque le presbytère donna le terrain pour construire, avec des fonds privés, la première église de Santa Ana.

En 1870 le Gouvernement de la République décréta la création de la première “alcaldía” de Santa Ana, située à Río Oro. Ceci pour considérer que l’on avait besoin d’autorité dans un site si éloigné de la ville d’Escazú où la population avait beaucoup grandi. Le recensement de 1864 indique une population de 1068 habitants à Santa Ana.

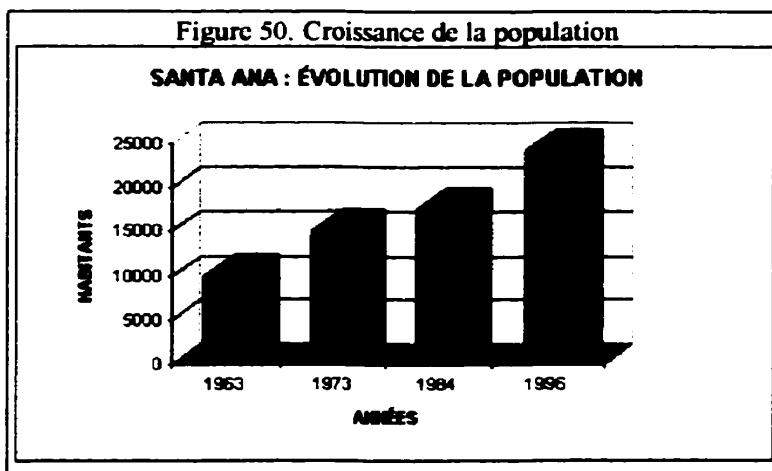
De même, durant les premières années de la décade de 1870 fut défini le tracé du quadrant officiel de la localité de Santa Ana. Celui-ci était constitué de trois chemins et de deux avenues

à côté de la “*plaza*” et de l’église. Durant les 30 années suivantes, les progrès de la localité de Santa Ana furent assez rapides. Déjà en 1902 “*l’aldea*” de Santa Ana avait plus de population que les villes d’Escazú, de Desamparados, de Santiago de Puriscal, de Aserri, de Pacaca (Colón), de San Marcos de Tarrazú et de la Guadalupe (Jiménez, 1967:7).

Ces faits historiques sont à la base du mouvement qui a permis aux habitants de Santa Ana d’obtenir leur indépendance administrative, le 29 août, 1907.

4.13 Croissance de la population

En 1864 la localité de Santa Ana comptait 1068 habitants. Quarante-trois ans plus tard, elle reçut le statut de municipalité avec une population de 2500 habitants. Comme dans le reste du pays, la croissance de la population fut relativement lente pendant la première moitié du vingtième siècle. Cependant, à partir de l’année 1963, la croissance fut très rapide (fig.50). Entre 1963 et 1996, la population a augmenté de 141%, ce qui équivaut à doubler la



population chaque 23 ans. Ce patron est conséquent avec ce que l’on observe pour l’ensemble du pays, et résulte d’une transformation significative des conditions sanitaires qui ont réduit fortement la mortalité générale et la mortalité infantile en particulier, ainsi que d’un retard relatif dans l’adoption de méthodes contraceptives et d’une nouvelle rationalité reproductive.

Santa Ana étant une municipalité dans la banlieue de San José, on peut prévoir que le taux de croissance naturelle montrera une tendance à la décroissance dans les années à l’avenir. Cependant, en raison de sa position, la municipalité constitue un attrait majeur pour un grand nombre de gens résidant dans la “*Gran Area Metropolitana*”. Ce n’est pas par hasard que la

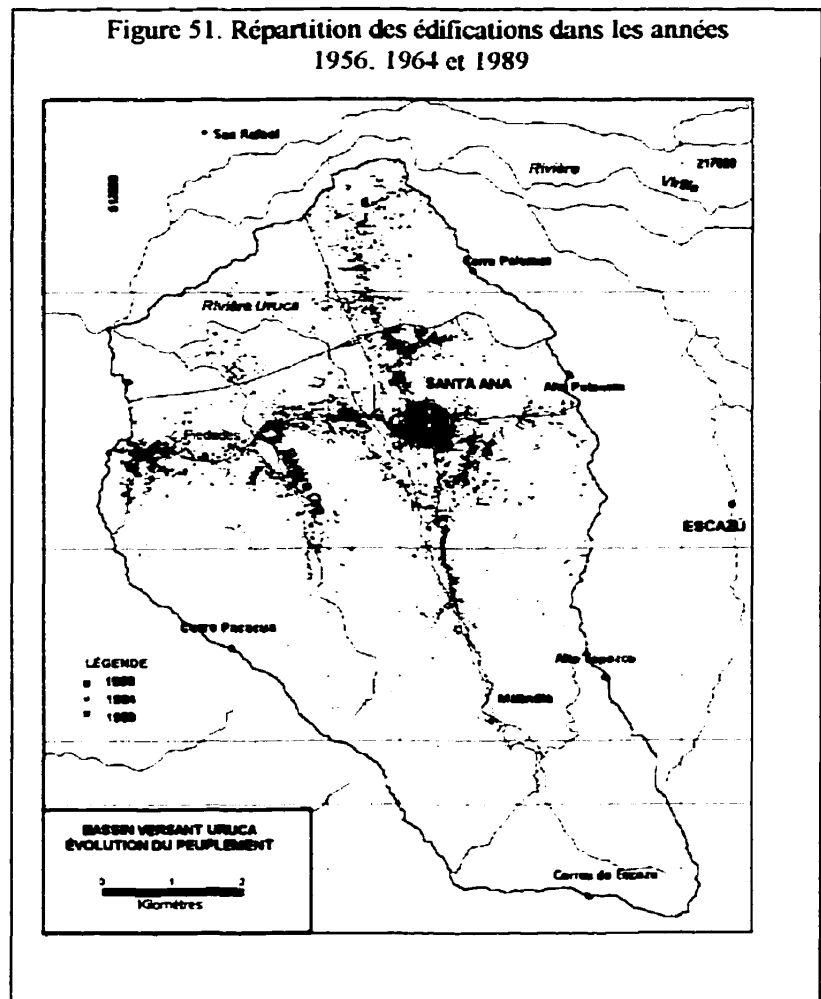
localité est connue comme la Vallée du Soleil, et attire, depuis quelques années, les immigrants nationaux et étrangers qui cherchent une bonne "qualité de vie". De nombreux nouveaux habitants viennent s'installer dans la périphérie du village, sur les hauts versants où ils profitent d'une grande qualité de paysage. L'accès assez rapide et la courte distance de la capitale (environ 15 minutes) font prévoir une immigration grandissante vers cette municipalité.

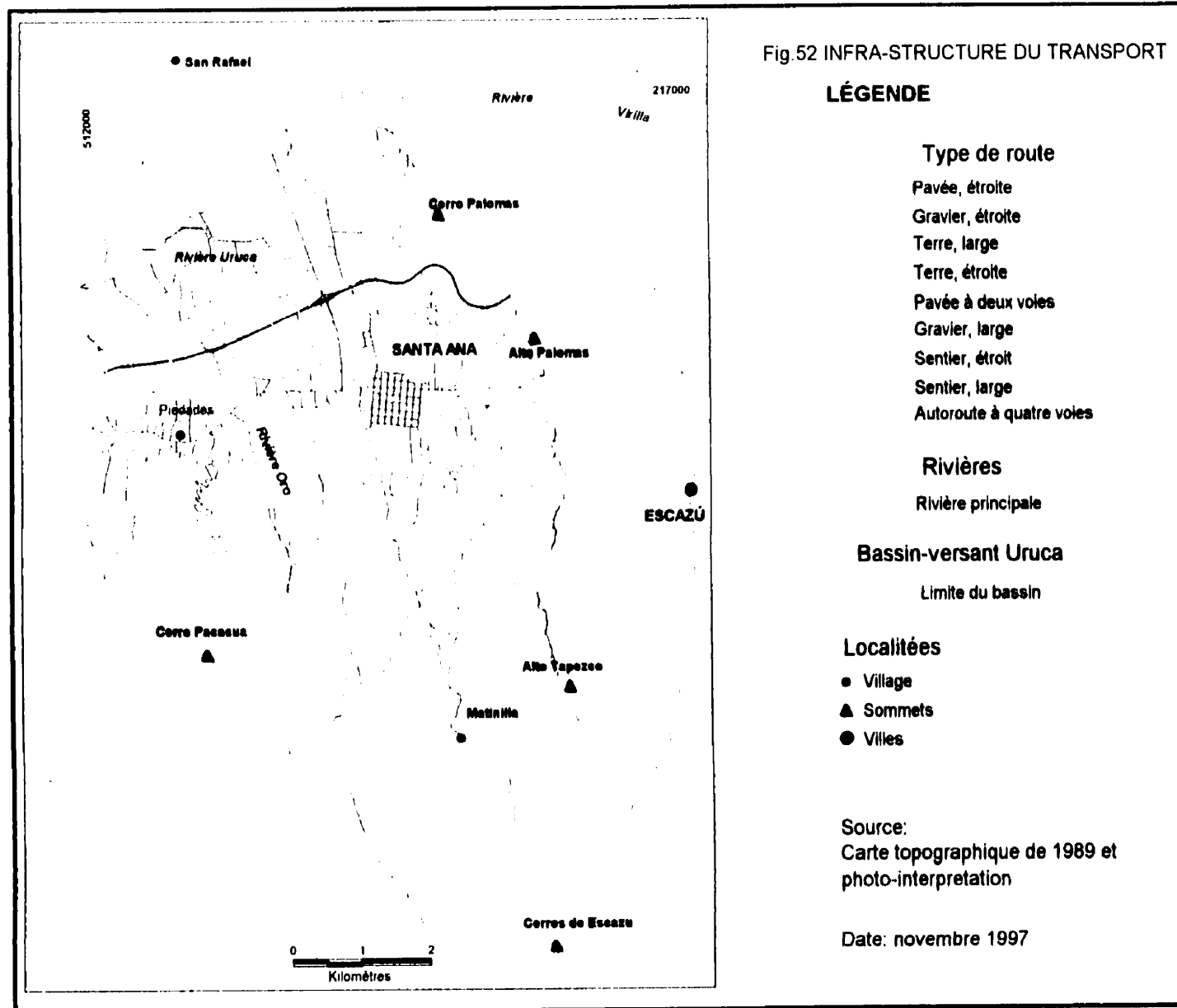
4.14 Répartition de la population dans l'espace et le temps

Nous avons déjà mentionné (voir 4.11) que la répartition actuelle de la population est encore dépendante des vieux axes du transport ; ceci était valable autrefois. Nous illustrons cette situation dans la figure 51. En plus des axes de voirie, la morphologie générale de la zone conditionne énormément l'organisation de l'espace bâti.

4.15 Infrastructure

Comme il n'est pas facile de trouver une information détaillée sur les types d'infrastructure (aqueducs, énergie, télécommunication, etc.), ce que nous allons présenter ici est tout simplement l'infrastructure de transport, classée d'après le niveau ou la catégorie des routes (fig 52).





4.16 Références bibliographiques du chapitre

ALVARADO, G. 1986. Hallazgos de megamamíferos fósiles en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. (4):1-46.

ARCE, R. 1988. Análisis de la variación espacial de la función de correlación entre datos de lluvia de la cuenca del río Tárcoles, Costa Rica. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica. Tesina para grado de técnico en meteorología (sin publicar).

ARIAS, O. et DENYER, P. 1991. Aspectos neotectónicos y geológicos de Puriscal y alrededores, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* (12):83-95.

ARIAS, O. et DENYER, P. 1994. Geología Estructural. Dans: Denyer, P. et Kussmaul, S. (eds). *Atlas Geológico Gran Área Metropolitana*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

ARNOLD, R. et WILDING, L. 1991. The need to Quantify Spatial Variability. Dans : M.J. Mausbach et L.P. Wilding eds. *Spatial Variabilities of Soils and Landforms*. SSSA Special Publication Number 28. Wisconsin, USA.

BADILLA, R. 1989. Estudio Climático del Cerro Tapezco. Cité par: Molina, F. *Deslizamiento del Alto de Tapezco. Santa Ana, Provincia de San José, Costa Rica*. Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

BAUMGARTNER, P. O., MORA, R., BUTTERLIN, C., SIGAL, J., GLACON, J., AZEMA, E. et BURGOIS, J. 1984. Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. (1): 57-136.

BERGOEING, J. P. et MALAVASSI, E. 1982. Geomorfología del Valle Central de Costa Rica -Explicación de la carta geomorfológica 1:50 000). Departamento de Geografía-Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica. Convenio Dpto de Geografía, U.C.R. / IGN, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Costa Rica.

BORGIA, A., BURR, J., MONTERO, W., MORALES, L. D. et ALVARADO, G. 1990. Fault propagation induced by gravitational failure and slumping of the Central Costa Rica volcanic range: implications for the large terrestrial and martian volcanic edificies. *J. Geoph. Res.*95(B9):14357-14382.

BURROUGH, P. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment.* Oxford, Clarendon Press. Chap 3: 39-56 pp.

BURROUGH, P. 1991. Soil information systems. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems.* John Wiley & Sons Inc. New York. Vol.2- cap.46.

DENYER, P. et ARIAS, O. 1991. Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central.* (12): 1-59.

DENYER, P. et ARIAS, O. 1994. Estratigrafía Sedimentaria. Dans: Denyer, P. et Kussmaul, S. (eds). *Atlas Geológico Gran Área Metropolitana.* Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

DENYER, P. et KUSSMAUL, S. (eds). 1994. Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

DERRUAU, M. 1983. Geomorfología. Ariel, Barcelona, España.

- ECHANDI, E.** 1981. **Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla.** Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Escuela Centroamericana de Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- ESTRADA, A.** 1987. **Estudio geológico-geotectónico del Deslizamiento San Blas, Río Reventado, Costa Rica.** Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Escuela Centroamericana de Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- FORBES, T.** 1986. **The Guy Smith interviews : Rationale for concepts in soil taxonomy.** Soil Manage. Support Services Technical Monograph 11, USDA-SCS, Washington, DC.
- HALL, G. et OLSON, C.** 1991. **Predicting Variability of Soils from Landscape Models.** Dans : M.J.Mausbach et L.P.Wilding eds. *Spatial Variabilities of Soils and Landforms* (1991). Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
- HÖGBERG, J. et LINDSKOG, J.** 1995. **The Matinilla landslide, Costa Rica.** *Royal Institute of Technology - Centre for International Technical and Educational Cooperation.* Stockholm.
- JIMÉNEZ, A.** 1967. **Contribución a una monografía de Santa Ana.** Monografía. Inédito.
- LEANDRO, G.** 1977. **Informe del estudio geofísico de los deslizamientos en el Cerro Tapezco, Santa Ana, San José.** FAO. San José, Costa Rica. Inédito
- MELÉNDEZ, C.** 1966. **Juan Vásquez de Coronado.** (Cité para A. Jiménez,A., 1967. Contribución a una monografía de Santa Ana. Inédito.).

MOLINA, F. 1990. Deslizamiento del Alto de Tapezco. Santa Ana, Provincia de San José, Costa Rica. Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Escuela Centroamericana de Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

MORA, S. 1985. Las laderas inestables de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central.* (3):129-161.

MORA, S. 1988. Informe del evento de desestabilización ocurrido en el deslizamiento del Alto de Tapezco, Santa Ana, entre los días 13 y 14 de setiembre del 1988. San José, Costa Rica. Inédito.

MORA, R. et **MORA, S.** 1994. Deslizamientos. Dans: Denyer, P. et Kussmaul, S. (eds). Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago. Costa Rica.

OBANDO, L. G. 1983. Estratigrafía y petrografía de las rocas aflorantes al sur del Valle Central (Tarbaca). Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Escuela Centroamericana de Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

PITTMAN III, W. C. et **ANDREWS, J. A.** 1985. Subsidence and thermal history of small pull-apart basins. Dans: Biddle, K.T. et Chistie-Blick, N. (eds). *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation.* Soc. Econ. Paleont. miner. Sp. Publ. 37:45-49.

PROTTI, R. 1986. Geología del flanco sur del volcán Barva. *Boletín de Vulcanología, UNA.* (17):23-31. Heredia, Costa Rica.

RAMIREZ, P. 1982. Análisis meteorológico de los veranillos. Instituto Meteorológico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

RIVIER, F. 1979. Geología de la región norte de los Cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Informe Semestral, Instituto Geográfico Nacional. Enero-junio*:99-137. San José, Costa Rica.

ROMANES, J. 1912 a. Geology of part of Costa Rica. *Quart. Jour. Geol. Soc.* 68:103-139. London.

SENARA - BGS. 1985. Mapa hidrogeológico del Gran Valle Central de Costa Rica. Escala 1:50 000. Gran Bretaña.

UREÑA, R. 1983. Análisis de estabilidad del flanco occidental del Alto de Tapezco, en Santa Ana. Tesis de Licenciatura en Ingeniería. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

WILLIAMS, H. 1952. Volcanic history of the Meseta Central Occidental, Costa Rica. *Geological Science.* 29(4):145-180.

ZÁRATE, E. 1974. La convergencia de la brisa de mar del océano pacífico con el flujo alisio, dentro del valle central. Instituto Meteorológico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

ZÁRATE, E. 1977. Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. Tesis de Grado. Universidad de Costa Rica.

ZÁRATE, E. et RAMÍREZ, P. 1983. Compendio Climatológico. Dans: IGN-CONICIT (eds). El sistema Fluvial del Tárcoles. *Serie Estudios Geográficos.* pp. 53-64.

PARTIE 2

Résumé:

Après le survol des aspects conceptuels et logistiques de notre application du SIRS présentée dans la première partie, cette deuxième partie est consacrée d'abord à la conception du SIRS dans un cadre institutionnel restreint, où nous proposons notamment le Diagramme du Flux de Données, le Modèle Conceptuel de la Base de Données et une esquisse du Dictionnaire de Données. Par la suite, nous discutons des Modèles Numériques de Terrain, un outil et un concept particulièrement important dans les applications du SIRS à l'étude des bassins-versants. Enfin, nous profitons de la structure du SIRS définie dans le MCD pour faire quelques analyses typiques des tâches de gestion et d'aménagement de bassins-versants.

CHAPITRE 5

CONCEPTION DU SYSTÈME D'INFORMATION À RÉFÉRENCE SPATIALE

Différentes approches de la conception des Systèmes d'Information (SI) et des Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) ont déjà été proposées. Nous ferons une brève revue des approches et par la suite nous discuterons les aspects couverts par notre recherche.

5.1 Fondements conceptuels

5.1.1 Les méthodes d'élaboration des SIRS

Le développement d'un SIRS est, le plus souvent, une tâche complexe, intensive, coûteuse et longue. Cela demande, naturellement, la définition et la poursuite d'une démarche claire et rigoureuse visant des objectifs bien identifiés.

La définition d'une procédure suffisamment fiable pour le développement des SI a été le résultat d'un effort considérable fait par des entreprises et des chercheurs, notamment durant les années 1970 et 1980.

Ce développement conceptuel, évidemment, ne fut pas possible avant que des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) aient été créés au sein de grandes entreprises pendant les années 70 (González, 1996:22-30).

*"Au début des années 70, le système informatique était le point de mire dans les implantations des systèmes de gestion de base de données (SGBD). Cependant, face aux difficultés rencontrées quant à la définition des besoins des usagers et la restructuration des organisations dans lesquelles l'informatique était implantée, l'on vit apparaître des méthodes de conception de SI vers la fin des années 70. L'approche conceptuelle diminua l'importance de l'appareil lui-même au profit de la gestion de la ressource **information**"* (Paquette, 1990:5).

D'après Boutin (1988, cité par Paquette, 1994:5), une méthode de conception des systèmes d'information est une *"démarche reposant sur un ensemble de règles et de principes décrivant les étapes et les produits à réaliser pour concevoir un système d'information"*.

Une de ces méthodes a été mise au point par le Ministère de l'Industrie, en France, en 1978-79. Elle a été appelée la méthode Merise. Bien que d'autres méthodes d'analyse et de gestion informatique aient été proposées, l'analyse structurée des traitements fut privilégiée à l'analyse structurée des données (Tardieu, et al., 1994:26). Ce changement de perspective, qui mettait les données au même plan que les traitements a apporté une nouvelle dimension à la conception des SI.

L'analyse structurée des données demandait une approche alternative aux *diagrammes de flux* utilisés pour la modélisation des traitements. Plusieurs *formalismes* ont été suggérés. Mentionnons en quelques-uns: a) le *formalisme individuel* proposé par Tardieu et ses collaborateurs (1979) (repris dans Merise); b) le *formalisme entité-relation* proposé par Chen (1976); c) le *formalisme relationnel* mis au point par Codd (1970).

La plupart des méthodes de conception des SI s'appuient sur le concept de *cycle de vie* ou *cycle de développement* du système. Dans la méthode Merise, ce cycle inclut sept phases: a) schéma directeur; b) étude préalable; c) étude détaillée; d) étude technique; e) production de programmes; f) mise en oeuvre; g) entretien. (Tardieu et al., 1994:44). Paquette (1990:7-9) définit chacune des phases.

- *Le schéma directeur.* Pour l'ensemble de l'organisation, le schéma directeur illustre le choix d'un scénario de développement du système d'information (SI) en termes de politique, d'organisation, de technicité et d'un plan de migration de l'ancien système vers le nouveau. Il nécessite donc une définition des différents domaines d'application du système, une planification globale du développement de chacun de ces domaines, l'identification des priorités pour l'administration ainsi qu'un plan détaillé de réalisation, année par année, en fonction de ces priorités (Paquette, 1990:8).
- *L'étude préalable.* L'étude préalable est définie comme domaine d'application, les sous-ensembles du système d'information et, dans le cadre de l'un d'eux, permet le choix d'une cible précise et planifiée sous forme de projet. L'étude préalable peut également mener à d'autres alternatives, notamment la décision de revoir le champ de l'étude. Dans ce cas, il faudra éventuellement reprendre une partie de l'étude préalable, ou la décision de ne pas poursuivre le projet.
- *L'étude détaillée.* Cette étape s'applique au champ de l'un des domaines identifié comme projet, lors de l'étude préalable; elle génère une synthèse des objectifs et des spécifications fonctionnelles externes détaillées sur les règles de gestion et d'organisation et sur les procédures proposées.
- *L'étude technique.* Elle porte sur le même projet et touche l'architecture technique - équipements, logiciels- et les modalités de réalisation du projet.

- *La production du logiciel.* C'est l'étape de réalisation et de validation du système informatique pour rencontrer les critères définis pendant les études antérieurement citées: l'étude détaillée et l'étude technique; une vérification provisoire du système proposé est effectuée ici avec des données fournies par les futurs utilisateurs.
- *La mise en oeuvre.* L'implantation du système dans son environnement et son acceptation définitive par les usagers constituent la dernière étape réelle de cette méthode.
- *L'entretien.* Etant plus un processus qu'une étape en soi, l'entretien comporte plusieurs procédures planifiées à l'avance pour assurer un fonctionnement adéquat du système. De plus, en réaction à des situations non planifiées, la décision peut réengager le mécanisme de développement du système pour le modifier intrinsèquement de manière à répondre adéquatement aux nouveaux critères ou objectifs. (Paquette, 1990:9).

Un autre schéma basé sur le concept de cycle de vie est présenté par le Département du Commerce des États Unis (1983; cité par Paquette, 1990:6). Cette procédure du développement compte cinq phases (figure 2). Boutin (1988) a décrit ainsi chaque phase:

- *Analyse préliminaire:* étape ayant pour but (1) la compréhension du problème et (2) la description des activités, des données, des flux d'information, des relations et des contraintes entourant le problème. Le résultat typique de cette phase est une définition des besoins.
- *Spécifications fonctionnelles:* processus par lequel on passe de l'énoncé des besoins à la description des fonctions qui devront être accomplies par le système; il s'agit de la définition "externe" du système, c'est-à-dire de la définition des fonctions à réaliser et non de la description détaillée du fonctionnement interne du système.
- *Conception détaillée:* processus par lequel on élabore la structure et la description détaillée interne du système afin de satisfaire aux spécifications de l'étape précédente. Les résultats

sont une description (1) de la structure du système, soit la structure générale du logiciel à développer), (2) de l'architecture des composantes du système (l'agencement des différentes composantes), (3) des algorithmes à utiliser, et (4) de la structure logique des données. Paquette (1990:6) ajoute, "pour être complète, cette définition devrait comprendre également les aspects non informatisés".

- *Implantation*: production des programmes informatiques (version codée) réalisant les fonctions spécifiées dans les étapes précédentes. D'après Paquette (1990:6), on doit inclure dans cette définition les aspects organisationnels, le personnel, l'aménagement des locaux de travail et autres.
- *Évolution*: phase couvrant toutes les modifications (réparations, adaptation à de nouvelles conditions, ajout de nouvelles fonctions), qui seront apportées au système dans la version actuelle du système" (p.6-7).

Paquette (1990:7) rappelle l'existence d'une sixième phase qui n'est toutefois pas considérée comme telle parce-qu'elle est intégrée dans toutes les autres. C'est la phase de *validation*, processus par lequel on s'assure que le résultat de chaque phase rencontre les critères de qualité voulus et représente une transformation précise de la phase précédente.

Plusieurs autres références évaluent les procédures pour le développement des SIRS (Martin, 1989; Beaulieu et al., 1990; Ollé et al., 1991; Bédard et Larrivée, 1992; Bédard, 1993; Aronoff, 1991; Burrough, 1986; Clarke, 1991; Goodchild et al., 1994; Thériault, 1994).

Aronoff (1991:248-49) fait ressortir l'aspect politique et organisationnel des SIRS. D'après lui, les causes d'échec des SIRS sont, le plus souvent, des problèmes organisationnels et non pas des problèmes techniques. Lors de la réalisation d'un SIRS, la technologie et les gens se rencontrent dans un processus politique à l'intérieur de l'organisation. Plusieurs transformations et disputes accompagnent l'adoption formelle du SIRS au sein de l'institution.

Cet auteur considère six étapes lors de l'adoption d'un SIRS : prise de conscience de la technologie; précision des besoins du système; évaluation du système; développement d'un plan d'élaboration; acquisition du logiciel et implantation; mise en opération.

Clarke (1991; dans Maguire et al., 1991:477-88) présente un modèle général, assez détaillé, pour la conception et le développement d'un SIRS. Nous le présentons de façon schématique:

1. ANALYSE DES BESOINS	2. SPECIFICATION DES BESOINS	3. EVALUATION DES ALTERNATIVES	4. IMPLANTATION DU SYSTÈME
1.1 Définition des objectifs	2.1 Conception finale	3.1 Créer une liste des systèmes adéquats	4.1 Plan d'implantation
1.2 Analyse des besoins des utilisateurs	2.2 Appel d'offres	3.2 Essai de performance	4.2 Contrat
1.3 Conception préliminaire		3.3 Évaluation coût-efficacité	4.3 Essai d'acceptation
1.4 Analyse coût-bénéfice			4.4 Implantation
1.5 Étude pilote			

Goodchild et al., (1994) ont édité une version française du "Core Curriculum in GIS du NCGIA". Les chapitres 27 à 35 de ce travail révisent de façon assez détaillée les différentes étapes du développement d'un SIRS.

Un aspect très intéressant, discuté au chapitre 35 de Goodchild *et.al.* (1994), est la place du SIRS dans l'organigramme institutionnel. Cette localisation peut être: 1) le département d'opération; 2) le département de support; 3) le niveau exécutif. Chacune des options a ses avantages et ses inconvénients.

Enfin, nous mentionnerons le travail de Thériault (1994), qui propose le développement des SIRS corporatifs par une *démarche progressive* permettant d'évaluer les implications de chaque phase du projet et de minimiser les risques reliés à l'incertitude technologique. Sept phases composent cette démarche (Thériault, 1994; Flagg, 1993). Thériault (1994:123) les définit comme suit:

- *L'étude d'opportunité* permet de décider de la pertinence du projet, de préciser les champs d'activité concernés et d'identifier les orientations stratégiques disponibles.
- *L'étude de faisabilité* permet de vérifier la rentabilité du système, de définir ses composantes, de préciser les orientations stratégiques, d'élaborer un scénario d'implantation et de préciser les impacts du SIRS pour l'organisation.
- *L'architecture et la modélisation* du système permettent de définir le mode de fonctionnement global du SIRS, d'impliquer les utilisateurs dans l'approbation des composantes du système et de spécifier l'ensemble des règles qui régissent leur fonctionnement.
- *L'analyse fonctionnelle* permet de décrire en détail tous les aspects d'une livraison tels qu'ils sont perceptibles par les utilisateurs, de valider la définition et le rôle des unités de traitement et de donner aux développeurs toutes les indications requises pour entreprendre la réalisation.
- *La réalisation technique* permet d'assembler les appareils, de réaliser les composantes logicielles, d'entreprendre la saisie de données et de rédiger les guides d'opérations requis pour une livraison.
- *L'implantation* permet d'effectuer les vérifications techniques de performance et de fiabilité pour valider le comportement de chaque livraison dans le système. De même, elle permet de réaliser l'intégration dans le SIRS, de dispenser la formation nécessaire pour initier les utilisateurs à l'usage des nouvelles fonctions et, éventuellement, d'effectuer les corrections ergonomiques requises pour améliorer le dialogue entre le système et les utilisateurs.
- *L'exploitation et l'entretien* du système permettent d'utiliser le système pour accomplir les opérations de gestion et de production visées par l'ensemble des fonctions complétées, de perfectionner les mécanismes de sécurité, de poursuivre la saisie et la validation des

données, d'effectuer les contrôles de qualité et de suggérer des modifications ou des ajouts dans le système.

5.1.2 Modélisation des données et modélisation des traitements

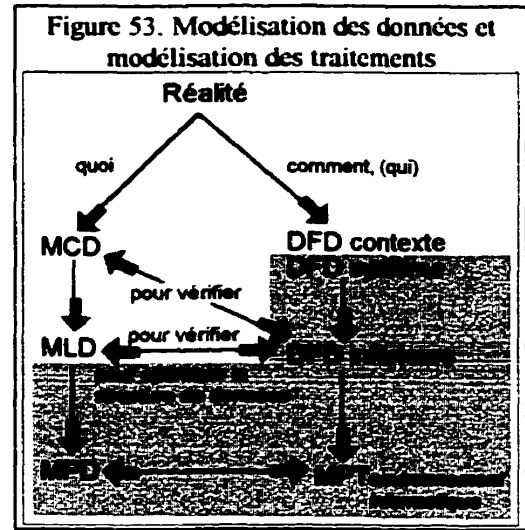
Quelle que soit la démarche suivie pour le développement du SIRS, deux des phases essentielles sont celles de la modélisation des données et de la modélisation des traitements.

D'après Bédard (1994, section 3, page 2), dans le contexte de la modélisation, une *donnée* peut être définie comme *le contenu d'une base de données*, tandis qu'un *traitement* serait *ce que l'on fait avec le contenu*.

La modélisation des données est basée sur les travaux de Merise (voir 5.1.1) et, dans les SIRS, elle ne s'est développée que durant les dix dernières années. En général, la modélisation de données consiste à identifier et décrire les données requises ainsi que leurs relations par rapport à une réalité et selon un but déterminé. On distingue trois niveaux dans l'approche de modélisation des données: la *modélisation conceptuelle des données* (MCD), la *modélisation logique des données* (MLD) et la *modélisation physique des données* (MPD). Nous discutons seulement les deux premières.

La modélisation des données est complémentaire de la modélisation des traitements. Celle-ci est une approche plus ancienne mais aussi la plus utilisée dans les SIRS. Le concept de *modélisation cartographique* (Tomlin, 1991) et le concept d'*algèbre des cartes* (Tomlin, 1983) se rapportent à l'approche "modélisation des traitements". En général, la modélisation des traitements consiste à décrire les flux des données dans le système, ainsi que les traitements et la transformation des données dans le contexte d'une application. On distingue quatre niveaux dans la modélisation des traitements: le *diagramme du flux de données du contexte* (DFDC), le *diagramme du flux de données du système* (DFDS), le *diagramme du flux de données inférieurs* (DFDI), et le *modèle physique des traitements* (MPT). Nous dirons un mot seulement du système DFDC ainsi que des aspects très partiels du DFDI.

Bédard (1994, section 3, page 4) présente un schéma montrant les liens entre la modélisation des données et la modélisation des traitements (fig. 53). Nous y indiquons les aspects traités dans cette recherche (carré éclairci). En réalité, il n'y a pas d'opposition entre ces deux approches, mais plutôt une forte complémentarité. Le départ doit être toujours l'identification des besoins d'information de l'organisation, des données utilisées et souhaitables, des sources des données, des procédures de transfert et des traitements de transformation visant à obtenir l'information requise.



Deux concepts complémentaires à la modélisation aux données et des traitements doivent être mentionnés ici: le *dictionnaire des données* (qui complète le MCD via une définition claire de chaque entité et la description de leurs attributs), et la *matrice des flux* (tableau décrivant tous les échanges entre les intervenants du projet, incluant les intervenants extérieurs du SI).

5.1.3 Les niveaux de la modélisation

La modélisation des données ou des traitements va, le plus souvent, du général au particulier; d'une approche indépendante de la technologie informatique et logicielle choisie à l'implantation dans un appareillage particulier. Nous discuterons ces niveaux qui présentent un intérêt pour la présente recherche.

Le Modèle Conceptuel des Données (MCD)

Bédard (1994, sect. 3, p.5) résume les caractéristiques du MCD. "Il s'agit d'une représentation de la réalité en fonction d'un but visé. Il est indépendant du type de technologie qui sera utilisé lors de l'implantation du SIRS et il n'est pas optimisé du point de vue de la

performance des traitements. Ce modèle est avant tout un outil de dialogue entre le concepteur et les divers intervenants d'un projet. Il est construit à partir d'un langage rigoureux et très restreint qui se veut intuitif et facile à comprendre. Il n'inclut pas de contraintes techniques qui alourdiraient la lecture du modèle.

Le modèle logique des données

C'est un modèle intermédiaire entre le MCD et le MPD. Il s'agit de la traduction et de l'optimisation du MCD en fonction d'une technologie particulière, l'optimisation devant tenir compte des principaux traitements requis, des points forts et des faiblesses d'un type de logiciel et d'une structure de données particulière (SGBD relationnel, SIG orienté-objet), ainsi que de l'architecture informatique de l'organisation. Il s'agit d'un guide pour l'implantation informatique du SIRS. (Bédard, 1994; sec.3, p.7).

Le diagramme du flux des données du contexte

En général, Le DFD est une représentation globale du flux de données dans l'organisation. Le DFD du contexte est le niveau le plus haut dans la modélisation du flux des données et met l'accent sur la participation des entités externes qui apportent ou utilisent les données du SIRS et sur la nature des flux représentés. À ce niveau, on n'identifie que le ou les processus fondamentaux sans spécification des traitements ni des procédures requises.

5.1.4 Les formalismes utilisés

Un *formalisme* est un *langage* formel, volontairement restreint en fonction d'un but précis de modélisation (Bédard, 1994; sec.1, p.5). Pour la modélisation dans les SIRS, on utilise des formalismes graphiques qui ont un grand pouvoir de communication autant pour le concepteur que pour les autres intervenants.

Le formalisme individuel étendu pour le MCD

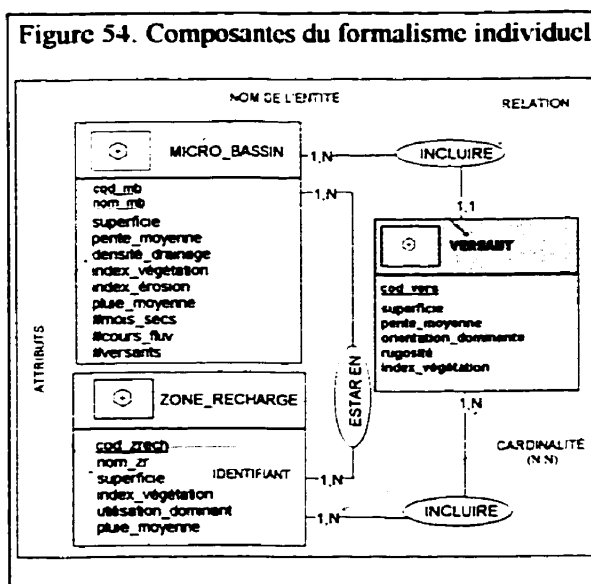
Pour la modélisation des données, nous utiliserons le *formalisme Modul-R*; celui-ci constitue une adaptation du *formalisme individuel* aux besoins de modélisation des données à référence spatiale. Il a été proposé par Bédard et autres (sans date, d'après Bédard, 1994; sec.5). À son tour, le *formalisme individuel* est une variante du formalisme *Entité-Relation* qui a été développée en France par les concepteurs de la méthode MERISE.

Nous allons maintenant décrire les composantes du formalisme individuel ainsi que leur extension, faite dans Modul-R, pour le traitement de la *référence spatiale*. Nous ne traiterons pas la *référence temporelle* qui, elle aussi, a été incorporée dans les travaux de Bédard et ses collaborateurs. Ceci déborderait les besoins de la présente recherche.

Les entités ou individus: tout objet, personne, concept ou événement de la réalité sur lequel on veut de l'information; graphiquement, l'entité est représentée par un rectangle contenant le nom unique de l'entité en lettres majuscules (fig. 54).

Les attributs ou propriétés: les caractéristiques d'une entité ou d'une relation qui nous intéressent en fonction du but de l'application. Un type particulier d'attribut est l'identifiant, lequel est unique (ou presque) pour chaque instance d'une classe d'entité. Lorsque l'identification n'est pas unique mais qu'elle dépend de l'identifiant d'une autre entité, on parle de dépendance fonctionnelle. Les attributs sont représentés dans

un autre rectangle (collé en bas du précédent) et en lettres minuscules. Si l'attribut est aussi l'identifiant -c'est-à-dire le champ clé- il doit être souligné (fig. 54).



Les relations: ce sont les associations entre les entités. Elles sont représentées par des ellipses à l'intérieur desquelles se situe le nom de la relation en majuscule et ses attributs en minuscules, s'il y a lieu.

Les cardinalités: les nombres minimum et maximum de fois qu'une relation peut se produire entre les occurrences de deux entités. En réalité, chaque relation contient deux associations, une dans chaque direction de la relation (fig. 54). Cependant, la cardinalité totale d'une relation est obtenue à l'aide des maxima des deux associations. Bien que la cardinalité totale ne soit pas représentée graphiquement, elle est très importante pour la construction du MLD dont elle détermine la structure.

Un autre aspect remarquable du formalisme individuel est qu'il accepte l'existence de deux ou de plusieurs relations de natures différentes entre deux entités.

Enfin, signalons que l'extension du formalisme individuel réalisée par Bédard et ses collaborateurs permet de placer à l'intérieur du rectangle de l'entité un symbole graphique (point, ligne ou polygone) permettant de décrire la forme géométrique des entités spatiales. Ceci permet d'énoncer les besoins des usagers quant à la symbolisation graphique des objets et facilite la traduction du MCD vers le niveau logique (MLD).

Le formalisme et la représentation du MLD

Au niveau du Modèle Logique de Données, on n'utilise pas d'expression picturale, mais plutôt une description textuelle abrégée (fig. 55). On y place d'abord le nom de l'entité ou relation en majuscule; par la suite, on place entre parenthèses les noms des attributs en minuscules. L'identifiant doit apparaître en premier et souligné; ensuite, on décrit tous les autres attributs et, enfin, on écrit les noms des attributs-identifiants d'autres entités avec lesquelles il y a des relations prévues. Ceux-ci doivent aussi être soulignés.

Fig.55 Exemple du modèle logique de données (MLD) pour les trois entités de la figure précédente

MICRO_BASSIN (cod-mb, nom, superficie, pente_moyenne, densité_drainage, index_végétation, index_érosion, pluie_moyenne, #mois_secs, #cours_fluv, #versants)
 VERSANT (cod-vers, superficie, pente_moyenne, orientation_dominante, rugosité, index_végétation, cod-mb, nom_mb)
 ZONE_RECHARGE (cod-zrech, nomzr, superficie, index_végétation, utilisation_dominante, pluie_moyenne)
 MICRO_BASSIN-ZONE_RECHARGE (cod-mb, nom-mb, cod-zrech)
 ZONE_RECHARGE-VERSANT (cod-zrech, cod-vers)

Pour la traduction du MCD dans un MLD et de celui-ci dans une base de données, on doit tenir compte des contraintes du mode de gestion des données. Dans une structure de type relationnelle (la plus utilisée pour la gestion des données attributs dans les SIG actuels), on observera les règles suivantes (Bédard, 1994; sec.9, p.3).

- a. Chaque entité se traduit dans au moins une *table* relationnelle.
- b. L'identifiant se convertit dans la *clé d'accès*.
- c. Chaque attribut devient une *colonne* de la table.
- d. Si la cardinalité totale de la relation est 1:1, on doit déplacer une table sur l'autre (c'est-à-dire, on doit unifier les tableaux). On peut cependant décider de les garder séparées pour éviter la croissance disproportionnée d'une table (nombre d'attributs)
- e. Si la cardinalité totale est 1:N, on doit ajouter l'identifiant de l'entité père dans l'entité fils. L'entité père est celle qui comporte la magnitude N de la relation.
- f. Si la cardinalité totale est N:N, on doit créer les deux tables d'entités plus une nouvelle table (entité-relation-entité) laquelle doit contenir, en principe, les identifiants des deux entités originelles dans toutes les combinaisons existantes (fig.56). Si la relation inclut en plus des attributs spécifiques, ceux-ci peuvent s'ajouter dans cette nouvelle table.
- g. Les cardinalités à magnitude fixe, par exemple 3:5 seront traitées comme dans le cas précédent.

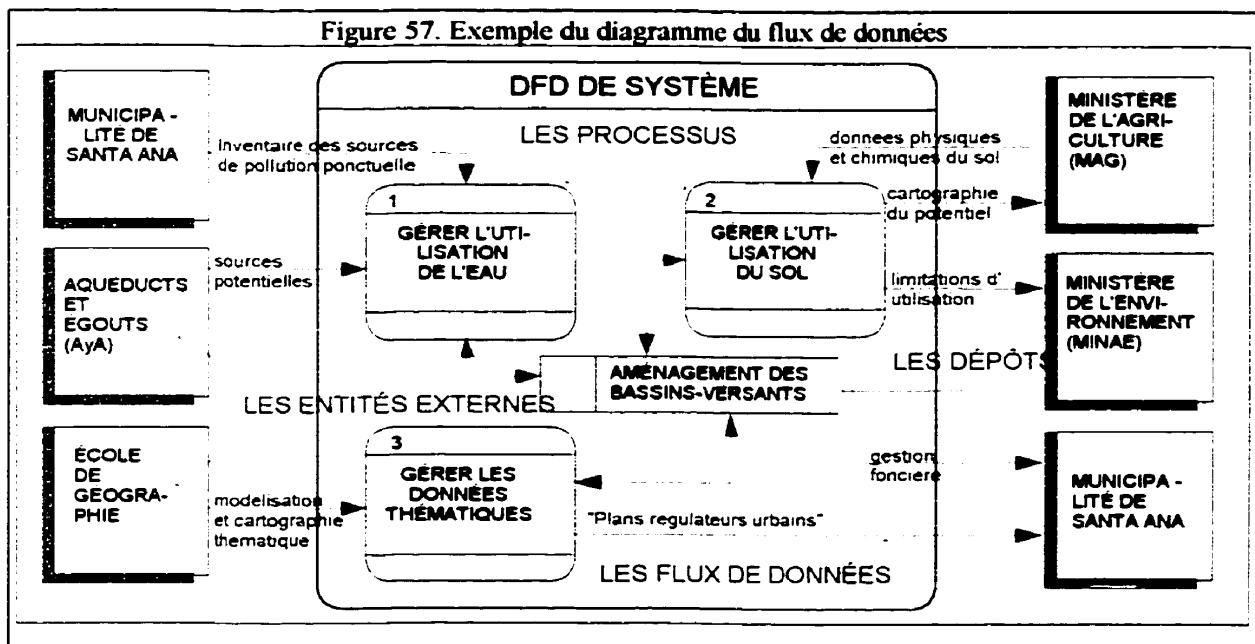
Figure 56. Exemple de traduction du MLD en tables relationnelles

ZONE RECHARGE			ZONE RECH.-VERS..		VERSANT		
cod zr	nom zr	superficie	cod zr	cod vers	cod vers	Superficie	pente moy..
101	Piedades		101	557	557		10
102	salitral		101	578	558		13

Les formalités des diagrammes du flux de données

Pour la modélisation des traitements, nous allons utiliser le formalisme du diagramme de flux des données de Gane et Sarson (1979) présenté par Paquette (1990). Dans ce langage, on distingue des *entités externes*, des *procédures* et des *dépôts de données*.

L'entité externe: personne ou organisation externe au SIRS qui saisit et lui achemine des données ou qui utilise celles produites par le SIRS. Elle est représentée par un carré avec fond ombragé pour l'identifier clairement des autres éléments du diagramme. On place les entités externes qui transmettent des données à gauche du DFD et ceux qui reçoivent de l'information à droite du DFD. Lorsqu'une entité externe est reliée à plus d'une ligne d'échange de données, celle-ci peut être répétée dans le diagramme pour éviter des croisements de lignes relationnelles établies entre les fonctions du diagramme mentionné. L'indication qu'une entité se répète se manifeste par le tracé d'une diagonale dans le coin inférieur droit du carré. (fig. 57).



Le flux de données: envoi des données d'une entité à une autre. Le flux de données est indiqué par une flèche, préférentiellement horizontale ou verticale, avec la tête de la flèche indiquant la direction du flux. Une description de la nature du flux de données est indiquée sur la flèche.

Les procédures: la procédure décrit le traitement de l'information. Elle est représentée par un rectangle aux coins arrondis et au haut duquel son numéro peut être indiqué. La description de la procédure est inscrite au milieu du rectangle. Nous utiliserons de la couleur pour les bords du carré, lorsque la procédure n'a pas été détaillée dans la création d'un DFD du niveau supérieur.

Les dépôts: c'est l'endroit où l'information est enregistrée. Le dépôt est identifié par deux lignes parallèles fermées à une extrémité.

“Les DFD permettent de travailler par niveaux d'abstraction, allant du général au particulier. Chaque action peut ainsi être “explosée”, ou explicitée plus en détail dans un autre DFD qui lui est propre, pour ensuite devenir son propre diagramme. Les actions d'un niveau inférieur sont référencées au niveau supérieur par leur numéro respectif. Ainsi, si la fonction 5 est “explosée”, les “sous-fonctions” seront alors 5.1, 5.2, 5.3, etc., et si un troisième niveau s'avère nécessaire, la numérotation sera sous la forme 5.1.1, 5.1.2 et ainsi de suite” (Paquette, 1990:58-59).

5.1.5 Autres règles à considérer

En mode relationnel, afin d'éliminer la redondance des données, le MCD doit respecter quatre formes normales appelées les *formes normales de Codd*.

La première forme normale est connue comme *l'élémentarité des propriétés* et signale que *“tous les attributs doivent être élémentaires (significatifs et indivisibles) par rapport aux besoins du client”* (Bédard, 1994; sec.7, p.2).

La deuxième forme normale, dit de la *dépendance pleine de l'identifiant* indique *“qu'il ne doit pas y avoir de valeurs d'attributs qui ne dépendent de l'occurrence de l'entité pour laquelle elles sont attribuées, c'est-à-dire, qui soient automatiquement les mêmes pour quelques occurrences différentes”* (Bédard, 1994; sec.7, p.3).

La *dépendance transitive* est la troisième forme normale. “Si un attribut C dépend de l’attribut A par le biais de l’attribut B, ceci n’est pas conforme à la troisième forme normale” (Bédard, 1994; sec.7, p.4).

La quatrième est connue comme la *forme normale de Boyce-Codd* et dit: “Si, pour un identifiant composé de plusieurs attributs, un de ces attributs dépend directement d’une propriété qui n’est pas l’identifiant, la forme normale de Boyce-Codd n’est pas respectée”.

Les MCD étant des outils de communication graphique, les changements du niveau d’abstraction sont souvent voulus et nécessaires. Ceci permet de créer plusieurs vues aidant à la compréhension du sujet modélisé. Dans le niveau de simplification le plus élevé, on parle d’une vue au *niveau sommaire*; puis on a des représentations au *niveau des thèmes* et au *niveau détaillé*. La symbolisation pour chaque objet graphique du MCD change d’après le niveau de la présentation. Aussi, il y a une sélection des composantes sémantiques particulières à inclure dans le graphique, selon que la vue est au niveau sommaire, des thèmes ou détaillée.

Bédard (1994; sec.5, p.32-33) signale les deux principales approches suivies pour aboutir à des représentations graphiques simples et compréhensives du MCD. Il s’agit de l’approche de *généralisation* et de l’approche de *simplification*. La généralisation “regroupe des entités avec des caractéristiques communes et la super-entité résultante est virtuelle” (Bédard, 1994; sec.5, p.32). La spécialisation “illustre les entités spécialisées en relation avec une entité plus générale. La super-entité résultante est réelle” (Bédard, 1994; sec.5, p.33). Une dizaine de règles particulières pour la généralisation et neuf règles pour la simplification ont été signalées par Bédard (1994; sec.5, p.34-44).

5.1.6 Choix d’une méthode

Comme nous l’avons exprimé au chapitre 1, nous avons décidé d’utiliser la méthode du *prototypage évolutif* pour le développement du SIRS. Cette méthode est discutée par Paquette (1990) et Doucet et al. (dans Bédard, 1994, article 7). Elle constitue une approche moins

formelle du développement des SI dans laquelle on utilise un *prototype* pour s'approcher, par un processus itératif, des besoins des utilisateurs.

Deux critères pertinents pour le choix de la méthode de développement du SI sont leurs degrés d'*incertitude* et de *complexité* (Burns et Dennis, 1985). L'utilisation d'un prototype est conseillée pour les projets de SIRS ayant un degré d'incertitude élevé (Doucet *et.al.*, 1994; Paquette, 1990). Cependant, lorsque la complexité croît, on doit accorder plus d'importance à certaines exigences propres aux grands projets. Ceci parce que le prototypage "*ne fournit pas d'outil de prise de décision stratégique et tactique, il n'établit pas d'objectif à atteindre, ni d'échéancier, ni de produits à livrer; il est donc difficile à gérer et à contrôler*" (Paquette, 1990: 17).

D'après nous, le projet de SIRS que nous avons abordé est complexe et, en même temps, source de beaucoup d'incertitude. Ceci permet d'utiliser le prototypage mais oblige à établir des normes de développement du SI assez rigoureuses. Dans notre recherche, cependant, nous nous sommes limités au développement d'un prototype, ce qui s'explique pour diverses raisons.

1. L'auteur n'essaie pas de concevoir et de développer au complet le projet du SIRS, mais plutôt de montrer son potentiel ainsi que certains aspects de la procédure de développement.
2. L'auteur ne fait pas partie des institutions directement concernées par l'utilisation et la gestion des bassins-versants.
3. L'auteur n'était pas dans le pays de l'application au début de la recherche.
4. L'intérêt de l'auteur est de donner un aperçu organisationnel minimum pour stimuler un esprit de collaboration entre les institutions concernées par les bassins-versants.
5. L'auteur essaie de montrer la puissance du MCD pour faciliter la communication et la discussion inter-institutionnelle.
6. Le degré d'implication des institutions dans ce travail a été assez faible, quoique cette situation se soit améliorée de plus en plus lorsque le travail de modélisation fait par l'auteur a été connu.

7. Les institutions avaient déjà des SIRS. Bien que leur opérationnalité puisse être remise en question, leur existence laisse de côté certains aspects de la méthode traditionnelle et oblige à l'adaptation d'autres méthodes.
8. Toutes les institutions, notamment l'ICE et le SNE -Département des Eaux-, souffrent d'un processus de restructuration impropre au développement d'un projet de SIRS formel. Au contraire, le prototypage et, notamment la modélisation conceptuelle de données, a contribué à éclaircir les besoins d'interrelation avec les autres institutions du pays.

5.2 Conception générale du SIRS

Nous allons présenter ici les principaux résultats de la phase de *conception* du SIRS. Nous présenterons dans le chapitre sept un exercice d'*application* du prototype élaboré. La phase d'implantation du système ne sera pas développée ici, parce qu'elle n'est pas encore terminée, et parce que ce n'est pas un objectif défini dans le cadre de cette recherche.

Nous envisageons, cependant, une première implantation à l'école de géographie de l'Université de Costa Rica (évident), et une deuxième implantation à l'ICE, institution qui montre beaucoup d'intérêt dans les applications de SIRS pour la gestion de bassins-versants.

Il faut dire que l'établissement de liens entre les institutions concernées dans la gestion des bassins-versants, à travers l'implantation des SIRS, arrivera à bon terme uniquement s'il existe une volonté gouvernementale pour bien gérer les bassins-versant. Seule la poursuite ou la reprise du travail que nous proposons jusqu'à son adoption intégrale au sein des institutions, ou encore la définition et la réalisation d'un nouveau projet de SIRS multi-institutionnel orienté vers les bassins-versants, serait considérée, selon notre perception, comme une *implantation* du SIRS conceptualisé.

5.2.1 La proposition d'un schéma directeur

Nous avons adopté le concept de la méthode Merise. La proposition d'un schéma directeur est la première phase de cette méthode et doit définir "*une stratégie de l'organisation relative aux besoins en ressources humaines, en matériel informatique, quincailleries et logiciels*" (Paquette, 1990:23). L'objectif du schéma directeur est d'établir le pont entre les objectifs stratégiques de l'organisation et leurs besoins en produits d'information.

L'organisation.

La gestion et l'aménagement des bassins-versants au Costa Rica requiert un encadrement multi-institutionnel que nous avons appelé (dans le langage de Merise) *l'organisation*. La tâche première de cette *organisation* ne sera pas la création du SIRS que nous proposons, mais plutôt une ré-interprétation de la problématique de l'aménagement du territoire, du rôle des bassins-versants et des composantes juridiques et institutionnelles concernées. Dans les chapitres deux et trois de cette recherche, on a essayé d'éclaircir le sujet qui pourrait servir de base à une discussion beaucoup plus élaborée.

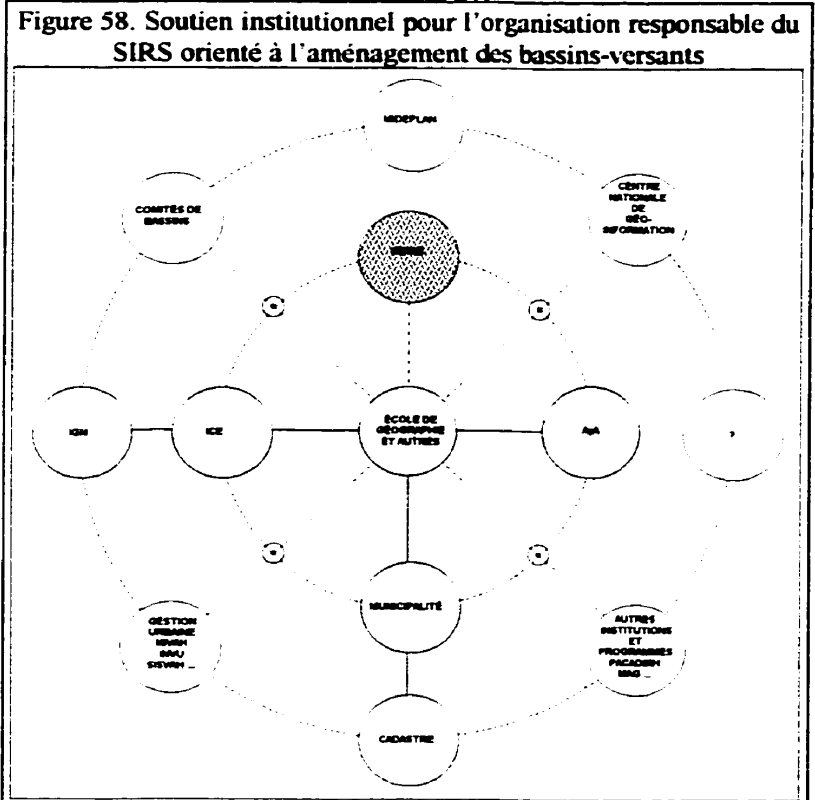
Si *l'organisation* n'existe pas encore, il y a quand même une structure institutionnelle suffisante pour la développer. Notre travail consistera donc à proposer une structure pour cette *organisation* en lui assignant quelques objectifs de base.

Sur la figure 58, nous montrons un aperçu du schéma conceptuel de l'organisation, ayant pour but la gestion des bassins-versants, gestion qui serait appuyée par un SIRS complètement fonctionnel. Bien qu'on montre ici seulement quelques liens existants (en trait rouge), des liens en développement (en traits bleus) et des liens souhaitables (en traits noirs), des interactions directes peuvent s'établir entre n'importe lesquelles des institutions participantes.

La fonction de *l'École de Géographie* et d'autres centres d'enseignement et de recherche intéressés aux SIRS et/ou à l'aménagement du territoire serait de collaborer dans la

conceptualisation et le développement d'applications SIRS/aménagement des bassins-versants. La place centrale que nous lui avons accordé veut juste illustrer sa participation dans l'aspect *conceptualisation*, qui est en soi la base de toute application de SIRS. Toutefois, ce n'est pas à nous de jouer un rôle de protagoniste ni dans la définition des besoins et d'objectifs, ni dans la gestion sinon dans leur interprétation et la traduction au format du SIRS.

Dans des cercles verts, on a souligné les institutions avec lesquelles nous avons été en rapport lors du développement de cette recherche. Pour des raisons de temps, le lien avec le MINAE / Département des Eaux a été mineur. Un des buts de l'élaboration du MCD a été d'établir, de montrer et de discuter le lien conceptuel entre ces cinq institutions dans le contexte de la gestion des bassins-versants. Au delà de la thèse, il y a l'objectif non déclaré de contribuer à créer un pont physique entre ces cinq institutions. Ceci définirait un noyau solide qui aurait la responsabilité d'attirer les autres institutions et organisations concernées par les bassins-versants et par l'aménagement du territoire en général.



Un premier avis que nous transmettrions à cette *organisation* et la raison pour laquelle nous proposons une structure non hiérarchique est le sentiment que l'intégration doit être *horizontale*. Une fois discutées les compétences et les responsabilités de chaque institution, l'*organisation* pourra se doter d'une superstructure coordinatrice par une désignation de

consensus. De la même façon, elle pourra s'intégrer dans d'autres instances gouvernementales et internationales, ce qui semblerait pertinent et avantageux.

Quant au lien physique que nous avons mentionné, il nous semble que les aspects fondamentaux à régler se rapportent à la définition claire des besoins d'informations concomitantes et à l'établissements des règles, des responsabilités spécifiques, des normes, des échéanciers et des procédures pour les échanges de données. Tout ceci n'a presque pas été discuté ni par ni entre les institutions du Costa Rica.

Les objectifs

Si l'*organisation* inclut autant d'institutions que celles prévues, l'apparition d'intérêts très divers peut s'envisager. Cependant, l'*organisation* étant créée pour la gestion et l'aménagement des bassins-versants, les objectifs doivent au moins rencontrer ces deux objectifs. Nous les précisons donc comme suit:

1. Concevoir, développer et mettre en utilisation un SIRS orienté vers les aspects opérationnels de la gestion et de l'administration des bassins-versants.
2. Discuter et préciser les compétences et les responsabilités de chaque institution associée par rapport au SIRS et par rapport aux processus de gestion et d'administration des ressources et des actions qui se développent à l'intérieur de chaque bassin-versant.
3. Doter le SIRS d'une structure flexible capable de répondre aux besoins de planification et d'aménagement territorial, notamment en ce qui concerne l'aménagement des bassins-versants.

Évidemment, une fois le pont relationnel établi, d'autres applications du SIRS peuvent être modélisées pour répondre aux besoins particuliers d'une institution ou d'un sous-ensemble des institutions faisant partie de l'*organisation*.

Dans le contexte de cette recherche, nous ne pouvons répondre complètement aux attentes d'une telle *organisation*, qui vise à la gestion et à l'aménagement des bassins-versants. Nous nous contentons donc de donner un aperçu général des aspects conceptuels concernés et de créer un petit essai d'application à titre démonstratif.

Les ressources

En ce qui concerne les *ressources humaines*, nous ne pouvons mentionner les personnes qui pourraient faire partie de l'*organisation* que nous sommes en train de proposer. Cependant, nous pouvons citer celles que nous avons contacté lors du développement de la recherche et en plus, nous pouvons aussi mentionner quelques départements des institutions qui sont particulièrement touchés par le sujet de notre recherche. Ceci est résumé dans la tableau 2.

Tableau 2. Personnel et institutions contactés lors du développement de la recherche

PERSONNE	DÉPARTEMENT	INSTITUTION
Géog. Gerardo Ramirez V. ¹	Bassins-Versants	AyA
Ing. Javier Saborio ²	Énergie et Environnement	ICE
Géog. Alvaro Porras ³	Eaux	MINAE
Téch. Florentino Alvarado ⁴	Cadastre	MUNICIPALITE, STA.ANA
Géog. Rafael Arce M. ⁵	École de Géographie	UNIVERSITÉ DE C.RICA
	Sols	MAG
	Environnement	SINAC/MINAE
	Hydrologie	ICE
	Prévention et mitigation	CNE
	Planification Urbaine	INVU
	Météorologie	IMN
	Cartographie de base	IGN
	Cadastre	Registre National

¹ G. Ramirez. Géographe. Chef du département de Bassins-versant. AyA.

² J. Saborio. Ingénieur. Spécialiste en SIG. Chargé du SIRS au Département d'Énergie et Environnement. ICE.

³ A. Porras. Géographe. Département des Eaux. Service National d'Électricité. Maintenant au Ministère de l'Environnement (MINA).

⁴ F. Alvarado. Technicien. Opérateur du SIT. Municipalité de Santa Ana.

⁵ R. Arce. Géographe. Université de Costa Rica. Candidat au doctorat. Université Laval. Proposeur du projet de SIRS.

	Planification	MIDEPLAN
	Eaux souterraines	SENARA
Autres	Autres	Autres

Note: Le * signale la personne responsable qui a collaboré dans ce projet. Le ** est le proposeur du projet.

Quant aux *ressources logicielles et aux outils*, nous allons exprimer quelques idées, mais il s'agit d'un sujet à développer dès le début du processus d'adoption et d'implantation du projet au sein de l'*organisation*, soit de l'ensemble des institutions concernées.

L'application *prototype* que nous avons créée pour cette thèse s'est développée initialement dans l'environnement informatique DOS, mais a évolué très positivement vers l'environnement WINDOWS durant la dernière phase. Durant tout le parcours, nous avons utilisé des plateformes PC (*personal computers*).

Les principales ressources de logiciel utilisées sont MapInfo⁶ (versions 2 à 4), Idrisi⁷ (version 4 pour DOS et version 1 et 2 pour Windows) et Surfer⁸ (version 4 pour DOS et versions 5 et 6 pour Windows). D'autres programmes ont servi à des tâches particulières: AutoCad⁹ (versions 10 à 12 pour DOS), DBase¹⁰ (version 4 pour DOS et version 5 pour Windows), GeoEas¹¹ (version 1.1 pour DOS), VarioWin¹² (version 2.2 pour Windows), DVP¹³ (version 3.4 pour DOS), R2V¹⁴ (version 2.1 pour Windows).

⁶ MapInfo Corporation. Troy. New York.

⁷ The Idrisi Project. Clark University. Worcester. Massachusetts.

⁸ Golden Software Inc.. Golden. Colorado.

⁹ AutoDesk. USA.

¹⁰ Borland International Inc.. USA.

¹¹ Englund. J.A. (1992) *GeoEas*. The Environmental Protection Agency (EPA), Las Vegas. USA.

¹² Pannatier. Y. (1996) "VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D". Springer-Verlag.

¹³ Les Systèmes Géomatiques DVP Inc. Charny. Québec. Canada.

¹⁴ Able Software Co.(1995). R2V for Windows and NT. Lexington. Massachusetts. USA.

La plupart de ces logiciels étaient disponibles au Département de Géographie de l'Université Laval. Cependant, l'auteur en a acquis quelques-uns à son retour au Costa Rica, où il a finalisé la recherche. La majeure partie du travail a été réalisée principalement avec MapInfo, Surfer et Idrisi. Les coûts commerciaux de cet ensemble sont d'environ 2700 \$US. Bien que le coût du logiciel DVP, spécialisé pour la photogrammétrie, soit assez élevé: d'environ 15000 \$US, nous croyons qu'un *logiciel* de ce type est indispensable¹⁵ pour une mise en application du SIRS considéré.

Parmi les institutions concernées par le projet, la disponibilité de ressources en logiciels est assez hétéroclite. L'ICE est très bien équipé, avec des programmes tels que ArcInfo¹⁶, ArcView¹⁷, Idrisi, Erdas¹⁸, MapInfo, Surfer, AutoCad et InfoCad¹⁹. La municipalité de Santa Ana utilise le logiciel MicroStation²⁰ d'Intergraph, ainsi que le module MGE²¹ et le SGBD Informix²². Le département des bassins-versants d'AyA n'en utilise pas régulièrement, et ne possède pas de logiciels SIG. Ils ont cependant créé des cartes numériques dans le cadre des projets initiés par d'autres institutions. D'autres départements d'AyA comptent déjà et utilisent des logiciels de SIG, tels que l'InfoCad. Enfin, le département des Eaux du MINAE ne possède pas de logiciel de SIG ni d'expérience dans ce domaine. Ceci est particulièrement préoccupant, si l'on considère qu'il s'agit de l'institution responsable de l'administration des eaux au niveau du pays.

L'information requise

L'évaluation des besoins en produits d'information est faite sur la base de notre connaissance acquise à partir d'une enquête, d'entrevues, du travail conjoint, de la révision des documents

¹⁵ Ceci parce que la cartographie de base dans les pays non développés est très vieille et souvent à des échelles inadéquates.

¹⁶ Environmental Systems Research Institute, ESRI, Redlands, California, USA.

¹⁷ Environmental Systems Research Institute, ESRI, Redlands, California, USA.

¹⁸ ERDAS Inc., Georgia, USA.

¹⁹ Digital Matrix Services Inc., Miami, USA.

²⁰ Bentley Systems, Inc., Pennsylvania, USA.

²¹ Intergraph Corporation, Huntsville, Alabama, USA.

²² Informix Software Inc., Menlo Park, California, USA.

existants, et même de la expérience obtenue lors du travail quotidien où l'on rencontre des gens provenant de différentes institutions.

La présentation du sujet est faite ici de façon générale, ce qui correspond à la phase de définition d'un schéma directeur pour le projet de SIRS. Les besoins en produits d'information sont spécifiés d'après les catégories *gestion, planification ou aménagement, et gestion-planification*. Les données nécessaires pour atteindre les objectifs de *gestion* ont besoin d'une plus grande rigueur conceptuelle, ainsi que d'un support institutionnel et juridique mieux spécifié. Il en est de même pour la précision dans leur représentation cartographique. L'affirmation contraire est valable pour les données servant à gérer de l'information pour utilisation exclusive dans la planification ou l'aménagement. Voici la liste identifiée:

1. Information pour la *gestion* des ressources minières. Les données de base viendraient de la Direction Nationale de Géologie et Mines du MINAE et du Secrétariat Technique de l'Environnement (SETENA/MINAE). Les spécifications légales sont assez claires en matière minière et sont compilées dans le *Code des Mines et sa réglementation* (1993) (*Código de Minería y su Reglamento*, 1993). Le degré de contrôle actuel est, cependant, insuffisant. La gestion des données est faite de façon artisanale. Une thèse de maîtrise²³ en cours proposera un schéma conceptuel pour l'adoption des SIRS dans ces départements.
2. Information pour la *gestion-planification* dans l'utilisation de l'eau. L'institution en charge est le Département des Eaux du MINAE (auparavant, relié au Service National d'Électricité, SNE). Le fondement légal est défini dans la *Loi des Eaux* de 1942 (*Ley de Aguas* de 1942) et ses modifications en 1959, 1972 et 1974. Plusieurs exceptions limitent le pouvoir du Département des Eaux/MINAE. Ce sont, par exemple, les privilèges accordés à l'ICE et l'AyA, qui peuvent, en quelque sorte, contourner la demande du permis d'exploitation. Contradictoirement, l'ICE et l'AyA sont les deux plus grands concessionnaires de la ressource. Au-delà de ce fait, le Département des Eaux ne dispose pas de ressources économiques et organisationnelles pour entreprendre la planification des

²³ Arauz, J. (1998) (en développement).

eaux, alors que son rôle reste limité à la concession des permis d'exploitation à tous ceux qui ont satisfait les pré-requis minimums.

3. Information pour la *gestion* des zones protégées. L'administration des zones de protection est sous la responsabilité du SINAC/MINAE (SINAC pour *Sistema Nacional de Áreas de Conservación* -Système National des Aires pour la Conservation de la Nature-). Un des problèmes du SINAC est que les zones de protection sont souvent définies par la loi, mais l'expropriation peut prendre des années étant donné la limitation budgétaire pour ce type d'investissement. La loi forestière, la loi organique de l'environnement, la loi des parcs nationaux et la loi de la vie sylvestre (*Ley Forestal*, la *Ley Orgánica del Ambiente*, la *Ley de Parques Nacionales*, et la *Ley de la Vida Silvestre*) sont les outils légaux pour la gestion. De plus, dans les *Plans Régulateurs Urbains* des municipalités, on établit des zones de protection. Cependant, de telles déclarations ont un caractère légal controversé s'il n'y a pas d'indemnisation au préalable.
4. Information pour la *gestion-aménagement* des zones urbaines. Ceci se traduit souvent par un document, le plan régulateur urbain (el *Plan Regulator Urbano*) et par une carte du *plan d'utilisation du sol*. Ce document est la propriété de la municipalité et s'applique sur son territoire. La base légale pour son établissement est le Code Municipal et la loi de planification urbaine (*Código Municipal* et la *Ley de Planificación Urbana*). Il faut noter que la plupart des municipalités n'ont aucun moyen de suivre le développement physique et socio-économique sur leur territoire. Signalons aussi qu'un grand nombre de Plans Régulateurs sont faits sans consultation des plans établis par les municipalités voisines, de sorte que des contradictions risquent d'apparaître.
5. Information pour la *gestion-planification* en matière de développement rural intégré. Ceci est un autre mandat municipal. Sur le plan légal, il se base sur le Code Municipal (*Código Municipal*). Il est encore moins opérationnel que les Plans Régulateurs Urbains et, à ma connaissance, aucune stratégie pour le développement rural intégré n'a été élaborée de façon indépendante. Toutefois, les Plans Régulateurs Urbains couvrent souvent la totalité de la municipalité; donc, en théorie, on n'a plus besoin d'un plan particulier pour la zone rurale. Le soutien légal de ce type de document doit être renforcé.

6. Information pour la *gestion-planification* des ressources sols et paysages. Ceci est mentionné pour la première fois dans la Loi Organique de l'Environnement (*Ley Organica del Ambiente*). L'état est le responsable de la gestion de ces ressources. Aucune institution n'a été spécifiquement désignée pour l'administration de ces ressources. Des précisions concernant cette loi doivent être fournies ou obtenues.
7. Information pour la *gestion* des zones de risques sujettes aux désastres. L'institution responsable pour la définition de telles zones est la Commission Nationale d'Urgences (*Comisión Nacional de Emergencias -CNE-*). Son atlas municipal des zones menacées est cependant insuffisant. Un travail beaucoup plus élaboré doit être fait. Un système d'information pour les désastres naturels en Amérique Latine, qui porte le nom curieux de DESINVENTAR (désastres - inventaire) pourrait servir d'appui aux travaux de détail permettant de définir les zones soumises aux risques dus à des causes naturelles et industrielles. Les municipalités doivent inclure l'information des risques dans leurs Plans Régulateurs. Les Écoles de Géographie, de Géologie, d'Architecture et de Sociologie, entre autres, pourraient contribuer à la définition des zones à risque. La loi relative aux définitions des zones de risque doit être révisée.
8. Information pour la *gestion* des déchets. D'après le Code Municipal, les municipalités sont responsables d'assurer la gestion des déchets. Elles peuvent, cependant, retenir les services d'une entreprise privée à cet effet. Dans les municipalités urbaines de la Zone Métropolitaine, on a connu de nombreux problèmes concernant le traitement des déchets parce que toutes les municipalités ont refusé d'accepter les déchets provenant de la métropole de San José.
9. Information pour la *gestion-planification* en matière de pollution de l'environnement. Ce sujet étant complexe, plusieurs institutions sont impliquées: le Ministère de la Santé Publique (*Ministerio de Salud Pública -MSP-*), les municipalités et le MINAE. C'est toutefois la Division d'Assainissement de l'Environnement du MSP (*Division de Saneamiento Ambiental*) qui doit exercer le contrôle sur la pollution. Le fondement légal se trouve dans la Loi organique de l'environnement, la loi Générale de la Santé, le Code Municipal (la *Ley Organica del Ambiente*, la *Ley General de Salud*, le *Código Municipal*) et les lois qui définissent les attributions de certaines institutions du secteur. En pratique,

certain aspects ne font l'objet d'aucune surveillance; par exemple l'évacuation des eaux d'égouts directement aux rivières ou la pollution par des sources non ponctuelles.

10. Information pour la *gestion-planification* en matière d'utilisation du sol. Le MINAE et le Ministère de l'agriculture et de l'élevage (*Ministerio de Agricultura et Ganaderia -MAG-*) ont défini une "Méthodologie pour la Détermination de la Capacité d'Utilisation de la Terre au Costa Rica" (1991). Cette méthode a été officialisée dans le décret 20501 MAG-MIRENEM. Le MAG serait l'institution appelée à fournir les cartes pédologiques à l'échelle adéquate. Chaque municipalité doit rédiger une carte d'utilisation du sol, laquelle fait partie du "Plan Régulateur" ou du "Plan de Développement Rural Intégré". L'Institut National du Logement et de l'Urbanisme (*Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo -INVU-*) établit, de temps en temps, des Plans de Développement Urbain, notamment pour la Grande Zone Métropolitaine. Pour ceci, l'INVU s'appuie dans la *Loi de Planification Urbaine*.
11. Information pour la *gestion* concernant la propriété foncière. Ceci concerne les municipalités qui doivent gérer l'aspect foncier. Elles y sont autorisées par le *Code municipal*.
12. Information pour la *gestion-planification* concernant l'expansion urbaine. L'INVU, le MIVAH et les municipalités sont concernées par ce sujet. Les données de base doivent venir du cadastre municipal (s'il existe), tandis que les scénarios du développement sont créés autant par les municipalités que par l'INVU.
13. Information pour la *planification* concernant la géographie physique du bassin. Plusieurs institutions pourraient contribuer à la collecte des données de base. Il faudra identifier celles qui sont capables de répondre à un tel besoin. L'institut géographique National (*Instituto Geográfico Nacional -IGN-*) pourrait fournir certains données de base. L'école de géographie de l'Université de Costa Rica pourrait être une autre source.
14. Information pour la *planification* concernant la marginalité sociale et économique. Le cadastre municipal pourrait apporter des informations utiles. La Direction Générale des Statistiques et des Recensements (*Dirección General de Estadística y Censos -DGEC-*) apporterait des données de population. L'Institut Mixte pour l'Aide Sociale (*Instituto Mixto de Ayuda Social -IMAS-*) pourrait contribuer à identifier la concentration des problèmes de

pauvreté. Nous percevons le besoin de définir concrètement l'obligation, pour une institution du secteur, de gérer la statistique et la géographie de la pauvreté.

15. Information pour la *planification* en matière d'éducation civique et socio-environnementale. L'éducation est à la charge du Ministère de l'Éducation Publique (*Ministerio de Educación Pública -MEP-*). L'*organisation* qui aurait pour mandat l'aménagement des bassins-versants transmettrait ses projets d'aménagement aux jeunes par des campagnes éducatives coordonnées avec le MEP.
16. Information pour la *planification* du réseau routier. Les données de base sur le réseau routier devraient provenir du MOPT/IGN. MOPT pour Ministère d'Oeuvres Publiques et Transports (*Ministerio de Obras Públicas y Transportes*), et IGN pour l'*Institut Géographique National*. Semble particulièrement intéressante l'information sur les risques affectant le réseau. Une autre information très pertinente serait une évaluation des avantages et des problèmes liés aux chemins de montagne. Un schéma directeur sur l'évolution du réseau pourrait résulter d'une telle évaluation.
17. Information pour la *planification* du réseau hydrographique. Il s'agirait d'abord de définir la structure et le fonctionnement du réseau tout en créant les liens entre réseau hydrographique, système de versants, et les données sur l'environnement et celles d'ordre socio-économique. Pour la conception de cette partie importante du SIRS, cette thèse et notre travail postérieur à l'école de géographie pourraient se révéler utiles. Pour la gestion des données ponctuelles, comme l'identification des sources, on doit impliquer les institutions responsables, notamment le Département des Eaux (*Departamento de Aguas*) du MINAE.
18. Information pour la *planification* en matière du réseau des versants et des bassins-versants. L'école de géographie et cette thèse pourraient contribuer à la définition de la structure et des relations fonctionnelles des éléments du réseau, ainsi qu'à l'interaction de ces éléments avec le système hydrographique. Une bonne partie des données thématiques pourraient être dérivées des MNT et à partir du traitement des images satellites. L'école de géographie et d'autres centres académiques pourraient apporter leur contribution.
19. Information pour la *planification* concernant les projets de développement aux niveaux régional et national. Le *Ministère de Planification* (MIDEPLAN) serait l'une des sources

principales dans ce domaine. Les programmes régionaux (Centre-américains) devraient aussi y être intégrés. L'INVU et le MIVAH pourraient apporter des données importantes. Le *Centre National de Géo-Information*, conçu pour appuyer l'aménagement du territoire à l'échelle nationale, serait aussi une source intéressante de données et d'informations.

5.2.2 L'organisation et les besoins particuliers des institutions: schéma conceptuel

Même si notre MCD ne sera probablement pas en mesure de répondre aux besoins d'information particuliers de chacune des institutions concernées, il est important de créer un schéma conceptuel de leurs attentes pour identifier lesquelles sont compatibles avec le SIRS en développement et, secondairement, pour laisser une structure de base pouvant être étendue par la suite.

À la municipalité de Santa Ana

La municipalité de Santa Ana possède déjà un Système d'Information Territorial (SIT) moyennement opérationnel. Nous le qualifions de moyennement opérationnel parce que les responsables sont encore trop sous la dépendance du bureau du Cadastre National pour une série de tâches telle que la numérisation des cartes. Aussi, le système n'intègre pas encore la totalité des opérations de gestion foncière qui constituent un des rares objectifs.

D'après nous, un tel système peut servir de base à la création d'un SIRS municipal avec des fonctions étendues couvrant l'ensemble des besoins de gestion municipal. Cependant, nous croyons que le SIT et le SIRS doivent être séparés physiquement, parce que le SIT est utilisé si régulièrement dans les services offerts au public, qu'il ne laisse pas la place aux analyses et à la modélisation requises dans des opérations plus complexes de planification territoriale correspondant aux SIRS. Le lien devrait donc se faire par l'entremise d'un réseau interne, comme il en existe déjà un à la municipalité de Santa Ana.

Dans le but de concevoir un SIRS plus versatile pour une municipalité, nous proposons un schéma conceptuel de la fonction municipale (fig. 59), qui place le sous-système de *planification et d'aménagement territorial* au centre d'interactions des divers sous-systèmes. Ce sous-système de planification s'appuierait directement sur les SIRS proposés et recevrait des données et des informations provenant d'autres systèmes. Il y aurait des flux de retour d'informations entre ce sous-système et tous les autres visant à faire une gestion chaque fois mieux intégrée et plus efficace. Le sous-système décideur-exécuteur (le *conseil municipal*, l'*exécutif municipal*, et leurs *conseillers*) serait fortement alimenté par le SIRS placé au sous-système de planification. Les liens avec d'autres municipalités et institutions, (une d'elles pouvant être l'*organisation* que nous sommes en train de proposer) sont aussi considérés.

Le SIRS proposé pourrait utiliser le même logiciel que le SIT, ce qui faciliterait le transfert de données, mais devrait inclure aussi des extensions pour le traitement des images, la modélisation du terrain et l'analyse de réseaux, entre autres fonctions.

Nous avons détaillé les différents sous-systèmes en tâches ou composantes plus détaillées (fig. 60), mais, ceci n'est qu'une suggestion qu'il faudrait

travailler avant de pouvoir l'utiliser comme base d'une modélisation conceptuelle du SIRS municipal.

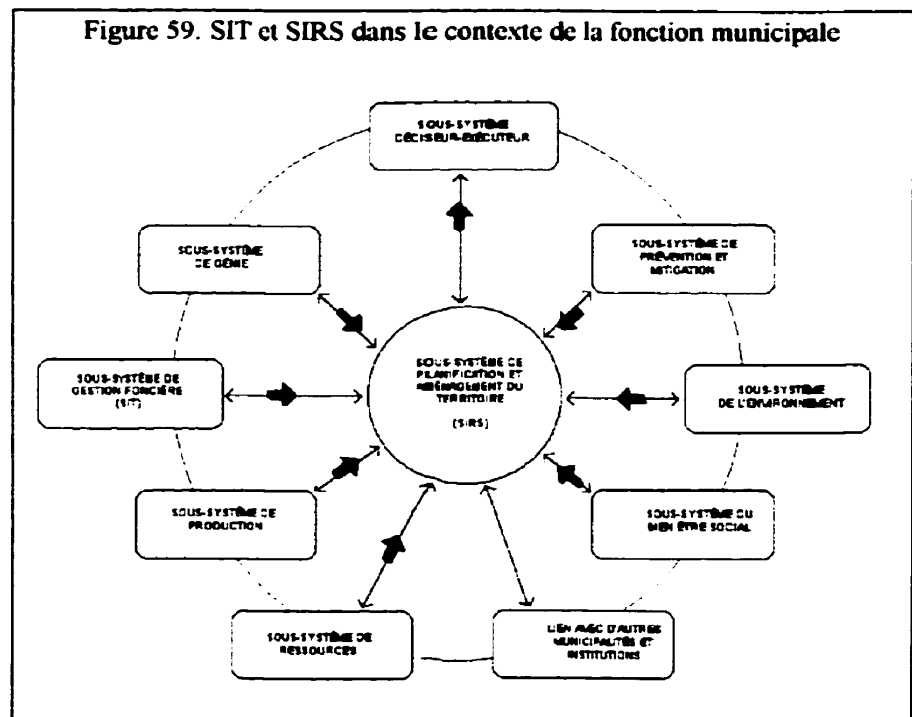
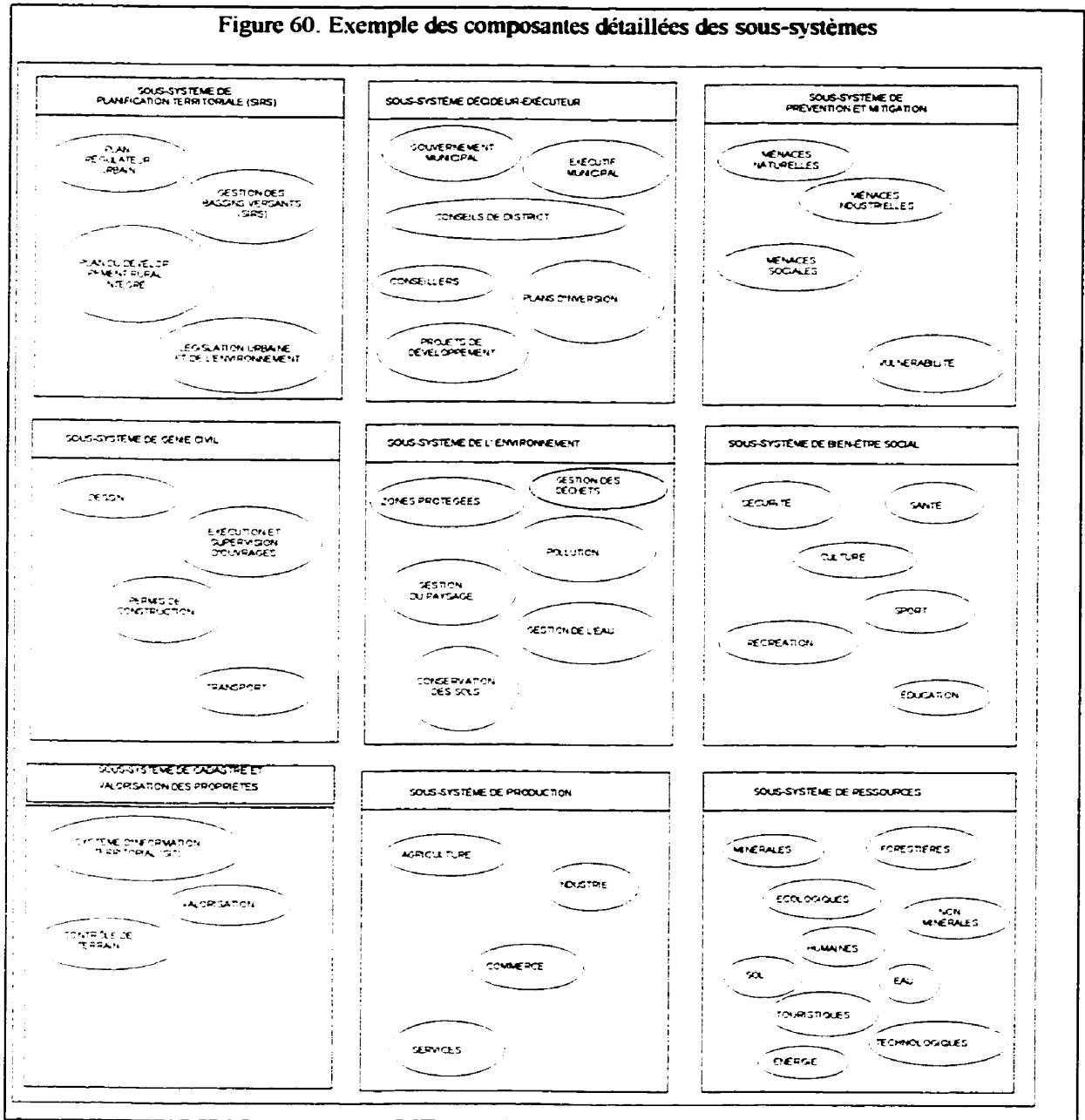
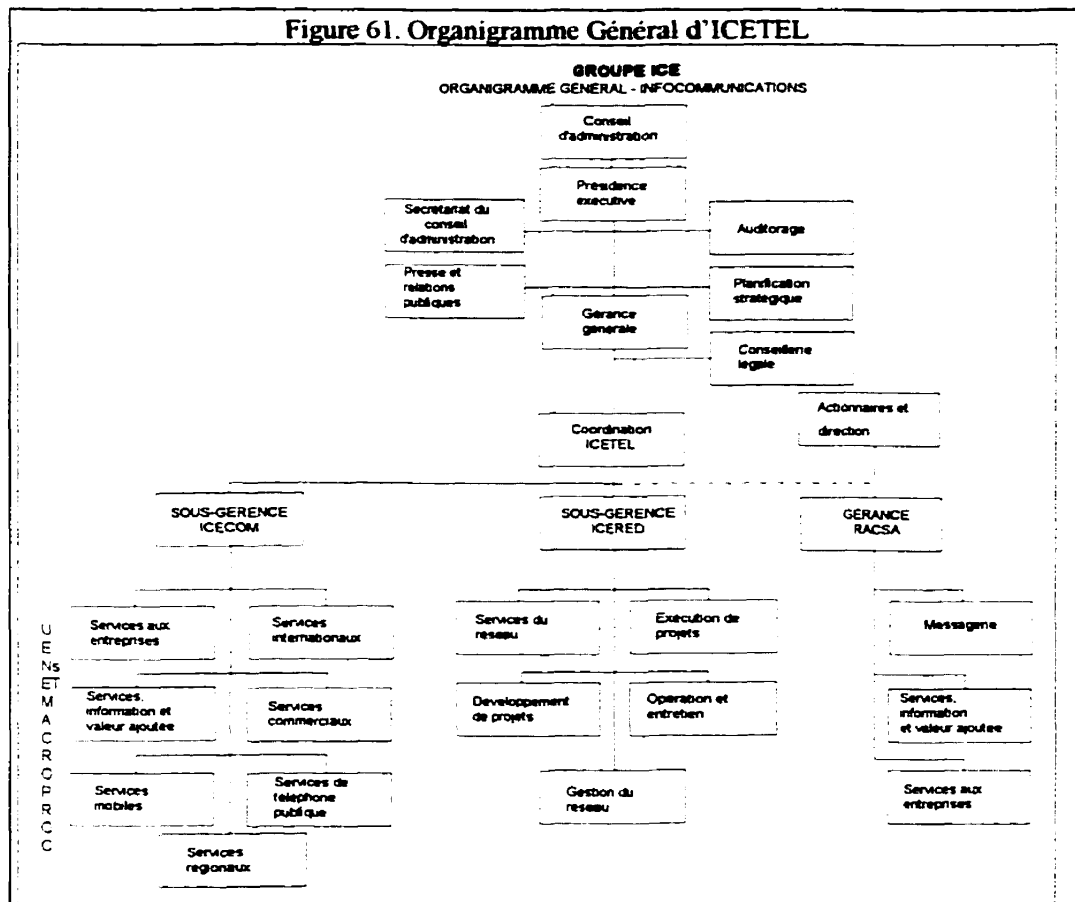


Figure 60. Exemple des composantes détaillées des sous-systèmes



À l'Institut Costaricain d'Électricité (ICE)

L'ICE est une grande institution possédant plusieurs divisions, directions et départements. À ce jour, plusieurs départements²⁴ utilisent régulièrement les outils de cartographie numérique et de SIG. L'introduction de la technologie des SIG s'est faite à l'initiative des départements et ne répond pas à des politiques institutionnelles (A. Vargas²⁵, communication personnelle). En conséquence les SIG sont utilisés pour résoudre des tâches spécifiques.



L'ICE vit un processus de transformation dicté par la pression politique du gouvernement central, qui le veut plus compétitif, avant que plusieurs des services prêtés en exclusivité par

²⁴ Environnement; géologie; génie civil; topographique; hydrologique; programmes de transmission énergétique; télécommunications; planification des télécommunications; planification énergétique; entre autres.

²⁵ Alberto Vargas. Section d'informatique. Division de génie. ICE.

cette institution semi-publique soient placés dans le libre marché. Dans ce processus de transformation, la vieille structure administrative va subir des changements profonds. Ceci nous empêche pour l'instant de créer un modèle de SIRS institutionnel suffisamment stable. C'est-à-dire que le modèle devra être modifié pour s'adapter aux contraintes organisationnelles.

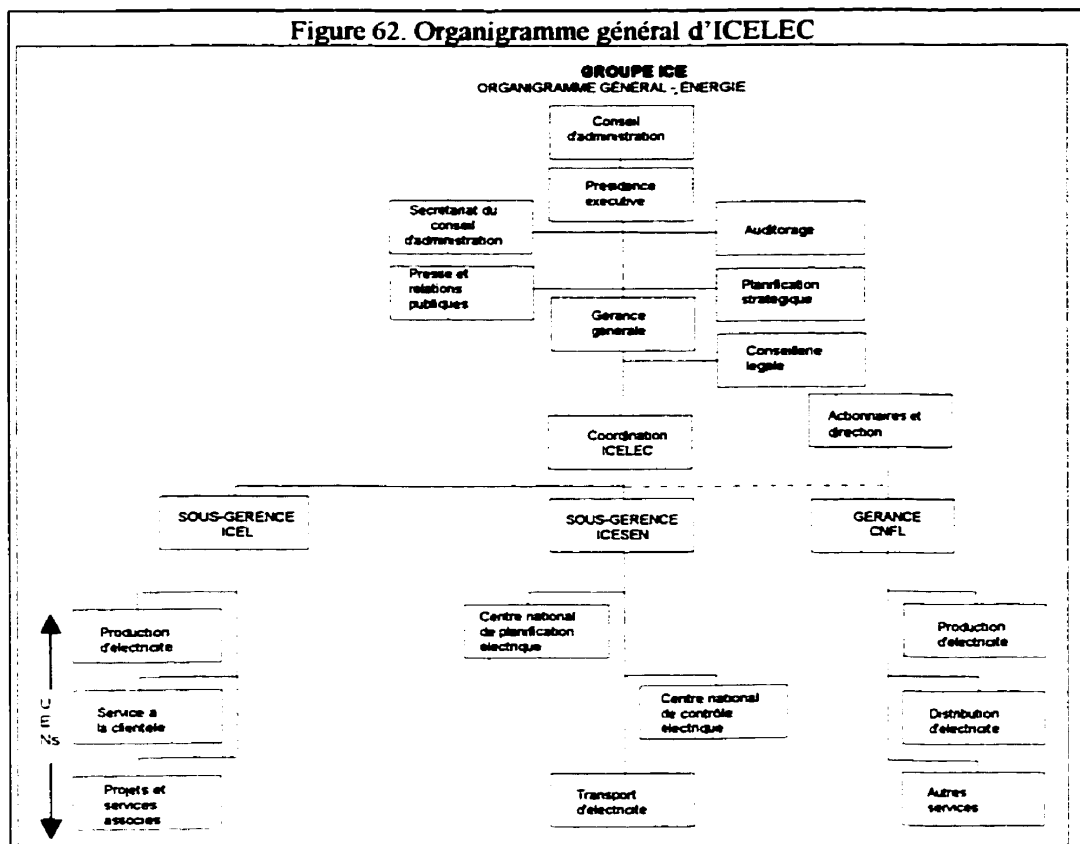
Un aspect positif de la situation de transformation que vit l'institution est qu'il y a une préoccupation réelle pour développer un SIRS fonctionnel à l'échelle de l'institution. Comme on pouvait le prévoir, l'une des grandes disputes consiste à décider quelle sera la place physique du (ou des) SIRS, quelle sera leur position dans la nouvelle structure administrative et quels seront les logiciels retenus. Ce dernier aspect est particulièrement conflictuel parce que chaque département a adopté une technologie logicielle²⁶ différente selon ses besoins et ses connaissances .

Dorénavant, chacune des unités d'affaires doit faire des profits. Ceci les a conduit à se disputer la propriété des sections et départements qui étaient les plus productifs dans la vieille structure administrative. De même, on se dispute la répartition des technologies de pointe, dont les SIG. Cette situation ne favorise pas l'adoption d'un schéma de SIRS définitif, mais plutôt la création d'un schéma d'intégration du SIRS qui serait conciliateur entre les intérêts institutionnels d'ensemble et les intérêts particuliers des "*unités stratégiques d'affaires*" (UENs). Notre SIRS multi-institutionnel pour l'aménagement des bassins-versants devra s'intégrer à l'intérieur de cette structure interne du SIRS-ICE.

La nouvelle structure administrative est fondée sur le concept des unités stratégiques d'affaires ("*unidades estratégicas de negocios*" ou UENs) (figs.61,62). Ces unités sont réparties entre deux divisions qui ont toujours été assez indépendantes: énergie et télécommunications (maintenant, ICELEC et ICETEL). Le tout est chapeauté par un niveau organisationnel supérieur comprenant le Conseil Directeur, la Présidence Exécutive et la Gérance Générale.

D'après ce que nous avons pu savoir, une bonne partie des départements qui utilisaient des SIGs seront regroupés dans l'UEN connu comme *Projets et Services Associés* de la sous-

gérance ICEL, dans la division ICELEC. On y trouve les anciens départements de géologie, géotechnique, génie civil, topographie, hydrologie, hydraulique, séismologie, vulcanologie et géophysique. Le département d'environnement (selon la vieille structure), l'un des plus développés en matière de SIG et avec un grand potentiel économique, est convoité par divers UENs. Il pourrait même dépendre de la gérance générale.

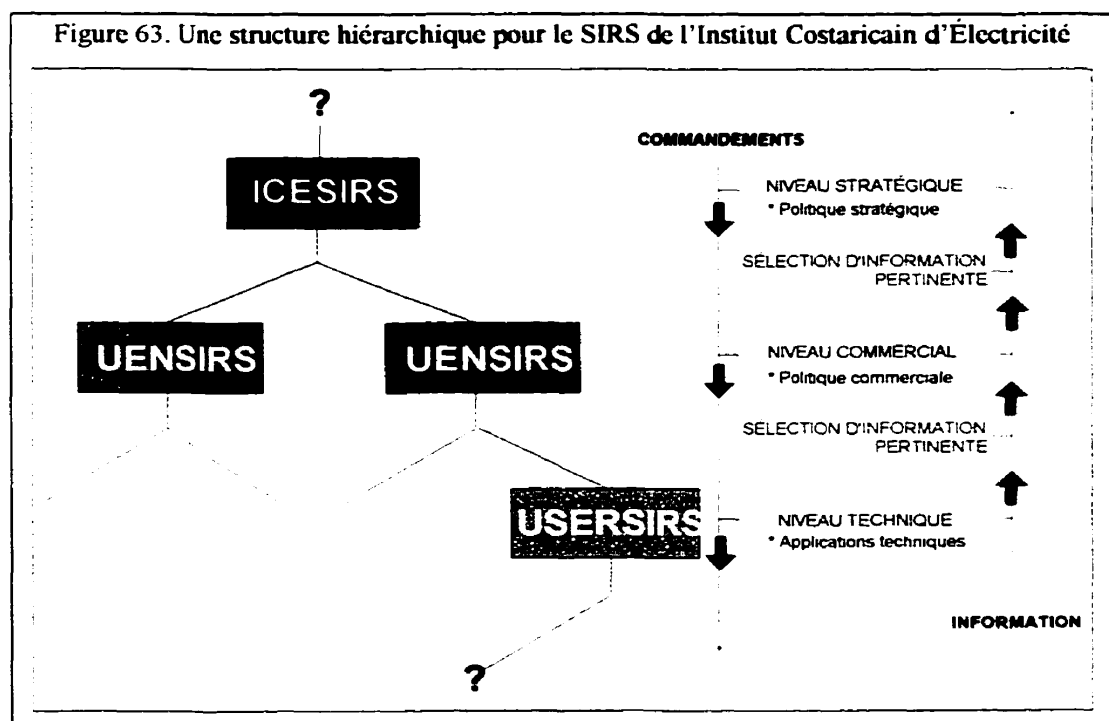


Étant donné la complexité d'une institution comme l'ICE, notamment dans la conjoncture actuelle où chaque section veut assurer sa survivance, nous proposons une intégration hiérarchique pour le SIRS (fig. 63).

Notre suggestion initiale pour l'ICE serait: 1) prévoir un SIRS à caractère institutionnel et donner une priorité à l'encadrement du SIRS dans la structure organisationnelle; 2) suivre alors une démarche qui va du général au spécifique, pour identifier les besoins en information

²⁶ Ilwis: Intergraph: Idrisi: ArcView-Spatial Analysis-3D-ArcNet: ArcInfo NT: InfoCad: Erdas: Sufer: MapInfo: et autres.

et en données particulières de chaque UEN (UENSIRS) et de chaque *unité de services* (USERSIRS) à l'intérieur de l'UEN; 3) définir une stratégie pour l'acquisition, le transfert et la mise à jour des données; 4) établir des politiques d'échange de données avec d'autres institutions gouvernementales; 5) décrire les principaux traitements de transformation des données permettant obtenir l'information voulue; 6) identifier les logiciels existants et nécessaires pour l'informatisation des tâches voulues dans chaque UEN; 7) concevoir un MCD général pour répondre aux besoins institutionnels; 8) concevoir les sous-MCD pour qu'ils soient capables d'assurer une bonne gestion des données et d'offrir des facilités accrues pour l'extraction de l'information utile dans chaque UEN.



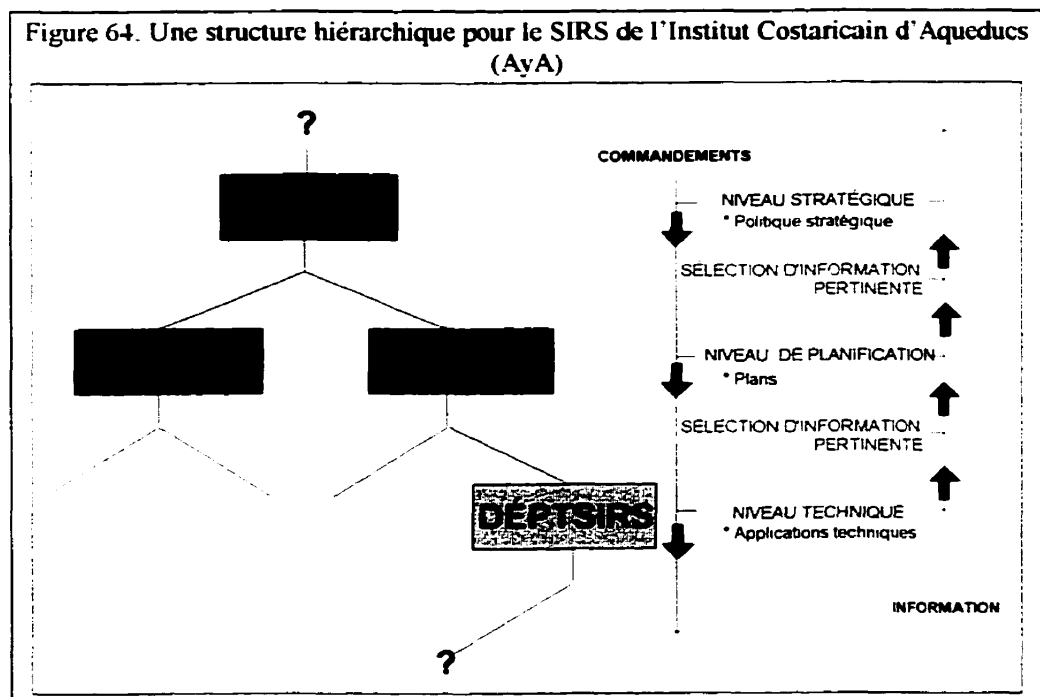
À l'Institut des Aqueducs (Acueductos y Alcantarillados AyA)

L'AyA a vécu depuis quelques années des compressions budgétaires et des suppressions de postes de travail. Une bonne partie des activités développées auparavant par le personnel de l'institution sont maintenant réalisées par l'entreprise privée. L'AyA vit aussi une situation de forte pression pour augmenter son efficacité.

Cependant, l'AyA n'est pas vue comme une institution destinée à créer des profits importants, mais plutôt comme une institution de service qui doit être efficace. Ceci rend sa situation un peu différente de celle de l'ICE.

Comme à l'ICE, l'AyA est une grande institution avec plusieurs directions et départements, dont certains utilisent régulièrement des logiciels de cartographie numérique et de SIG. Cependant, le département des bassins-versants, qui a été notre principal associé, n'utilise pas les SIRS. Par contre, ils sont très intéressés à adopter les SIRS là où ils s'avéreraient rentables.

Étant donné la complexité institutionnelle de l'AyA, nous pensons à un SIRS à structure similaire à celui de l'ICESIRS, mais avec une hiérarchie organisationnelle plus classique: *division - direction - département*. Il y aurait un niveau stratégique au sommet de la pyramide et un niveau technique à la base (fig.64). Toutefois, en position intermédiaire, la fonction principale du SIRS consisterait à appuyer la *planification* au niveau des directions et non à générer un profit. On doit établir une politique claire pour les échanges d'informations entre les départements, les directions et la gérance en fixant les responsabilités à chaque niveau.



En ce qui concerne spécifiquement le département des bassins-versants, nous croyons que l'adoption d'un SIRS est indispensable si ce département veut acquérir une plus grande efficacité en planification et une capacité de réponse face aux exigences d'une population qui grandit vite dans un pays manquant de lignes directrices en planification urbaine.

À l'Université de Costa Rica (UCR)

Plusieurs départements et centres de recherche pourraient s'intégrer dans un projet multi-institutionnel comme celui-ci. Nous allons discuter brièvement ce qui concerne notre intérêt immédiat, soit la place de l'école de géographie dans le projet.

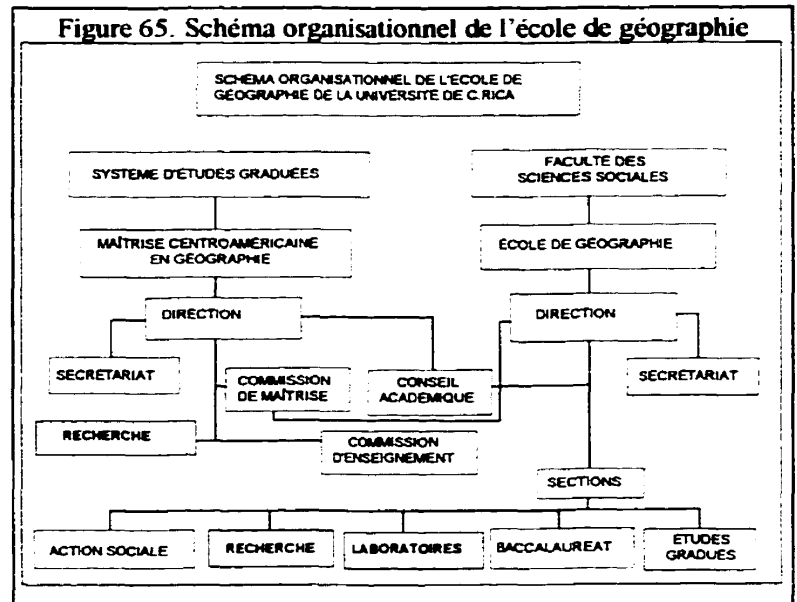
En fait, l'école de géographie a plusieurs raisons de s'intéresser à ce projet de SIRS.

1. Le thème des bassins-versants est un point fort du point de vue académique.
2. On veut y développer des applications de SIRS importantes dans le contexte de problèmes nationaux.
3. On pourrait acquérir une expérience considérable dans un projet de cette envergure. Ceci se traduirait dans une formation plus solide pour les étudiants.
4. De nombreux étudiants pourraient trouver des financements pour leurs sujets de thèse dans ce contexte particulier de recherche.
5. C'est un domaine ligne de recherche pouvant assurer du travail aux étudiants gradués.
6. C'est un sujet qui pourrait attirer des ressources toujours limitées. Ceci pourrait de même se traduire par une amélioration des laboratoires de SIRS, (en géomorphologie, en photogrammétrie et photo-interprétation).

Le département de géographie a aussi des besoins particuliers en données et en information, soit pour des applications strictement académiques, soit pour des projets d'application engagés par d'autres institutions gouvernementales ou privées. Ces dernières sont permises depuis la création du FUNDEVI. Par contre, le département n'a pas de stratégie systématique pour le recueil ou la création de données, comme l'exige une application sérieuse de SIRS.

L'une des contributions du département de géographie serait la conceptualisation du projet, initiée dans cette recherche. Une telle conceptualisation doit évoluer et s'améliorer lorsque les institutions déjà touchées et d'autres montreront des niveaux de compromis adéquats, et lorsqu'elles exposeront aussi des besoins et des conditions particulières. D'autres contributions concerneraient la modélisation des données (MCD, MLD) et l'élaboration des Modèles Numériques d'Altitude (Chapitre 6).

La figure 65 expose le plan organisationnel de l'école de géographie. Le projet du SIRS affecterait les *sections de recherche* (notamment le PROIGE, ou *Programa de Investigación Geográfica*) et les *laboratoires* (en particulier, les laboratoires de systèmes d'information géographique, de photointerprétation, de cartographie et de géomorphologie). Toutes ces *sections* dépendent de la *direction* de l'école, avec un professeur responsable de chaque section.



5.3 Conception détaillée

Pour préciser en détails cette modélisation conceptuelle du SIRS, nous avons rencontré des responsables de l'ICE, de l'AyA et de la Municipalité de Santa Ana. Nous avons aussi travaillé au Département des Eaux quand il faisait partie du Service National d'Électricité (SNE). Ces rencontres ont permis d'identifier des besoins généraux compatibles avec le concept d'un SIRS orienté vers l'aménagement des bassins-versants.

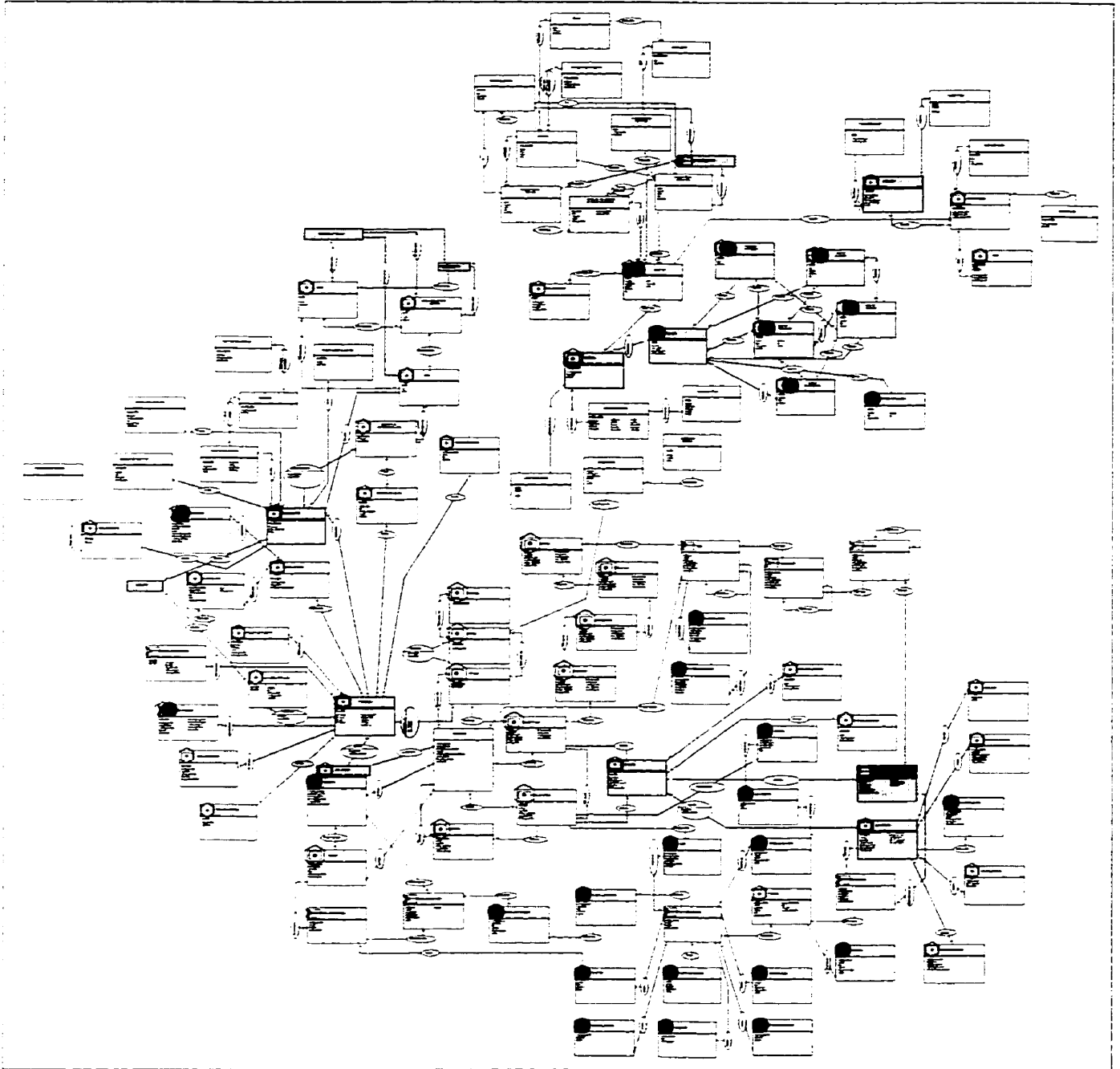
5.3.1 Modèle Conceptuel de Données

Une vue détaillée du MCD est présentée dans la figure 66 (page suivante et pochette annexe). Le but central de ce MCD était d'établir les interrelations entre le réseau des bassins-versants, le réseau hydrographique, les paramètres de l'environnement, l'infrastructure, la division politique et le cadastre. Quelques remarques par rapport au MCD semblent importantes.

1. L'intérêt de choisir certaines entités de base.

Nos entités de base seront le *versant*, la *section fluviale* ou le *tronçon*, le *noeud fluvial*, la *section routière*, la *construction*, le *district* et le *lot-unité d'évaluation foncière*. Ces entités fonctionneront comme unités de base pour l'ajout d'informations provenant des interrelations avec d'autres entités. Il est préférable que ces unités soient assez stables (dans le temps), consistantes (au plan conceptuel) et facilement identifiables (dans l'espace). C'est pourquoi, nous avons préféré utiliser le *versant* comme unité de base par rapport à l'*unité de terrain*, qui est définie sur une base plus statistique que physique (pour une discussion voir Carrara, 1996).

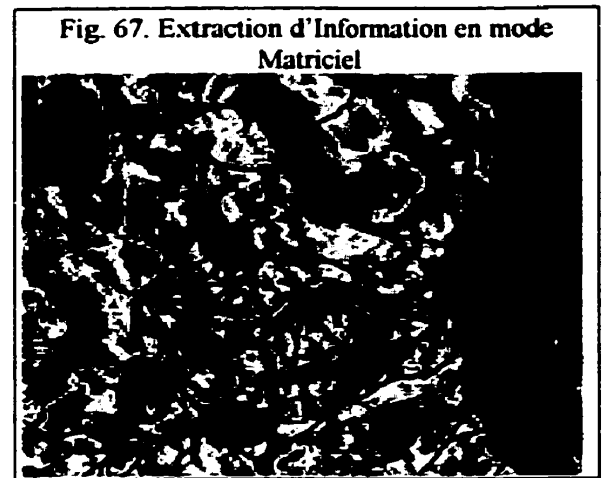
L'importance de cette remarque est particulièrement indiquée lorsqu'on travaille dans un univers raster-vecteur non intégré, ce qui est le cas pour plusieurs traitements faits dans cette recherche. Si nous prenons, par exemple, la *pente moyenne* des *versants*, celle-ci est obtenue avec grande précision en superposant, dans Idrisi, les polygones vectoriels des versants, à l'image des pentes (fig. 67). Par la suite, nous pouvons calculer la *pente moyenne* des *micro-bassins* comme une *moyenne pondérée* des pentes annotées pour chaque versant lui appartenant. Cette dernière opération se fait entièrement à l'aide du SGBD relationnel de MapInfo. L'avantage ici est que l'image des pentes comme celle des polygones des versants sont assez stables et consistantes.

Figure 66. Vue détaillée du Modèle Conceptuel de Données (MCD)²⁷

²⁷ Voir cette figure en annexe.

Au contraire, dans le mode vectoriel, l'utilisation des *unités de terrain* superposées aux *classes de pente* donnerait des résultats très discutables à cause de l'inconsistance conceptuelle des deux classifications dont l'acceptabilité dépend du contexte d'application. En plus, la vérification sur le terrain de la carte produite ne disposerait pas de critères ou repères permettant de préciser les limites entre les unités.

2. L'intérêt de décrire le système fluvial comme un réseau.



Pour certaines applications, notamment en hydrologie, il faut être en mesure d'interroger le système afin de trouver toutes les *sections fluviales* qui se trouvent en amont ou en aval d'une section fluviale, d'un noeud de confluence ou encore d'un versant. Pour répondre à cette question dans un environnement relationnel on a plusieurs choix.

Au début nous avons essayé de coder le réseau hydrographique suivant un schéma de codage hiérarchique spatialement ordonné, adapté du travail de Werner et Smart (1973). Comme la pratique du traçage des réseaux fluviaux posait des problèmes d'inconsistance reliées au concept²⁸ et à l'échelle d'analyse²⁹ (Werner, 1988, 1991; Barbera et Rosso, 1989; Dawes et Short, 1994; Zhang et Montgomery, 1994), nous avons renoncé à cette idée parce qu'un tel système était trop rigide pour nos besoins. Nous cherchions un système capable de s'adapter facilement à d'autres échelles et pouvant être utilisé pour l'ensemble du territoire national.

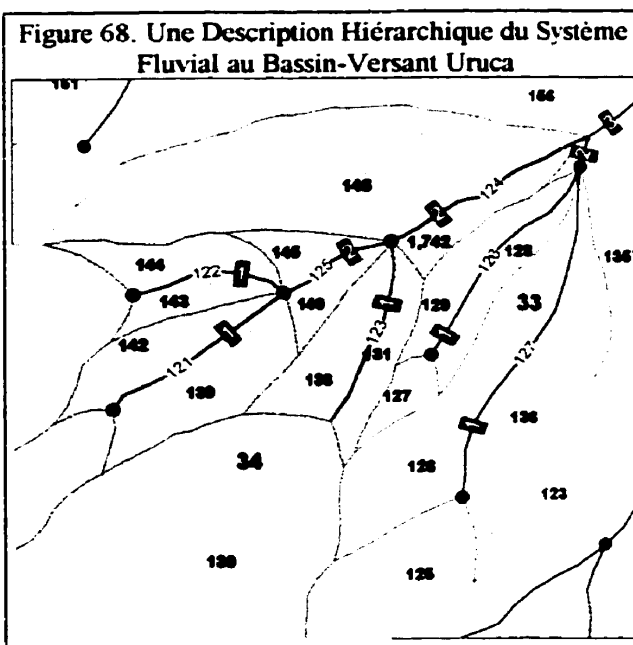
²⁸ Quel est l'élément caractéristique permettant d'inclure une ligne du flux dans le réseau hydrographique? Est ce que c'est l'existence d'un flux permanent?, d'un vallon?, d'un lit dépourvu de végétation? ou autres éléments diagnostiques?. Toute réponse est discutable selon le contexte d'application.

²⁹ Un modèle fractal semble s'adapter à la description générale de la topographie terrestre ainsi qu'aux réseaux hydrographiques.

Une autre possibilité consistait, tout simplement, à placer l'ensemble des *sections fluviales* (ou les *tronçons* dans la terminologie du logiciel Cartier³⁰) dans une table dont les niveaux hiérarchiques et les noms des bassins seraient des attributs. Cette solution simple ne fut pas retenue parce qu'elle n'était pas conforme à la troisième forme normale de Codd (Bédard, 1994, sect.7, p.4). C'est-à-dire, l'inclusion d'un *tronçon* dans un bassin quelconque ont l'ordre hiérarchique supérieur était prédéterminé par son appartenance à un autre bassin dans les ordres précédents. Ceci produit beaucoup de redondance inutile dans la base de données.

Nous avons finalement adopté la stratégie du découpage topologique en *tronçons* et *versants* proposé par Strahler (1964) (figure 68). Dans cette méthode, les tronçons ("links") extérieurs reçoivent un code hiérarchique de 1. L'union entre deux tronçons d'ordre (ou code) n_1, n_2 donne lieu à un code ($n_{max} + 1$) (pour le tronçon en l'aval) si les deux tronçons unis ont le même code, ou ($n_{max} + 0$) si ils sont d'ordre différent. C'est-à-dire, qu'on étiquette de l'amont vers l'aval.

Une des raisons pour adopter cette méthode fut qu'elle ne produit pas une croissance exponentielle des niveaux hiérarchiques (le Costa Rica entier étant couvert peut-être par les dix à douze premiers niveaux; le bassin-versant Uruca atteignant le *sixième* niveau).



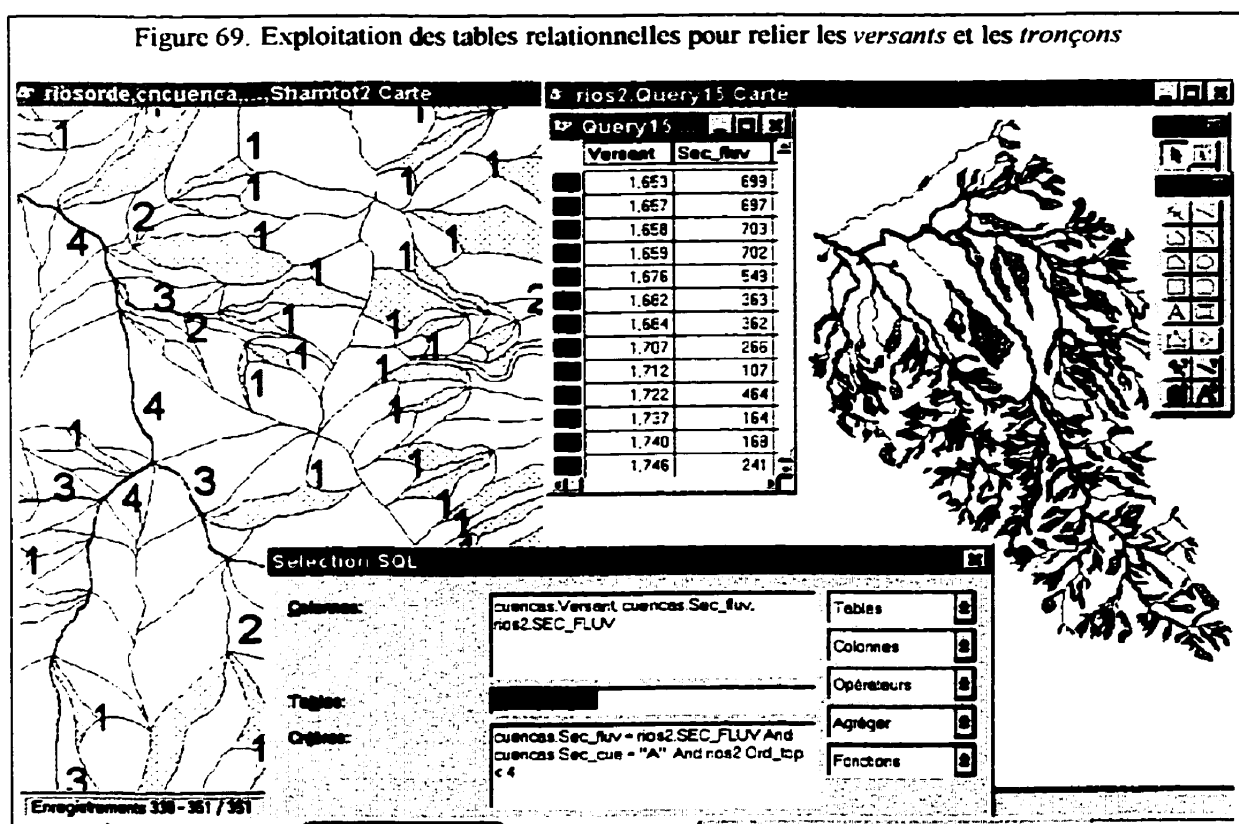
Une autre raison est que la méthode a été assez étudiée et utilisée sur le plan théorique et pratique.

Nous avons alors utilisé la hiérarchisation du réseau fluvial comme un attribut dans la table des *tronçons* fluviaux. Nous l'avons utilisée aussi pour classer les versants tributaires selon les mêmes 6 niveaux hiérarchiques; mais ceux-ci se sont traduits en un nombre similaire d'entités et

³⁰ CARTIER. Logiciel de numérisation et de construction de géo-bases réalisé au Laboratoire de Traitement de

de tables relationnelles. Chacun des bassins-versants d'un ordre particulier devient alors un *individu* ayant ses propres attributs et n'est plus simplement un élément quelconque dans une catégorie générale, comme ils le seraient si on les avait tous mis dans une même table.

Nous avons utilisé un *codage numérique séquentiel* (non spatial) pour identifier de façon unique chaque *tronçon* et chaque *versant* des deux réseaux. L'effet d'avoir oublié de dessiner un tronçon ou un versant ne produit qu'une perturbation très locale, facile à corriger. Ceci est un avantage de la méthode de Strahler. Nous avons créé, évidemment, un lien entre chaque *tronçon* fluvial et les *versants* contributifs (fig. 69). Ceci s'exprime par la relation 1:3 entre les deux entités (fig. 66). Si on veut appliquer cette méthode à l'échelle du pays, par exemple dans des institutions différentes, on peut établir une dépendance fonctionnelle entre l'identifiant des entités *tronçons* et *versants* par rapport aux bassins-versants identifiables par des *noms* particuliers. La normalisation sera alors une tâche beaucoup plus simple.



Enfin, pour répondre à la question formulée ci-dessus, nous avons cru pertinent de décrire en détail le réseau fluvial. Ceci est un travail de quelques heures étant donné que nous avons une quantité respectable de 709 *tronçons*, soit 709 routes possibles pour le flux d'eau. Ce travail est facilité lorsqu'on fait la description de l'amont vers l'aval et que l'on tient compte de la répétition de la route associée à un tronçon par rapport au tronçon situé immédiatement vers l'amont.

3. L'importance des unités politiques.

Ceci tient principalement au fait que beaucoup des données de base, notamment les données socio-économiques, leur sont rattachées. En plus, très souvent les gens demandent des informations compilées par niveaux administratifs. Le SIRS veut faciliter la gestion des bassins-versants dans le domaine municipal tout en respectant que le district reste l'unité territoriale la plus petite considérée par l'administration municipale.

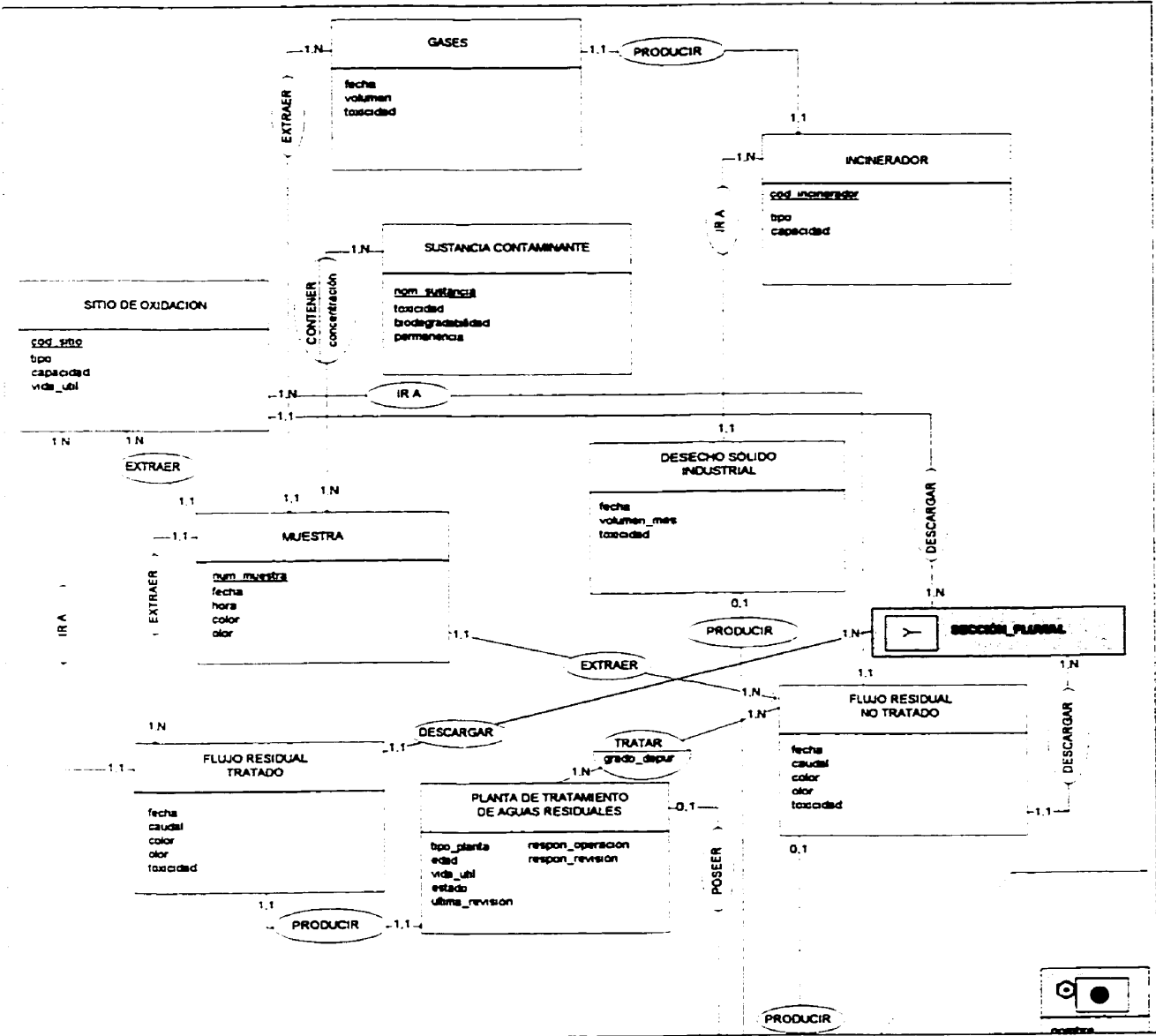
4. L'importance du cadastre.

Étant donné que la Municipalité de Santa Ana possède déjà une base cadastrale assez détaillée et actualisée, il est bien avantageux de l'inclure dans notre MCD. Cependant, il faut préciser que l'inexistence de cette base de données n'affecterait pas sensiblement l'utilité du SIRS conçu. En fait, la partie du cadastre qui nous intéresse le plus est l'association *lot-propiétaire* avec les autres paramètres des bassins-versants. L'application foncière du cadastre est un aspect secondaire dans notre MCD, qui pourrait être considéré juste pour établir un pont entre le SIRS orienté à l'aménagement des bassins-versants et le SIT cadastral.

Nous allons présenter maintenant quelques vues détaillées du MCD pour discuter des détails de sa conception.

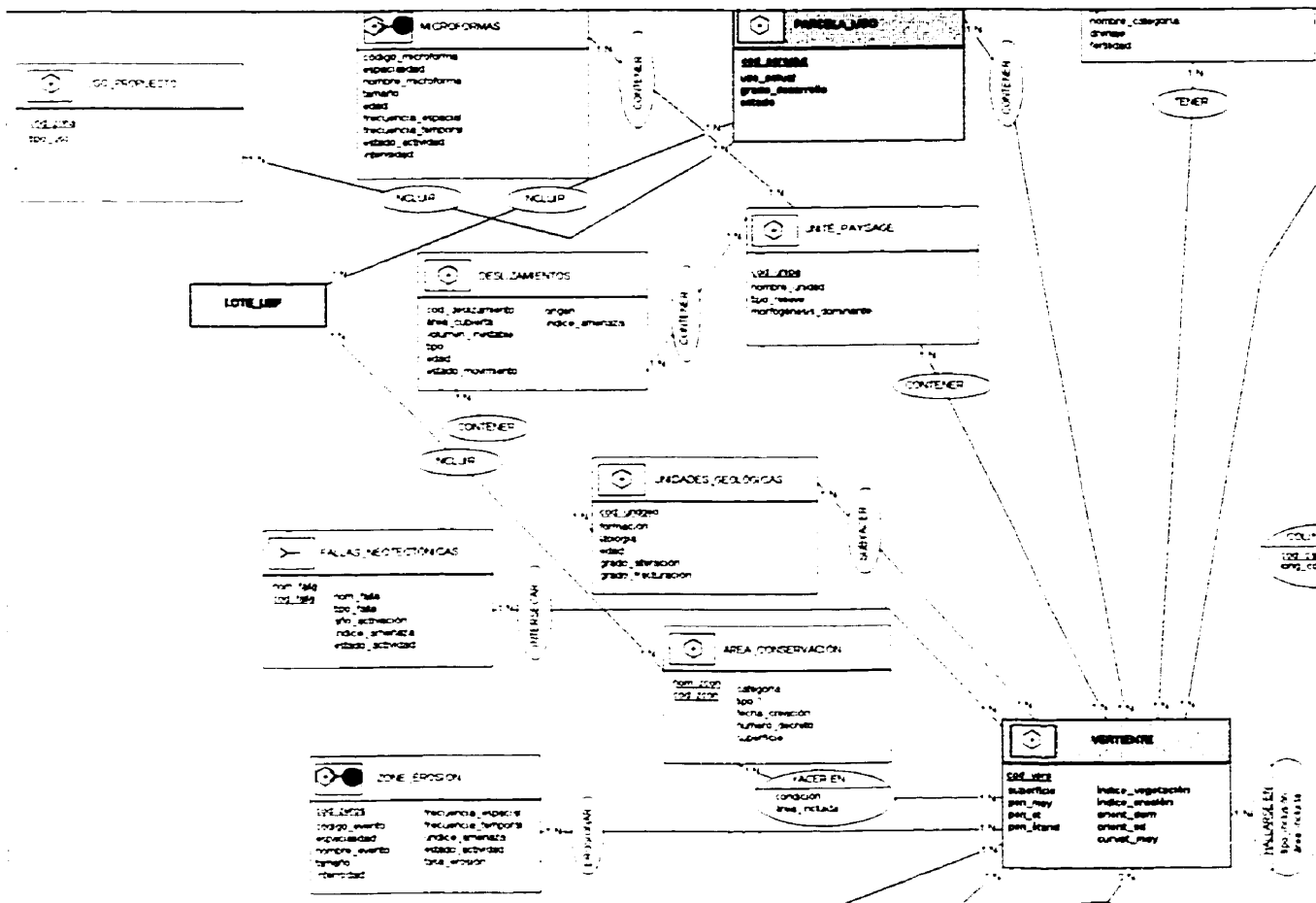
Sur la figure 70, on aperçoit les détails de la modélisation du système de traitement des eaux résiduelles provenant des *industries*. Cet aspect a évidemment un grand intérêt dans un SIRS orienté vers l'aménagement des bassins-versants.

Figure 70. Vue détaillée du MCD: le système de traitement des eaux résiduelles



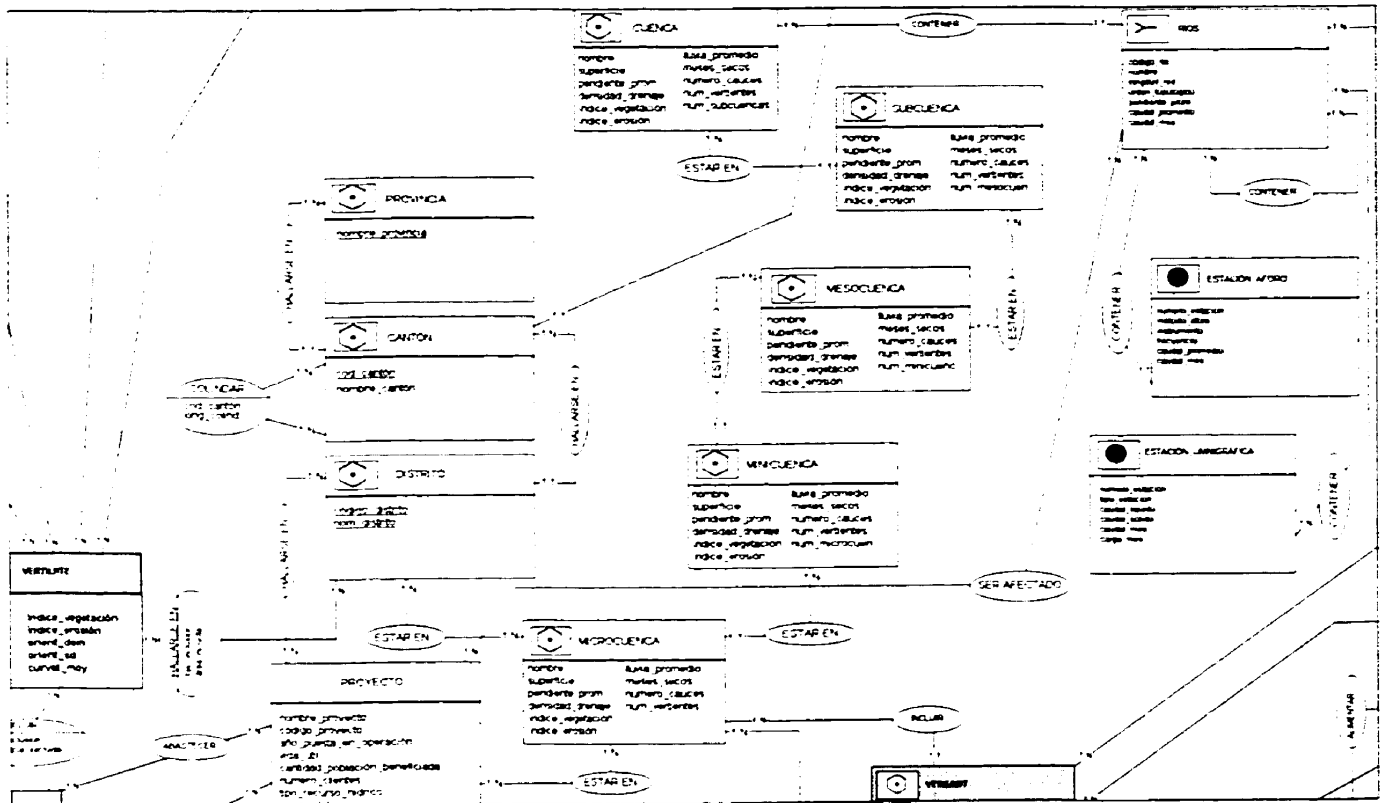
Une autre vue détaillée (figure 71), montre le rapport entre *versants* et différents descripteurs souvent utilisés dans les modèles de l'environnement.

Figure 71. Vue détaillée du MCD: les rapports entre *versants* et autres descripteurs de l'environnement



Sur la figure 72, on montre le concept de réseau de bassins-versants et la forme selon laquelle ils seraient reliés. Il en est de même pour la hiérarchie administrative (à gauche).

Figure 72. Vue détaillée du MCD: l'organisation hiérarchique des bassins-versants.



5.3.2 Dictionnaire de données

Pour illustrer le concept, nous utilisons le modèle de dictionnaire préparé par Villeneuve et Pageau (dans Bédard, 1994). En plus d'une présentation générale, ce modèle de dictionnaire permet de décrire les *entités* et les *relations*.

Comme il a été mentionné, le dictionnaire de données permet de compléter les notions exprimées dans le modèle conceptuel de données (MCD) et de documenter le SIRS.

Figure 73. Illustration du concept de dictionnaire de données

CONCEPTION D'UN SIRS POUR L'AMÉNAGEMENT DES BASSINS-VERSANTS COSTA RICA, AMÉRIQUE CENTRALE

Rafael Arce Mesén

Dic., 1997

Dictionnaire de données pour le Système d'Information à Référence Spatiale

PREFACE

Contenu du dictionnaire

Ce dictionnaire de données est composé de deux parties. Dans la première partie sont définies les *entités* et dans la seconde les *relations*. On y inclut des informations d'un niveau conceptuel et logique.

Référence spatiale

Environnement du travail	2D
Projection cartographique	Conique Conforme de Lambert
Système de coordonnées	Costa Rica Nord
Datum planimétrique	NAD27

Référence temporelle

Ne sera pas gérée.

Information contextuelle

Les données de base sont des cartes au 1:50 000ième et 1:10 000ième de l'IGN du

Costa Rica, en format papier et en projection Conique Conforme de Lambert. Des photos aériennes avec échelle variable, 1:10 000 à 1:80 000 ont été utilisées.

P D Liste des clefs utilisées

Le "I" signifie que l'attribut est un identifiant.

Le "C" signifie que l'attribut fut obtenu par calcul

Le "O" signifie que l'attribut est obligatoire.

Le "T" signifie le type d'héritage, soit spécialisation (S), généralisation (G) ou agrégation (A).

Ax indique le nombre (x) de caractères alphanumériques.

Nx.k indique le nombre (x) total de caractères numériques et le nombre (k) la largeur de la fraction décimale.

amj signifie (année, mois, Jour)

pmd signifie (pays, municipalité, district).

VERSANT (VERSANT)

THÈME(S)

RESEAU DES BASSINS-VERSANTS

TYPE D'ENTITÉ

Entité réelle

DÉFINITION SÉMANTIQUE


C'est l'unité de terrain élémentaire qui s'écoule vers un même *segment fluvial* ou *tronçon* du réseau fluvial

ATRIBUTS


Nombre	Définition	Domaine			Héritage				
		Valeurs		Forme	I	C	O	Nom. Ent.	T
cod_vers	numero séquentiel unique pour chacun des versants	1 à 99999		N5.0	x		x		
superficie	superficie du versant	0 à 9999999.9		N9.1		x	x		
pen_moy	pente moyenne du versant (en pourcentage)	0 à 99999.9		N7.1		x			
pen_et	écart type de la valeur de la pente	0 à 99.9		N4.1		x			
pen_étan	étendue de la valeur de la	0 à		N7.1		x			

	penne dans chaque versant	99999.9							
ind_vég	indice de végétation (NVDI obtenu à partir des images de satellite)	-1.000 à 1.000		N6.3					
ind-erosiv	indice d'érosion (obtenu par traitement)	0.00 à 1.00		N4.2					
ori_dom	orientation azimutale dominante sur le territoire du bassin-versant	0 à 359.9		N5.1			x		
ori_sd	écart type des mesures d'orientation dans chacun des bassins-versants	0 à 99.9		N4.1			x		
curv_moy	courbure moyenne du terrain	-1.000 à 1.000		N6.3			x		

DÉFINITION GÉOMÉTRIQUE

	Étendue > 0	Largeur >	Longueur >	Hauteur >
Point				
Ligne				
Surface	X			
Volume				
Détails				
Graphique				

SYMBOLOLOGIE INITIALE

Symbole	
Norme	

DÉFINITION TEMPORELLE

	Type (durée >)		Historique	Référentiel		Règles
	Ponctuelle	Durable	(période)	Résolution	Origine	
Existence						Naiss./Mort:
Présence						Affichage:
Fonctionnalité						
						Activ./Desactiv:
Évolution						
						Changem:
Détails						

RÈGLE(S) DE MODÉLISATION

L'entité VERSANT devient la table VERSANT. L'attribut code_vers est un identifiant unique pour chacun des versants. L'entité VERSANT a plusieurs relations du type N:N, notamment avec les entités environnementales. Ceci oblige à des traitements de superposition lorsqu'il s'agit d'entités spatiales. Une table relation doit être créée pour chacune des relations suivantes N:N : VERSXZCONS, VERSXFAINT, VERSXUNGEO, VERSXUNITE, VERSXPARUS, VERSXUNSOL, VERSXCONMIN, VERSXDISTR, VERSXLOTUEF, VERSXBAPROV, VERSXZPOTS, VERSXZACUM, VERSXZEROS, VERSXRESUB, VERSXZPHYD, VERSXZONRE. L'entité VERSANT possède aussi quelques relations 1:N: SECTFLUV_DRAINER VERSANT, BASSINI_INCLURE_VERSANT, et MICBAS_INCLURE_VERSANT. Pour toutes ces relations 1:N où VERSANT est l'entité fils, on doit lui ajouter les identifiants des entités père.

STRUCTURE GÉOMÉTRIQUE

Une versant est un polygone fermé délimité sur des cartes topographiques ou sur des photos aériennes restituées. La continuité topologique entre deux versants doit être respectée. Avant de numériser les versants, on numérisera le réseau hydrographique parce que celui-ci détermine le découpage des versants. En plus, on doit se servir des lignes du réseau hydrographique pour définir les limites internes des versants.

STRUCTURE DESCRIPTIVE

VERSANT(cod_vers, superficie, pen_moy, pen_et, pen_étand, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, ori_sd, curv_moy, cod_secfl, cod_bvl, nom_micbas)

VERSANT_INCLURE_LOT_UNITÉ_EVAL_FONC (VER_I_LOT)**THÈME(S)**

Bassins-versants, cadastre

TYPE DE RELATION

Relation spatiale

DÉFINITION SEMANTIQUE

L'inclusion peut être complète ou partielle

ENTIÉS LIÉES

Nom	Cardinalité	Description	Cardinalité	Nom
VERSANT	1..N		1..N	LOTUEF

ATTRIBUTS

Nom	Définition	Domaine		Forme	I	C	O
		Valeurs					
cod_vers	nombre séquentiel unique pour chacun des versants	1 à 99999		N5.0	x		x
id_uef	nombre unique pour chacun des lots_unité d'évaluation	1 à 9999999		N7.0	x		x

RÈGLE(S) DE MODÉLISATION

Table nécessaire pour décrire le rapport N:N entre VERSANT et LOT_UNITÉ DE ÉVALUATION. Elle est obtenue par superposition ("overlay") des deux cartes correspondantes. Pour faciliter la création de cette table, il est conseillé d'entrer les identifiants uniques de chacune des tables à être superposées avant de lancer l'opération d'intersection.

STRUCTURE DESCRIPTIVE

VER_I_LOT (cod_vers, id_uef)

5.3.3 Modèle Logique de Données

Nous le présentons tel qu'il est implanté dans MapInfo; un logiciel de cartographie numérique et de SIG, non topologique, relationnel, possédant un excellent langage d'interrogation SQL. Il est présenté par thèmes.

1. RÉSEAU DE BASSINS-VERSANTS

VERSANT (cod_vers, superficie, pen_moy, pen_et, pen_étand, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, ori_sd, curv_moy, cod_sectf, cod_bv1, nom_micbas)

BASVERS1 (cod_bv1, superficie, pen_moy, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, cod_bv2)

BASVERS2 (cod_bv2, superficie, pen_moy, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, cod_bv3)

BASVERS3 (cod_bv3, superficie, pen_moy, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, cod_bv4)

BASVERS4 (cod_bv4, superficie, pen_moy, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nom_micbas)

MICBAS (nom_micbas, superficie, pen_moy, alt_moy, alt_et, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sectf, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, nom_minbas)

MINBAS (nom_minbas, superficie, pen_moy, alt_moy, alt_et, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sect, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, nom_mesbas)

MESBAS (nom_mesbas, superficie, pen_moy, alt_moy, alt_et, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sect, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, nom_sousbas)

SOUSBAS (nom_sousbas, superficie, pen_moy, alt_moy, alt_et, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sect, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, nom_basin1)

BASSINI (nom_bassin1, superficie, pen_moy, alt_moy, alt_et, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sect, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, nom_basin2)

BASAPPROV (cod_basapp, superficie, pen_moy, pen_et, pen_étand, alt_moy, alt_et, alt_étand, ind_veg, ind_erosiv, ori_dom, nomb_vers, nomb_sect, dens_drain, prec_moy, nomb_mois_sec, Q_max, Q_min, Q_tot, cod_vers)

2. BASSINS-VERSANTS - ENVIRONNEMENT

VERSXZCONS (cod_vers, nom_zcon, cod_zcon)

VERSXFAINT (cod_vers, nom_falla, cod_falla)

VERSXUNGEO (cod_vers, cod_undgeo)

VERSXUNITE (cod_vers, cod_unite)

VERSXPARUS (cod_vers, cod_parcelut)

VERSXUNSOL (cod_vers, cod_usol)

VERSXCOMIN (cod_vers, cod_numcon)

VERSXDISTR (cod_vers, cod_dist, nom_dist)

VERSXLOTUEF (cod_vers, num_uef)

VERSXBAPROV (cod_vers, cod_bassap)

VERSXZPOTS (cod_vers, cod_zpe)

VERSXZACUM (cod_vers, cod_zacum)

VERSXZEROS (cod_vers, cod_zeros)

VERSXRESUB (cod_vers, cod_rasub)

VERSXZPHYD (cod_vers, cod_zphyd)

VERSXZONRE (cod_vers, cod_zrec)

VERSXUNIPA (cod_vers, cod_unipa)

5.3.4 Méta-données

Les méta-données sont des renseignements concernant les données utilisées dans le SIRS. Récemment les méta-données ont été incorporées, comme une extension, dans la base de données des logiciels de SIG. C'est le cas du logiciel ArcView. Dans le logiciel Idrisi, on peut gérer une quantité relativement limitée de méta-données qui font partie du fichier document ("*document file*") nécessaire, entre autres, pour traduire les données du format d'emmagasinage au format d'affichage. Cependant, le fichier *.doc* d'Idrisi comporte des méta-données *actives* (*erreur positionnelle, résolution, value error*) dans le sens qu'elles peuvent paramétrer certains traitements. Ceci facilite notamment l'incorporation du concept de *seuils* dans les SIRS (Burrough, 1986: 11).

Si on n'a pas la possibilité de conserver les méta-données dans la base de données du logiciel de SIG, on a néanmoins l'opportunité de les reporter sur format papier, comme nous le faisons dans cette recherche (fig. 74).

Figure 74. Exemple d'une page de méta-données

Titre: versants

Résumé: zones de drainage correspondant à une *section fluviale* ("tronçon" ou "link")

But: pour être utilisée comme l'unité physique de base dans l'analyse des réseaux de bassins-versants ainsi que pour porter des données spatio-statistiques

Processus: les courbes de niveau, l'image ombragée, et les flèches d'orientation du flux, ont été affichées ensemble, par la suite, les *versants* ont été numérisés manuellement, sur l'écran (voir image ci-jointe)

Données spatiales et tabulaires rapportées: pente, orientation de pente, courbure, réseau de bassins-versants, réseau hydrographique, géologie, géomorphologie, utilisation du sol, indice de végétation, chemins, capacité d'utilisation du sol, unités physiographiques, contours, glissements, photos aériennes.

Autres références: cartes provenant de l'Institut Géographique National (IGN), à des échelles 1:10 000 (1991) et 1:50 000 (1989). Photos aériennes acquises par l'IGN, aux échelles, 1:10 000 (1989), 1:20 000 (1989) et 1:40 000 (1976). Les données font partie de la thèse de doctorat de l'auteur. Le nom du travail est "*Conception d'un Système d'Information Géographique pour l'Aménagement des Bassins-Versants au Costa Rica*".

Période de durée des données: données stables créées entre 1995 et 1997

Consistance logique: le logiciel utilisé accepte des données non topologiques, mais beaucoup d'attention fut mise pour éviter des inconsistances topologiques

Précision de positionnement: On n'a pas testé pour le **rms**. La résolution, définie comme échelle/39 37*0.001 fut 0.254. (Note: les valeurs typiques rms pour la carte de base se placent en 0.005 cm).

Diagramme du flux: SCAN contours + VECTORISER contours + PROJETER vers la projection Costa Rica Lambert (partie Nord) + INTERPOLER pour créer un DTM + NUMÉRISER les versants.

Description du processus: on a scanné et vectorisé les contours; le résultat fut converti dans un fichier ASCII de coordonnées X,Y,Z; ce fichier fut lu avec le logiciel SURFER pour créer le MNA. On a choisi l'algorithme du krigeage à variogramme linéaire, pour accomplir la dernière tâche. Les routines de *Surfer* ont été utilisées pour créer des flèches de pente maximale (ou "flow direction") ainsi qu'une image ombragée. L'image ombragée, les flèches du flux, et les contours ont été affichés ensemble pour une numérisation manuelle utilisant le logiciel MapInfo et la projection Lambert Conique Conforme pour le Costa Rica Nord.

Traitement de données:

1997

Entité et Attributs

Description détaillée:

VERSANT (entité polygone)

	Cod_vers	Tip_vers	Sec_flux	PenProm	PenMin	PenMax	PenSD
<input type="checkbox"/>	1	C	557	55.0564	11.1071	112.3300	20.2667
<input type="checkbox"/>	2	B	557	69.6197	17.5406	145.5480	19.5226
<input type="checkbox"/>	3	A	557	79.9553	2.3662	212.4860	29.0595
<input type="checkbox"/>	4	C	558	61.9951	32.0655	111.0410	15.0843

Cod_vers

(identifiant numérique séquentiel)

Type_vers (A: versant gauche dans le sens du flux; B: versant droit dans le sens du flux; C: versant de réception des sommets, existe juste pour les bassins-versants de premier ordre)

Sec_flux (identifiant numérique séquentiel pour la section fluviale. Attribut utilisé pour établir l'interrelation *versant-section fluvial*)

Pen_Prom (pente moyenne dérivée du MNA)

Pen_Min (pente minimale dérivée du MNA)

Pen_Max (pente maximale dérivée du MNA)

Pen_SD (écart type des valeurs d'inclinaison de la pente)

Note: quelques autres attributs comme courbure, orientation du versant, altitude, seront ajoutés.

5.4 Références bibliographiques du chapitre

ASAMBLEA LEGISLATIVA de COSTA RICA. 1993. Code des mines et leur réglementation / Código de Minería y su Reglamento. 1a.Ed. Investigaciones Jurídicas S.A. Año IV. N° 50. San José, Costa Rica

ARONOFF, S. 1991. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications. Ottawa, Canada.

BARBERA, P. et ROSSO, R. 1989. On the fractal dimension of streams networks. *Water Resources Research*. 25(4):735-741

BÉDARD, Y. 1994. Recueil de lectures: Hiver 1994. Vol 1.. Structuration et stockage de données à référence spatiale. Département de Sciences Géodésiques et Télédétection. Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec. Canada.

BÉDARD, Y. et LARRIVÉE, S. 1992. Développement des systèmes d'information à référence spatiale : vers l'utilisation d'ateliers de génie logiciel. *CISM Journal ACSGC*. 46(4) : 423-433.

BEAULIEU, D., BÉDARD, Y., BHÉRER, L., BOULANGER, G., BOUTIN, G. et DUTIL, F. 1990. Guide de la Géomatique. Ordre des arpenteurs-géomètres du Québec. Canada.

BOUTIN, G. 1988. Étude de l'applicabilité d'une méthode traditionnelle de conception de systèmes d'information dans le contexte d'un système d'information à référence spatiale. Mémoire présentée pour l'obtention du grade de maître ès science (M.Sc.). Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval. Québec, Canada.

BURNS, R. N. et DENNIS, A. R. 1985. Selecting the appropriate application development methodology. *Data Base*. 17(1):19-23.

BURROUGH, P. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford, Clarendon Press. Chap 3: 39-56 pp.

CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F. et REICHENBACH, P. 1996. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. Dans: Internet: <http://158.deis.unibo.it/gis/chapt1.htm>.

CHEN, P. 1976. The entity-relationship model: Toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1(1):3-36.

CLARKE, A. 1991. GIS specification , evaluation and implementation. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 2-Chap 1. John Wiley & Sons Inc. New York.

CODD, E. F. 1970. A relational model of data for large shared data banks. *Communication of the ACM*. 13(6).

DAWES, W. et SHORT, D. 1994. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes. *Water Resources Research*. 30(4):1045-1055

DOUCET, B., BÉDARD, Y., PAQUETTE, F. et BÉLANGER, L. 1994. Utilisation d'outils de modélisation et prototypage pour faciliter le dialogue concepteurs-utilisateurs lors du développement d'un SIRS: application à un cas concret. Dans: Bédard, Y. 1994. Recueil de lectures: Hiver 1994. Vol 1. Département de Sciences Géodésiques et Télédétection Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec. Canada.

FLAGG, A.W. 1993. Follow a seven-step path to GIS nirvana. *GIS World* 6(9) : 48-49.

GANE, C. et SARSON, T. 1979. Structured systems analysis: Tools and techniques. New York, N.Y. Prentice-Hall, Inc.

GOODCHILD, M., KEMP, K., THÉRIAULT, M. et ROCHE, Y. (eds) 1994. Systèmes d'information géographique. Notes de cours. Vol. 1. LATIG. Département de géographie. Université Laval, Québec. Canada.

GONZÁLEZ, C. 1996. Sistemas de bases de datos. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

MARTIN, J. 1989. Information Engineering, Book I, Introduction. Edition Prentice-Hall Inc.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) et Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas (MINAER). 1991. Metodología para la Détermination de la Capacidad d'Utilisation de la Terre au Costa Rica / Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. SEPSA. San José Costa Rica

OLLÉ, T. W. et.al. 1991. Information Systems Methodologies. 2nd. Edition. Addison-Wesley Publishing Company.

PAQUETTE, F. 1990. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion et l'aménagement de la forêt Montmorency. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès science (M.Sc.). Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval. Québec, Canada.

STRAHLER, A. N. 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. Dans: Network Hydrology

TARDIEU, H., ROCHFELD, A., et COLLETTI, R. 1994. La méthode MERISE. Tome 1 Principes et outils. Les éditions d'organisation. Paris.

THÉRIAULT, M. 1994. Systèmes d'information géographique. Concepts fondamentaux. Département de Géographie. Université Laval, Québec. Canada.

TOMLIN, C.D. 1991. Cartographic Modelling. Dans: Maguire, Goodchild and Rhind (eds). *Geographical Information Systems*. Vol 2-Chap 1. John Wiley & Sons Inc. New York.

TOMLIN, C.D. 1983 a. Digital cartographic modelling techniques in environmental planning. Ph.D. dissertation. Yale University, Connecticut.

VILLENEUVE, D. et PAGEAU, J. 1994. Dictionnaire de données à référence spatiale. Dans : Bédard, Y. 1994. Recueil de lectures: Hiver 1994. Vol 1.. Structuration et stockage de données à référence spatiale. Département de Sciences Géodésiques et Télédétection. Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec. Canada.

WERNER, C. 1988. Formal analysis of ridge and channel patterns in maturely eroded terrain. *Annals. of the Association of American Geographers*. 78(2):253-270.

WERNER, C. 1991. Several Duality Theorems for Interlocking Ridge and Channel Networks. *Water Resources Research*. 27(12):3237-3247.

WERNER, C. et SMART, J. S. 1973. Some new methods fo topologic classification of channel networks. *Geographical Analysis*. 5: 271-295.

ZHANG, W. et MONTGOMERY, D. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*. 30(4):1019-1028

CHAPITRE 6

CONSTRUCTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE (MNA)

Dans la perspective d'obtenir un prototype représentatif de ce que nous allons appeler le "cœur" du SIRS orienté vers l'aménagement des bassins-versants, nous avons déterminé que la création d'un modèle numérique d'altitude était une tâche indispensable. Le MNA pouvait nous fournir une grande quantité de données de base pouvant être utilisées pour en extraire une information intéressante dans une perspective d'aménagement. C'est pourquoi nous allons discuter dans ce chapitre: des méthodes de construction des MNA, leurs potentiels et leurs faiblesses, les algorithmes d'interpolation concernés, des procédures pour en tirer des données dérivées (pente, exposition et courbure du relief) et, finalement, des résultats obtenus dans notre application.

6.1 Introduction

Un modèle numérique d'altitude est "*un arrangement ordonné de nombres représentant la distribution spatiale des élévations au-dessus d'un datum arbitraire dans un paysage*" (Moore *et al.* 1993). Il peut consister en des altitudes échantillonnées sur des points particuliers ou des altitudes moyennes sur un segment du paysage. Ainsi que l'altitude, toute autre variable qui est distribuée de façon continue dans l'espace peut être représentée comme un modèle

numérique. Il y a donc toute une famille de modèles numériques de terrain (MNT) avec des noms particuliers pour la variable représentée (Burrough, 1986:39).

Moore *et al.* (1993:15) remarquent l'importance des MNA dans les pays en développement. *“Dans nombre de ces pays, il y a un manque général de données sur l'environnement et le seul document disponible est la carte topographique. A partir des données fournies par ces cartes, des paramètres topographiques peuvent être calculés et utilisés pour la planification des réseaux de recueil d'autres données, ainsi que pour la planification initiale du développement agricole et forestier”*. Le Costa Rica n'étant pas loin de la situation signalée, nous avons placé les produits dérivables du MNA au coeur de notre SIRS pour l'aménagement des bassins-versants.

Les modèles numériques d'altitude (MNA) sont souvent utilisés dans la modélisation hydrologique moderne. On s'en sert pour obtenir des données dérivées telles que l'altitude, la hauteur moyenne des versants, l'orientation ponctuelle, l'inclinaison locale, la pente moyenne, la surface de dispersion, l'inclinaison moyenne des versants, l'inclinaison de dispersion, la superficie du bassin, la longueur du parcours, la longueur du bassin, la courbure en profil, la courbure en plan, etc. (Beven et Moore, 1993; Eash, 1994). On s'en sert aussi pour déduire les routes d'écoulement (*“flow paths”*) (Costa et Burges, 1994; Jenson et Domingue, 1988; Smith and Brilly, 1992), les réseaux hydrographiques (Montgomery et Foufoula, 1993; Ichoku et Chorowicz, 1994; Dawes et Short, 1994; Hutchinson, 1989; Tarboton *et al.*, 1993) et les réseaux de bassins-versants (Band, 1986; Palacios et Cuevas, 1986; Zhang *et al.*, 1990, Verdin, 1997). Enfin, c'est la base de la modélisation physique (*“distributed models”*) des crues (Goodrich *et al.*, 1991; Grayson *et al.*, 1992; Palacios et Cuevas, 1992; Binley and Beven, 1993; Drayton *et al.*, 1993; Zhang et Montgomery, 1994).

Les MNA sont aussi utilisés pour déduire des paramètres morphométriques d'utilité en géomorphologie (Dikau, 1989, 1990, 1993; Gardner *et al.*, 1990; Dymond *et al.*, 1995; Tachikawa, *et al.*, 1994; Lanyon et Hall, 1983; Hall et Olson, 1991; Montgomery et Foufoula, 1993; Desmet, 1993; Jenson et Domingue, 1988), pour l'analyse de stabilité du terrain (Montgomery et Dietrich, 1994; Wu et Sidle, 1995; Wu, 1993), pour le calcul des taux

d'érosion (Arce, 1993); pour détecter les sites de départ des cours d'eau (Tribe, 1991); pour l'étude des sources de contamination non ponctuelles (Hamlett *et al.*, 1992; Panuska *et al.*, 1991); pour la détermination de l'ensoleillement (Ranzi et Rosso, 1995), pour la prédiction des zones de saturation dans les bassins-versants (O'Loughlin, 1986); pour l'étude des risques naturels (Wadge *et al.*, 1993; Carrara *et al.*, 1996; Carrara *et al.*, 1991; Mejia *et al.*, 1994; Gupta et Joshi, 1990) et pour des dizaines d'autres applications.

Pendant longtemps, les applications en modélisation de terrain ("*digital terrain modeling*") ont été mieux adaptées aux logiciels de SIG en mode matriciel. Dans les logiciels de SIG vectoriels, ces applications faisaient partie de modules spécialisés. Les causes de cette séparation étaient de nature technique et conceptuelle, et concernaient le caractère bi-dimensionnel ou 2D des données et des SIG vectoriels traditionnels, et la nature tridimensionnelle ou 3D des applications en modélisation de terrain. De nos jours, on n'a pas encore réussi à intégrer complètement ces deux conceptions de SIRS vectoriels (pas dans les petits logiciels populaires), mais l'utilisation de structures de données plus performantes permet un rapprochement assez fonctionnel. D'autre part, des interfaces conviviales permettent à l'utilisateur de passer sans problème du mode matriciel au vectoriel et vice-versa. Des exemples d'intégration matricielle - vectorielle existent entre les petits logiciels de SIG, tels que ArcView - Spatial Analysis d'Esri; ou MapInfo - Vertical Mapper. Ces développements n'étant apparus que récemment, nous n'en avons pas profité dans le cadre de cette recherche. C'est-à-dire, que nous avons dû passer par des procédures d'exportation-importation de données moins attractives pour pouvoir utiliser la performance en modélisation de terrain disponible dans Surfer et Idrisi, et par la suite revenir au logiciel MapInfo, qui avait été retenu comme logiciel de base pour implanter notre prototype d'application.

6.2 Étapes dans la construction des MNA

La *première étape* dans la construction d'un modèle numérique d'altitude consiste à obtenir la base de données d'altitude. Ceci se fait soit par les méthodes conventionnelles de nivellement, et de photogrammétrie analogique, soit par des méthodes plus modernes: systèmes de

positionnement global (peu précis pour les altitudes, mais précis pour les coordonnées est et nord), stations totales, photogrammétrie numérique.

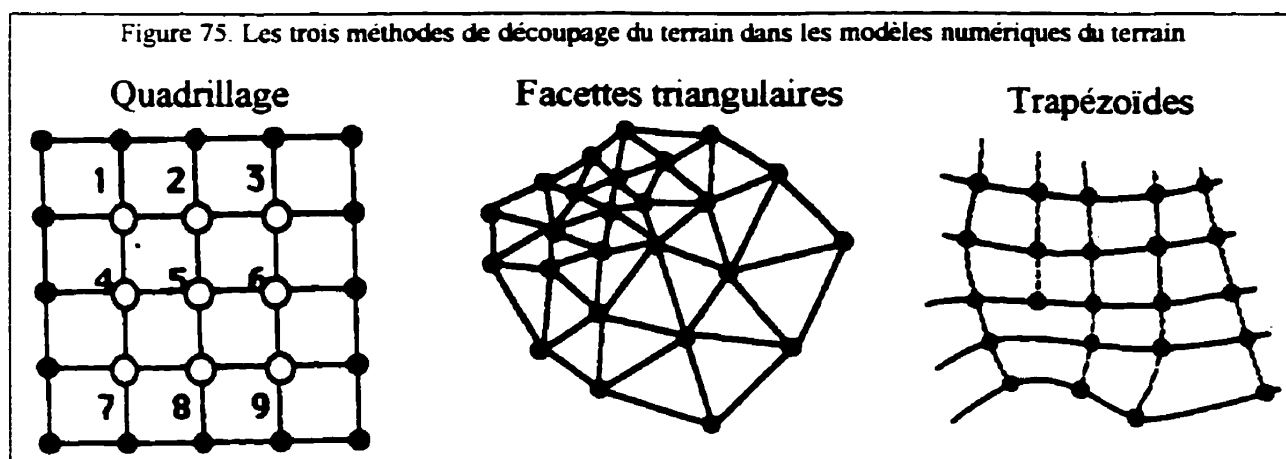
L'arrangement original de ces données d'altitude peut aller des lignes de contour (un des produits de la photogrammétrie conventionnelle), aux quadrillages réguliers (d'après certaines méthodes d'échantillonnage traditionnelles, soit sur le terrain ou par photogrammétrie conventionnelle et numérique), aux points à distribution irrégulière (obtenus par nivellement conventionnel), et, enfin, aux points à distribution particulière dont le dessin a été optimisé pour mieux saisir la variabilité spatiale d'un phénomène dont la distribution peut être présumée.

Makarovic (1976; cité par Burrough, 1986) distingue trois méthodes principales pour l'échantillonnage photogrammétrique permettant de construire des MNA: (1) échantillonnage *sélectif* lorsque les points-échantillons sont sélectionnés avant ou pendant les processus d'échantillonnage; (2) échantillonnage *adaptatif*, quand les points-données redondants peuvent être rejetés lors du processus d'échantillonnage si l'on considère qu'ils apportent peu d'information additionnelle; (3) échantillonnage *progressif* lorsque l'échantillonnage et l'analyse de données se font simultanément, les résultats de l'analyse déterminant la façon dont la sélection doit se poursuivre. (Burrough, 1986:43).

Dans la *deuxième étape*, on doit convertir les données de terrain dans un fichier informatique à structure convenable pour qu'il puisse être traité par un logiciel de construction des MNA. Certaines des techniques d'échantillonnage d'altitude permettent la saisie des données sous forme de fichiers informatiques de sorte que cette deuxième étape est optionnelle.

La *troisième étape* consiste à choisir ce que nous appellerons la *méthode* de construction du MNA. On doit décider quelle sera la procédure générale pour structurer le réseau spatial des unités élémentaires qui composeront le MNA. Trois procédures générales ont été proposées et discutées dans la littérature: le *réseau de triangles irréguliers* (RTI, ou *Triangular Irregular Network*, RTI), le *réseau en quadrillage*, et le *réseau basé sur les isohypses* (ou méthode des trapézoïdes) (fig. 75) (Moore et Grayson, 1991; Moore *et al.*, 1993; Tachikawa, *et al.*, 1994).

Le choix de la procédure est, parfois, affecté par la nature des données d'altitude disponibles. La méthode des trapézoïdes, par exemple, ne s'applique que pour les isohypses, tandis que la triangulation irrégulière n'est pas optimale lorsque les données ont été saisies suivant un quadrillage régulier, sans tenir compte des lignes de force du relief (talweg, lignes de partage des eaux, ruptures de pente, cuvettes, sommets, etc.). Le but de l'application influence aussi la structure du réseau spatial.



La construction du réseau spatial constitue, la *quatrième étape*. La complexité de cette tâche varie selon la méthode. En général, la construction des *grilles régulières* est le cas le plus simple. La matrice spatiale est complètement définie par les coordonnées (X_{terr}, Y_{terr}) d'origine et d'aboutissement, la résolution de la matrice (taille de cellule) et/ou le nombre de "pixels" en lignes et colonnes. Malheureusement, lorsque les données de base n'ont pas été saisies en quadrillage régulier, l'utilisation des grilles régulières oblige à utiliser des algorithmes d'interpolation dans le but d'estimer une valeur unique pour chaque noeud de la matrice spatiale. En conséquence, les noeuds dans la matrice en quadrillage régulière ont une incertitude accrue par rapport aux noeuds équivalents des réseaux de facettes et de trapézoïdes.

La construction des *facettes triangulaires* et des *trapézoïdes* est beaucoup plus compliquée. Dans le cas des *trapézoïdes*, deux des côtés doivent être perpendiculaires aux isohypses et les deux autres seront des approximations tangentielles à la courbe de niveau. En plus, on doit définir une surface maximale à partir de laquelle une cellule doit être divisée en deux. Par ailleurs, la construction des facettes triangulaires peut se faire en utilisant des stratégies

différentes, que nous verrons plus loin (voir 6.3.2). En général, toute méthode de construction des RTI devrait permettre l'incorporation au MNA des *lignes structurelles* ou *lignes caractéristiques* du relief (lignes de partage des eaux, escarpements et autres lignes de rupture de pente, réseau fluvial, etc.). Les arêtes des triangles ne devraient jamais traverser ces lignes.

Tandis que la tâche de construire le réseau spatial s'alourdit par la complexité des règles utilisées lors de la création des *facettes triangulaires* et *trapézoïdes*, la création du réseau spatial en *quadrillage* s'alourdit par le besoin d'interpoler. C'est-à-dire, par l'application d'un modèle mathématique permettant d'*estimer* la valeur d'altitude dans chaque noeud de la grille à partir des données de terrain. L'*interpolation* de l'altitude est donc la *cinquième étape* dans la construction du MNA, mais ne s'applique que dans la méthode du quadrillage régulier.

Plusieurs algorithmes d'interpolation sont disponibles dans les logiciels spécialisés. L'*inverse de la distance*, les *splines*, le *Krigeage*, la *courbure minimale*, sont parmi les plus utilisés lorsqu'on a décidé de créer une matrice spatiale en quadrillage. En mode RTI et trapézoïdal la matrice spatiale est constituée de cellules dont les vertex coïncident avec des points à altitude connue. Ceci évite d'interpoler pour construire la matrice spatiale.

Plusieurs logiciels de SIRS estiment des informations dérivées, telles que la pente, l'orientation des versants, la courbure en plan, et la courbure en profil, pendant le processus de création du MNA. Ces dernières données feront partie de la base de données attributive et non pas de la *géobase*. *Strictu sensu*, cette tâche ne fait pas partie de la procédure de construction du MNA, mais elle y est intimement reliée. De telles estimations peuvent se faire par deux voies. Dans les quadrillages réguliers, on peut les obtenir directement à partir des valeurs ponctuelles de la matrice des altitudes ou encore moyennant l'ajustement d'une surface polynomiale. Pour les *facettes triangulaires* et les *trapézoïdes*, on doit déterminer des surfaces polynomiales.

Dans la méthode des RTI, on considère, le plus souvent, que les triangles sont des plans inclinés dont les propriétés dérivées sont homogènes pour l'ensemble du triangle. Ceci empêche l'estimation de la courbure du terrain et produit un modèle *discret* pour l'inclinaison

et l'orientation des pentes. Des techniques plus complexes prévoient l'ajustement de surfaces polynomiales d'ordre supérieur, dont la continuité mathématique entre les triangles est assurée (Barnhill et Boehn, 1983; cités par Moore *et al.*, 1993). Le remplissage des triangles par des fonctions linéaires a l'avantage de créer des surfaces beaucoup moins complexes, ce qui facilite leur exploitation dans les logiciels de SIG vectoriels en mode bi-dimensionnel (2-D).

Quelle que soit la méthode de construction du MNA ou l'algorithme d'interpolation choisi, la surface interpolée n'est qu'une approximation plus ou moins grossière de la surface réelle du terrain, compte tenu de la généralisation introduite lors de l'échantillonnage spatial, des imprécisions liées à la mesure du phénomène, des incertitudes reliées au choix de la méthode d'interpolation, et des distorsions géométriques induites par le maillage spatial. Une estimation de la qualité du modèle est donc la *sixième étape* dans la construction du MNA.

La vérification de la qualité du MNA peut se faire par diverses procédures. D'abord, on doit tenir compte de la qualité des données de base (le produit de l'échantillonnage) par rapport à la réalité topographique. Ceci détermine déjà un certain degré de généralisation, un changement d'échelle dans le sens cartographique, que l'on doit connaître et accepter si le but de l'application le permet. Sans compter les biais systématiques possibles qui résulteraient d'un protocole d'échantillonnage spatial inadéquat. Une matrice régulière, parce qu'elle impose un espacement systématique entre les points d'échantillonnage constitue un bel exemple de protocole inadéquat qui rate quasi systématiquement les sommets et les creux dans un relief. Évidemment, le problème est souvent atténué par un resserrement du maillage régulier, mais sans jamais disparaître avec les tailles de matrices d'usage courant: équidistance de 10 à 50 mètres.

Deuxièmement, on doit examiner les limitations de chacune des méthodes de construction selon le phénomène qu'on veut modéliser et par rapport au but fixé (Mark, 1978; Moore *et al.*, 1988). Troisièmement, on doit examiner les limitations des algorithmes d'interpolation dans la méthode retenue, par rapport au phénomène que l'on veut modéliser (Dutton, 1988 :10). Les procédures deux et trois sont un peu intuitives, et dépendent de l'expérience de l'analyste, parce que la surface à modéliser n'est souvent pas bien connue. On peut néanmoins effectuer

un premier filtre entre les méthodes disponibles en comparant les principes sur lesquels elles sont fondées avec la nature des processus qui conditionnent la variation géographique du phénomène considéré.

Quatrièmement, on doit vérifier la qualité de l'interpolation par rapport aux données de base. Ceci se fait par simple calcul de la carte des *différences* (*résidus* d'interpolation), ainsi que par l'analyse statistique de leur structure spatiale. Enfin, on doit vérifier l'homomorphisme du MNA par rapport à la réalité de terrain. La surface topographique étant un phénomène particulièrement bien connu et cartographié, cette vérification peut se faire par superposition de la carte des isohypses originales avec la carte des isolignes dérivées du MNA. On peut aussi calculer les *différences* moyennes entre la surface interpolée et des points d'échantillonnage non utilisés lors de l'interpolation. On pourrait aussi vérifier l'existence d'autocorrélation spatiale significative entre les résidus obtenus de cette façon.

La surface topographique étant une structure *fractale*, on ne peut que l'approcher grossièrement à l'aide d'un MNA. En général, plus la densité des points d'échantillonnage est grande, plus on se rapproche de la surface réelle. Mais, pour une échelle considérée, on doit fixer une limite de précision (en altitude) qui doit être atteinte avec un minimum de repères.

Pour le cas particulier des applications hydrologiques, mais aussi pour les autres applications, la méthode de construction des MNA devrait inclure la possibilité de définir les *axes structurels du relief* au travers desquels l'interpolation est interdite pour des considérations théoriques. La méthode des *trapézoïdes* est particulièrement bien adaptée à l'utilisation de telles lignes structurelles, la méthode du RTI peut s'y adapter si la procédure de détermination des points est adéquate, tandis que la méthode de *grille* est incapable de répondre à ce type de besoin.

Les axes structurels du relief étant des phénomènes presque linéaires et/ou ponctuels à toute échelle, il est impossible de les reproduire en forme appropriée par la plupart des méthodes d'échantillonnage. En plus, souvent, de tels échantillonnages sont faits sans considération des exigences de la modélisation numérique dans les MNA. L'addition des axes structurels, même

ceux saisis en deux dimensions, permet de créer des surfaces plus réalistes, évitant la formation de *micro dépressions* (« *pits* ») et *micro sommets* (*summits*) factices d'échelle locale, qui apparaissent typiquement le long des dits axes. Sous-produits d'une procédure d'interpolation inadéquate, ces micro-reliefs artificiels sont nuisibles pour la modélisation hydrologique et requièrent des techniques permettant de les éliminer.

Deux des techniques utilisées pour défaire ces dépressions artificielles (« *pits* ») sont la *généralisation* et le *remplissage*. Dans la première, on utilise une fonction locale -le plus souvent la valeur médiatrice-, définie dans une fenêtre mobile ou « *kernel* » qui s'applique itérativement à chaque noeud du MNA pour remplacer les valeurs d'altitude estimées. Le résultat de ce traitement est l'équivalent d'une procédure de généralisation cartographique avec une perte considérable de détails et une diminution de l'exactitude du MNA et produits dérivés, tels que la carte de pentes et d'orientation de versants. On peut l'utiliser avec plus de confiance lorsque l'échantillonnage dépasse la densité requise pour l'échelle considérée. Ces techniques de correction sont fort répandues dans les applications matricielles (mode *grille*), et leur existence même plaide en faveur des méthodes RTI et trapézoïdales.

Le *remplissage* des fausses dépressions est un traitement comportant deux étapes. Dans la première, on doit identifier les fausses dépressions en les distinguant des vraies; dans la deuxième, on applique itérativement une fonction locale qui fait croître les minimums locaux jusqu'à l'obtention d'une surface doucement inclinée. Cette fonction n'affecte que les valeurs d'altitude dans l'environnement local ayant été pré-classées comme appartenant à l'une des dépressions artificielles. Quoique plus rares et moins problématiques du point de vue de la modélisation hydrologique, les micro-sommets artificiels sont aussi traitables par cette technique.

6.3 Les méthodes de construction des MNA

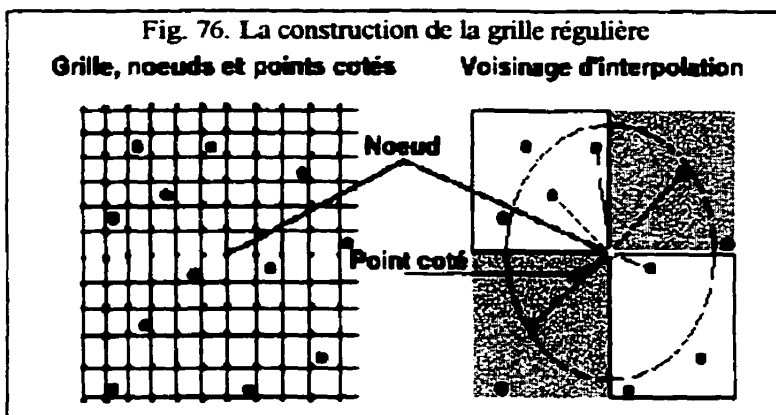
Tel que mentionné ci-haut, trois méthodes générales ont été proposées pour la construction des modèles numériques d'altitude: quadrillages réguliers, triangles (ou facettes) irréguliers et trapézoïdes irréguliers (aussi appelée la méthode des isohypses). Ces principes de découpage

territorial remontent aux années soixante, mais leur implantation en forme d'algorithmes informatiques s'est développée en particulier à partir des années quatre-vingts.

6.3.1 La méthode en quadrillage régulier (MNA matriciels)

Le plus souvent il s'agit d'un quadrillage dont la valeur d'altitude a été mesurée ou doit être estimée à chaque noeud d'intersection dans une grille régulière. (fig. 76).

Ce type de MNA est le plus utilisé. Il est basé dans une structure de données du type matriciel qui a l'avantage d'être simple et facilement dérivable. Cependant, ce modèle a plusieurs inconvénients: (1) il n'est pas capable de saisir les changements brusques; (2) la taille de la grille affecte la fidélité des résultats obtenus et le temps de calcul; (3) les lignes de flux, vers l'amont, utilisées dans les analyses hydrologiques ont tendance à faire des "zigzag" résultant dans des représentations peu réalistes. Considérant que la grille doit s'adapter aux terrains accidentés, il peut exister une certaine redondance dans les terrains plats. (Moore *et al.*, 1993; Panuska *et al.*, 1991).



Costa et Burges (1994) proposent une procédure capable de reproduire la véritable orientation du flux de masse sur un versant tout en utilisant un découpage matriciel. Une telle procédure est de grande utilité pour les applications en hydrologie et en géomorphologie parce qu'elle permet de faire le calcul d'importants paramètres du terrain, tels que la surface totale contributive (STC), la zone drainée vers un segment unitaire de l'isohypse ou surface spécifique contributive (SSC), la surface totale de dispersion (STD), et surface spécifique de dispersion (SSD).

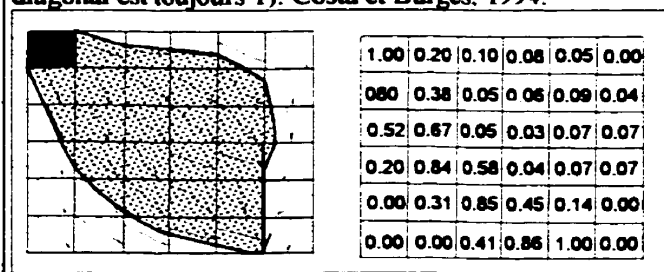
La STC est la zone drainée vers un segment unitaire de l'isohypse et placée topographiquement au-dessus de celle-ci. La STD est la zone réceptrice du flux provenant d'un segment unitaire de l'isohypse et placée topographiquement en-dessous de celle-ci. La SSC équivaut à la STC divisée par la longueur unitaire du segment de contour (L). De façon similaire, $SSD = STD/L$.

Costa et Burges (1994) signalent que le calcul de tous ces paramètres, lorsque faits avec des algorithmes qui considèrent chaque *pixel* d'une matrice régulière comme une source ponctuelle de masse, donne des résultats assez trompeurs. Pour ces algorithmes un *pixel* n'émet qu'un flux unidimensionnel dans l'une des huit directions de base (N,NE,E,...,NO). Au contraire, l'algorithme de Costa et Burges considère le pixel comme une source non ponctuelle produisant un "tube" de flux dont l'amplitude est déterminée par l'orientation de la surface du pixel. Il est intéressant de remarquer que cet algorithme considère négligeable les flux NO, NE, SE, et SO tenant compte que la surface de contact diagonal entre deux "pixels" tend vers zéro. La figure 77 illustre le principe utilisé pour Costa et Burges (1994) pour contourner les limitations 1, 3 et 4, signalées ci-haut, concernant les MNA en mode matriciel. À remarquer que, pour tout pixel, le flux peut prendre n'importe quelle direction et que le flux diagonal est égal à zéro.

Une telle solution est possible si l'on est capable d'ajuster une fonction mathématique sur la matrice régulière créée par interpolation, par balayage photogrammétrique ou par levé sur le terrain. Il s'agit donc d' "un essai pour reconstruire la surface topographique après qu'elle a été emmagasinée dans le format d'une image comprimée d'un modèle numérique d'altitude" (Costa et Burges, 1994:1685). Voir aussi 6.5.1.

Les problèmes de redondance de données, lors de la phase d'échantillonnage par saisie photogrammétrique, ont été partiellement résolus par la technique d'échantillonnage *progressif* (Makarovic, 1973), dans laquelle les

Figure 77. Simulation d'un processus de diffusion contrôlé par l'orientation de la pente et non pas restreint aux huit directions de base: N,NE,E,SE,S,SO,O. (Le flux diagonal est toujours 1). Costa et Burges, 1994.



stéréophotos sont automatiquement *scannées* sur des grilles progressivement plus fines selon la complexité du relief (Burrough, 1986, p.44).

Le découpage territorial en quadrillage se traduit en langage informatique dans un modèle de données connu comme le modèle "*matriciel*" qui se traduit, le plus souvent, dans une structure de données du type "*raster*", ou plus rarement, dans des structures plus complexes, comme les *arbres quaternaires* ("quad-tree") dont l'ordre de balayage spatial et le codage suit différentes stratégies. Un des avantages d'une telle structure est que le MNA peut être combiné et analysé conjointement avec d'autres données dont le format est très proche, par exemple, les images satellitaires.

Dans une perspective plus théorique, le découpage en cellules rectangulaires a été critiqué parce que de telles cellules utilisent quatre points pour décrire des surfaces plates alors qu'on n'a besoin que de trois points. Ceci peut être résolu si l'on transforme le réseau matriciel dans un réseau triangulaire (Lee,1991; Tachikawa *et al.*,1994). Ces derniers auteurs montrent qu'une telle transformation offre des avantages pour la modélisation géomorphologique dans les contextes d'un système d'information géomorphologique des bassins-versants (Tachikawa *et al.*, 1994:13).

La valeur d'altitude dans chaque cellule de la matrice spatiale étant définie par interpolation, cette méthode de découpage donne des estimations approximatives de l'altitude. Certains algorithmes d'interpolation dits *approximatifs* peuvent même altérer la cote d'altitude dans les noeuds coïncidant avec une donnée de terrain, ce qui est tout à fait inacceptable.

6.3.2 La méthode des facettes triangulaires

Cette méthode représente le territoire par un réseau de triangles irréguliers (figure 75) où les vertex coïncident avec les points échantillonnés. Chaque triangle est défini par trois arêtes et chacune des arêtes est limitée par deux vertex. Idéalement, les vertex se rapportent aux points particuliers du terrain ("*specific points*"): sommets, dépressions et coteaux, tandis que les

arêtes décrivent les caractères linéaires du terrain: lignes de rupture, fond de vallées et lignes de partage des eaux (Lee, 1991:268).

La méthode des RTI a été largement utilisée dans les SIG. Parmi ses avantages, on mentionne qu'elle facilite une représentation topologique efficace et une représentation à résolutions multiples, ce qui engendre des économies en mémoire pour le stockage des données. Elle est aussi efficace pour le traçage automatique des isolignes, la visualisation en 2½ D, le recouvrement de la surface avec d'autres données thématiques (drapées), l'ombrage du relief, l'analyse volumétrique, et l'analyse d'intervisibilité (Tsai, 1993:501). Les paramètres du terrain: pente, exposition, superficie et périmètre, peuvent être calculés pour chaque facette triangulaire et emmagasinés comme attributs associés à chaque facette. En plus, la structure de données en RTI est gérée comme une structure vectorielle topologique quelconque, permettant les opérations de superposition et d'intersection avec d'autres couches thématiques (Burrough, 1986; Tsai, 1993).

Dans la plupart des méthodes en RTI, les triangles sont considérés comme des surfaces linéaires. C'est-à-dire, qu'on ne conserve pas toute la *variance* du phénomène analysé à l'intérieur des triangles. Puisque les triangles ont des tailles variables, souvent très grands dans les terrains plats, on perçoit les discontinuités dans les arêtes et une morphologie en facettes trop artificielle. Ceci est vu comme une contrainte dans une perspective de visualisation, malgré les économies en matière d'emmagasinage.

La plupart des méthodes pour la construction du modèle RTI consistent à trouver l'ensemble des points qui représentent au mieux la surface du terrain d'après un nombre de critères préétablis (Lee, 1991:268). On suppose que les données sont autocorrélées et on essaie de minimiser la redondance en éliminant les points apportant une contribution trop marginale pour la construction d'une surface représentative de la surface réelle.

Dans un premier temps, on doit établir l'importance de chaque point pour modéliser la surface. Un point est dit "important" si son altitude ne peut pas être estimée adéquatement en utilisant les altitudes observées dans son voisinage. L'utilisateur définit le degré d'ajustement en

fonction de ses besoins et de cette façon contrôle partiellement la résolution du modèle en RTI.

Deuxièmement, on établit des règles pour effectuer et terminer la sélection. Une approche consiste à l'arrêter lorsqu'un nombre prédéfini de points ont été sélectionnés. Dans ce cas, on cherche à trouver et à utiliser les points les plus significatifs pour modéliser la surface. La deuxième approche indique d'arrêter la sélection lorsqu'il n'y a plus de points excédant une limite de tolérance déterminée. On cherche donc, à contrôler la différence maximale entre la surface RTI et la surface réelle (Lee, 1991:269).

Lee (1991:269) distingue quatre catégories de méthodes RTI pour modéliser la surface du terrain:

La méthode "squelette" proposée par Fowler et Little (1979) suivant les concepts suggérés par Peucker et Douglas (1975) consiste à trouver les points structurels du relief (le squelette) avec lesquels on construit un premier modèle RTI. Par la suite, on additionne des points d'appui dépassant un niveau de tolérance d'altitude pré - spécifié. Cette méthode est difficile à programmer, requiert de spécifier des limites horizontales et verticales de tolérance et montre beaucoup de sensibilité aux erreurs dans la spécification d'altitude des terrains plats.

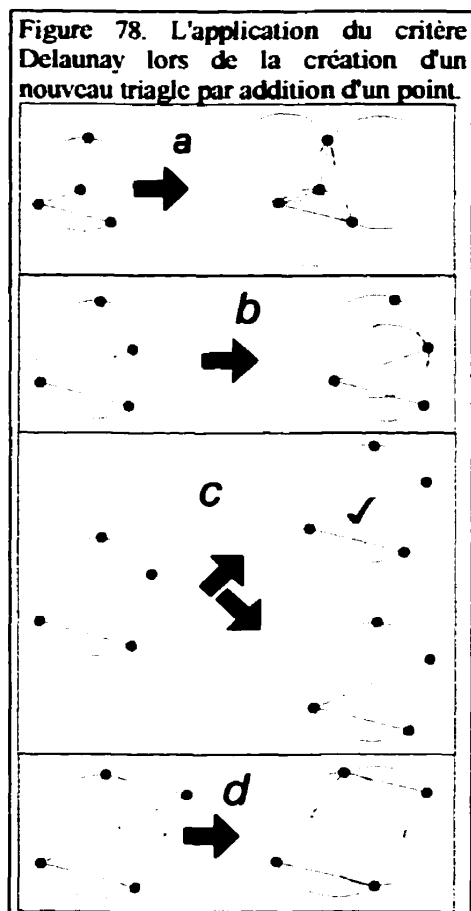
La méthode du "filtrage" proposée par Chen et Guevara (1987) consiste à sélectionner les "points très importants" (VIP: *very important points*) de la surface. La méthode est adaptée pour trouver ces points à partir des MNA en mode grille. La procédure consiste à utiliser un filtre sur une fenêtre de 3x3 pixels pour calculer les différences d'altitude perpendiculaires entre les axes N-S, E-O, NE-SO, NO-SE et le point au centre de la grille. Les différences moyennes sont calculées pour chaque fenêtre. Les points ayant les différences plus fortes sont considérés des VIP points et feront partie du RTI. La procédure utilise un algorithme simple et rapide, mais la fixation est faite uniquement en fonction de la topographie locale.

De Floriani *et al.* (1994) ont proposé une méthode de triangulation "hiérarchique" (HT) qui est, à la fois, une structure de données et une méthode pour sélectionner les points significatifs

pour construire le RTI. En utilisant cette procédure, la surface est modélisée en niveaux de détails de plus en plus fins avec des triangles emboîtés.

Tsai (1993) signale que la procédure de triangulation proposée par Delaunay (1934) contient toutes les propriétés importantes pour décrire le terrain; on l'utilise souvent pour créer les modèles RTI. L'auteur distingue entre la procédure Delaunay *standard* (sans contraintes) et la procédure *modifiée* (soumise à certaines contraintes). Les contraintes sont, soit les arêtes importantes du relief (lignes de crête et fonds de vallées), ou des frontières d'exclusion externes et internes. Dans tous les cas, ces contraintes sont ajoutées sur le réseau triangulaire de base créé par l'une des méthodes Delaunay *standard*.

Une triangulation de Delaunay d'un groupe de points est un ensemble de triangles interconnectés mais non superposés de sorte que le cercle circonscrit de chaque triangle ne contient pas d'autres points. Il s'agit du *critère Delaunay*. L'application de ce critère lors de la création d'un nouveau triangle par addition d'un point quelconque est montré dans la figure 78. Dans le premier cas (*a*), le nouveau point est à l'intérieur du cercle circonscrit et d'un triangle préexistant, ce qui oblige à subdiviser ce dernier en trois triangles fils. Dans *b*, le point est dans le cercle circonscrit mais en dehors du triangle préexistant. La solution correcte, dans ce cas et celle qui produit deux triangles avec cercles circonscrits vides. Cette solution, en plus, concorde avec le *critère de Lawson*, ou critère des triangles équilatéraux. Dans le cas *c*, le nouveau point coïncide avec la frontière du cercle circonscrit et deux solutions sont possibles; on préférera alors celle qui minimise la longueur totale des côtés. Lorsque le nouveau point est en dehors du cercle circonscrit (*d*), la solution consiste à connecter ce point avec les vertex du côté le plus rapproché.



D'après la procédure utilisée pour créer le réseau triangulaire, les algorithmes peuvent être divisés en trois classes principales: *diviser et conquérir*, *insertion progressive* et *triangulation croissante* (Tsai, 1993:508).

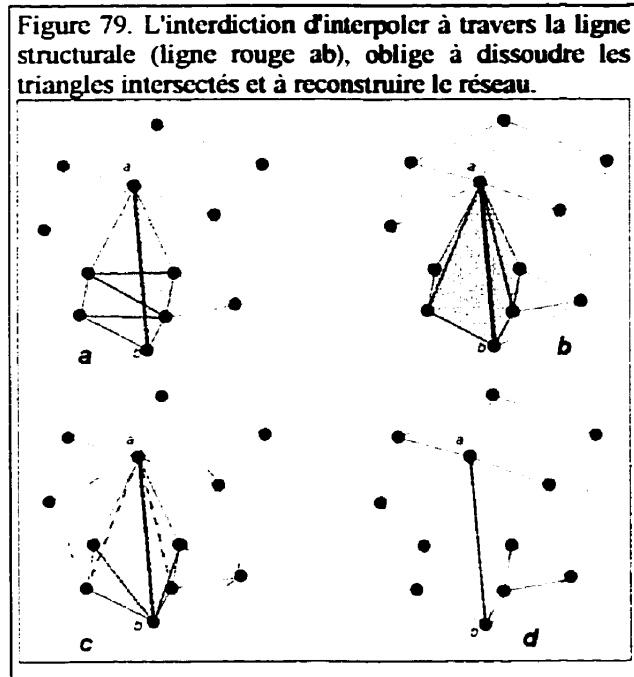
La première procédure consiste à ordonner spatialement la série de données et par la suite à la diviser récursivement en deux groupes pour construire un arbre binaire. À la fin de la chaîne chaque sous-ensemble doit contenir de 3 à 6 points à partir desquels on en sélectionne trois pour construire un premier triangle, et on ajoute les autres itérativement. Enfin, les triangulations sont agrégées niveau par niveau jusqu'à la construction de l'ensemble du réseau.

L'algorithme d'*insertion progressive* consiste à définir une superstructure triangulaire ou rectangulaire et par la suite insérer chaque point non traité, un par un, dans les triangles de Delaunay existants, qui sont alors raffinés.

La *triangulation croissante* consiste à sélectionner un point quelconque à partir duquel on cherche le point voisin le plus proche. Ces deux points seront connectés par une ligne droite ou *ligne de base* à la droite de laquelle on cherchera le voisin le plus proche pour compléter un premier triangle. Chacun des deux nouveaux côtés du triangle formeront à leur tour une ligne de base pour la recherche et la connexion avec d'autres points à leur droite. De ce fait, le réseau triangulaire croît par un processus de diffusion.

Quel que soit l'algorithme utilisé pour créer la triangulation de Delaunay, on a souvent besoin d'introduire des *restrictions* dans le réseau triangulaire. Ces restrictions sont souvent des frontières à travers lesquelles l'interpolation est *interdite* (les arêtes du relief). Dans l'approche traditionnelle, l'algorithme doit identifier les triangles qui sont intersectés par chaque *ligne structurale* (fig. 79a) et éliminer tous les côtés intérieurs des triangles pour créer le *polygone d'influence* de la ligne de restriction (fig. 79b). Par la suite, tous les vertex du *polygone d'influence* seront connectés au noeud de départ de la ligne de restriction (fig. 79c) et une nouvelle triangulation *restreinte* mais obéissant au *critère de Lawson* est réalisée (fig. 79d).

Tsai (1993:512-521) présente un algorithme de triangulation appelé le *Convex Hull Insertion*. Le *Convex Hull* (polygone convexe) d'un ensemble de points coplanaires est défini comme le plus petit polygone convexe les contenant. Toute ligne liant deux points situés dans le polygone doit rester entièrement dans ce polygone, et le polygone lui-même, fait partie de la triangulation *Delaunay standard*.



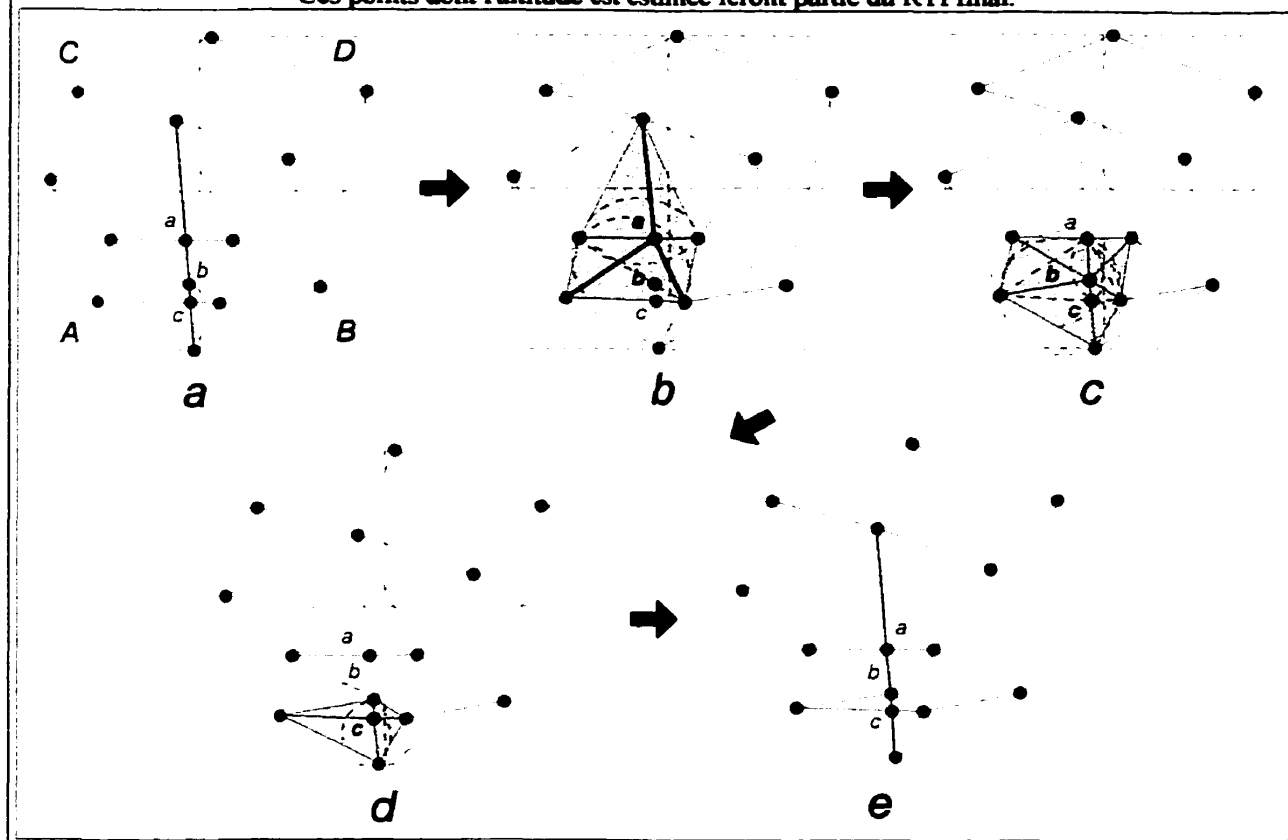
L'algorithme proposé par Tsai suit plusieurs étapes: (1) diviser l'ensemble de points en N/k cellules, c'est-à-dire $(N/k)^{1/2}$ lignes et colonnes, où k est le nombre moyen de points par cellule (par défaut $k = 4$); (2) trouver le *polygone convexe* de l'ensemble sous-divisé; (3) construire la triangulation *Delaunay* dans le *polygone convexe* en utilisant le *critère de Delaunay*; (4) insérer itérativement d'autres points non compris dans le *polygone convexe*, et raffiner la triangulation *Delaunay* de base; (5) insérer itérativement les segments

représentant des *restrictions* (lignes structurales du relief) et raffiner la triangulation *Delaunay*; (6) éliminer tous les triangles qui sont en dedans des frontières d'exclusion interne ou en dehors des frontières d'exclusion externe.

L'algorithme présenté par Tsai inclut la possibilité de masquer les zones d'exclusion tel que le polygone externe à la zone d'étude, ou des polygones intérieurs, comme les lacs. En plus, les algorithmes pour l'insertion itérative de nouveaux points ou des *lignes de restriction* sont plus sophistiqués. Dans le cas des lignes de restriction, l'algorithme de Tsai crée des vertex¹ dans toute intersection entre cette ligne et la triangulation *Delaunay* existante (figure 80).

¹ Dans le cas des lignes structurales saisies en 2-D (coordonnées x,y), l'altitude dans ces vertex doit être estimée, tandis que dans la saisie 3-D (coordonnées x,y,z) par photogrammétrie numérique, les lignes structurales font partie intégrale de l'échantillon utilisé pour la création du RTI et aucune estimation est nécessaire.

Figure 80. Représentation graphique du processus de construction du RTI d'après l'algorithme de Tsai, 1993. L'introduction d'une ligne structurale (ligne rouge) oblige à créer des vertex dans les intersections a,b,c. Ces points dont l'altitude est estimée feront partie du RTI final.



6.3.3 La méthode vectorielle ou des trapézoïdes

Étant donné que les cartes en courbes de niveau sont souvent les seuls documents disponibles pour faire l'analyse du relief, une procédure analytique qui utilise directement le contenu informationnel des isohypses a été suggéré. Dans sa version non informatisée, la procédure a été proposée par Onstad et Brakensiek (1968) et reprise par Speight (1974) qui l'a utilisée pour dériver des paramètres morphométriques et hydrologiques (voir 6.3.1). Une première version informatisée fut alors proposée par O'Loughlin (1986) et suivie par Grayson *et al.* (1988) et Moore et Grayson (1991), entre autres.

Moore et Grayson (1991) remarquent que le découpage en trapézoïdes (fig. 81) est le mieux adapté lorsqu'il s'agit de modéliser les processus de transport de masse sur la surface du terrain. Une telle modélisation est basée sur le concept de *tube de flux* tel qu'illustré dans la figure 81 (Onstad et Brakensiek, 1968; Moore *et al.*, 1988; Grayson *et al.*, 1992; Wu et Sidle, 1995).

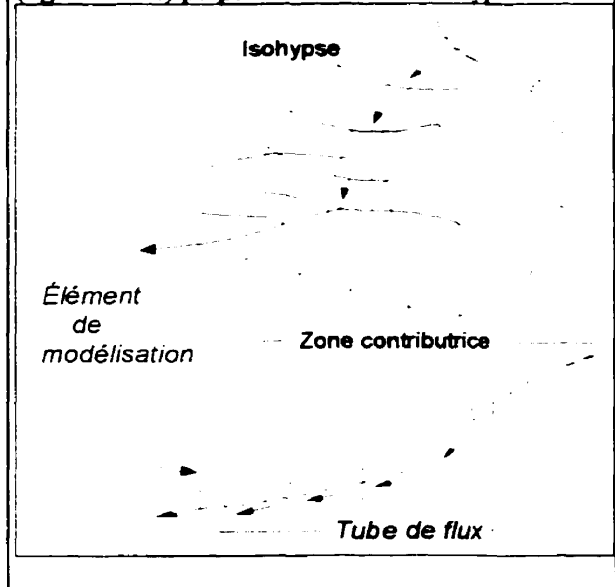
D'après Moore et Grayson (1991:1178), la discrétisation en trapézoïdes est la seule méthode de modélisation du terrain qui permet d'extraire les propriétés d'intérêt hydrologique et géomorphologique sans une connaissance préalable du relief. Ceci nous semble discutable puisqu'on a besoin de la carte topographique pour pouvoir utiliser la méthode.

La procédure utilisée pour construire les trapézoïdes consiste à superposer les lignes de

flux aux isohypses pour créer les différents *tubes de flux*. Les lignes de flux sont normales aux isohypses (lignes équipotentielles). Les isohypses sont introduites directement (code d'altitude compris), tandis que les lignes de flux sont construites par un processus analytique, itératif, qui débute le plus souvent avec l'isohypse de moindre altitude. Ce processus compare les isohypses par paires successives et crée des segments perpendiculaires partant de l'altitude supérieure vers l'isohypse inférieure. Un paramètre d'entrée contrôle la distance entre chaque couple des vecteurs qui font partie de deux lignes de flux voisines. Ceci détermine la largeur locale du *tube de flux* et l'ampleur du *trapézoïde* (défini par l'intersection du couple de vecteurs voisins avec les isohypses intersectés).

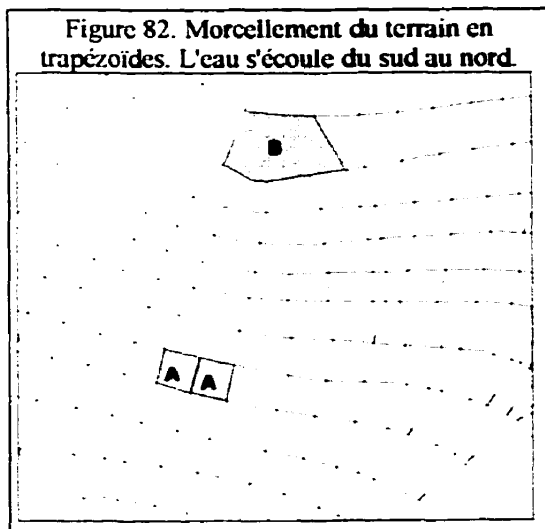
Les lignes de flux sont construites en utilisant deux critères: (1) que la distance soit minimale entre deux courbes de niveau adjacentes, et (2) qu'elles soient orthogonales aux isohypses d'altitude inférieure. Ces deux critères sont utilisés dans le but de limiter l'erreur liée à

Figure 81. Dans le réseau spatiale en trapézoïdes, chaque cellule élémentaire (zone ombragée) fait partie d'un *tube de flux* délimité par des vecteurs (lignes vertes) perpendiculaires aux isohypses.



l'utilisation de segments de ligne droite dans la définition des lignes de flux. Le premier critère est utilisé pour les arêtes (dorsales) et le deuxième pour les thalwegs. L'application de l'un ou l'autre des critères est déterminé par la courbure de l'isohypse (radians par mètre sur un plan horizontal) qui est estimée par différentiation numérique des noeuds le long de la ligne.

L'espacement horizontal entre isohypses est contrôlé par un choix soigneux de l'équidistance verticale et en utilisant des lignes auxiliaires lorsque le terrain est plat. Par ailleurs, la distance entre les vecteurs du flux adjacents, λ , qui définit la largeur du *tube de flux*, est contrôlée par un paramètre d'entrée S_{int} rapporté à la surface intérieure allouée pour chaque trapézoïde. Dans TAPES, l'un des logiciels les plus utilisés pour faire ce type d'analyse (Moore et Grayson, 1991), si: $1.3 S_{int} < \lambda < 2 S_{int}$, un nouveau noeud de début de ligne de flux est inséré à mi-chemin ($\lambda/2$) entre les lignes de flux existantes et la courbe de niveau en aval (voir A, dans la figure 82). Par contre, si, $2 S_{int} < \lambda < n S_{int}$ (où n est un entier plus grand que 2) on doit insérer $(n-1)$ noeuds également espacés et distancés ($\lambda/(n-1)$) unités (mètres) qui s'ajouteront à l'isohypse, en aval (voir B, dans la figure 82).



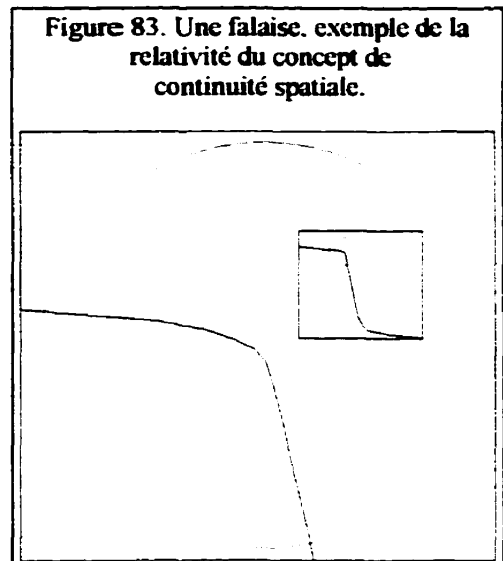
La figure 82 montre qu'un trapézoïde peut recevoir le flux provenant d'un, deux ou plusieurs trapézoïdes situés en amont, mais il ne peut transférer son flux que vers un seul élément en aval. Lorsque plusieurs lignes confluent vers un axe principal, elles deviennent asymptotiques et la superficie des trapézoïdes diminue sans devenir nulle.

6.4 Discussion des méthodes et algorithmes d'interpolation

L'interpolation spatiale consiste à "*estimer la valeur d'une propriété dans des sites non échantillonnés dans la zone couverte par des points d'observation existants*" (Burrough, 1986:147).

La rationalité derrière la procédure d'interpolation est l'observation commune que les points d'un échantillon qui sont voisins dans l'espace ont des propriétés similaires, tandis que les points plus éloignés ont des propriétés de plus en plus différentes. Cette particularité est connue comme l'*autocorrélation spatiale*. Un autre postulat de l'interpolation spatiale repose sur l'existence de *continuité* mathématique dans la fonction distribuée dans l'espace.

Cette dernière condition est fortement dépendante de l'échelle d'analyse considérée. La température de l'air est une propriété distribuée montrant une continuité et une autocorrélation à toute échelle. Cependant, à l'échelle planétaire, les *fronts froids* sont considérés comme des discontinuités dans le champ de la température. Une *falaise* (fig. 83) est une discontinuité topographique sur une carte au 50 000 ième, mais ne l'est plus si on la représente au 1 000 ième. La répartition de l'or dans un dépôt fluvial ne constitue pas une fonction continue; mais si on exprime cette propriété comme une *taux* de concentration par unité de surface, on peut arriver à un modèle de distribution assez continu.



Pour estimer la valeur d'une propriété dans un point non compris dans l'échantillon, on utilise toujours l'information qui provient des points échantillonnés. En absence d'autocorrélation spatiale, la seule estimation possible est celle basée sur des critères statistiques tels que la fonction de distribution, la valeur moyenne et l'écart type. C'est-à-dire, une estimation basée sur la théorie des probabilités, sans aucune référence à l'espace géographique considéré. Ceci, évidemment est insuffisant dans le contexte de l'analyse spatiale.

Lorsqu'il existe une autocorrélation, l'estimation peut être améliorée en accordant des *poids* différentiels aux points du *voisinage*: les points les plus proches ayant un poids relatif supérieur à ceux qui sont plus éloignés. Dans une première option, ces poids sont assignés d'après un *modèle déterministe* qui décrit approximativement la fonction de décroissance de la

corrélation spatiale selon la distance entre l'ensemble des points voisins considérés et le point à interpoler. Dans une deuxième option, ces poids sont répartis suivant un *modèle stochastique* dans lequel les poids ne dépendent pas strictement de la distance qui sépare chaque point échantillonné du point à être interpolé, mais de la *covariance* entre l'ensemble des points d'échantillon constituant le voisinage du point à interpoler et la *covariance* entre l'ensemble des points du voisinage et le point à être interpolé.

6.4.1 La méthode des moyennes mobiles pondérées

Cette méthode consiste à estimer la valeur d'altitude Z^* d'après une fonction inverse de la distance. Cette estimation est répétée pour chaque point dans une grille régulière en utilisant un voisinage circulaire ou elliptique de rayon connu (fig. 76). Formellement:

$$Z^*(x_j) = \left(\sum_{i=1}^n Z(x_i) \cdot d_{ij}^{-\alpha} \right) / \left(\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-\alpha} \right) \quad (1)$$

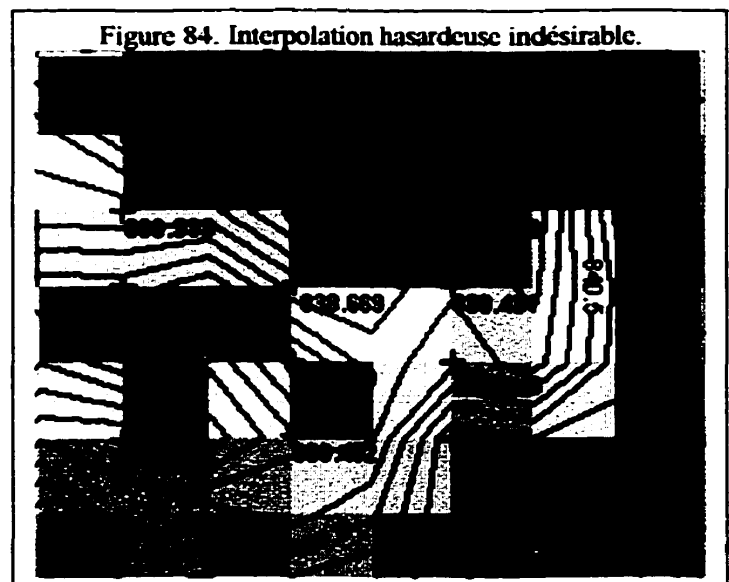
où Z^* est la valeur d'altitude estimée,
 x_j sont les points pour lesquels l'interpolation est faite,
 x_i sont les points échantillonnés du voisinage,
 Z est la valeur d'altitude dans un point d'échantillon du voisinage,
 d_{ij} est la distance entre le point d'échantillon x_i et le point interpolé x_j , et
 $-\alpha$ est le facteur de pondération de la distance (toujours négatif).

En règle générale l'autocorrélation diminue avec l'augmentation de la distance d_{ij} entre la valeur observée Z et la valeur estimée Z^* , d'où l'utilisation d'un coefficient négatif ($-\alpha < 0$) dans la fonction de pondération ($d_{ij}^{-\alpha}$). Habituellement le coefficient $-\alpha$ vaut -2 indiquant que la contribution des points du voisinage dans l'estimation de Z^* décroît selon une fonction quadratique inverse de la distance. Un coefficient $-\alpha$ de -1 indique une décroissance linéaire de la contribution des points en fonction de la distance d_{ij} . Le *poids relatif* d'un point d'échantillon x_i dans l'estimation de chacune des altitudes Z^* des divers points x_j dans la grille dépend de sa distance par rapport au noeud (x_j) considéré, du nombre de voisins dans la région

de recherche (i.e., du voisinage), ainsi que de la distance totale entre tous les points échantillonnés du voisinage et le noeud considéré. La valeur Z^* dans un noeud, est déterminée non pas juste par la contribution relative de chaque point du voisinage, mais par leurs valeurs absolues et par la stratégie ayant permis leur sélection.

À l'exception de la stratégie de sélection, les quatre autres paramètres doivent changer lorsqu'on se déplace d'un noeud de la grille vers le suivant. Cependant, lorsqu'on essaie de créer une grille trop dense (une grille ayant un nombre de noeuds supérieur à dix fois le nombre total de points échantillonnés, il arrive que les points utilisés pour estimer la valeur Z^* soient les mêmes pour deux ou plusieurs noeuds dans la grille. Dans ce cas, la valeur Z^* changera en fonction des variations des *poids relatifs* des divers points considérés, et non pas des valeurs Z mesurées. Une telle variation dérive plus de la méthode utilisée que des données mesurées et produit une matrice d'altitude instable où le "bruit" de l'algorithme l'emporte sur les valeurs réelles (fig. 84).

Lorsque la valeur du paramètre $-\alpha$ augmente, la surface interpolée devient moins lisse et un effet connu comme les "yeux de boeuf" apparaît (Voir les noyaux dans la figure 84). Ceci traduit une contribution rapidement décroissante des voisins relativement éloignés lorsque l'on utilise des valeurs $-\alpha > -1$. D'autre part, moins la surface est lissée, plus les valeurs Z^*



interpolées se rapprochent des valeurs Z mesurées dans une localisation particulière.

L'algorithme de *l'inverse de la distance* utilisé dans le logiciel *Surfer* (Golden Software, 1995: 5.30) ajoute dans la formule de calcul un paramètre de lissage additionnel (δ) pour tenir compte de l'incertitude des données. Ceci produit une interpolation moins rigide, même lorsqu'on utilise des puissances α élevées, telles que 2, 3, ou 4.

Plusieurs remarques ont été faites à propos de la méthode d'interpolation par les *moyennes mobiles pondérées*: sensibilité à la taille du voisinage, sensibilité aux distributions anisotropiques des points d'échantillon, production de surfaces à noyaux multiples, incapacité de représenter les détails linéaires et absence d'estimation des incertitudes associées aux estimations de Z^* .

6.4.2 La courbure minimale

D'après son nom, cette méthode d'interpolation essaie de produire la surface continue de moindre courbure sur laquelle tous les points d'observation sont ancrés. Des surfaces encore moins courbées sont par exemple les surfaces de tendance basées sur une *régression polynomiale des moindres carrés* ou encore les surfaces plates produites par les réseaux triangulaires: RTI. Cependant, les *surfaces de tendance* n'essaient pas de reproduire les valeurs observées avec exactitude, raison pour laquelle Laslett *et al.* (1987:331-332) ne les considèrent pas comme des procédures d'interpolation *strictu sensu*²; tandis que les surfaces en RTI ne sont pas des surfaces avec continuité mathématique.

La méthode de la *courbure minimale* est inspirée du principe des *règles flexibles* ("thin plates") dont la pression exercée dans un point donné produit une réaction (déformation) affectant un environnement local déterminé par certains points fixes ou frontières. Dans l'espace 2D, cet environnement local est connu comme une *plaque* ou *pièce* faisant partie de la *mosaïque* totale de la surface interpolée. L'union entre les différentes plaques de la mosaïque

² Les *surfaces de tendance*, ainsi que celles produites par les *séries de Fourier* sont considérées des méthodes d'interpolation globales dans lesquelles la surface interpolée est une approximation grossière de la totalité des valeurs Z mesurées. On les distingue des méthodes d'interpolation locales (le *Krigeage*, les *splines*, l'*inverse de la distance*, etc.), qui utilisent l'information d'un sous-ensemble (le *voisinage*) des points d'échantillon. L'utilité des premières consiste à trouver la structure spatiale régionale ainsi que les noyaux éloignés de cette tendance (Burrough, 1986), tandis que les dernières donnent des estimations réalistes des valeurs espérées pour les localités non visitées lors de l'échantillonnage. La méthode de la *courbure minimale* est en quelque sorte une méthode hybride puisqu'elle réalise d'abord une interpolation globale, mais par la suite rapproche les estimations par un processus itératif qui tient compte des résidus locaux.

doit définir une surface continue, dérivable au premier et au deuxième degrés (pente et courbure).

L'approximation d'une telle surface est une extension des fonctions *splines*, équivalentes mathématiquement des *règles flexibles* utilisées par les dessinateurs. Ce sont des *fonctions polynomiales sectionnées* dont celles du troisième degré reproduisent assez bien les déformations des *règles flexibles*. Lorsque étendues à l'espace 3D, ces fonctions sont appelées *bicubic splines* ou *B-splines* (Burrough, 1986:152).

Tel que mentionné par Briggs (1974:39), l'approximation par *B-splines* ou par *courbure minimale* est une solution d'interpolation dont le but est d'estimer l'ensemble des valeurs Z^* pour les noeuds d'une grille régulière, de sorte que l'estimation pour le point de grille se rapproche de la valeur observable Z lorsque la position du point d'observation se rapproche de la position du point de grille. Cette approche d'interpolation n'oblige pas à connaître de façon explicite, la fonction continue dans l'espace 3D reproduisant la surface réelle. Dans le premier cas, l'interpolation est faite à partir d'une solution numérique par différences finies, tandis que dans le dernier, on doit trouver une solution analytique par calcul différentiel.

Dans une perspective différentielle, le problème à résoudre consiste à trouver la déformation induite sur la "*règle flexible*" par les forces agissant sur des points discrets, de sorte que les déplacements vers ces points soient égaux aux observations Z connues. Soit u le déplacement, x, y les variables d'espace, et f_n les forces agissant dans les positions (x_n, y_n) , $n = 1, \dots, N$, où les observations sont w_n , alors:

$$\begin{aligned} \Delta^4 u &= f_n \text{ si } x = x_n \text{ et } y = y_n, \text{ ou} \\ &= 0 \text{ dans les autres cas.} \end{aligned} \quad (2)$$

où:

$$u(x_n, y_n) = w_n \text{ (déplacement = valeur "Z" observée)} \quad (3) \text{ et}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) = 0 \quad (4)$$

sont des conditions limites à respecter, et la solution de (2) est trouvée numériquement tenant compte que la *courbure totale* doit être minimisée. En différences finies, ceci s'exprime par:

$$C(u) = \iint ((\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2)^2) dx dy \quad (C = \text{courbure totale}) \quad (5)$$

L'opérateur $\Delta^4 u$ est connu comme *l'opérateur bi-harmonique* (Golden Software, 1995:5.63), utile pour exprimer, entre autres, les fonctions de la courbure d'une règle flexible, du flux visqueux dans un milieu poreux, et des tensions dans un milieu à élasticité linéaire. Par définition:

$$\Delta^4 u = \partial^4 u / \partial x^4 + 2 \partial^4 u / \partial x^2 \partial y^2 + \partial^4 u / \partial y^4 \quad (6)$$

Pour l'interpolation bi-dimensionnelle, un ensemble complet d'équations différentielles permettant de minimiser (5) ont été dérivées (Briggs, 1974:48). Les solutions varient selon que l'interpolation est faite près ou loin des bords, près ou loin des points d'observation, dans les coins ou sur les bords.

Si les observations ne sont pas disposées dans une grille régulière, la solution n'est pas basée sur l'équation (4) mais sur la condition exprimée par l'équation (7):

$$(\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2) (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2) = 0 \quad (7)$$

ce qui conduit à un ensemble de solutions exprimées par diverses équations algébriques qui sont mieux résolues en utilisant des procédures *itératives* d'approximation (Young, 1962, cité par Briggs, 1974), dont la valeur de départ est assignée soit en utilisant la valeur d'observation du point le plus proche ou encore une moyenne des valeurs observées dans le *voisinage*.

Smith et Wessel (1990) mentionnent que la méthode d'interpolation naturelle pour la *courbure minimale* est la fonction *spline bicubique*, mais cette procédure produit des oscillations et d'étranges points d'inflexion surtout dans les régions manquant de données. Hutchinson (1989) a introduit des améliorations importantes dans la procédure: (a) en additionnant des

termes de la première dérivée dans la condition variationnelle, ce qui minimise la surestimation, (b) en incorporant un algorithme considérant le réseau de drainage, (c) en utilisant une grille à résolutions multiples pour réduire le temps de calcul.

Smith et Wessel (1990), montrent que l'ajout d'un paramètre de *tension* dans l'équation de la *flexure* de la "courbe flexible" permet d'éliminer les inflexions artificielles. Son approche est appelée *splines en tension*. Elle consiste à relâcher la condition visant à minimiser la *courbure globale*, au profit d'une solution avec plus de variation locale (Smith et Wessel, 1990:296).

Mitásová et Hofierka (1993) et Mitásová et Mitás (1993) ont développé une méthode d'interpolation basée sur le principe de la *courbure minimale avec tension* qui est indépendante de la distribution spatiale des points d'observation (grille, points dispersés, isohypses). Elle utilise la structure de quadrillage usuelle pour emmagasiner, manipuler et visualiser les résultats des analyses topographiques, tout en atteignant la qualité des estimations faites par la méthode des *trapézoïdes* (voir 6.3.3). Leur méthode est connue sous le nom de *splines en tension complètement régularisées*. Elle fut élaborée pour remplir les exigences des analyses topographiques lorsqu'il s'agit de produire des estimations fiables de la pente et de la courbure du relief (Mitásová et Hofierka, 1993:659). Avec cette méthode, des dérivées de tout ordre sont valides, contrairement aux solutions traditionnelles qui sont limitées à celle de second ordre.

Dans le logiciel *Surfer*, la méthode de la *courbure minimale* a été définie suivant l'approche de Briggs (1974) et Smith et Wessel (1990). Par ailleurs, les calculs des dérivées de terrain utilisent l'approche suggérée par Mitásová et Hofierka, 1993 et Mitásová et Mitás, 1993.

6.4.3 Triangulation

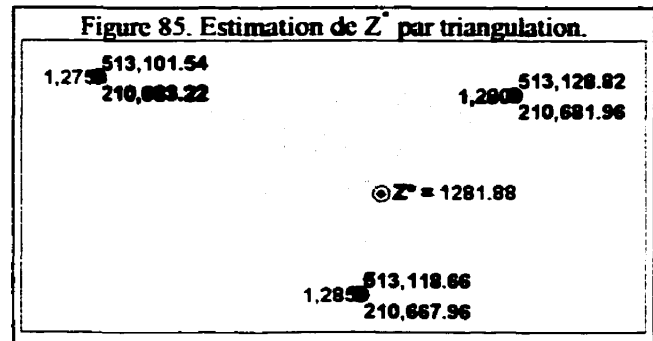
Cette méthode d'interpolation requiert d'abord la création du réseau triangulaire ou RTI, tel que présenté à la section 6.3.2. Une fois que les triangles de Delaunay ont été construits, on décrit la surface intérieure du triangle par une fonction linéaire dérivée des altitudes de chacun

des points d'échantillon constituant les vertex du triangle. Cette fonction permet de calculer l'altitude à chaque point dans le triangle de sorte que la valeur Z^* estimée peut être transcrite autant comme un attribut dans la base de données d'un logiciel gérant des structures de données vectorielles, ou comme la cote "Z" dans la grille régulière d'un logiciel gérant des structures de données matricielles (le logiciel *Surfer* par exemple). Formellement:

$$Z^* = a + bx + cy \quad (8)$$

où a , b , c sont des coefficients à déterminer tandis que x , y sont les coordonnées cartésiennes d'abscisse et d'ordonnée.

Dans l'exemple (fig. 85), Z^* est obtenu en solutionnant le système des trois équations linéaires suivantes:



$$1275 = a + 513101.54b + 210683.22c \quad (9a)$$

$$1280 = a + 513128.82b + 210681.96c \quad (9b)$$

$$1285 = a + 513118.66b + 210667.96c \quad (9c)$$

réarrangeant 9a, on obtient:

$$a = 1275 - 513101.54b - 210683.22c \quad (10)$$

remplaçant cette valeur a dans l'équation 9b, on produit:

$$1280 = (1275 - 513101.54b - 210683.22c) + 513128.82b + 210681.96c, \text{ ou}$$

$$b = [(5 + 1.26c) / 27.28] \quad (11)$$

et l'on peut remplacer cette valeur b dans l'équation 10:

$$a = 1275 - 513101.54 \left(\frac{5+1.26c}{27.28} \right) - 210683.22c$$

$$a = -92768.53739 - 234382.1914c \quad (12)$$

et maintenant, on peut utiliser l'équation 9c pour calculer c :

$$1285 = -92768.53739 - 234382.1914c + 513118.66 \left[\frac{5 + 1.26c}{27.28} \right] + 210667.96c$$

$$c = -0.4742591871$$

remplaçant c dans l'équation 12, on obtient:

$$a = -92768.53739 - 234382.1914 (-0.4742591871)$$

$$a = 18389.37021$$

et remplaçant c dans l'équation 11, on obtient b :

$$b = \left[\frac{5 + 1.26 (-0.4742591871)}{27.28} \right]$$

$$b = 0.1613795243$$

Soit $Z_{(x,y)} = Z_{(513120,210675)}$, un point à l'intérieur du triangle (figure 85):

$$Z^* = 18389.37021 + 0.1613795243 (513120) + (-0.4742591871) (210675)$$

$$Z^* = 1281.877476.$$

À différence de la méthode des *moyennes mobiles pondérées*, la triangulation de Delaunay va toujours respecter la valeur Z lorsque la position d'un point d'échantillon coïncide avec celle d'un noeud de grille ou *pixel* à interpoler. C'est-à-dire, $Z - Z^* = 0$, lorsque les positions x_i , et x_j coïncident. Cette propriété est très souhaitable dans toute méthode d'interpolation. Par contre, l'interpolation par triangulation est incapable de "prédire" l'existence de sommets ou de

dépressions locales autres que celles décrites explicitement dans les données mesurées. Cette forme de “prédiction” est une autre propriété souhaitable.

Avec la triangulation de Delaunay, on peut prendre en compte les caractères linéaires (les *lignes structurelles*: rivières, lignes de partage d’eau, lignes d’escarpement) de la surface originelle, soit en additionnant ces *lignes* au-dessus du réseau (option disponible dans la version 3.0 du logiciel *ArcView*, ainsi que dans le logiciel *GWN-DTM* de *Intergraph*, entre autres) pour, par la suite, redéfinir le réseau (voir 6.3.2) ou, moins efficacement, en ajoutant suffisamment de points le long de tels *axes* (seule option disponible dans le logiciel *Surfer*) sans intégration réelle des *lignes*. Ceci représente un avantage considérable par rapport aux méthodes basées sur une triangulation de Delaunay. En contrepartie, cette méthode risque de lisser excessivement la surface lorsqu’une absence locale de données oblige à créer des triangles trop grands. En plus, indépendamment de la taille du triangle, la *variance* interne est modélisée par une surface linéaire, ce qui s’avère une sur-simplification de la réalité, incompatible avec plusieurs types d’application.

6.4.4 Le Krigeage

La méthode d’interpolation par *Krigeage* ou “*kriging*” est définie comme “*une méthode d’interpolation par moyennes pondérées où l’ensemble des poids assignés aux points échantillonnés minimise la variance d’estimation, qui est calculée en fonction d’un modèle de variogramme et des emplacements relatifs des points les uns par rapport aux autres, ainsi que par rapport au point en estimation*” (Englund, 1988:xiv -traduction libre).

Le *Krigeage* est, dans un certain sens, une méthode d’interpolation basée sur le principe des *moyennes mobiles* (voir 6.4.1), mais il est capable de répondre à certaines considérations inaccessibles avec les autres méthodes: (a) quelle est la longueur du rayon de recherche?; (b) quelle forme et orientation doit-il avoir pour une interpolation optimale (isotropie versus anisotropie)?; (c) existe-t-il une façon optimale pour estimer le *poids* qui ne soit pas une

simple fonction de la distance?; (d) quelle est l'erreur (incertitude) associée à la valeur interpolée? (Burrough, 1986:155).

Le *Krigeage* est une méthode d'interpolation locale dite *optimale*, dans le sens où elle utilise la programmation dynamique pour choisir les *poids* d'interpolation de manière à obtenir la *meilleure estimation linéaire non biaisée* de la valeur de la variable dans un point quelconque.

La méthode repose sur le principe que la variation spatiale d'une propriété (ce que l'on appelle une *variable régionalisée*) est trop irrégulière pour être modélisée par une simple fonction mathématique; mais qu'elle peut être décrite par une *surface stochastique*. L'interpolation doit donc, premièrement, explorer et, par la suite, modéliser l'aspect stochastique de la variable régionalisée. L'information qui en résulte est alors utilisée pour estimer les *poids* de la fonction d'interpolation.

La *théorie des variables régionalisées* (Matheron, 1971) assume que la variation spatiale d'une variable quelconque peut être obtenue par l'addition de trois composantes majeures: (a) la composante *structurelle*, exprimée avec une valeur moyenne constante ou avec une tendance constante; (b) une composante *aléatoire spatialement corrélée*; et (c) un *bruit aléatoire* ou erreur résiduelle. (Burrough, 1986:155). Les composantes (b) et (c) sont présumées constantes partout dans la zone-échantillon.

Soit \mathbf{x} la position dans 1, 2 ou 3 dimensions, la valeur de la variable régionalisée Z en \mathbf{x} est:

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + \varepsilon'(\mathbf{x}) + \varepsilon'' \quad (13)$$

où $m(\mathbf{x})$ est une fonction *déterministe* décrivant la composante *structurelle* de Z dans la position \mathbf{x} , $\varepsilon'(\mathbf{x})$ est le terme dénotant les résidus de $m(\mathbf{x})$ qui sont de nature *stochastique*, localement variables et spatialement corrélés, et ε'' est un *bruit* résiduel, gaussien, spatialement indépendant ayant pour moyenne zéro et variance σ^2 (figure 86).

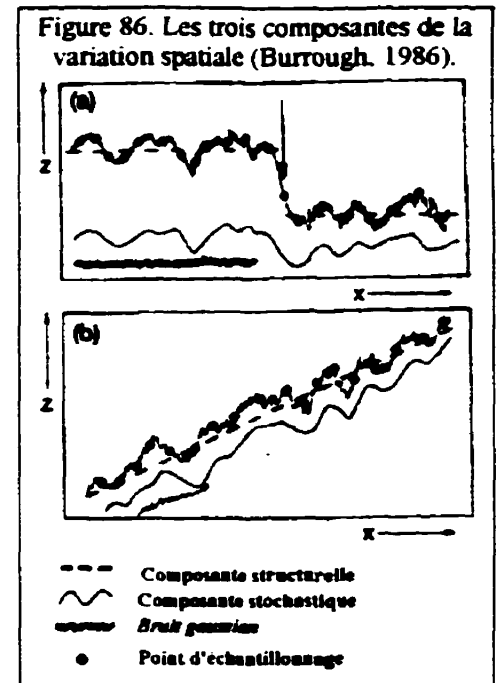
La première étape dans le *Krigeage* consiste à choisir une fonction adéquate pour le terme $m(\mathbf{x})$. Dans le cas le plus simple, lorsqu'il n'existe pas de tendance ou "drift" dans les données, $m(\mathbf{x})$ est égal à la valeur moyenne de la zone d'échantillonnage. Dans ce cas, la *différence moyenne* ou différence espérée entre deux positions quelconques \mathbf{x} et $\mathbf{x}+\mathbf{h}$ séparées par un vecteur de distance \mathbf{h} , sera:

$$E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})] = 0 \quad (14)$$

Dans un tel cas, on peut assumer aussi que la *variance des différences* dépend seulement de la distance, \mathbf{h} , entre les sites, soit:

$$E[\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})\}^2] = E[\{\varepsilon'(\mathbf{x}) - \varepsilon'(\mathbf{x}+\mathbf{h})\}^2] = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (15)$$

où $\gamma(\mathbf{h})$ est une fonction connue sous le nom de *semi-variance* (la moitié de la *variance*).



Les conditions établies par les équations (14) et (15) correspondent à l'*hypothèse intrinsèque* de la *théorie des variables régionalisées* (Burrough, 1986:156; Oliver et Webster, 1990:315). D'après celle-ci, une fois la composante structurelle éliminée des données, la variation restante est homogène et les différences entre ces sites sont fonction de la distance les séparant.

Si les deux conditions spécifiées dans l'hypothèse intrinsèque sont respectées, la semi-variance peut être établie à partir des points compris dans l'échantillon:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 1/2 n \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z(x_i - \mathbf{h})\}^2 \quad (16)$$

où n est le nombre de paires des points séparées par la distance \mathbf{h} . La distance entre les points \mathbf{h} , est aussi appelée le décalage ou "lag". Un graphique de $\gamma(\mathbf{h})$ sur \mathbf{h} est nommé *semi-*

variogramme. La construction de ce dernier constitue une étape fondamentale pour établir les *poids* à utiliser lors de l'interpolation. (Burrough, 1986:156).

À l'instar de la méthode de l'*inverse de la distance*, le *Krigeage* requiert le calcul de la somme pondérée des points d'échantillon dans le *voisinage* du site à évaluer, soit:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (17)$$

mais dans le *Krigeage*, la somme des *poids* w_i doit être égale à 1. Les *poids* sont calculés à partir d'un ensemble de $n + 1$ d'équations linéaires simultanées, où n est le nombre de points utilisés pour l'estimation dans une localisation quelconque. En forme matricielle, les équations des *poids* sont:

$$C \cdot w = d$$

qui peuvent être étalés à:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdot & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdot & C_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

où les termes dans la matrice C sont les valeurs des *covariances spatiales* entre les points de l'échantillon et les termes dans d sont aussi des *covariances spatiales*, mais entre les points de l'échantillon et le *point à estimer*. La *covariance spatiale* est une mesure de la *corrélacion spatiale* ou *autocorrélacion*. Le terme μ est un paramètre connu comme le *multiplicateur de Lagrange*, un paramètre flexible utilisé pour s'assurer que l'addition des *poids* soit égale à 1. L'équation (18) est résolue en pré-multipliant les termes des deux côtés de l'égalité par l'inverse de C :

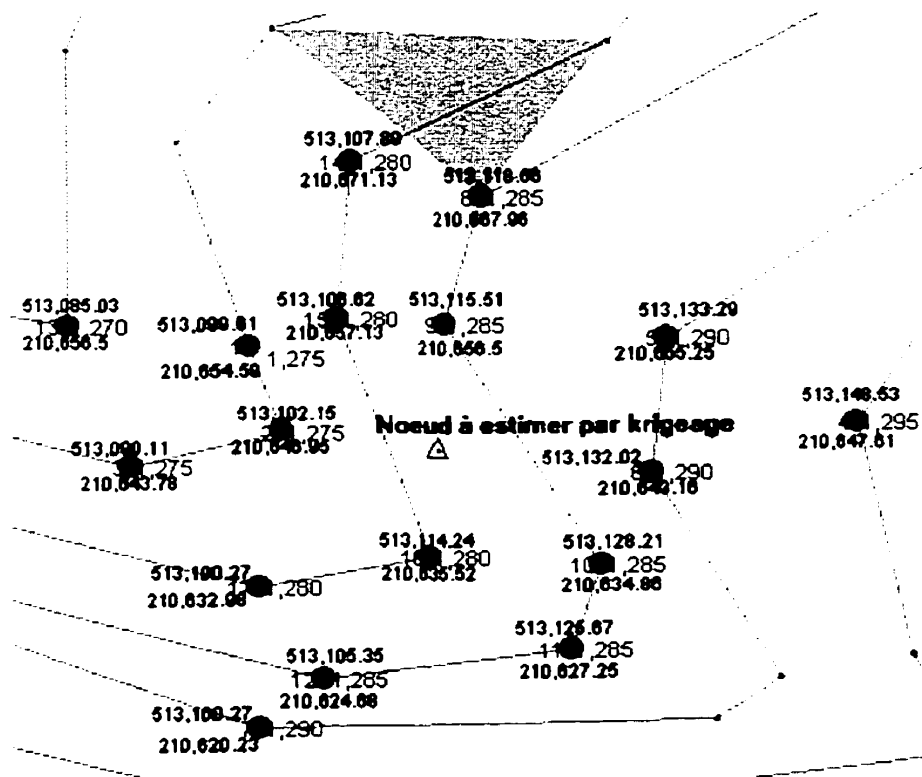
$$C^{-1} \cdot C \cdot w = C^{-1} \cdot d \quad (19)$$

$$w = C^{-1} \cdot d \quad (20)$$

Pour chaque noeud qui doit être estimé lors de la création de la *grille*, les matrices des *covariances* C et d doivent être calculées (tel que décrit ci-dessus), et l'équation (20) résolue pour obtenir les *poids*. Ceux-ci sont ensuite appliqués dans l'équation (17) pour calculer la valeur estimée de la variable, c'est-à-dire, la "hauteur" de la surface modélisée à ce point particulier.

Pour illustrer la procédure d'interpolation avec le *Krigeage*, nous utiliserons un sous-ensemble des données illustrées dans la figure 87. La zone choisie pour cet exemple est située juste au sud de celle utilisée pour expliquer les traitements en mode RTI (figures 85 et 87). Huit points ont été retenus (2, 5, 6, 9, 10, 15, 16 et 17); leurs coordonnées sont présentées dans le tableau 3.

Figure 87. Carte des points utilisés pour l'essai d'interpolation par *Krigeage*³.



³ Pour cet exemple nous avons utilisé le logiciel VarioWin (Pannatier, 1996) afin de déterminer le modèle de variogramme requis.

D'après l'équation (5), la valeur d'altitude dans chaque noeud de la grille est estimée par la

POINT	EST	NORD	ALTT.
2	513102.15	210646.95	1275
5	513133.29	210655.25	1290
6	513132.02	210643.16	1290
9	513115.51	210656.50	1285
10	513128.21	210634.86	1285
15	513106.62	210657.13	1280
16	513114.24	210635.52	1280
17	513100.27	210632.98	1280

somme linéaire des valeurs d'altitude observées dans le voisinage (observations à l'intérieur du rayon de recherche) multipliée par sa pondération. Donc, la tâche importante consiste à calculer les *poids* de chacune des observations. La première étape consiste à mesurer (ou calculer): a) les

$\{n*(n-1)\}/2$ distances moyennes entre tous les points du voisinage (tableau 4), ce qui constitue les données de base pour calculer la matrice des *covariances spatiales* (C); b) les "n" distances entre le noeud de grille à estimer et chacun des points inclus dans son voisinage (tableau 5), ce qui permettra le calcul du vecteur des *covariances spatiales* (d).

	PT2	PT5	PT6	PT9	PT10	PT15	PT16	PT17
PT2	0.00	32.23	30.11	16.42	28.73	11.12	16.64	14.10
PT5	32.23	0.00	12.16	17.82	21.01	26.74	27.43	39.83
PT6	30.11	12.16	0.00	21.23	9.13	28.99	19.35	33.34
PT9	16.42	17.82	21.23	0.00	25.09	8.91	21.02	28.03
PT10	28.73	21.01	9.13	25.09	0.00	31.02	13.99	28.00
PT15	11.12	26.74	28.99	8.91	31.02	0.00	22.91	24.97
PT16	16.64	27.43	19.35	21.02	13.99	22.91	0.00	14.20
PT17	14.10	39.83	33.34	28.03	28.00	24.97	14.20	0.00

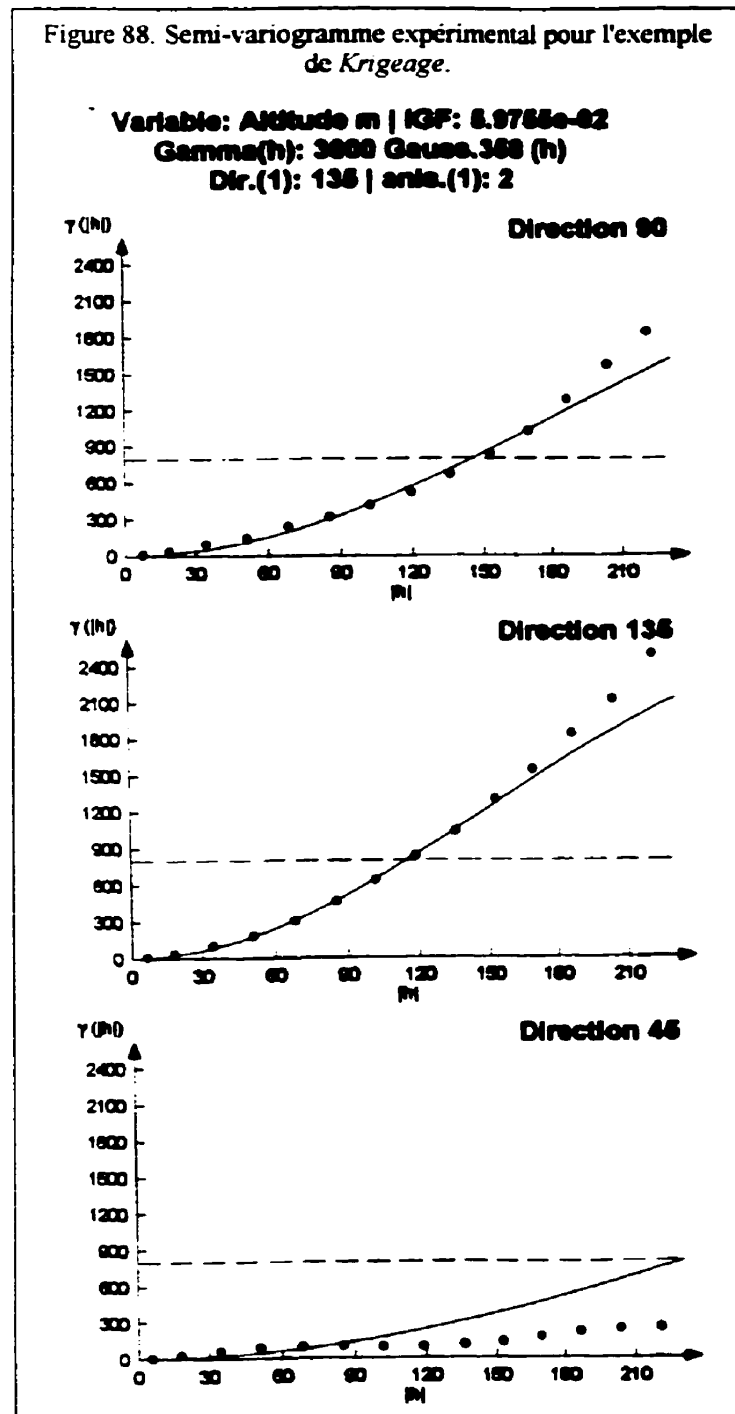
Pour avoir une idée quant à la structure de la variation spatiale, on produit un semi-variogramme, c'est-à-dire un graphique qui montre la variation de la semi-variance de l'attribut étudié (l'altitude dans ce

cas) selon la distance de séparation entre les points échantillonnés dans la zone d'étude. Les logiciels GeoEas ou VarioWin pourraient être utilisés pour accomplir cette tâche, dont le travail consiste à établir des *classes* de distance (ou *lags*) et, pour chaque classe, à calculer la valeur moyenne des différences d'altitude prenant en compte les paires de points échantillonnés correspondantes (voir l'équation 4).

Punto	Distance
2	13.00
5	20.97
6	17.12
9	11.51
10	16.65
15	14.74
16	9.51
17	19.01

Il faut utiliser des logiciels conçus pour l'analyse *géostatistique* non seulement pour accélérer les calculs, mais aussi pour la possibilité qu'ils offrent de déterminer quel modèle de variogramme s'ajuste le mieux aux données expérimentales (linéaire, gaussien, exponentiel,

sphérique, etc.) et quels sont les paramètres déterminants du variogramme (effet de pépite ou bruit résiduel, seuil de plateau ou asymptote de la variance, rayon d'influence maximale de



l'autocorrélation spatiale pour la variable considérée). Pour estimer la covariance entre chaque couple des points connus et de ceux-ci avec le noeud de grille à interpoler, on doit se référer toujours à ce modèle de variogramme, qui décrit la structure régionale de la variance. La figure 88 présente les trois semi-variogrammes expérimentaux emboîtés utilisés dans l'exemple développé⁴. Remarquons l'importance d'utiliser plusieurs semi-variogrammes directionnels simultanément lorsque les données montrent une forte anisotropie.

Pour cet exemple, nous avons choisi le modèle *gaussien*, bien qu'on ne puisse pas déterminer de plateau pour la variance étant donné la petite dimension de la zone d'essai (300 x 300 mètres). Les paramètres importants du variogramme furent : bruit (*mugget*), $\epsilon'' = 0$; plateau (pour le domaine d'interpolation d'intérêt) ou facteur d'*échelle*, $c = 3000$, et seuil d'autocorrélation = 358. Le modèle

gaussien utilise la fonction suivante (Pannatier, 1996:50) :

$$\gamma_{(h)} = c (1 - e^{-(3h^2)/a^2}) \quad (21)$$

ou "h" est la distance particulière de chaque couple des points dont on veut estimer la covariance spatiale.

Tandis que le variogramme fixé caractérise la structure régionale de la variance, c'est-à-dire la composante structurelle $m(x)$ de l'équation 13, on doit analyser la covariance locale (autour du noeud à interpoler), ce qui permet d'évaluer $\varepsilon'(x)$ (la variation locale spatialement corrélée) de l'équation 13.

C'est la matrice de ces *covariances* qui permettra finalement d'estimer les valeurs d'altitude. Pour notre zone d'essai et pour le noeud choisi, les covariances sont calculées en remplaçant la variable « h » dans l'équation 21 par la distance séparant chaque couple de points tirés des tableaux 5 ou 6. Soit :

$$\gamma_{(2,5)} = 3000 (1 - e^{-(3 \cdot 32.23^2)/358^2}) = 72.053 \quad (\text{pour la couple Pt2 et Pt5}).$$

La matrice des *covariances spatiales* C ainsi calculées est présentée dans le tableau 6 et d'après l'équation 20, on a besoin de calculer son *inverse* C^{-1} (tableau 7), tâche pour laquelle on peut utiliser un logiciel de tableur.

	PT2	PT5	PT6	PT9	PT10	PT15	PT16	PT17	
PT2	0.00	72.0530050	62.9916782	18.8788089	57.3978772	8.66789211	19.3756683	13.9204892	1
PT5	72.05	0.00	10.3596270	22.2263141	30.8476618	49.7790798	52.3573885	109.349446	1
PT6	62.99	10.3596270	0.00	31.4715158	5.85127347	58.4328912	26.1832662	77.0590614	1
PT9	18.88	22.2263141	31.4715158	0.00	43.8865011	5.57252320	30.8625905	54.6522034	1
PT10	57.40	30.8476618	5.85127347	43.8865011	0.00	66.8047176	13.7038855	54.5646441	1
PT15	8.67	49.7790798	58.4328912	5.57252320	66.8047176	0.0	36.6451439	43.46890	1
PT16	19.38	52.3573885	26.1832662	30.8625905	13.7038855	36.6451439	0.00	14.1243848	1
PT17	13.92	109.349446	77.0590614	54.6522034	54.5646441	43.468906	14.1243848	0.00	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	0

⁴ Pour l'application à l'ensemble de la zone expérimentale colon. *zexpcolo*, référée plus tard, nous avons eu

Tableau 7. Matrice inverse C^{-1} des covariances spatiales pour l'exemple de calcul manuel avec Krigage

	PT2	PT5	PT6	PT9	PT10	PT15	PT16	PT17	
PT2	-380.40	-135.00	471.62	-253.83	-426.19	400.72	244.49	78.59	-30.07
PT5	-135.00	-150.95	233.28	126.09	-107.70	12.73	-84.37	105.91	32.93
PT6	471.62	233.28	-640.03	190.50	515.71	-422.10	-205.79	-143.19	-49.73
PT9	-253.83	126.09	190.50	-641.92	-391.27	551.40	536.37	-117.34	-46.95
PT10	-426.19	-107.70	515.71	-391.27	-514.74	512.21	362.49	49.48	53.89
PT15	400.72	12.73	-422.10	551.40	512.21	-593.29	-480.87	19.21	54.32
PT16	244.49	-84.37	-205.79	536.37	362.49	-480.87	-458.03	85.70	-40.92
PT17	78.59	105.91	-143.19	-117.34	49.48	19.21	85.70	-78.35	27.52
	-30.07	32.93	-49.73	-46.95	53.89	54.32	-40.92	27.52	-1508.34

Suivant la même procédure, on calcule la matrice (ou vecteur) correspondant aux *covariances spatiales* du noeud considéré (tableau 8). Soit :

$$\gamma_{(\text{Noeud1,pt2})} = 3000 (1 - e^{-(3 \cdot 13.00^2)/358^2}) = 11.8389$$

(pour la couple Noeud 1 et Pt2).

Tableau 8. Vecteur des covariances spatiales d

POINT	NOEUD 1
PT2	11.8389187994359
PT5	30.7106107268941
PT6	20.5094080757392
PT9	9.29077792889754
PT10	19.4112991466981
PT15	15.2248957271335
PT16	6.344768334693
PT17	25.2750907337089
	1.00

Alors, on utilise l'équation 20 ($w = C^{-1} \cdot d$) pour obtenir le vecteur des poids particuliers de chacun des huit points connus pour estimer l'altitude (tableau 9). Cette opération se fait aussi dans un logiciel de tableur.

Et finalement, on calcule les altitudes utilisant l'équation 17. Soit :

$$Z^* = \sum (w_i z_i) \text{ (pour les huit points)}$$

$$Z^*_{Pt2} = (0.4185971 \cdot 1275 - 0.2073843 \cdot 1290 + 0.4577092 \cdot 1290 + 0.6377952 \cdot 1285 - 0.3575355 \cdot 1285 - 0.4079914 \cdot 1280 + 0.6530373 \cdot 1280 - 0.1942274 \cdot 1280)$$

$$Z^*_{Pt2} = 1281.8116$$

En plus, on peut évaluer *a priori* la marge d'erreur de l'estimation en utilisant le multiplicateur de *Lagrange* (u) du tableau 9. Selon :

Tableau 9. Vecteur des poids relatifs w

POINT	NOEUD 1
PT2	0.4185971
PT5	-0.2073843
PT6	0.4577092
PT9	0.6377952
PT10	-0.3575355
PT15	-0.4079914
PT16	0.6530373
PT17	-0.1942274
u	0.0178105

l'occasion d'améliorer l'ajustement déficient montré dans la direction nord-est (figure 116).

$$\text{Var}_{\text{noeud}} = u + \sum (w_i d_i) \text{ (pour les huit points considérés)}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}_{\text{noeud}} = & 0.0178105 + (0.4185971*11.8389188 - 0.2073843*30.7106107+ \\ & 0.4577092*20.5094081 + 0.6377952*9.2907779 - 0.3575355*19.4112991- \\ & 0.4079914*15.2248957+ 0.6530373*6.3447683 - 0.1942274*25.2750907) \end{aligned}$$

$$\text{Var}_{\text{noeud}} = 7.5 \times 10^{-6} \text{ mètres.}$$

D'après la figure 87, la valeur d'altitude estimée $Z^* = 1281.8116$ semble correcte. Mais, pour avoir une image plus complète (fig. 89), nous avons réalisé le *Krigeage* en utilisant le logiciel SURFER (même modèle de variogramme et mêmes paramètres). Nous avons trouvé :

$$Z^*_{\text{surfer}} = 1282.47$$

La différence (0.66 m) résulte du fait que l'interpolation avec Surfer n'était pas restreinte à utiliser les huit points que nous avons choisi et que la fonction *gaussienne* dans *Surfer* est définie d'une façon différente de celle définie par Pannatier (equation 21). Dans *Surfer* :

$$\gamma_{(h)} = c (1 - e^{-h^2})$$

Un semi-variogramme, toujours gaussien, mais beaucoup mieux ajusté aux données de la zone d'essai décrite (zexpcolo), est discuté plus loin (voir 6.6.5.2), mais la valeur Z^* estimée est restée sensiblement la même: $Z^* = 1281.8141$.

Figure 89. Interpolation spatiale avec *Krigeage* selon un modèle de variogramme gaussien.

6.5 Calcul des dérivées

Que ce soit avec des modèles numériques en grille régulière, en facettes triangulaires ou en trapézoïdes, on a souvent besoin d'obtenir des quantités dérivées à partir de tels MNA. Cette opération, qui ne fait pas partie de la procédure de création de la matrice spatiale, est discutée et illustrée à l'aide d'un exemple.

6.5.1 Discussion du concept

Le calcul des dérivées spatiales n'est autre chose que l'application du *calcul différentiel* aux variables ayant une distribution continue sur le terrain. *“Deux approches mathématiques différentes peuvent être utilisées dans l'application du calcul différentiel aux distributions spatiales. Une approche numérique peut être utilisée pour approcher la valeur du taux de changement dans une localisation particulière à partir des données disposées sur une grille régulière (celle-ci est appelée méthode des différences finies appliquée aux MNA en quadrillage régulier). Alternativement, une approche analytique peut être utilisée pour différencier des fonctions de surface continues (par exemple, les surfaces de tendance polynomiales) pour obtenir de nouvelles équations décrivant le taux de changement de la variable dépendante”* (Eyton, 1991:87).

Le calcul de la pente comme $\Delta h/\Delta x$ (amplitude du déplacement vertical / amplitude du déplacement horizontal) entre deux points est un exemple de différentiation utilisant le calcul des différences finies. La détermination d'une équation pour décrire le plan tangent en un point à la surface du terrain est un exemple de l'approche analytique de la différentiation utilisant le calcul différentiel. (Eyton, 1991:87).

Le calcul des attributs topographiques d'un paysage obtenus par différentiation numérique directement sur les points-échantillon du MNA, sans détermination d'une surface mathématique, constitue une approche d'utilité limitée parce qu'elle n'est adaptée qu'aux MNA en grille régulière et parce qu'elle ne produit pas de résultats physiquement réalistes

(Collins, 1975; Douglas, 1986; Moore *et al.*, 1993). En plus, cette méthode est très sensible aux erreurs dans l'estimation de la valeur d'altitude. De telles erreurs souffrent d'un processus de diffusion spatiale lorsqu'on calcule des cartes dérivées par différentiation numérique des matrices d'altitude; c'est la raison pour laquelle ces cartes sont moins fiables et montrent plus de rugosité ou "bruit" que les cartes "primitives" (non dérivées).

L'analyse de la géométrie de la surface du terrain joue un rôle important pour l'étude des processus qui structurent le paysage. *“Des estimations fiables des paramètres topographiques, qui reflètent la géométrie du terrain, sont nécessaires pour la modélisation géomorphologique, hydrologique et écologique parce que le terrain contrôle le flux de masse dans le paysage”* (Mitasová et Hofierka, 1993:657).

Pour analyser les caractéristiques topographiques d'un paysage, une surface est fixée aux points d'altitude mesurée. Barnhill (1983) a classifié les méthodes de fixation de la superficie en *locales* (la superficie fixée dans un point se rapporte uniquement aux données dans l'environnement local) et *globales* (la superficie fixée dans un point utilise la majorité des points échantillonnés, avec une remarquable perte d'exactitude). Parmi les méthodes *locales*, on distingue la fixation par *pièces* (petites sections courbées de la superficie locale avec continuité mathématique dans et entre les différentes pièces) et par *points* (fixation locale *discrète* basée dans le calcul des différences finies à partir des points d'altitude mesurée, sans aucune continuité mathématique) (Moore *et al.*, 1988:448).

Les attributs topographiques tels que la *pente*, l'*aire spécifique du bassin*, l'*orientation du terrain*, la *courbure* (sur le plan ou en profil), peuvent être dérivés de n'importe quel type de MNA. Cependant, la structure la plus simple et la plus utilisée pour l'estimation de ces attributs est la grille régulière. On a signalé des contraintes pour toutes les méthodes (Moore *et al.*, 1993:9). Cependant, certaines des contraintes, telles que la taille des fichiers dans la structure basée sur les isohypses, ou les difficultés pour créer la connexion entre les facettes vers l'amont, dans les structures RTI, ont été surmontées progressivement.

Selon Moore *et al.*, 1993, dans le contexte particulier de la modélisation hydrologique dynamique, l'utilisation des grilles pour décrire la répartition spatiale des données topographiques n'est pas approprié. Les modèles hydrologiques simulent le flux de l'eau à travers la surface et la cellule élémentaire du MNA devrait refléter ce besoin. La méthode basée sur les isohypses offre des avantages substantiels dans ce sens (Moore *et al.*, 1988; Moore et Grayson, 1989, 1991; Moore *et al.*, 1993) parce que la structure des aires élémentaires est basée sur la façon dont l'eau s'écoule à la surface du terrain.

Récemment, Mitasová et Hofierka (1993) ont proposé une méthode qui *“est indépendante de la distribution spatiale des données d'entrée” (grilles, points dispersés ou isolignes). Elle utilise la structure en grille standard pour emmagasiner, manipuler et visualiser les résultats de l'analyse topographique et, en même temps utilise les paramètres de qualité des méthodes basées sur les isolignes. Cette méthode est basée sur l'interpolation avec des splines complètement régularisés avec tension (CRST) et fut spécialement construite pour respecter les exigences de l'analyse topographique quand il est nécessaire de connaître les estimations fiables de la première et de la deuxième dérivées de l'altitude, soit la pente et la courbure du relief”* (Mitasová et Hofierka, 1993:658).

Quoi qu'il en soit, il est évident que les structures RTI et trapézoïdales sont préférables si le but est d'obtenir une représentation fidèle du relief, en tenant compte que la structure topographique est directement visible et que l'on peut la décrire de façon explicite. À l'opposé, la structure en grille est aussi simple que rigide, ce qui est sa limitation principale. En ce qui concerne la représentation distribuée d'autres variables (non directement visibles), les avantages des structures RTI et trapézoïdales sont mineurs.

Obtenir des représentations fidèles du terrain est la première étape dans la procédure de dérivation de cartes fiables. Le choix des algorithmes de dérivation bien adaptés aux différents "maillages" spatiaux vient compléter la tâche. Nous allons maintenant présenter quelques-uns des algorithmes parus dans la littérature.

6.5.2 Présentation des algorithmes pour le calcul des dérivées spatiales à partir du MNA

6.5.2.1 Dérivation par *différences finies* appliquées aux quadrillages réguliers

Pour illustrer les différents algorithmes de différentiation numérique proposés dans la littérature, nous allons utiliser la grille décrite dans les figures 90a et 90b. Les valeurs

	P₁₃	P₁₄	P₁₅	P₁₆	P₁
	P₁₂	P₂₃	P₂₄	P₁₇	P₂
	P₁₁	P₂₂	P₂₅	P₁₈	P₃
	P₁₀	P₂₁	P₂₀	P₁₉	P₄
	P₉	P₈	P₇	P₆	P₅

présentées dans la figure 90a ne montrent que des positions dans la matrice qui ont été codées d'une façon plus ou moins arbitraire. La figure 90b, par contre, se réfère aux altitudes de la surface correspondant à la matrice illustrée dans la figure 90a. Ces valeurs proviennent d'un

secteur du MNA du bassin-versant Uruca (figure 91) mais, pour l'exemple de calcul, nous leur avons soustrait 1270 mètres. Pour les calculs numériques, nous allons assumer des *pixels* carrés avec une longueur de côté égale à 1mètre et une valeur numérique d'altitude située au centre du *pixel*.

	7.96997	8.08997	8.22998	8.39001	8.56006
	8.46997	8.60999	8.76001	8.92004	9.07996
	8.95996	9.10999	9.27002	9.43005	9.59998
	9.45996	9.62000	9.78003	9.94995	10.12000
	9.95996	10.13000	10.30005	10.46997	10.64001

Calcul du gradient:

Pour le calcul du *gradient* d'une propriété régionalisée (distribuée dans l'espace) dans une orientation donnée Burrough (1986:50) propose, pour le point p25:

$$G_{\text{est}} = \partial z / \partial x = (P_{18} - P_{22}) / 2 \partial x$$

$$G_{\text{nord}} = \partial z / \partial y = (P_{24} - P_{20}) / 2 \partial y \quad (22)$$

numériquement:

$$G_{\text{est}} = (9.43005 - 9.10999) / 2 = + 0.16003$$

$$G_{\text{nord}} = (8.76001 - 9.78003) / 2 = - 0.51001 \quad (\text{le signe indique l'orientation du gradient})$$

Surfer estime ces valeurs à 0.159973 et -0.511597, respectivement. Les différences pouvant résulter des effets d'arrondissement ou de variations mineures dans la formule de calcul.

Si le calcul est fait dans l'orientation diagonale à la grille, on devra utiliser $2\partial x/\sqrt{2}$ ou $2\partial y/\sqrt{2}$ dans la partie inférieure de l'équation (22).

L'équation (22) présente l'inconvénient que les erreurs locales dans l'estimation de l'altitude ont de fortes conséquences sur l'évaluation de la pente dérivée. Horn (1981) propose une solution plus complète:

$$G_{\text{est}} = \partial z / \partial x = ((P_{17} + 2P_{18} + P_{19}) - (P_{23} + 2P_{22} + P_{21})) / 8\partial x \text{ et}$$

$$G_{\text{nord}} = \partial z / \partial y = ((P_{17} + 2P_{24} + P_{23}) - (P_{19} + 2P_{20} + P_{21})) / 8\partial y \quad (23)$$

Celle-ci constitue une expression généralisée pour les gradients est-ouest et nord-sud respectivement.

Figure 91. Grille d'essai pour le calcul manuel des dérivées spatiales.

1277 27002	1277 38000	1277 48999	1277 58997	1277 73999	1277 89001	1278 06006	1278 25000	1278 46997
1277 71997	1277 83997	1277 96997	1278 08997	1278 22998	1278 39001	1278 56006	1278 75000	1278 94995
1278 18994	1278 32996	1278 46997	1278 60999	1278 76001	1278 92004	1279 07996	1279 26001	1279 44995
1278 66003	1278 81006	1278 95996	1279 10999	1279 27002	1279 43005	1279 59998	1279 77002	1279 95996
1279 13000	1279 29004	1279 45996	1279 62000	1279 78003	1279 94995	1280 12000	1280 29004	1280 46997
1279 59998	1279 78003	1279 95996	1280 13000	1280 30005	1280 46997	1280 64001	1280 81995	1281 00000
1280 06995	1280 26001	1280 44995	1280 64001	1280 81006	1280 98999	1281 17004	1281 33997	1281 52002

Calcul de l'inclinaison de la pente:

Combinant les expressions (22) ou les expressions (23) comme une multiplication vectorielle, on peut obtenir la valeur maximale de la pente, qui ne coïncide pas, habituellement, avec celles obtenues dans les orientations N-S et E-O:

$$P_{\text{incl}} = \text{SQRT} ((\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2) \quad (\text{radians}) \quad (24)$$

$$P_{\text{incl}} = \text{SQRT} ((G_{\text{est}})^2 + (G_{\text{nord}})^2)$$

Numériquement:

$$P_{\text{incl}} = \sqrt{(0.16^2 + (-0.51)^2)} = 0.5345 \text{ radians} = 28.12 \text{ degrés}$$

Surfer estime dans ce cas 28.1924, la différence étant vraisemblablement attribuable au nombre de chiffres significatifs considérés lors du calcul (15 dans *Surfer*).

Calcul de l'orientation de la pente:

L'estimation de l'orientation de la pente ou azimuth est obtenue à partir des dérivées premières de l'altitude selon une procédure en deux étapes proposée par Eyton (1991:89):

La première étape consiste à calculer l'angle local ϕ entre la valeur du *gradient directionnel* est (G_{est}) et la celle de l'inclinaison générale de la pente (P_{incl}):

$$P_{\text{oriloc}} = \phi = \cos^{-1} ((\partial z/\partial x) / (\sqrt{((\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2)})) \quad (25)$$

$$= \cos^{-1} (G_{\text{est}} / P_{\text{incl}})$$

Pour P_{25} nous obtenons:

$$P_{\text{oriloc}} = \cos^{-1} (0.16 / 0.5345) = 72.58 \text{ degrés.}$$

Dans la *deuxième étape*, on doit convertir l'angle local ϕ dans un azimut θ , pour lequel nous utilisons des règles basées dans les signes des vecteurs de gradients (fig. 92).

$\partial z/\partial x$	$\partial z/\partial y$	Azimut
+	+	$270-\phi$
+	-	$270+\phi$
-	+	$90+\phi$
-	-	$90-\phi$

Pour P_{25} , $\partial z/\partial x$, c'est-à-dire G_{est} , est *positif*, tandis que $\partial z/\partial y$ (soit G_{nord}) est *négatif* donc l'orientation de la pente, θ , résulte:

$$P_{orient} = 270 + 72.58 = \mathbf{342.58} \quad (\text{nord})$$

L'estimation faite avec *Surfer* fut 342.636.

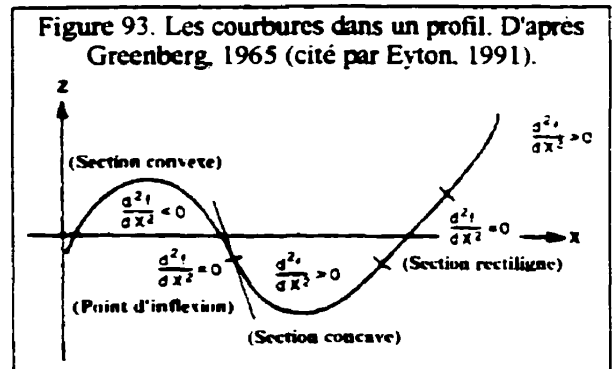
Calcul de la courbure (dérivée seconde):

La courbure du terrain représente la variation de la pente le long de la surface. Pour une orientation donnée, disons l'axe "x", si la variation est nulle, $\partial^2 z/\partial x^2 = 0$, la courbure est zéro et la pente est rectiligne; si $\partial^2 z/\partial x^2 > 0$ la courbure est positive (*concave*) et, si $\partial^2 z/\partial x^2 < 0$ la courbure est négative (*convexe*) (fig. 93).

Dans une représentation matricielle:

$$C_{est} = \partial^2 z/\partial x^2 = (2P_{25} - P_{22} - P_{18}) / (\partial x)^2$$

$$C_{nord} = \partial^2 z/\partial y^2 = (2P_{25} - P_{20} - P_{24}) / (\partial y)^2 \quad (26)$$



numériquement:

$$C_{est} = (2*9.27002 - 9.10999 - 9.43005) / (1^2) = 0 \quad (\text{pente rectiligne})$$

$$C_{nord} = (2*9.27002 - 9.78003 - 8.76001) / (1^2) = 0 \quad (\text{pente rectiligne})$$

Dans *Surfer* les résultats furent: 0.00524902 et 0.00439453 respectivement, qui indiquent des profils avec une concavité très minime de 1%.

Si l'on s'intéresse exclusivement à la valeur absolue, on peut estimer la courbure maximale comme le produit vectoriel des expressions (26), soit:

$$C_{\max} = \text{SQRT} ((\partial^2 z / \partial x^2)^2 + (\partial^2 z / \partial y^2)^2) \quad (27)$$

$$C_{\max} = \text{SQRT} ((C_{\text{est}})^2 + (C_{\text{nord}})^2)$$

numériquement:

$$C_{\max} = \sqrt{0} = 0$$

Le logiciel *Surfer* ne fait pas automatiquement ce calcul. Utilisant les valeurs des courbures *est* et *nord* calculées avec ce logiciel, on peut estimer que C_{\max} vaut 0.0068457.

Le plus souvent la courbure est estimée dans une orientation plus significative en termes d'*analyse de terrain*. Deux de ces orientations sont: l'azimut de P_{\max} dont la deuxième dérivée de l'altitude est connue comme la *courbure en profil*, et la normale audit azimut dont la deuxième dérivée de l'altitude est la *courbure en plan*. Dans *Surfer*, on peut calculer aussi la *courbure tangentielle*.

Tandis que l'orientation et l'inclinaison de la pente affectent l'*orientation* et la *vitesse* d'un flux qui se déplace le long d'un versant, la courbure du terrain détermine les *changements de vitesse*, rapportés aux variations de la courbure en profil, et les phénomènes de *convergence* (concentration) et *divergence* (diffusion), qui se rapportent aux variations dans la courbure en plan. La *courbure tangentielle* proposée dans *Surfer* est analogue à la courbure en plan, mais la divergence (ou confluence) est analysée par rapport à un plan vertical.

Ces concepts ont des applications pratiques immédiates. Dikau (1989, 1990) propose une méthodologie pour découper le territoire dans une hiérarchie d'unités géométriques et topologiques en *morpho-facettes* et *morpho-éléments*. Ces deux catégories constituent des *mésformes* qui sont délimitées sur la base d'une analyse des pentes et des courbures du relief. Hall et Olson (1991) discutent l'importance de l'analyse de terrain, notamment la distribution

spatiale de la convergence et de la divergence dans la modélisation du flux d'eau et leur implication dans la formation et l'évolution du sol.

Les algorithmes inclus dans *Surfer* estiment les trois types de courbures suivant les équations de Mitásová et Hofierka (1993) et Mitásová et Mitás (1993).

La courbure en profil y est définie comme:

$$C_{\text{profil}} = \frac{((\partial^2 z / \partial x^2) (\partial z / \partial x)^2 + 2(\partial^2 z / \partial x \partial y) (\partial z / \partial x) (\partial z / \partial y) + (\partial^2 z / \partial y^2) (\partial z / \partial y)^2)}{((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2) * \sqrt{(((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2) + 1)^3}} \quad (28)$$

$$C_{\text{profil}} = \frac{((C_{\text{est}}) (P_{18}-P_{22})^2 + 2*(C_{\text{max}}) (P_{18}-P_{22}) (P_{24}-P_{20}) + (N_{\text{ord}}) (P_{24}-P_{20})^2)}{((P_{18}-P_{22})^2 + (P_{24}-P_{20})^2) * \sqrt{(((P_{18}-P_{22})^2 + (P_{24}-P_{20})^2) + 1)^3}}$$

Pour P_{25} , évidemment, la solution numérique de l'expression (28) sera *zéro*, puisque autant C_{est} que C_{nord} et C_{max} valent *zéro*. Cependant, si l'on utilise les valeurs obtenues dans *Surfer* pour ces mêmes quantités, on obtient:

$$C_{\text{profil}} = \frac{((0.00524902) (9.43-9.11)^2 + 2*(0.0068457) (9.43-9.11) (8.76-9.78) + (0.00439453) (8.76-9.78)^2)}{(((9.43-9.11)^2 + (8.76-9.78)^2) * \sqrt{(((9.43-9.11)^2 + (8.76-9.78)^2) + 1)^3}}$$

$$C_{\text{profil}} = \frac{(0.0005374996 - 0.00446887296 + 0.00457206901)}{(1.1428 * \sqrt{(2.1428)^3}}$$

$$C_{\text{profil}} = 0.0026163745$$

La courbure en plan y est définie comme:

$$C_{\text{plan}} = \frac{((\partial^2 z / \partial x^2) (\partial z / \partial y)^2 - 2(\partial^2 z / \partial x \partial y) (\partial z / \partial x) (\partial z / \partial y) + (\partial^2 z / \partial y^2) (\partial z / \partial x)^2)}{\sqrt{(((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2)^3)}} \quad (29)$$

La solution obtenue dans *Surfer* est $C_{\text{plan}} = 0.00339076$.

D'après le travail de Mitasova et Hofierka, les phénomènes de divergence/convergence sont mieux décrits par la *courbure tangentielle*, qui est mesurée sur le plan normal à la direction perpendiculaire au *gradient*. Ceci s'exprime:

$$C_{\text{tangentielle}} = \frac{((\partial^2 z / \partial x^2) (\partial z / \partial x)^2 + 2(\partial^2 z / \partial x \partial y) (\partial z / \partial x) (\partial z / \partial y) + (\partial^2 z / \partial y^2) (\partial z / \partial y)^2)}{((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2) * \sqrt{((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2 + 1)}} \quad (30)$$

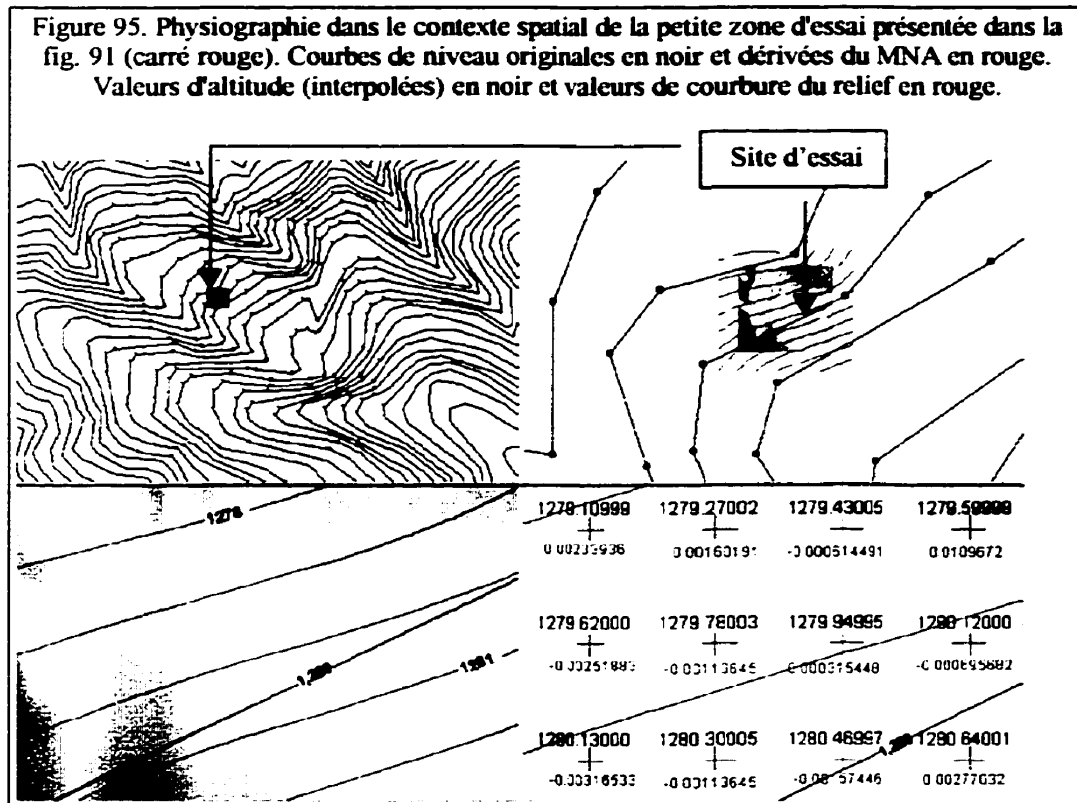
Pour P₂₅ $C_{\text{tangentielle}} = 0.00160191$.

Sur la figure 94, on peut noter que la courbure en profil est très sensible aux moindres distorsions dans l'espace défini par la variable "z" (isohypses, couleur rouge). Cependant, on note aussi une consistance remarquable: la coloration bleue correspond aux valeurs négatives (convexités) tandis que la verte se rapporte aux valeurs positives (concavités).

Sur la figure 95, nous plaçons le site d'essai dans un contexte spatial plus large et nous fournissons un échantillon des résultats numériques (altitude et courbure en profil) obtenus avec le logiciel *Surfer*.

Les isolignes en couleur noire représentent les courbes de niveau extraites de la carte topographique tandis que les rouges sont des courbes de niveau interpolées. Dans cette image contextuelle, on peut noter l'existence d'une dépression dans la partie nord-ouest de la petite zone d'essai, raison pour laquelle on aperçoit une bonne structuration spatiale de la courbure du relief (tonalités bleues et vertes).





6.5.2.2 Dérivation par calcul sur des éléments finis triangulaires.

La plupart des procédures en RTI supposent des triangles inclinés mais ayant une surface interne plane. Ceci facilite le calcul de l'inclinaison et de l'orientation de la pente. Palacios et Cuevas (1986) ainsi que Jones et al. (1990) ont décrit des procédures pour dériver ces attributs à partir des réseaux triangulaires.

D'après Jones et al. (1990:1237), l'équation du plan défini par les trois vertex d'un triangle vaut:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (31)$$

où les coefficients A,B,C, et D sont calculés à partir des coordonnées des trois vertex $(x_1 \ y_1 \ z_1)$, $(x_2 \ y_2 \ z_2)$, $(x_3 \ y_3 \ z_3)$:

$$A = y_1 (z_2 - z_3) + y_2 (z_3 - z_1) + y_3 (z_1 - z_2) \quad (32a)$$

$$B = z_1 (x_2 - x_3) + z_2 (x_3 - x_1) + z_3 (x_1 - x_2) \quad (32b)$$

$$C = x_1 (y_2 - y_3) + x_2 (y_3 - y_1) + x_3 (y_1 - y_2) \quad (32c)$$

$$D = -Ax_1 - By_1 - Cz_1 \quad (32d)$$

Et l'on peut réécrire l'équation 10 comme:

$$z = f(x,y) = -((A/C)x + (B/C)y + (D/C)) \quad (33)$$

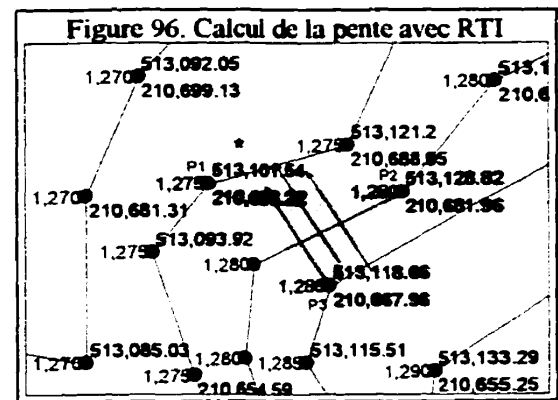
celle-ci permettant de calculer l'altitude de n'importe quel point sur la surface du triangle. En plus, si l'on prend la première dérivée de l'équation 13 par rapport à x et par rapport à y , on obtient:

$$\partial f / \partial x = - (A/C) \quad (34)$$

$$\partial f / \partial y = - (B/C) \quad (35)$$

et, dans ce cas là:

$$P_{RTI} = \partial f / \partial x + \partial f / \partial y \quad (36)$$



où P_{RTI} est l'inclinaison de la pente d'un triangle faisant partie du réseau triangulaire.

Pour le triangle défini par les vertex (P1,P2,P3) (figure 96):

$$A = 210683.22 (1280 - 1285) + 210681.96 (1285 - 1275) + 210667.96 (1275 - 1280)$$

$$A = 63.7$$

$$B = 1275 (513128.82 - 513118.66) + 1280 (513118.66 - 513101.54) + 1285 (513101.54 - 513128.82)$$

$$B = -187.2$$

$$C = 513101.54 (210681.96 - 210667.96) + 513128.82 (210667.96 - 210683.22) +$$

$$513118.66 (210683.22 - 210681.96)$$

$$C = -394.721$$

$$P_{RTI} = (-63.7 / -394.721) + (187.2 / -394.721)$$

$$P_{RTI} = -0.3128 \text{ (ou } 31.28\% \text{, le signe est non significatif).}$$

Pour le calcul de l'orientation, nous suivrons la méthode en deux étapes proposée par Eyton (1991) et telle qu'utilisée pour les calculs dans le modèle des quadrillages réguliers (ci-haut). Ainsi:

$$P_{\text{onloc}} = \text{Cos}^{-1} (\text{Gest} / P_{RTI}) \quad (P_{RTI} \text{ équivaut à } P_{\text{incl}} \text{ dans l'équation 3)}$$

$$P_{\text{onloc}} = \text{Cos}^{-1} ((\hat{c}f / \hat{c}x) / P_{RTI})$$

$$P_{\text{onloc}} = \text{Cos}^{-1} (0.1614 / 0.3128)$$

$$P_{\text{onloc}} = \mathbf{58.94 \text{ degrés.}}$$

Et, si l'on analyse les signes des gradients selon x et y de la première dérivée de la fonction exprimée dans l'équation 13, on obtient:

$$\hat{c}f / \hat{c}x = - (A/C) = 0.1614 \text{ (signe positif)}$$

$$\hat{c}f / \hat{c}y = - (B/C) = - 0.4742 \text{ (signe négatif)}$$

ceci nous situe dans le quadrant NO et, d'après la figure 86:

$$RTI_{\text{orient}} = P_{\text{orient}} = 270 + 58.94 = \mathbf{328.94 \text{ degrés (flèches rouges dans la figure 96).}}$$

6.5.2.3 Dérivation par calcul sur des éléments finis dans une structure trapézoïdale.

Si l'on divise le territoire en trapézoïdes normaux aux isohypses, le calcul de l'inclinaison de la pente devient une opération simple. Moore *et al.* (1988) ont dérivé les expressions suivantes:

$$P_{\text{trap1}} = ((\Delta h / (\sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)})) + (\Delta h / (\sqrt{((x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2)})))/2$$

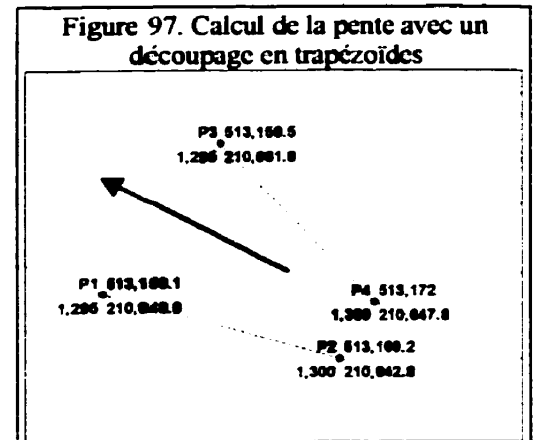
Et

$$P_{\text{trap2}} = \Delta h / \sqrt{(((x_2 + x_4)/2) - ((x_1 + x_3)/2))^2 + (((y_2 + y_4)/2) - ((y_1 + y_3)/2))^2}$$

Où : P_{trap1} exprime la pente moyenne des deux *vecteurs* aux isolignes, limitant le trapézoïde, et P_{trap2} exprime la pente moyenne le long de l'axe central du trapézoïde.

Dans les zones planes ou dans les crêtes arrondies, ces deux expressions donnent des résultats sensiblement similaires; cependant, dans le fond des vallons, P_{trap1} approche la pente du terrain déversant vers un collecteur commun, tandis que P_{trap2} approche la pente du cours d'eau.

Numériquement (fig. 97):



$$P_{\text{trap1}} = ((5 / (\sqrt{((513150.1 - 513169.2)^2 + (210648.6 - 210642.8)^2)})) + (5 / (\sqrt{((513159.5 - 513172.0)^2 + (210661.9 - 210647.8)^2)})))/2$$

$$P_{\text{trap1}} = (0.2505 + 0.2654) / 2$$

$$P_{\text{trap1}} = 0.2579 \text{ (25.79\%)}$$

Tandis que :

$$P_{\text{trap2}} = 5 / \sqrt{(((513169.2 + 513172.0)/2) - ((513150.1 + 513159.5)/2))^2 + (((210642.8 + 210647.8)/2) - ((210648.6 + 210661.9)/2))^2}$$

$$P_{\text{trap2}} = 5 / \sqrt{(249.64 + 99.0025)}$$

$$P_{\text{trap2}} = 0.26778 \text{ (26.78\%)}$$

Nous ferons le calcul d'orientation utilisant la ligne médiatrice pour laquelle nous venons d'estimer la valeur P_{trap2} moyenne.

Les positions centrales le long des *isohypses* sont d'abord calculées :

$$X_{13} = (513150.1 + 513159.5) / 2 = 513154.80$$

$$Y_{13} = (210648.6 + 210661.9) / 2 = 210655.25$$

$$X_{24} = (513169.2 + 513172.0) / 2 = 513170.60$$

$$Y_{24} = (210642.8 + 210647.8) / 2 = 210645.30$$

Ceci nous permet de calculer la longueur de la ligne médiatrice (h) ainsi que chacun des cotés du triangle rectangle formé ($\hat{c}x$, et $\hat{c}y$):

$$h = \text{SQRT}((X_{13} - X_{24})^2 + (Y_{13} - Y_{24})^2) = 18.67197$$

$$dx = X_{24} - X_{13} = 15.8$$

$$dy = Y_{13} - Y_{24} = 9.95$$

L'orientation locale de la pente étant alors :

$$P_{\text{oriloc}} = \tan^{-1}(\hat{c}y/\hat{c}x)$$

$$P_{\text{oriloc}} = \mathbf{32.20^\circ}$$

Et l'orientation azimutale vaut:

$$\text{TRAP}_{\text{orient}} = 270^\circ + 32.2^\circ \text{ (suivant la loi de signes utilisée auparavant)}$$

$$\text{TRAP}_{\text{orient}} = \mathbf{302.2^\circ} \text{ (flèche noire dans la figure 97).}$$

6.6 L'échantillonnage optimal

Dans la discussion des modèles numériques d'altitude (MNA), le problème de coût des calculs et de fidélité de la représentation du relief se pose avec acuité. Une bonne partie de la *théorie de l'échantillonnage*, développée notamment dans la science statistique, consiste à trouver la taille minimale d'échantillon dont les paramètres permettent une estimation fiable des valeurs de la population.

D'après Balce (1987), le but de l'échantillonnage optimal est d'acquérir un MNA avec une quantité minimale de points d'échantillon, mais capable de produire des courbes de niveau respectant les normes de précision requises. Autant la taille, comme la distribution spatiale sont inclus dans le concept d'échantillon optimal (Ayeni, 1982).

Un échantillonnage inadéquat produit des MNA imprécis et inefficaces qui nécessitent des ajustements coûteux. Au contraire, le sur-échantillonnage implique des temps de saisie inutile, accroît le temps pour le traitement des données, et engendre des problèmes d'emmagasinage de données en mémoire informatique (Balce, 1987:323).

Le sujet de l'échantillonnage optimal a été discuté notamment dans le contexte des échantillonnages par photogrammétrie (Makarovic, 1973, 1975; Ayeni, 1976a, 1976b, 1982; Balce, 1987).

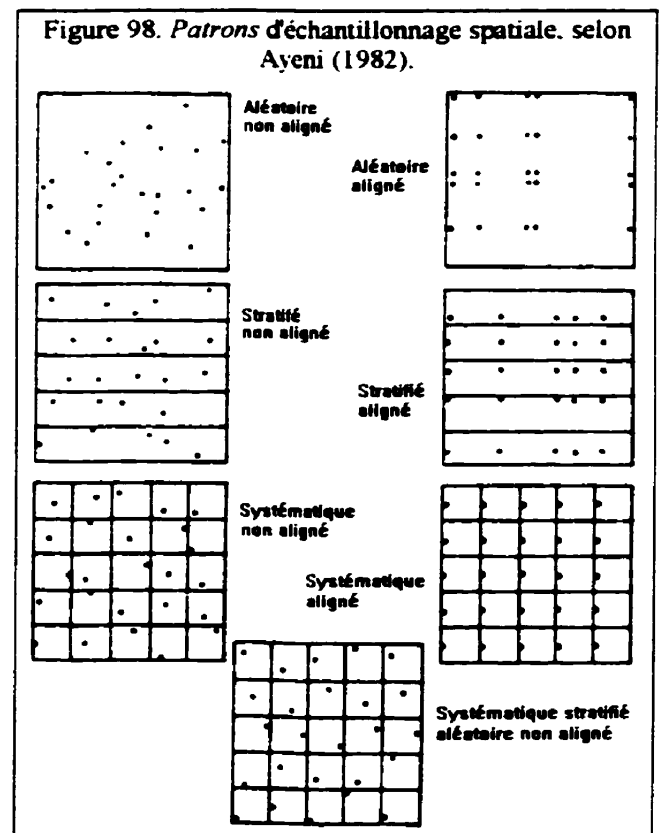
D'après Ayeni (1982:1687), la définition de la *taille optimale* de l'échantillon requiert une évaluation adéquate de la rugosité du terrain par rapport à son extension spatiale. Dans ce but, l'auteur propose d'utiliser une quantité connue comme la *magnitude du vecteur harmonique* ("the harmonic vector magnitude") ou HVM. Ayeni propose de fixer la surface d'un stéréo-modèle (un couple de photos aériennes visibles en 3-D) par la technique des moindres carrés en utilisant une combinaison de deux fonctions mathématiques: (a) un filtre linéaire et (b) une fonction double de Fourier (Ayeni, 1982:1987). Ayeni (1976a) a démontré que la quantité HVM pouvait être utilisée comme paramètre pour estimer la rugosité de terrain. Par la suite,

Ayeni (1982) utilise cette propriété du HVM pour estimer la taille optimale de l'échantillon pour neuf surfaces différentes, utilisant l'approche d'échantillonnage *progressif* proposé par Makarovic (1973, 1975). Ceci consiste à calculer itérativement la quantité HVM avec, chaque fois, plus de points de repère et des grillages plus denses, jusqu'à obtenir la valeur HVM *minimale*.

D'autre part, Ayeni (1982) reconnaît qu'un *patron* régulier (distribution uniforme des points d'échantillon) n'est pas toujours la meilleure stratégie d'échantillonnage, ce qui oblige à considérer l'organisation spatiale optimale des points échantillonnés. A son avis, "*puisque les propriétés de corrélation se rapportent à la distribution spatiale des irrégularités de la surface, les caractéristiques de la corrélation (spatiale) seront appliquées au problème du patron optimal d'échantillonnage*" (Ayeni, 1982:1689).

Se basant sur le travail de Das (1950), Ayeni (1982) a évalué l'efficacité relative des divers *patrons* d'échantillonnage (figure 98) et a conclu: (a) le *patron systématique stratifié aléatoire non aligné* est le plus efficace dans presque tous les types de terrain étudiés; (b) les théorèmes de Das (1950), basés sur le principe de l'autocorrélation spatiale, peuvent être utilisés comme indicateurs *a priori* du type de patron d'échantillonnage optimal pour tout type de terrain indépendamment de sa rugosité et de la taille de l'échantillon. Ceci suggère que la caractéristique fondamentale du terrain qui détermine le patron optimal d'échantillonnage est l'autocorrélation spatiale.

D'après Balce (1987:323), une stratégie pour faire un échantillonnage optimal lors de la construction d'un MNA à partir des méthodes



photogrammétriques inclut les étapes suivantes:

- échantillonnage sélectif des changements abrupts dans l'altitude, tels que lignes de rupture ("*breaklines*"), sommets ("*hilltops*") et dépressions;
- échantillonnage réticulaire utilisant des intervalles réguliers, semi-réguliers ou irréguliers; et
- échantillonnage *progressif* utilisant la deuxième dérivée de l'altitude ("*second height differences*") (Makarovic, 1977) ou la *magnitude du vecteur harmonique* ("*harmonic vector magnitude*") (HVM) calculée à partir d'une double fonction de Fourier (Ayeni, 1982).

Cependant, dans la pratique courante, on se limite aux deux premières étapes.

Ackermann (1994) a adopté une perspective assez divergente par rapport aux travaux de Ayeni (1982) et Balce (1987). D'après lui, l'évolution informatique et la photogrammétrie numérique permettent actuellement de sur-échantillonner le terrain pour obtenir des représentations fidèles tout en minimisant l'intervention des opérateurs. Ceci rend la méthode optimale en terme de coûts et de précision, même si l'on doit gérer une certaine redondance de données. Ce principe de *redondance* est proposé comme une nouvelle philosophie permettant de résoudre, via les *algorithmes*, beaucoup des problèmes de représentation du terrain qui auparavant étaient résolus par l'intervention des experts.

Ackermann insiste sur l'importance des *lignes de rupture*, normalement saisies séparément, dans le processus général d'échantillonnage, et pouvant demander autant de temps que l'ensemble d'un échantillonnage systématique. L'approche par *redondance* permet de découvrir qu'une bonne partie des lignes de rupture sont en réalité des transitions graduelles (fig. 83) pouvant être obtenues par un échantillonnage dense. La saisie manuelle est dès lors limitée aux seules discontinuités majeures (par exemple, les falaises).

D'après cet auteur, les MNA conventionnels ont été produits en utilisant des densités de grille entre 2 et 10 fois supérieures à la densité des points repérés, tandis qu'avec la photogrammétrie

numérique, on peut repérer 10 fois plus de points que de noeuds formant la grille. C'est-à-dire que l'on peut passer de 5 000 points par stéréo-modèle à 500 000 points, toujours en utilisant une matrice conventionnelle de 50 000 noeuds par stéréo-modèle ou encore en densifiant sensiblement une telle matrice.

L'approche proposée par Ackermann n'est possible que lorsque la saisie des triades (x, y, z) est complètement automatisée, et lorsque des algorithmes puissants et des structures de stockage efficaces facilitent les tâches de correction des "anomalies" induites par la présence de la végétation, des édifices et autres facteurs d'erreur. Toutefois l'approche a le mérite de saisir la structure fine du terrain laissée de côté, en raison des coûts, par la photogrammétrie conventionnelle.

MacEachren et Davidson (1987) signalent cinq facteurs qui affectent la précision dans l'estimation des points intermédiaires, c'est-à-dire la précision de l'interpolation:

- la précision dans la mesure des données (qui se rapporte à la méthode et aux instruments utilisés),
- la densité de points de contrôle (le plus souvent un problème de coûts),
- la distribution spatiale des points de contrôle,
- la procédure d'estimation (*interpolation*) utilisée, et
- la variabilité spatiale de la surface représentée (en fonction de l'autocorrélation spatiale)

Dans le calcul d'un MNA dérivé des cartes topographiques, l'erreur dans le tracé horizontal vient s'ajouter à l'erreur verticale (problème mineur dans les MNA construits à partir d'échantillonnage photogrammétrique direct ou à partir des observations de terrain). Ceci a été démontré de façon empirique par Koppe (1902) (cité par Imhof, 1982). La relation suivante a été proposée:

$$e_{h_{\text{moyen}}} = \pm (A + B \tan\alpha)$$

où: $e_{h_{\text{moyen}}} = \text{erreur moyenne en altitude}$

A = erreur ou incertitude en altitude

B = erreur dans le tracé horizontal

α = pente du terrain (degrés)

Sur une carte au 1:25 000 avec $\alpha = 20^\circ$:

$$e_{h_{\text{moyen}}} = \pm (1 + 7 \tan 20) = \pm 3.5 \text{ mètres.}$$

L'intensité d'échantillonnage a reçu une attention considérable de la part des statisticiens, particulièrement en relation avec *l'estimation des moyennes* de population à partir des échantillons. Ceci, cependant, est un objectif assez éloigné du but poursuivi en la géographie lorsqu'on fait des *estimations ponctuelles* à l'aide des procédures d'interpolation. Dans ce dernier cas, on travaille avec des variables spatiales à distribution continue dont les observations ne sont pas indépendantes mais autocorrélées, et l'on doit accepter une certaine redondance pour améliorer les *estimations intermédiaires*.

Lorsque l'intensité d'échantillonnage croît, l'erreur d'estimation ainsi que la dispersion spatiale décroissent selon un taux plutôt décroissant (Morrison, 1971; Ackerman, 1978; Ayeni, 1982; Sheppard, 1984; MacEachren et Davidson, 1987:229). L'amplitude des erreurs est également reliée à la complexité de la surface.

Sheppard (1984) a trouvé de façon empirique le rapport suivant:

$$e_{h_{\text{moyen}}} = k N^{-0.56}$$

où: $k = \text{constante}$

N = nombre des points d'observation

La structure générale de cette relation a été confirmée dans plusieurs expériences réalisées par MacEachren et Davidson, 1987, qui ont trouvé une valeur moyenne de -0.307 ± 0.031 pour l'exposant.

D'après les travaux de Morrison (1971) et d'Akima (1974), on peut supposer que l'amplitude des données, plus que la distribution des points de repère ou la méthode d'interpolation, détermine la précision des estimations faites par interpolation.

Morrison (1971) a comparé diverses stratégies d'échantillonnage spatial pour une variété de surfaces topographiques. Il a conclu que l'échantillonnage aléatoire stratifié non aligné produit des estimations plus précises. Des résultats équivalents ont été obtenus par Ayeni (1982).

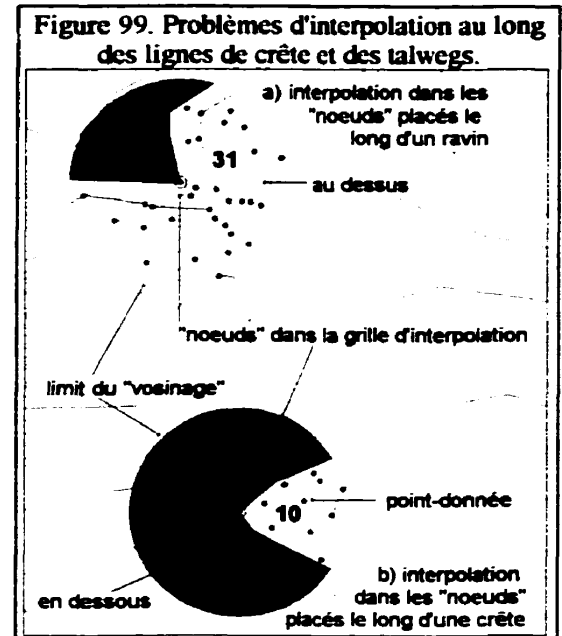
Ces auteurs ont utilisé des échantillonnages aléatoires, c'est-à-dire, indépendants de la nature de la surface échantillonnée. McCullagh et Sampson (1972), cependant, ont montré que l'addition de quelques points soigneusement sélectionnés améliore la précision de l'interpolation. De même, Peucker (1979) a mentionné l'avantage d'ajouter les lignes structurelles du relief dans la base de données d'altitude.

Lam (1983) a passé en revue les méthodes d'interpolation spatiale, les classifiant en *zonales* et *ponctuelles*. Ces dernières sont utilisées lorsqu'on travaille avec des surfaces continues. Parmi les ponctuelles, on distingue entre celles basées sur une approche globale et celles basées sur une approche locale. Celles-ci utilisent l'information des points situés dans le voisinage du *noeud* à interpoler pour viser une *estimation* la plus exacte possible. Certaines, parmi elles, permettent de garder la valeur originale lorsque le *noeud* de grille coïncide avec la position d'un point d'échantillon, tandis que d'autres se contentent d'approcher la valeur observée.

Deux approches ont été utilisées pour faire l'interpolation: a) l'utilisation d'une fonction de l'inverse de la distance entre les points de repère et le *noeud* de la grille (voir les sections 6.4.1 et 6.4.4); b) la mise en oeuvre d'un modèle mathématique (une fonction polynomiale) pour essayer de reproduire la surface 3D décrite par les quelques points d'échantillon dans un voisinage plus ou moins étendu (section 6.4.2). La méthode RTI (discutée à la section 6.4.3) fait partie de cette dernière stratégie.

D'après Davis (1975, cité par MacEachren et Davidson, 1987) la méthode d'interpolation la plus prometteuse est celle qui intègre les avantages des deux approches.

Que ce soit avec des fonctions reposant sur l'inverse de la distance (une mesure de l'autocorrélation) ou sur l'approximation polynomiale, des erreurs d'estimation importantes sont souvent trouvées près des *lignes de rupture* du relief. Même avec des points de repère précis, denses et régulièrement distribués sur la surface considérée, les estimations ont tendance à devenir moins précises le long des rivières, crêtes et ruptures de pente. Tel que montré sur la figure 99, ceci est dû aux disparités dans la quantité relative des points-voisins au-dessus (zone jaune) par rapport à ceux situés en dessous (zone verte) de l'altitude d'un noeud particulier dans la grille d'interpolation. Dans le fond des vallons, on utilise un *voisinage* dominé par des points placés au-dessus de la valeur en estimation (rapport 31/15 dans la figure 99a). La situation inverse s'est produite dans les crêtes (fig. 99b) avec un rapport 10/23. Ce problème est particulièrement important pour la *surface topographique* où l'on trouve des transitions assez brusques. Ajouter les *lignes structurelles du relief* dans la base de données et interdire l'interpolation à travers ces lignes semble apporter une solution efficace à ce problème.



D'après MacEachren et Davidson (1987), l'effet de la *variabilité de la surface* dans la précision de l'interpolation spatiale est relié au *degré d'autocorrélation spatiale* ainsi qu'à l'amplitude *du changement par unité de distance*. Ces deux aspects sont en réalité inter-reliés et font partie de la quantité connue comme la *magnitude du vecteur harmonique* ("the harmonic vector magnitude") ou HVM que Ayeni (1982) a utilisé dans le processus de sélection des points d'échantillon.

6.7 Discussion à propos du MNA du bassin-versant Uruca

6.7.1 Historique de sa conception

Au départ nous disposions de deux sources de données: a) les isohypses extraits des cartes topographiques par *scannage* et vectorisation, et b) des photos aériennes. L'utilisation conjointe des deux sources présentait certaines difficultés pratiques. D'un coté, les fichiers des isolignes avaient été très mal vectorisés (il y avait même des entrecroisements d'isohypses); les cotes d'altitude n'avaient pas été assignées; et la résolution spatiale n'était pas homogène (la partie inférieure du bassin-versant était couverte au 10 000 ième, tandis que la partie supérieure ne l'était qu'au 50 000 ième). En contrepartie, les photos aériennes n'avaient pas de points de repères décrits sur le terrain; nous ne disposions pas d'un scanner approprié⁵, et nous ne disposions pas non plus, au départ, d'un logiciel de photogrammétrie nous permettant d'initier immédiatement l'échantillonnage supplémentaire dans les zones avec des données topographiques déficitaires.

Nous avons donc initié notre travail avec les fichiers d'isolignes extraits des cartes topographiques. Pour l'ensemble de nos données, après quelques mois de travaux d'édition, nous avons un gros fichier contenant 450 000 points d'altitude. Cependant nous étions contraints par la capacité limite de la base de données du logiciel d'interpolation Surfer (version 2.0 pour D.O.S.) ne supportant que 16 384 points. Il nous fallait donc morceler le terrain en une trentaine d'unités en ne dépassant pas cette limite. On s'est servi du logiciel Dbase II pour choisir itérativement ces sous-modèles. Ceux-ci devaient, par la suite, se regrouper dans le logiciel Idrisi pour aboutir dans un MNA d'ensemble du bassin-versant.

Après une quantité importante d'essais empiriques et suite à une revue substantielle de la littérature, nous avons perçu le besoin de compléter les données dans la partie aval du bassin-

⁵ Le seul disponible était installé sur ordinateur Macintosh sans autre dispositif pour la sortie que les disquettes de 1.44 MB. Ceci nous a obligé à scanner nos 40 photos à raison de 5 morceaux par photo; puis de les traduire au format IBM compatible et finalement les reconstruire avec le logiciel Idrisi. Ce type de problème est hereusement résolu actuellement grâce aux progrès de la technologie.

versant, en raison de la faible topographie et de la grande distance entre les courbes de niveau. C'est pourquoi nous avons balayé nos photos aériennes et initié la saisie des points cotés directement par photogrammétrie numérique. Ceci évidemment est survenu un peu plus tard, lorsque nous avons eu accès au logiciel DVP⁶. Nous n'avons pas complété cette tâche⁷, mais les données acquises ont permis d'améliorer la précision dans la zone plane, quoi que avec des difficultés considérables pour combiner des données topographiques qui proviennent de sources différentes, d'échelles variées, et de procédés de saisie différents. En réalité, nous n'avons pas combiné les deux fichiers, mais nous avons plutôt utilisé le deuxième pour interpréter visuellement et tracer à main levée quelques courbes auxiliaires afin d'améliorer certains secteurs du MNA. En plus, nous avons réalisé quelques essais d'interpolation avec des sous-modèles entièrement dérivés des données photogrammétriques.

6.7.2 Pré-traitement des données

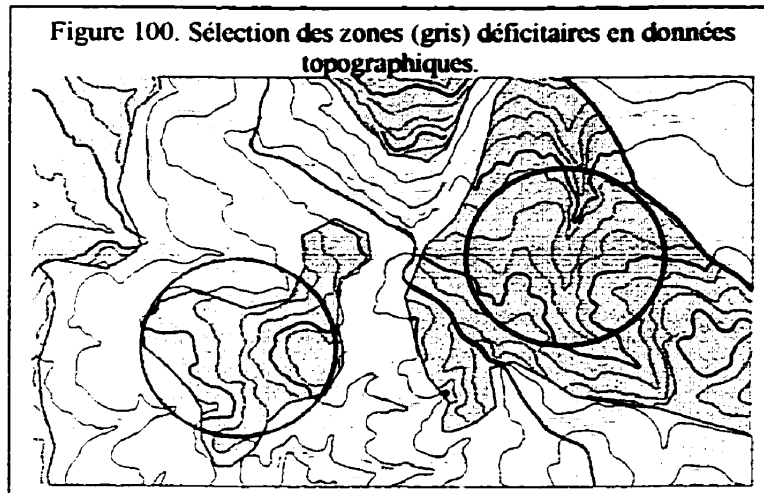
Suite à la « *rasterisation* » et à la « *vectorisation* » des isohypses, le travail a continué avec l'élimination de la surcharge en vertex qui affectait la plupart des fichiers. Puis, nous avons interpolé les données pour essayer différents algorithmes et vérifier l'inexistence de valeurs d'altitude mal assignées. Ces défauts sont facilement visibles sur les cartes d'estompage construites à partir du relief (*shaded relief*). Une fois que la version 5.0 de Surfer (pour Windows) est devenue disponible, nous avons pu faire des essais d'interpolation sur l'ensemble du bassin. On s'est vite aperçu de la nécessité d'homogénéiser la densité du réseau de points cotés parce qu'on remarquait une différence substantielle dans le « grain » (niveau de détail physiographique) au contact entre la zone couverte au 10 000 ième et celle couverte au 50 000 ième (voir 4.9.3, et figure 37). Ce même problème se manifestait aussi à l'intérieur de la zone couverte au 10 000 ième, lorsqu'on passait des terrains de piémont vers la plaine dominée par des dépôts fluviaux et des colluvions. Cependant, tandis que le contact entre les deux échelles montrait une discontinuité nette dans le MNA, le manque de données à

⁶ Les Systèmes Géomatiques DVP Inc. Charny, Québec. Version 3.40.

⁷ En raison de la fin de notre séjour au Canada. Mais, nous nous sommes servis aussi du logiciel DVP pour faire l'interprétation et la numérisation 3D des phénomènes géomorphologiques.

l'intérieur des terrains plats couverts au 10 000 ième s'exprimait par la morphologie classique en côtelettes ou échelons (Arce, 1993).

Un zonage physiographique, délimitant notamment les zones déficitaires en données au 50

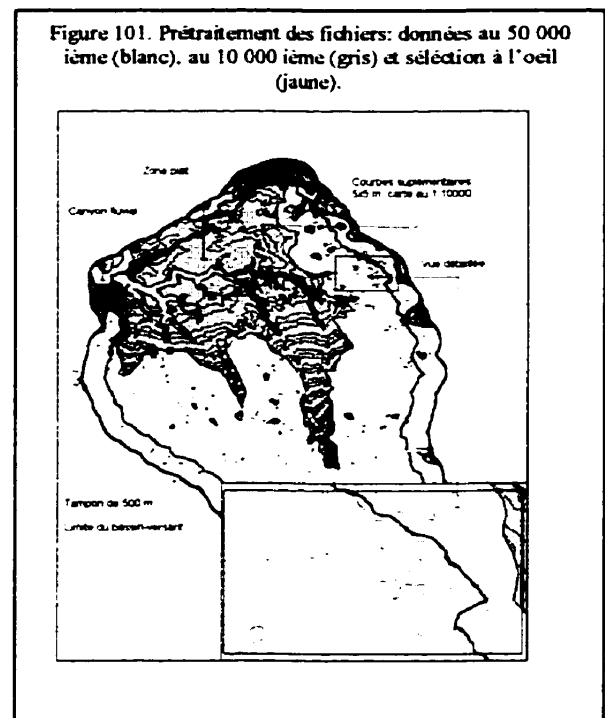


000 fut alors construit, et des courbes de niveau provenant des cartes au 10 000 ième furent ajoutées (figures 100 et 101). En plus, on a délimité et « nettoyé » la zone du canyon fluvial Virilla, où on a gardé moins de points cotés parce qu'il y en avait beaucoup trop. Puis, nous avons interpolé, à main levée, quelques isolignes

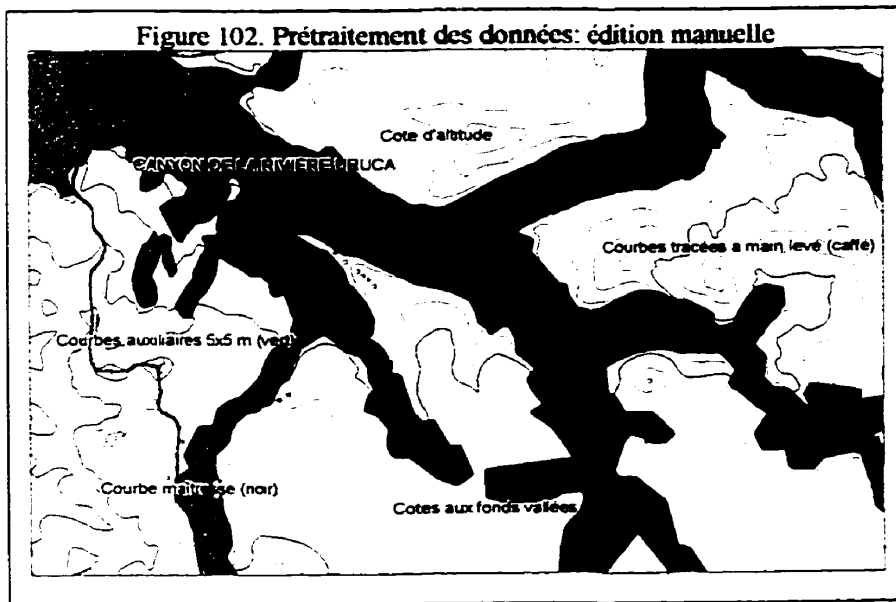
auxiliaires dans les sites caractérisés par de fortes perturbations dans le patron des courbes de niveau (situation particulièrement notable dans les terrains plats au nord du bassin). Pour cette tâche, nous nous sommes servi du fichier topographique issu des photos aériennes. Enfin, nous avons ajouté des points cotés particulièrement importants le long des fonds plats de vallées et des vallées fortement encaissées. Ceci a permis d'aboutir à un modèle du relief ayant un maximum de continuité et relativement représentatif du relief réel (figure 102).

6.7.3 Choix de la méthode

Pour cette recherche, nous n'avons qu'un choix; les seuls logiciels disponibles étant Surfer et Idrisi, notre MNA devrait utiliser l'approche grille en mode matriciel. Nous avons de toute façon enquêté sur les avantages des autres



approches, particulièrement de la méthode RTI. Seuls les gros logiciels, comme le module GWN-DTM⁸ de GWN Systems Inc., ou ArcInfo-TIN offraient des approches RTI vectoriels permettant d'inclure de façon explicite les *lignes caractéristiques* du relief (soit, lignes de rupture, talwegs et lignes de crêtes). L'approche par les *isohypses* ou des trapézoïdes, de son côté, était beaucoup moins répandue, parce qu'elle n'avait pas été implantée dans les logiciels de SIG commerciaux. Pourtant, cette dernière approche était très intéressante pour nous puisqu'il s'agissait d'une méthode développée spécifiquement pour la modélisation du terrain à partir de cartes en courbes de niveau.



En plus, la plupart des logiciels offerts sur le marché à prix raisonnables avaient les mêmes limites que Surfer par rapport à la taille des fichiers. C'était le cas des logiciels Quick Surf et TAPES-C⁹ qui utilisaient des approches RTI et des

trapézoïdes respectivement.

6.7.4 Choix d'un algorithme d'interpolation

Une bonne variété d'algorithmes d'interpolation est offerte dans les logiciels Surfer et Idrisi. Pour chacun, on dispose d'options pouvant affecter significativement le produit obtenu. Il fallait donc enquêter sur leurs performances et limitations et, parallèlement, faire des essais pratiques avec différents *paramètres* sur des topographies variées. Plusieurs chercheurs (Peucker, 1980, Lam, 1983; Laslett *et al.*, 1987; Voltz et Webster, 1990; Lee, 1991; Weber et

⁸ GWN Systems Inc. (1993) GWN-DTM Digital Terrain Model, version 5.0 for Microstation 4.0. User's manual.

Englund, 1992, 1994; Kumler, 1994) avaient déjà enquêté sur ces sujets. Nous nous sommes servi de leurs travaux pour identifier et nous guider dans l'essai des principaux algorithmes disponibles.

Parmi les plus fameux, nous avons retenu les algorithmes de la *fonction inverse de la distance*, celui de la *courbure minimale* ou *MinCurv*, qui

fait partie de la famille d'algorithmes *splines* (interpolation par *pièces polynomiales*), le

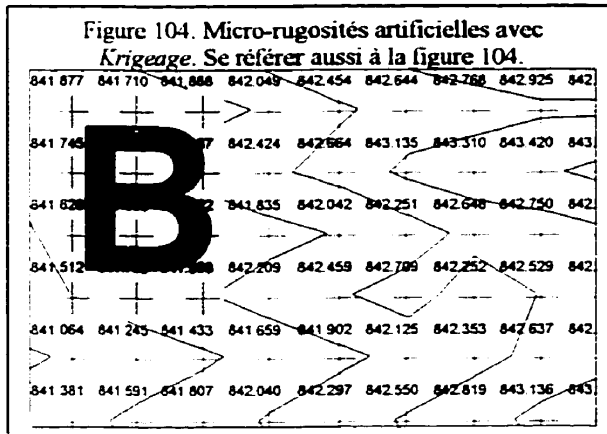
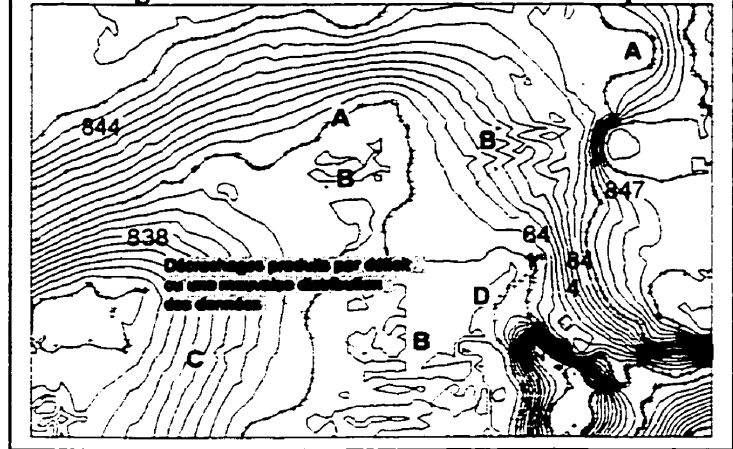


Figure 103. Problèmes liés au *Krigeage*. Les croix rouges suivent le tracé des courbes de niveau originales. Les isolignes noires sont les courbes de niveau interpolées.



Krigeage, basé dans la théorie géostatistique des *variables régionalisées*, et la *triangulation de Delaunay*, qui fait partie des méthodes RTI, mais, qui est disponible dans Surfer en mode matriciel uniquement.

Après quelques essais avec les algorithmes mentionnés, en utilisant toujours l'approche *grille* du mode *matriciel*, nous avons déterminé

que les algorithmes d'interpolation offerts par le logiciel Surfer étaient supérieurs à ceux offerts par Idrisi. En conséquence nous avons retenu Surfer pour l'*interpolation*¹⁰ de la matrice d'altitudes. Également, nous avons déterminé que deux algorithmes de la famille *B-splines* (*MinCurv* et *Spline*) ainsi que le *Krigeage* donnaient les résultats les plus proches de nos données de départ¹¹. En particulier, les trois étaient capables de reproduire des sinuosités complexes dans les *isohypses*, notamment lorsque celles-ci gardaient une certaine continuité. Cependant, les trois présentaient des défauts dans les terrains à données déficitaires ou en

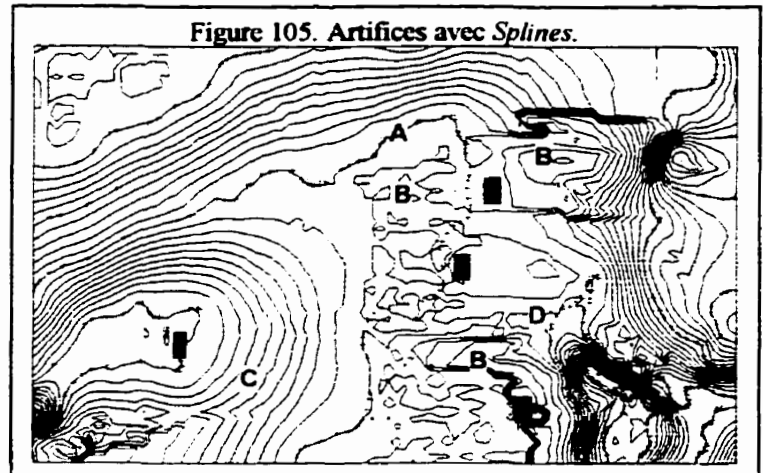
⁹ Topographic Analysis Programs for the Environnemental Sciences – Contour.

¹⁰ Quoi que physiquement cette tâche conduit à la constitution du fichier de support du MNA, on ne doit pas la confondre avec le processus de construction du MNA, tel que nous l'avons présenté à la section 6.2

¹¹ Nous avons négligé, après quelques essais l'algorithme du RTI parce que celui-ci est moins performant lorsqu'on ne peut pas ajouter et utiliser les *lignes caractéristiques* du relief.

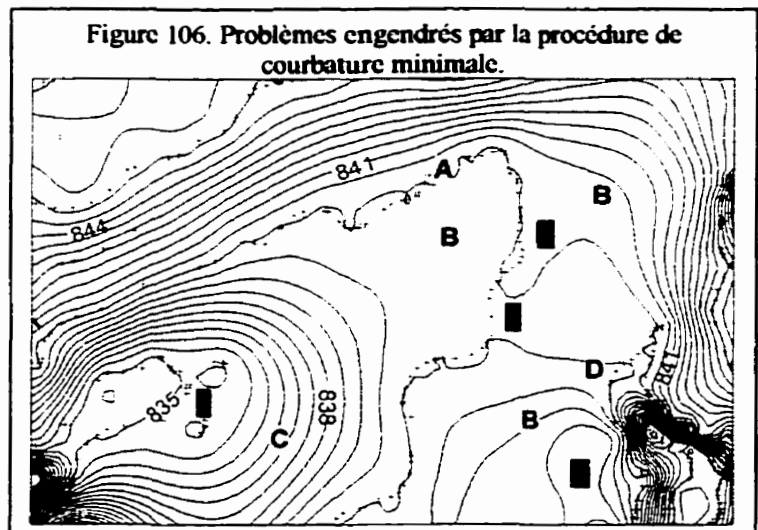
distribution asymétrique. Le *Krigeage* et les fonctions *splines* créaient des micro-rugosités complexes (voir "B" dans les figures 103, 104 et 105) tandis que *MinCurv* produisait des surfaces trop lissées et artificielles (figure 106). Nous y reviendrons pour une analyse plus détaillée.

Enfin, nous avons passé en revue la littérature disponible concernant l'interpolation utilisant les *splines* et le *Krigeage*. Le *Krigeage* a été abordé dans des ouvrages assez spécialisés dont ceux de Agterberg (1970), Journel et Huijbregts (1978), Burgess et Webster (1980a, b), Webster et



Burgess (1980), Burgess *et al.* (1981), Webster (1985), Mulla (1988), Webster et Oliver (1989), Oliver et Webster (1990), Cressie (1990), Barnes (1991), Burrough (en Mausbach et Wilding, 1991), Kitanidis (1993), Cressie (dans Goodchild *et al.*, 1993), Burrough (dans Goodchild *et al.*, 1993), Pan (1994), Bourgault (1994), Delay et Marcily (1994), Lamorey et Jacobson (1995). L'utilisation des *splines* et son expansion bi-dimensionnelle *B-splines* est traitée par Briggs (1974) –base pour l'algorithme *MinCurv* disponible dans Surfer, Legates et Willmott (1986), Smith et Wessel (1990), Mitasová et Mitas (1993), Hutchinson (1995).

Une des limitations observées dans la revue bibliographique est que le *Krigeage* a été testé notamment dans le domaine des sciences du sol et dans l'exploitation des mines, mais beaucoup moins dans les études du relief topographique. Par contre, la théorie *géostatistique* le supportant est assez générale et relativement accessible aux non mathématiciens.



De l'autre côté, le traitement mathématique dans les *B-splines* est assez complexe, ce qui limite la compréhension de cette procédure qui est particulièrement bien adaptée pour la modélisation de surfaces décrites par des isolignes, comme c'était notre cas.

Ceci nous a incité à être prudents, en choisissant de petites zones d'essai (*training zones*) avant de choisir l'algorithme pour interpoler le MNA du bassin-versant au complet.

6.7.5 Interpolation du modèle

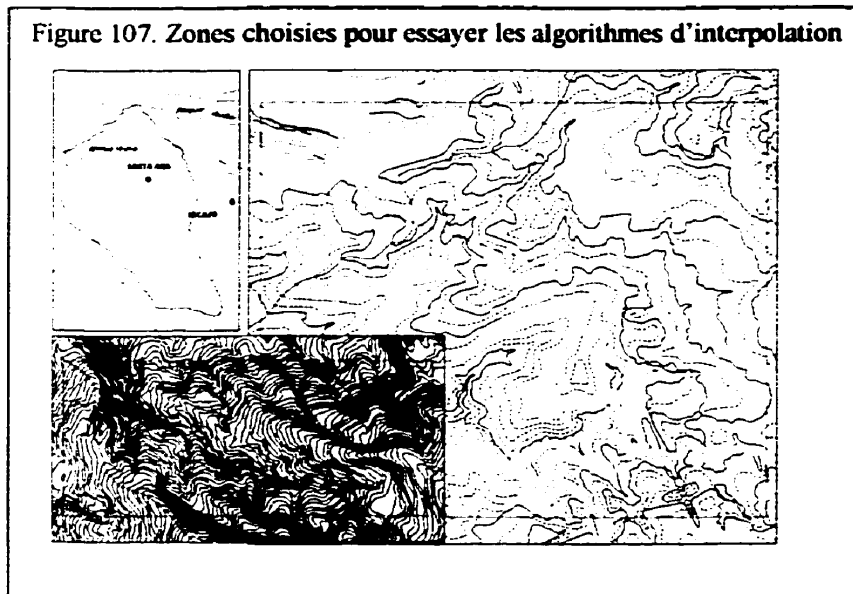
6.7.5.1 Étude préliminaire

Que ce soit avec le *Krigeage* ou avec les *B-splines* (*MinCurv* et *splines*), on avait besoin de tester les différents paramètres pour examiner et interpréter les résultats. Pour ceci, nous avons sélectionné deux zones d'essai¹² appelées *zexpcolo* et *zexprepe* (figure 107). Les figures présentées, lorsqu'on a traité des algorithmes d'interpolation et de dérivation, correspondent à la première zone, tandis que les figures 103 à 106 proviennent de la deuxième. *Zexprepe* se trouve au nord, dans la plaine volcano-sédimentaire où les données topographiques étaient déficitaires et distribuées de façon assez irrégulière. En plus, on y trouve le canyon des rivières Virilla et Uruca, une morphologie particulièrement difficile à reproduire dans le MNA. *Zexpcolo*, par contre, est située au centre-ouest du bassin, dans une topographie complexe, abrupte, mais avec une densité et une distribution des points d'altitude connue qui devrait suffire à la création d'un MNA de qualité acceptable.

Tel que montré sur les figures 103 à 106, les trois interpolations mettent en évidence des différences appréciables par rapport aux données de base. Cependant, d'après nous, celles-ci ne constituent pas des problèmes reliés uniquement aux algorithmes utilisés. Ils sont plutôt dus à une très mauvaise sélection des points de repère topographique (croix rouges sur ces figures). Ceci met en relief l'importance de l'échantillonnage lorsqu'on essaie de caractériser

¹² Plusieurs autres essais avaient déjà été faits lors des cours orientés sur le sujet de cette recherche. Notamment, les thèmes d'exploration du doctorat, le stage en techniques cartographiques et les lectures dirigées concernant les MNT.

des variables distribuées dans l'espace (MacEachren et Davidson, 1987; Burrough (dans: Mausbach et Wilding, 1991)).



Construire notre MNA à partir d'un *Modèle Analogique d'Altitudes* (MAA) représenté par la carte topographique entraîne des avantages et des inconvénients. L'avantage est qu'on connaît déjà la structure du terrain, de sorte qu'on peut organiser l'échantillonnage de façon optimale. En contrepartie, le

choix judicieux des points à utiliser lors de l'interpolation est normalement restreinte aux points le long des courbes de niveau. Même si toute sélection faite en ce sens signifie une perte de détail (une généralisation cartographique), on peut encore gagner sur la qualité du modèle, puisque celle-ci se rapporte à des propriétés du terrain beaucoup plus importantes que la taille du plus petit phénomène représentable (c'est-à-dire, son *grain*).

Une mauvaise distribution des points de repère est à l'origine, par exemple, de déplacements significatifs dans la position des structures topographiques (la crête **G**, fig. 106 semble déplacée vers l'est comme conséquence de la concentration des données autour du ravin au sud-est de l'image); de sa déformation (la dépression **C** sur les figures 103, 105 et 106 semble trop arrondie par rapport aux deux courbes de niveau l'entourant), et de la création de structures artificielles (fort ravinement dans la pente **B** des figures 103, 104; falaises dans **G** de la figure 105 et « lacs » à la position **F** dans la figure 106).

La disparition totale des structures réelles n'est possible que dans le cas de phénomènes mineurs et ceci lorsque les algorithmes présentent la particularité de ne pas retenir la valeur

originale lorsque le noeud interpolé coïncide avec un point de repère connu. D'après le manuel du logiciel *Surfer*, le *Krigeage* est un interpolateur exact qui retient les données de repère lorsqu'on spécifie un *erreur de variance* égale à zéro. En la pratique ceci ne se produit que lorsqu'on utilise des matrices à très haute résolution spatiale (1 m x 1 m par exemple). Pour une matrice de résolution moyenne (10 m x 10 m), il y a toujours des déviations entre les valeurs mesurées et celles estimées par *Krigeage*. Ceci nous a permis de construire la carte des différences d'interpolation discutées à la section 6.7 (figure 129). Pour sa part, l'algorithme *MinCurv* (*courbure minimale*) n'est pas capable de se conformer aux valeurs des points d'échantillon.

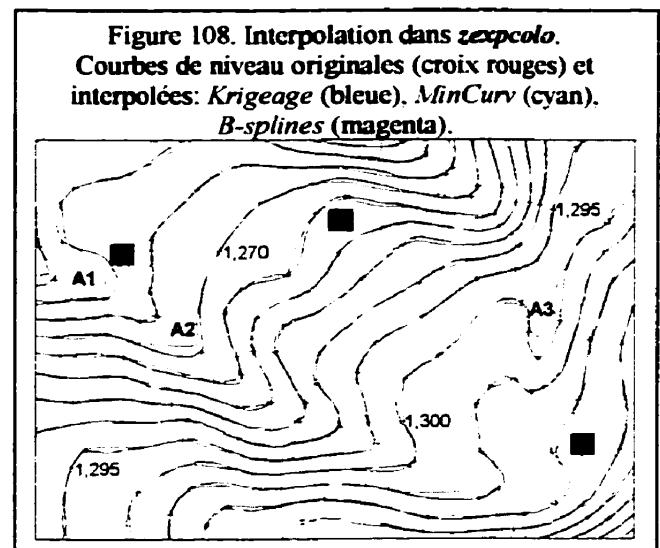
Étant donné que nous avons la « réalité » du terrain à la portée de la main (si l'on accepte la carte comme une réalité du terrain, au moins provisoirement), il était possible d'aller chercher des points d'appui à tout moment. Ceci est permis notamment lorsqu'on ne dispose pas d'autres moyens pour améliorer les données de base, et lorsqu'on suspecte que l'interpolation visuelle ou le calcul manuel donnera des résultats supérieurs à ceux obtenus par les algorithmes d'interpolation décrits plus haut (voir section 6.4). On doit être conscient que cette procédure ajoute de l'incertitude même si l'on gagne en précision. Dutton (1988) a discuté en détail tout ce qui concerne l'ajout de la connaissance d'expert dans les processus d'interpolation spatiale.

Lorsqu'il y a des données suffisantes et que leur distribution est adéquate par rapport au noeud à être interpolé, les trois algorithmes donnent des résultats semblables et permettent de reproduire fidèlement les structures décrites par les courbes de niveau (courbes de 840 et 845 mètres dans les figures 103, 105 et 106, et toutes dans la figure 108). On note, cependant des défauts qui sont éventuellement attribuables aux inconsistances des algorithmes.

Les lettres A (figure 108) signalent quelques déviations mineures entre l'interpolation faite par *Krigeage* (montrée ici en forme de courbes de niveau de couleur bleue), par rapport à la « réalité » de la carte topographique (croix rouges). Quoique très sophistiqué, le *Krigeage* est une technique d'interpolation basée sur le principe des *moyennes mobiles pondérées* et celles-ci rencontrent des difficultés pour s'adapter aux détails mineurs du terrain. En particulier, les

élongations des courbes de niveau le long des axes des vallées encaissées à fond plat sont très difficiles à reproduire (voir section 6.5 et figure 99). Cependant, la stratégie de calcul utilisée par le *Krigeage* minimise la variance de l'estimation, en tenant compte du modèle de variogramme adopté, ainsi que des positions des échantillons entre eux et par rapport au noeud visé (Englund, 1988). Ceci donne au *Krigeage* le pouvoir de créer ce que l'on a appelé « l'effet écran » (*screen effect*) consistant à minimiser les *poids relatifs* des échantillons qui se trouvent à derrière d'autres par rapport au noeud visé. Pour des raisons analogues, le *Krigeage* tient compte du degré de concentration des échantillons et assigne des poids moindres à tous ceux qui se regroupent dans un noyau ou « *cluster* ».

Les lettres **B** (figure 108) signalent quelques défauts connus des algorithmes basés dans les *B-splines* naturelles. Les oscillations étranges des courbes interpolées par *MinCurv* (lignes en couleur cyan) signalées dans B1 et B3 sont nécessaires pour assurer la continuité mathématique de la surface interpolée dans l'union des différentes pièces ou sections polynomiales (Smith et Wessel, 1990:294). Dans B2, on note que même dans des sinuosités mineures, l'algorithme de la *moindre courbure* (*MinCurv*) est incapable de reproduire la valeur des repères avec exactitude. Des améliorations pour éviter ces oscillations étranges des *B-splines* ont été proposées par Smith et Wessel (1990) ainsi que Mitsová et Mitás (1993), ce qui conduit au concept des *B-splines* en *tension* illustré dans la figure par la ligne magenta. Celle-ci montre la meilleure adaptation au type de terrain dans l'exemple.



De plus, si l'on compare les figures 103 et 106, en utilisant spécifiquement l'isoligne de 840 m (croix rouges), on remarque un comportement opposé entre le *Krigeage* et *MinCurv*. Le *Krigeage* atteint une exactitude supérieure et devient plus stable lorsqu'on s'approche de la ligne de données (*isohypse*), tandis que le *MinCurv* est très instable et inexact le long de cette

ligne devenant stable dans les secteurs intermédiaires entre les *isolignes* originales. Ce comportement de l'algorithme de la *moindre courbure* est explicable parce que les solutions varient en fonction de la situation du noeud par rapport aux points de repère (voir 6.4.2).

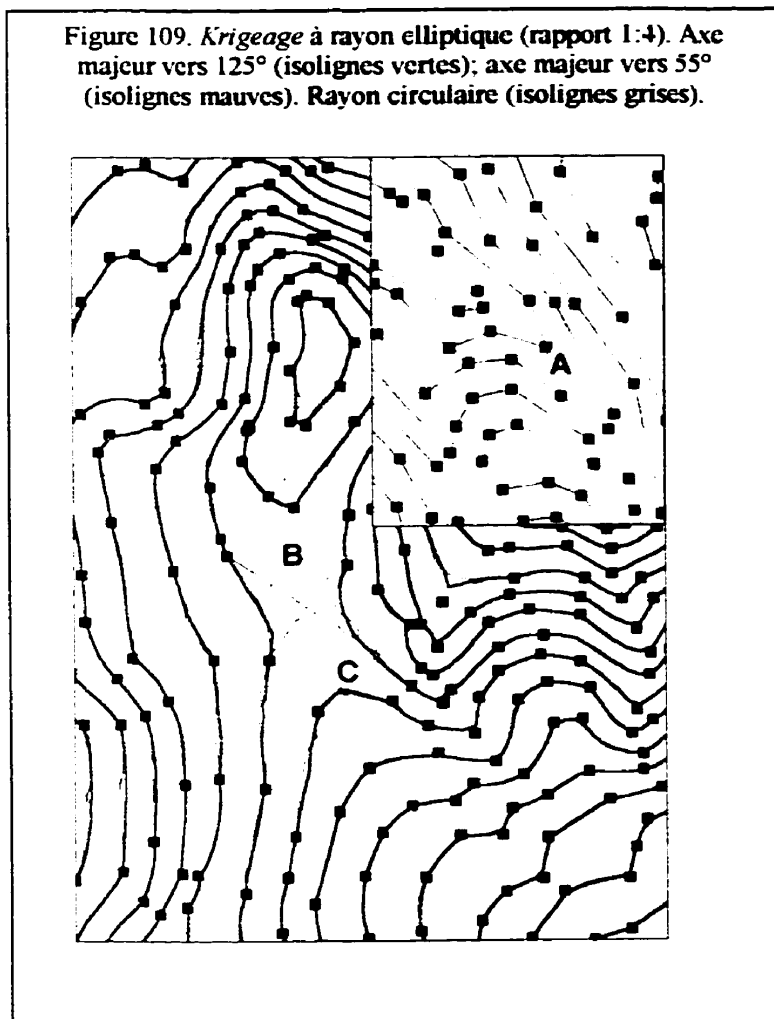
À noter que jusqu'ici nous avons basé nos comparaisons entre "vérité de terrain" et modèle interpolé utilisant l'approche *contour* versus *contour*. Or pour être rigoureux nous devons mentionner que la représentation du MNA en courbes de niveau est en soit le produit d'une interpolation pouvant introduire des distorsions additionnelles, notamment lorsque la matrice spatiale a une faible résolution. Ce n'est certainement pas le cas des matrices spatiales utilisées ici (figures 103 à 106) ayant une taille de 5x5 mètres par pixel. Signalons, en passant, que nos *contours* originaux ont été généralisés lors du processus de reproduction digitale par *scannage* puis *vectorisation* et plus tard par les traitements de sélection automatisée des points les plus significatifs. Tout ceci fait que notre évaluation de qualité n'est qu'une approximation grossière, même par rapport à la carte topographique.

Nous avons mentionné que les algorithmes d'interpolation offrent normalement plusieurs *paramètres* qu'on peut changer selon la variable considérée, la distribution et la densité des points de repère et, dans le cas du *Krigeage*, selon les propriétés géostatistiques de l'échantillon. Nous ne pouvons pas réaliser toutes les combinaisons mais nous illustrerons certains principes avec quelques exemples. Les résultats présentés seront retenus lors de l'interpolation définitive du MNA pour l'ensemble du bassin-versant Uruca.

Un premier ensemble de paramètres modifiables inclue la longueur et la symétrie de l'ellipse ainsi que les critères à utiliser lors de la sélection des points appartenant au voisinage d'un noeud particulier. Cette option est disponible dans le *Krigeage* et les *B-splines* mais pas pour la méthode *MinCurv*. Pour les petites distances, la longueur du rayon de recherche affecte l'exactitude de l'interpolation conditionnant la distribution des *poids* pour chacun des repères. Une fois qu'un grand nombre de points de repère ont été inclus dans l'ellipse de recherche, cet effet ne se produit plus parce que l'essentiel du *poids* collectif, près de 100%, a déjà été assigné aux points les plus proches du noeud. Si l'on définit une ellipse asymétrique (une anisotropie), l'assignation des *poids* suivra toujours une fonction de la distance, mais la

sélection des points d'échantillon pourra aller plus loin dans le sens défini par l'axe majeur de l'ellipse. Enfin, si les données ne sont pas distribuées isotropiquement, on obtient de meilleurs résultats en spécifiant des recherches par quadrant ou octant, ce qui introduit une condition pour tenir compte de l'orientation des points en même temps que de la distance lors de la sélection et de la pondération.

La figure 109 permet de comparer l'effet d'une ellipse (lignes mauves et vertes) plutôt qu'un



cercle de recherche (lignes grises).

On a utilisé l'algorithme du *Krigeage* avec les paramètres par défaut¹³ calculés par Surfer, sauf que pour les recherches orientées, on a limité le rayon de recherche à 200m x 50 m et azimuth de 125° (lignes vertes) et 200m x 50 m en azimuth 55° (lignes mauves). L'élongation de l'ellipse dans le sens des 125° (indiqué en lignes rouges) avait pour objectif de faire descendre le relief en suivant les fonds de vallées (point A dans le carton) où l'on voit que l'interpolation (lignes vertes) surestime les altitudes par rapport aux données issues de la carte topographique (lignes bleues). L'effet escompté ne s'est pas

produit et on a plutôt induit la sous-estimation, de l'altitude (point B) dans la ligne de crêtes

¹³ Surfer utilise par défaut un variogramme linéaire où l'échelle C est égale à la variance des données. le seuil d'autocorrelation A (*range*) est égal à la moitié de la distance séparant les deux points-données les plus éloignés et la variance spatialement non déterminée (l'effet pépite ou *nugget*) est zéro. La pente du variogramme est déterminée par le rapport C/A . La recherche est faite par *quadrant* et le rayon de recherche est égal à A .

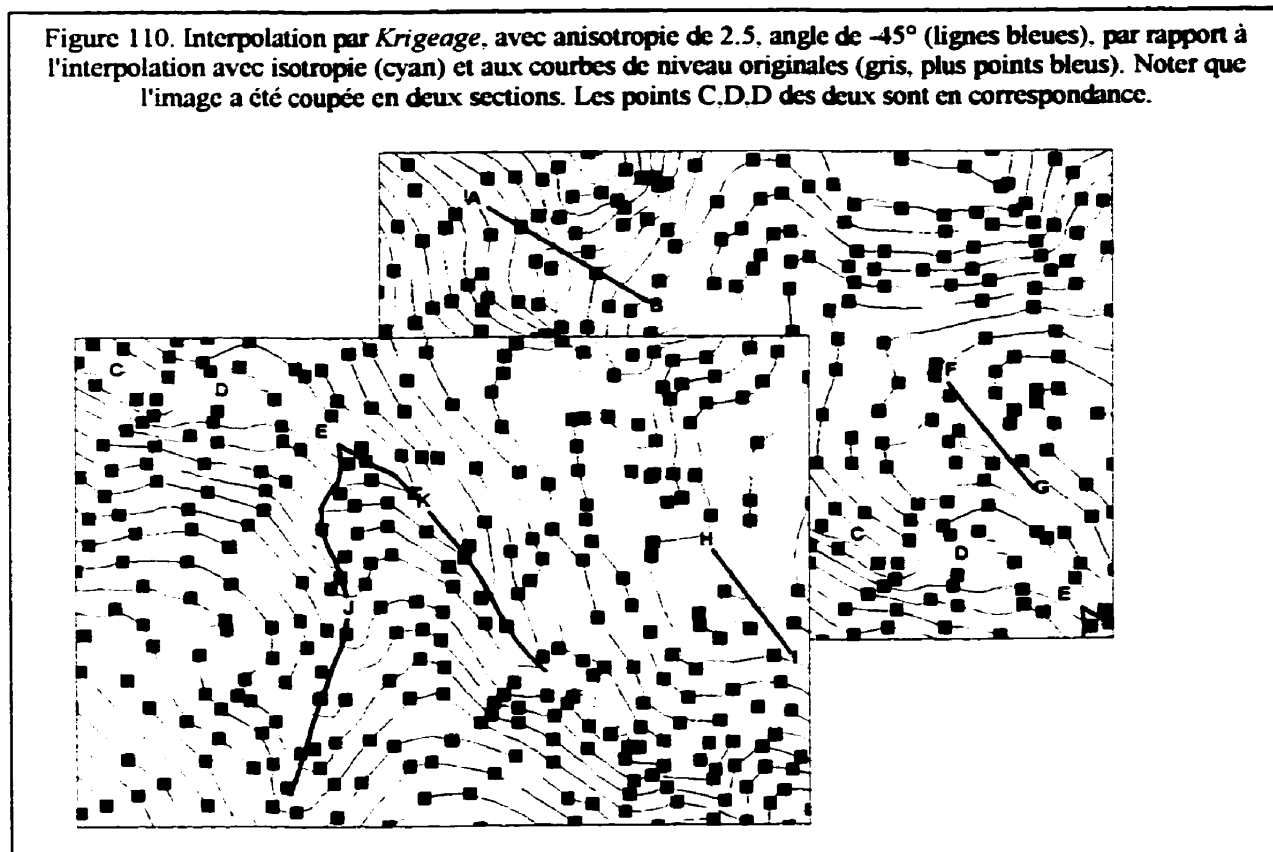
jusqu'au point de renverser l'interprétation du col. La sélection orientée a créé aussi une certaine instabilité dans l'interpolation (point C) dans les deux cas.

Un autre *paramètre* que l'on peut manipuler pour chercher à obtenir la meilleure interpolation est l'*anisotropie*. Celle-ci permet de spécifier des *poids* différentiels pour les points de repère selon leur orientation par rapport au noeud visé. Le *poids* relatif de chacun devient déterminé par le rapport d'anisotropie ainsi que par son angle (0-90°) en relation avec l'orientation privilégiée.

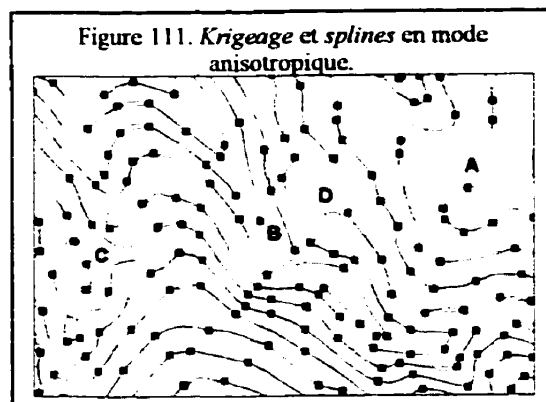
Étant donné que dans la zone d'essai *zexpcolo*, les structures physiographiques sont orientées approximativement dans l'axe NO-SE, et en tenant compte des effets déjà décrits (voir section 6.6, figure 99), il semble intéressant de donner un *poids* supérieur à cet axe, où l'on trouve les problèmes d'interpolation les plus marqués. En utilisant toujours le *Krigeage* avec les paramètres par défaut, sauf pour l'anisotropie (rapport de 2.5 et orientation -45°), on a créé l'interpolation montrée dans la figure 110. Le long du profil **K** nous voyons que l'interpolation avec anisotropie (bleue) a produit une approximation meilleure par rapport aux *contours* originaux (lignes grises et points bleus) que l'interpolation analogue faite avec isotropie (cyan). Ce résultat est conforme aux attentes et est souhaitable. Malheureusement, dans les vallées d'orientation opposée aux structures majeures (profil **J**), la situation est inversée et on s'aperçoit que les deux interpolations surestiment les données originales et que c'est plutôt l'interpolation isotropique qui reproduit le mieux la surface originale dans le fond des vallées. Un effet similaire est visible entre les points C, D, E pour un même fond de vallée, mais à cause d'un changement d'orientation de la structure. Enfin, signalons la strangulation des structures topographiques d'orientation normale à l'axe d'anisotropie (profils **AB**, **FG** et **HI**), conséquence d'une forte sous-estimation (**FG**, **HI**) ou surestimation (**AB**).

Enfin, nous avons comparé l'interpolation faite avec *Krigeage anisotropique* versus celle faite avec *splines* et le même degré d'anisotropie (2.5 et -45°). Dans la figure 111, on note que l'interpolation avec *splines* (lignes rouges) produit une sous-estimation majeure d'altitude par rapport au *Krigeage* (isolignes vertes) dans les crêtes d'orientation opposée à l'axe majeur d'anisotropie (**A**), mais à l'inverse elle fait une surestimation mineure dans les fonds de

vallées (**B**), reproduisant mieux les données de repère (ligne grises et points bleus). En plus, on constate la formation de quelques dépressions (**C**) et sommets artificiels (**D**).



En conclusion, nous pouvons remarquer qu'une surface comme *Zexprepe*, avec une quantité et une distribution de points de repères semblable à celle utilisée ne peut pas reproduire le relief correctement, quel que soit l'algorithme utilisé ou les paramètres de sélection et de pondération retenus. Au contraire, la structure générale de *Zexpcolo* est facilement reproductible en utilisant les algorithmes de base du *Krigeage* et de fonctions *splines*. Ajuster *Zexpcolo* dans les détails est cependant une tâche très lourde où le choix des paramètres appropriés est difficile. Dans le cas de *Zexprepe* aucune amélioration significative ne pourrait résulter du simple fait de changer

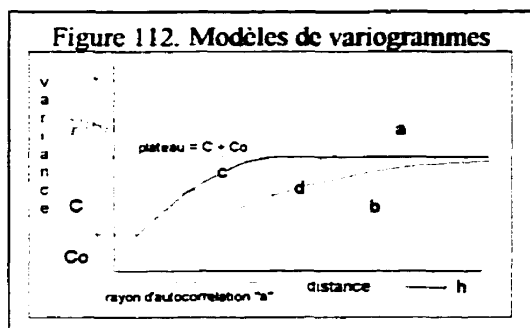


ces paramètres; on doit donc penser à une saisie des points de contrôle plus soignée et surtout, respectueuse des unités morphologiques.

Notons, en passant, que si on n'a pas l'opportunité de corriger d'une façon adéquate une sélection des données déjà faite, ce qui pourrait être notre cas, une procédure alternative serait de découper le territoire en unités bien adaptées aux algorithmes disponibles, puis, de recomposer le tout. Néanmoins, ceci est très laborieux, crée des problèmes de continuité le long des contacts, et n'améliore guère le cadre conceptuel de réalisation du MNA.

6.7.5.2 Analyse géostatistique

Le *Krigeage* offre des options d'interpolation plus avancées qui utilisent les paramètres géostatistiques de l'échantillon. Ceux-ci sont déterminés à l'aide du *variogramme*



expérimental: un modèle mathématique décrivant le rapport *variance/distance* de la variable régionalisée.

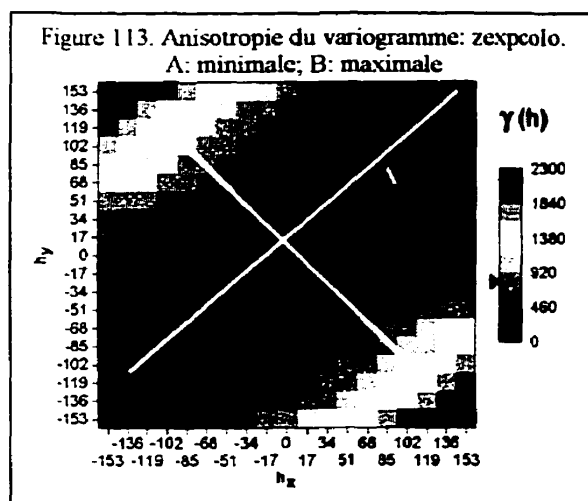
Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour synthétiser la structure de ce rapport : linéaire (a), gaussien (b), sphérique (c), exponentiel (d), et autres (figure 112) (Golden Software, 1995; Pannatier, 1996; Englund, 1988; Burrough, 1986).

On distingue deux types de modèles: transitionnels et non transitionnels. Dans les premiers la variance du processus atteint une limite (asymptotique ou fixe) appelée son plateau (*sill*) dont la projection sur l'axe horizontal définit le rayon d'autocorrélation spatiale (*range*) (cas b, c, et d dans la figure 112). Dans le deuxième cas, la variance croît sans limites dans la zone échantillonnée (par exemple dans le modèle linéaire). Il s'agit probablement d'un phénomène ayant une tendance globale ou, tout simplement, d'un cas transitionnel mais décrit dans un contexte spatial trop restreint pour saisir toute sa variance.

Puisqu'il y a souvent des milliers de paires de points dans un échantillon de taille moyenne (par exemple, 1000 données), on doit les arranger en classes de distance ou décalages (*lags*);

on calcule alors la variation moyenne de l'attribut mesuré à l'intérieur de chaque classe de distance. Ce sont les *décalages*, plus que les distances absolues, qui apparaissent dans le variogramme. Encore là, le variogramme empirique est souvent assez dispersé et l'ajustement d'un modèle mathématique de variogramme aux données est faite, le plus souvent, par un processus itératif assisté par ordinateur. Une fois que le modèle de variogramme le mieux adapté aux données réelles est déterminé, on s'en sert pour répartir les *poils* particuliers de chaque point de d'échantillon autour du noeud à interpoler (voir exemple de calcul dans la section 6.4.4).

En se servant du logiciel *VarioWin*, nous avons réalisé une étude exploratoire de *variographie*



pour l'altitude dans les deux zones d'essai : *zexpcolo* et *zexprepe*. Un bref aperçu du processus et des résultats est présenté dans les pages suivantes.

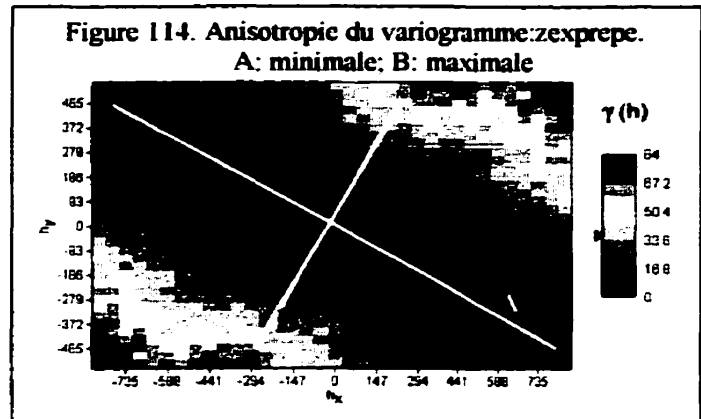
La première étape du processus consiste à préparer les données de façon à pouvoir faire les analyses statistiques. Pour l'essentiel, il s'agit de transformer le fichier dans le format requis par le logiciel et de faire le calcul des *distances*

euclidiennes et des *différences* (Z) pour chaque paire de points à l'intérieur de la zone de recherche. (Voir 6.4.4).

Dans la deuxième étape, on effectue une analyse exploratoire pour déterminer quelle est la structure générale du variogramme (Pannatier, 1996, figure 4.1 montre et discute différentes vues permettant d'interpréter la continuité spatiale des données). Dans notre cas, nous remarquons (figures 113 et 114) que la variance $\gamma(h)$ augmente lorsque le décalage h_x et h_y croît (c'est l'expression du principe d'autocorrélation), mais le gradient de ce changement n'est pas uniforme le long des axes cartésiens (x,y), indiquant l'anisotropie du processus. La figure 113 montre que dans la zone expérimentale Colon, les structures du relief sont alignées selon l'axe sud-ouest / nord-est et que l'autocorrélation des cotes d'altitude est minimale dans

l'axe nord-ouest / sud-est. Il s'agit d'une structure nettement anisotrope qui doit être modélisée en utilisant au moins deux semi-variogrammes orientés afin de bien décrire les structures morphologiques concernées. La figure 114 possède aussi deux axes d'autocorrelation spatiale fortement opposés, mais la variation du phénomène est plus grande.

Après quelques essais faisant varier le nombre et l'amplitude des *classes*¹⁴ ou catégories de décalage, on arrive à construire un graphique où la distribution des rapports « variance/distance » suit approximativement une courbe modélisable avec les modèles mathématiques mentionnées. Les figures 115 et 116 montrent la distribution empirique des rapports variance/décalage pour *zexpcolo* et *zexprepe* respectivement.



Étant donné l'anisotropie du processus (figures 113 et 114), il est conseillé de créer des variogrammes emboîtés (« *nested variograms* ») pour reproduire le comportement spécifique dans les orientations principales. Pour chacun des axes considérés, on peut utiliser différents modèles de variogramme, ainsi que des limites de variance (*sills*) et de seuils d'autocorrélation (*ranges*) particuliers. Par contre, l'effet de pépité (C_0 dans la figure 112) est indépendant de la position des points d'échantillon dans l'espace et constitue une propriété globale de l'échantillon.

Dans *zexpcolo* (figure 115), nous avons construit des semi-variogrammes selon les deux axes principaux d'anisotropie (135° la maximale et 45° la minimale), ainsi que l'axe intermédiaire des 90° (angles mesurés à partir du nord, vers l'est). La partie de la variance correspondant à l'effet de pépité fut fixée à 6 mètres et les trois variogrammes ont été modélisés avec la fonction *gaussienne*. Pour l'axe des 135° (NO-SE), on a estimé une limite d'autocorrélation spatiale (*range*) à 525 m (paramètre "a" dans la fonction du variogramme), ainsi qu'une variance maximale (non atteinte) de 5500 m (paramètre "c"), et une anisotropie égale à 5.0. Pour l'axe des 45° (NE-SO), la limite d'autocorrélation spatiale fut de 124.2 m, avec *plateau*

(non atteint) de 16 m et anisotropie égale à 0.0 m. Enfin, dans l'azimut des 90° (est-ouest) le domaine d'autocorrélation spatiale est allé à 20300 m, tandis que le *plateau* fut estimé à 1,000,000 m et l'anisotropie a atteint 100 m. Ce dernier semi-variogramme semble trop fictif et son utilisation est risquée.

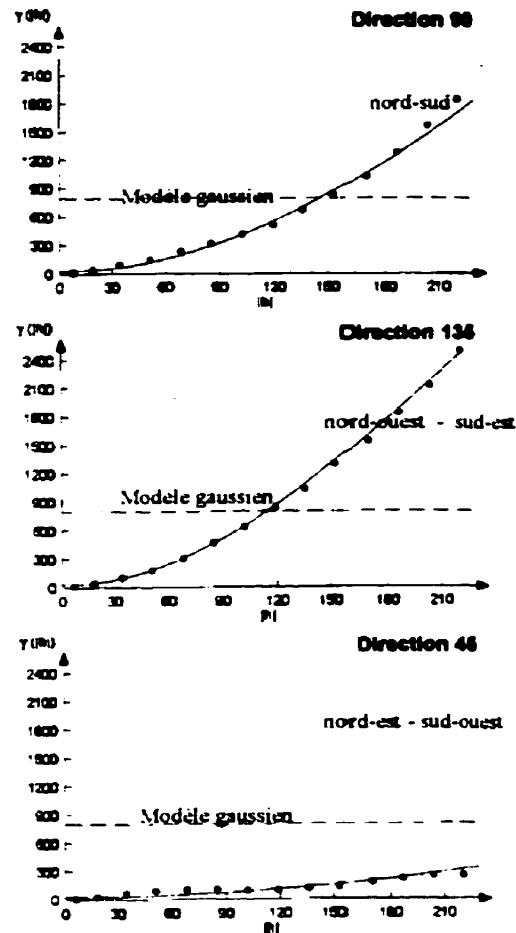
Pannatier (1996:50) mentionne que la fonction *gaussienne* est un modèle transitionnel utilisé pour décrire des phénomènes extrêmement continus¹⁵.

Mathématiquement¹⁶:

$$\gamma(h) = c (1 - e^{-3h^2 / a^2})$$

Figure 115. Semi-variogramme pour les différences d'altitude dans la zone expérimentale Colón. Modèle gaussien. directions de 90° (est-ouest), 135° (nord-ouest à sud-est), et 45° (nord-est à sud-ouest).

Variable: Altitude m | IGF: 4.6004e-03 (paspele)
 Gamme(h): 6 + 5600 Gauss.526 (h) + 1000000 Gauss.20300 (h) + 16 Gauss.124.2 (h)
 Dir.(1): 135 | anis.(1): 6 | Dir.(2): 90 | anis.(2): 100 | Dir.(3): 45 | anis.(3): 0

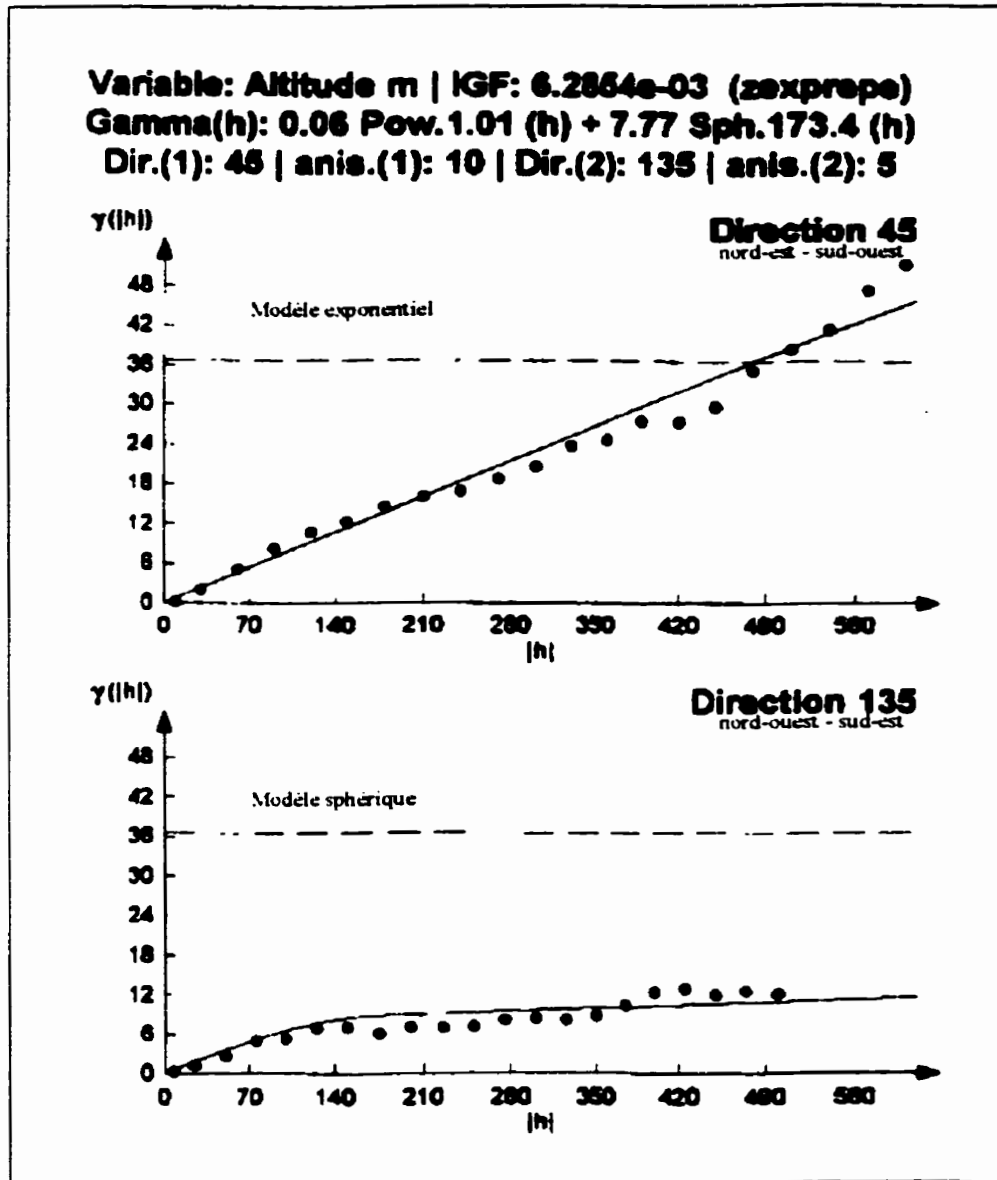


¹⁴ Les données sont divisées en classes pour obtenir des valeurs stables du rapport de variance versus la distance. Autrement, le graphique serait trop complexe et surchargé.

¹⁵ La surface topographique étant un bon exemple de ce type de phénomène, on constate un excellent ajustement du modèle.

¹⁶ Pannatier (1996:51) fait remarquer que l'utilisation du modèle gaussien lors du *Krigeage* produit certains problèmes d'instabilité si l'on utilise une valeur de variance *de pépite* égale à zéro et suggère d'utiliser une valeur infime lorsqu'elle semble être nulle. C'est ce que nous avons fait en retenant 6 mètres

Figure 116. Semi-variogramme pour les différences d'altitude dans la zone expérimentale *Real de Pereira*.
 Modèle exponentiel pour l'azimut 45° (NE-SO), et modèle sphérique pour l'axe des 135° (NO-SE).



- où : c représente le plateau de la semi-variance
 a est un *seuil* défini de façon pratique comme la distance pour laquelle la variance atteint 95% de la valeur au plateau
 h est la distance particulière entre deux points de l'échantillon ou entre un point de l'échantillon et le noeud à interpoler.

En ce qui concerne *zexprepe*, nous avons construit un variogramme emboîté ne retenant que les deux orientations anisotropiques dominantes: les azimuts 45° (NE-SO) et 135° (NO-SE). Rappelons que dans cette zone, il y a plus de dispersion dans le rapport variance/distance; mais encore là, on peut ajuster un modèle mathématique aux données. Pour l'orientation de 45°, le taux de variation est beaucoup plus fort et le modèle le mieux adapté est celui de la *fonction exponentielle*. Les autres paramètres sont: *puissance* = 1.01, et c = indéfini. L'azimut 135° de son côté montre moins de variations pouvant être modélisées avec une fonction *sphérique* avec $c = 7.77$ m et *rayon d'autocorrélation* = 173.4 m. L'anisotropie est égale à 5.0 m.

Pannatier (1996:51) remarque que le modèle *exponentiel* n'est pas du type transitionnel puisqu'il n'a pas de *plateau* et la variance augmente de pair avec l'éloignement entre les points échantillonnés. Mathématiquement :

$$\gamma(h) = c h^a$$

- où c représente le plateau de la semi-variance
 a est une puissance comprise entre 0 et 2 ($0 < a < 2$)

D'après Pannatier, ce modèle a un intérêt particulier puisqu'il montre différents comportements près de l'origine suivant la valeur de a . Il est évident que, lorsque a est égal à 1, le modèle devient *linéaire*. Dans *zexprepe*, nous avons obtenu $a = 1.01$ sur l'orientation nord-est où l'autocorrélation est minimale (figure 116).

Lorsque nous avons utilisé les modèles de variogramme issus des données expérimentales de *zexprepe* et *zexpcolo*, les résultats de l'interpolation (figures 117 et 118) n'ont pas atteint la qualité des modèles interpolés avec les paramètres par *défaut* du logiciel *Surfer* (soit, un variogramme linéaire, tel qu'expliqué à la page 318). En particulier, on note beaucoup plus d'instabilité dans le tracé des *isolignes*; il y a donc une perte de continuité qui serait expliquée par la diminution du *poids* des données dans la direction de la plus grande continuité, en faveur des données orientées sur l'axe de variance maximale. On note aussi un lissage global des *isohypses* qui est expliqué par l'utilisation d'une composante d'incertitude ou effet de pépite¹⁷ (*nugget effect*).

Ces résultats sont en contradiction avec la théorie géostatistique et obligent à chercher des explications en analysant les conditions particulières de notre application empirique.

Figure 117. Résultats du *Krigeage* dans *zexprepe*: bleu (avec les paramètres issus des semi-variogrammes adaptés avec *VarioWin*): cyan (avec les paramètres définis par défaut dans le logiciel *Surfer*).

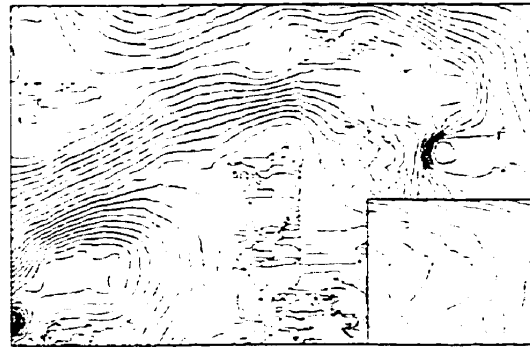
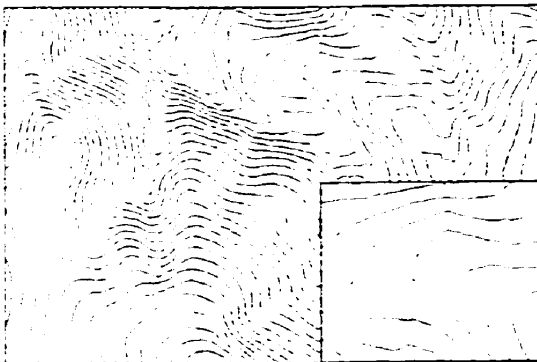


Figure 118. Résultats du *Krigeage* dans *zexpcolo*: bleu (avec les paramètres issus des semi-variogrammes adaptés avec *VarioWin*): cyan (avec les paramètres définis par défaut dans le logiciel *Surfer*).



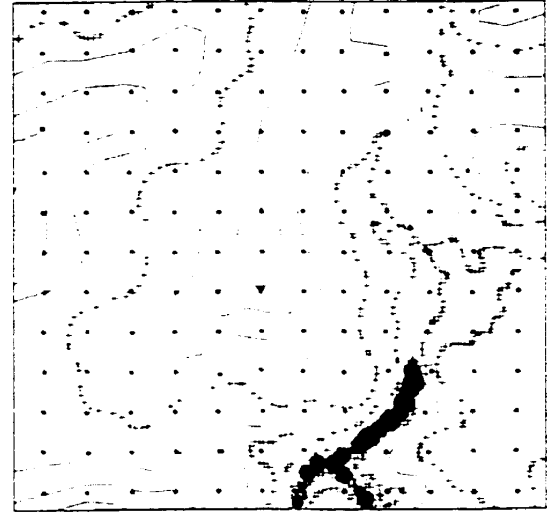
En premier lieu, le logiciel *Surfer* n'accepte pas de calculer la matrice spatiale utilisant la fonction gaussienne, à moins qu'on utilise un certain paramètre d'incertitude (variance de pépite). Ceci suffit à expliquer l'effet de lissage observé dans les isolignes en couleur cyan des figures 117 et 118.

Deuxièmement, les données topographiques sont fortement autocorrélées dans toutes les directions et montrent des tendances globales sur des territoires beaucoup plus grands que les zones d'essai. Il aurait

donc fallu éliminer ces tendances (*trends* ou *drifts*) avant de réaliser l'analyse géostatistique (Burrough, 1986:160).

Troisièmement, pour un même variogramme, il y a toute une famille de fonctions et non pas une seule, qui peuvent être adaptées aux données expérimentales. C'est pourquoi les fonctions des variogrammes exponentiels, sphériques et gaussiens ont été programmées de façon différente dans les logiciels *VarioWin* et *Surfer*. Ce constat, comme le logiciel *VarioWin* lui-même, sont arrivés un peu tard dans le processus de la présente recherche, ce qui explique en partie nos résultats peu consistants.

Figure 120. Addition des données issues des échantillonnages photogrammétriques (points disposés en maillage régulier) et isohypses interpolées à la main (en café).



Enfin, remarquons que même sans les raisons exposées plus haut, nous n'attendions pas de

Figure 121. Extrait du fichier de données photogrammétriques. Le point en couleur cyan est aussi montré dans la figure 120 comme référence spatiale.

3.753	· 841.711	· 841.669	· 839.471	· 842.702
3.368	· 843.403	· 843.028	· 839.312	· 844.475
39.32	· 842.848	· 842.642	· 843.007	· 840.655
0.643	· 840.755	· 842.241	· 841.045	· 840.813
2.648	· 840.421	· 841.855	· 840.864	· 840.706
2.317	· 841.785	· 841.469	· 840.849	· 844.249
10.23	· 843.381	· 843.013	· 842.662	· 840.654
9.786	· 841.312	· 844.493	· 844.366	· 835.089
39.73	· 840.831	· 846.034	· 846.439	· 834.843

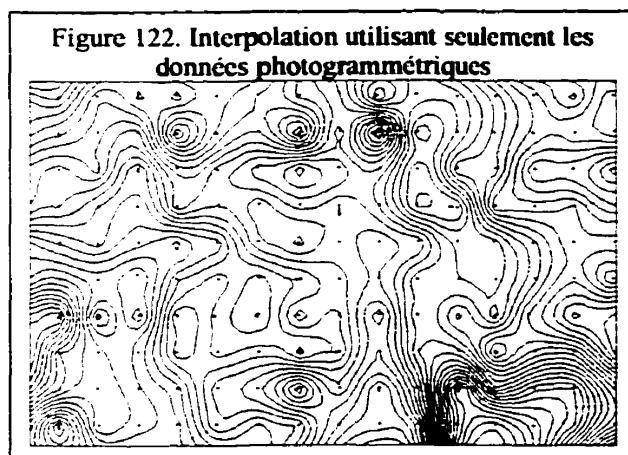
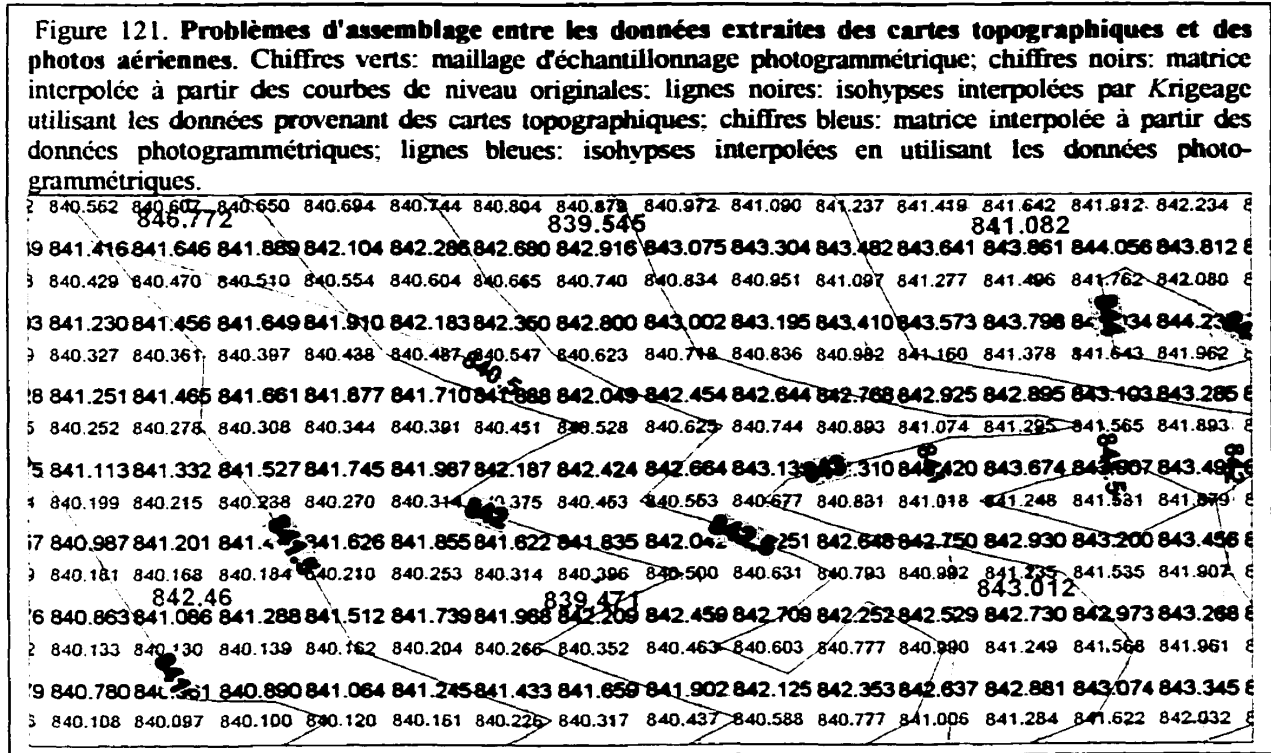
grandes améliorations des résultats pour *zexpree* en raison de la mauvaise distribution des points d'échantillon; c'est donc dans cette direction que nous avons continué notre recherche¹⁸.

Tous ces efforts pour améliorer la qualité du MNA n'ayant donné les résultats attendus, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il fallait plutôt reprendre la saisie des données (voir discussion dans 6.6.2). Cette approche constitue, bien sûr, un départ méthodologique du traitement précédent et vise

¹⁷ Mot issu du génie minier où le *Krigeage* a été développé. Il exprime une sorte de variation locale tout à fait fortuite.

¹⁸ Les limitations techniques liées à la modélisation des variogrammes et interpolation spatiale sont maintenant surmontées par certains logiciels, comme *Gridstat* (mailto:gridstat@netcom.com) ou *S+ Spatial Stats* (<http://www.mathsoft.com/splus/>). Le logiciel *Idrisi32* annoncé pour l'été 1999, inclura aussi des options de modélisation de variogrammes et interpolation par *Krigeage*.

spécifiquement l'acquisition d'un MNA de qualité acceptable. En l'acceptant, nous avons initié une phase d'édition intense cherchant à obtenir un fichier de données topographiques à distribution bien plus homogène. On a même interpolé des *isohypses* supplémentaires à l'oeil et avec l'aide du fichier extrait par photogrammétrie (figures 119 et 120). Ceci a été particulièrement difficile parce que les deux sources (carte et photos) ont révélé une structure spatiale assez différente (figures 121 et 122).



Après ce travail d'édition, nous avons recalculé les MNA des zones d'essai *zexppe* et *zexpcolo* avec *Krigeage* et fonctions *splines*. Nous présentons les résultats pour *zexppe*, zone qui a nécessité des ajustements majeurs (figure 123).

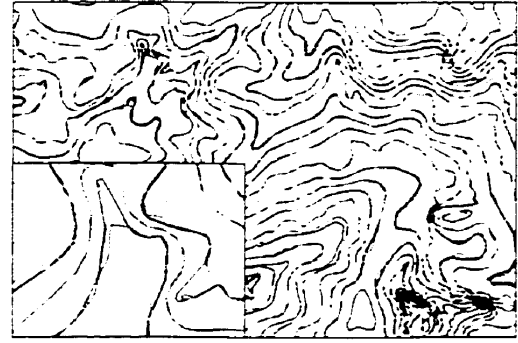
Dans la figure (123) les courbes de niveau originales apparaissent en noir, celles interpolées par *Krigeage* sont en mauve et en vert celles interpolées avec *splines*. On constate

un résultat nettement supérieur à tout ce que nous avons obtenu auparavant et une confirmation empirique que la distribution des données influence la qualité du MNA plus que l'algorithme d'interpolation utilisé. Plusieurs défauts d'interpolation subsistent dans les fonds de vallée, mais ils sont dans l'ordre de précision des données de départ; il nous est impossible de les corriger sans l'utilisation d'une source de données plus fiable. Suite à ce résultat, et après avoir densifié nos données partout dans la carte de base (figures 100 à 102), nous avons interpolé le MNA pour le bassin-versant Uruca au complet.

6.7.5.3 Discussion des résultats

Les figures 124 et 125 illustrent les principaux résultats obtenus lors de l'interpolation avec le *Krigeage* et les fonctions *splines*. La figure 124 montre un modèle d'estompage dérivé du

Figure 123. Nouvelle interpolation dans *zexprepe*, après densification des données.



MNA interpolé avec le *Krigeage*, ainsi que les deux zones d'essai : *zexprepe* et *zexpcolo*. Pour la première, nous avons superposé la carte des courbes de niveau équidistantes de 1 m., tandis que pour la deuxième les *isohypses* sont équidistantes de 5 m. Les résultats sont acceptables dans les deux cas. Pour l'ensemble du modèle, on note des artifices bizarres surtout au nord-ouest, autour du canyon Virilla. Cependant, tous ces artifices sont en dehors du bassin-versant Uruca et même en dehors d'une zone tampon de 500 m pour laquelle nos données ont été corrigées.

Dans les deux modèles, il subsiste encore quelques dépressions artificielles (plus dans le modèle interpolé avec fonctions *splines*), conséquence du manque de continuité des données le long des couloirs étroits dans les fonds de vallées. Celles-ci sont impossibles à éviter en utilisant l'approche *matricielle* que nous avons retenue. C'est pourquoi des algorithmes de remplissage des fausses dépressions ont été ajoutés dans les versions plus à jour des logiciels de SIG. Pour les besoins de notre recherche, cependant, nous avons considéré que les résultats atteints donnaient une précision suffisante. Cependant, lorsqu'on travaille dans la modélisation hydrologique, on est obligé de corriger ces petits défauts résiduels.

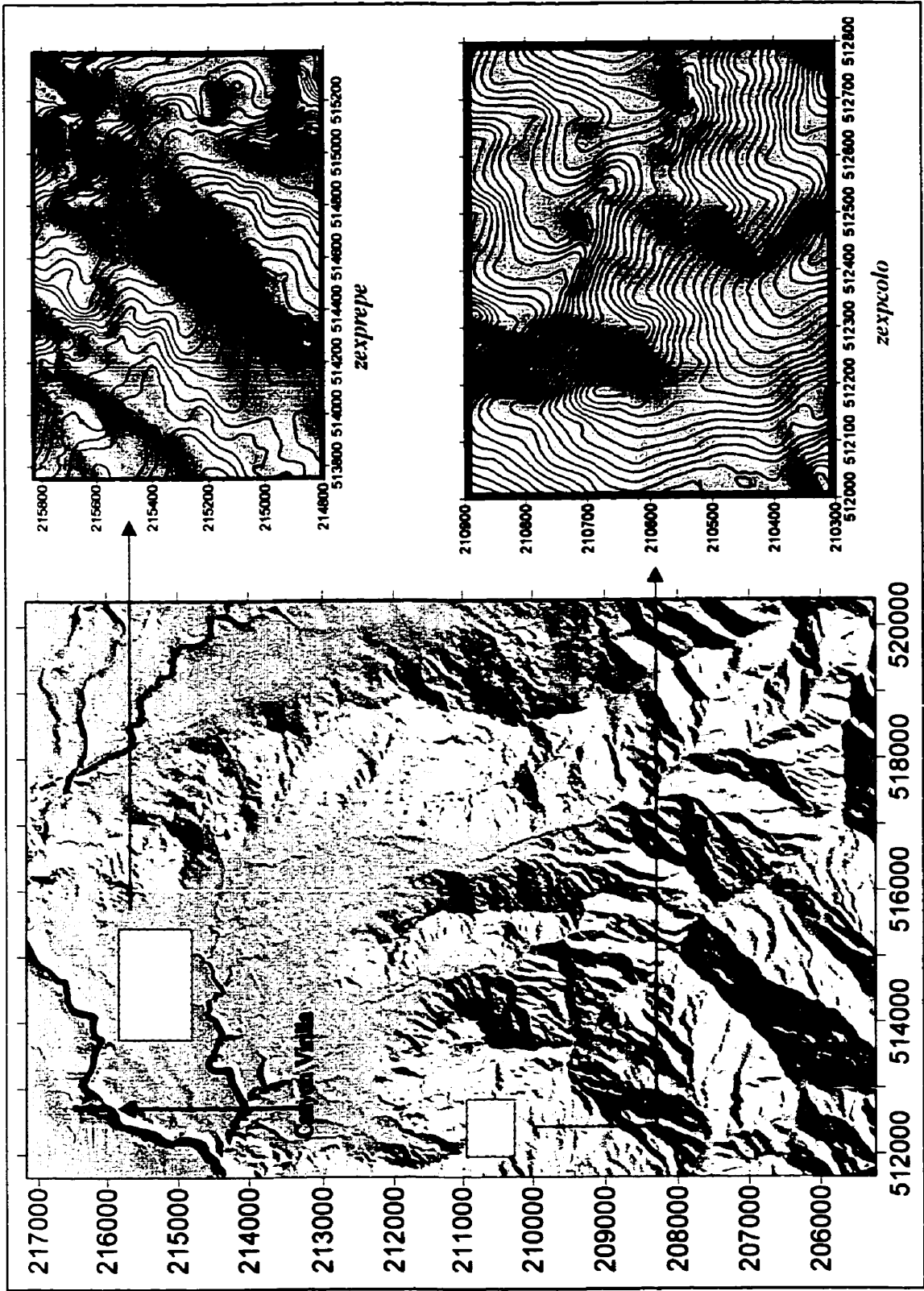


Figure 12 . Résultats de l'interpolation avec Krigage.

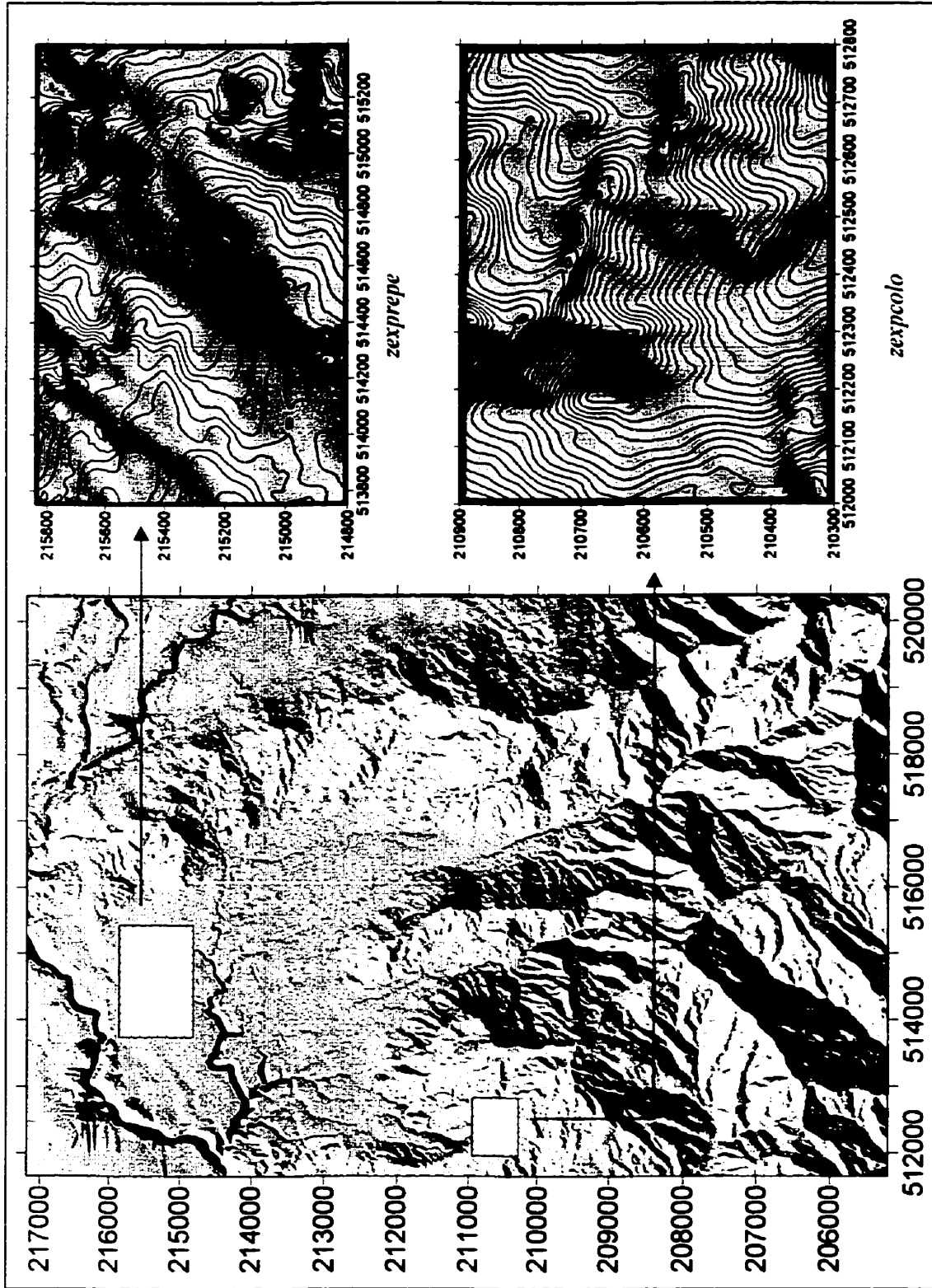


Figure 125. Résultats de l'interpolation avec les fonctions *Splines*.

6.8 Les documents dérivés du MNA

Seulement trois produits ont été dérivés du MNA mais plusieurs autres pourraient être obtenus en utilisant des algorithmes présents dans *Surfer* et autres logiciels. Nous les discutons brièvement et présentons les cartes déjà traduites en mode vectoriel.

6.8.1 La carte des pentes

Cette carte a été produite en utilisant l'algorithme de calcul utilisé par le logiciel *Idrisi*. Il s'agit de l'algorithme connu comme "rock's case" (Eastman, 1992:169), lequel tient compte seulement des 4 pixels voisins dans les directions principales (nord, sud, est et ouest). La taille du pixel est, comme dans le MNA, de 10 x 10 mètres. La pente est déterminée alors comme:

$$\text{Pente} = \sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}$$

Au préalable, nous avons vérifié par comparaison des cartes résultantes que celui-là donnait des résultats équivalents à ceux de *Surfer*¹⁹. Ceci fait, nous l'avons re-classifiée dans les cinq classes de pente, en considérant l'histogramme de distribution des valeurs. Le produit obtenu étant suffisamment clair (figure 27), aucun algorithme de filtrage²⁰ ne fut utilisé pour traiter cette carte.

6.8.2 La carte d'exposition du relief

Elle aussi a été produite dans *Idrisi*. Un effort a été fait pour choisir les couleurs de manière à recréer l'effet d'estompagement en supposant le soleil placé au nord-ouest (Moellering et Kimerling, 1990). Aucun filtrage ne fut utilisé pour obtenir ce document. La qualité générale de la carte a été vérifiée en lui superposant les courbes de niveau (figure 127).

¹⁹ En degrés, la pente maximale calculée par *Surfer* fut de 74.47, tandis que *Idrisi*, estimait 360 %. Le minimum fut zéro dans les deux cas. Nous avons calculé les différences entre l'une de l'autre ayant des résidus moindres.

²⁰ En général, pour les cartes dérivées et classifiées numériquement, on utilise des algorithmes de filtrage, tels que la médiane ou le mode, ce qui permet d'éliminer le bruit et de définir des zones plus homogènes. Il s'agit d'une procédure visant l'obtention d'un produit d'apparence plus proche de la carte traditionnelle, plus lisible, mais avec une perte d'exactitude dans chaque traitement de lissage ou généralisation.

6.8.3 La carte de la courbure du relief

Pour la produire, nous avons utilisé le module d'analyse de terrain du logiciel *Surfer*, en choisissant l'option *courbure tangentielle*. Celle-ci est définie comme le taux de changement de l'angle d'orientation du terrain par rapport au plan vertical (Golden software, 1995:5.61). Elle est donc une mesure de degré de convergence ou divergence sur un plan vertical tangentiel à l'isohypse locale. Plus les isohypses sont courbées, plus la courbure tangentielle augmente en magnitude. Les valeurs positives indiquent des terrains concaves et convergents, tandis que les valeurs négatives sont reliées aux lignes de crête et des conditions divergentes. Les valeurs se rapprochant de zéro dénotent des terrains localement plats.

Surfer permet aussi de calculer la courbure en profil. Celle-ci se rapporte à la convergence ou à la divergence le long de l'axe de pente maximale pour tout point du terrain. Les changements de vitesse dans l'écoulement de l'eau et des sédiments sur les versants, donc le taux d'érosion, sont en relation avec cette mesure de la courbure topographique.

L'implantation des algorithmes pour le calcul de la courbure dans *Surfer* a été faite suivant les travaux de Mitasová et Mitas (1993). Ces auteurs ont développé de nouvelles fonctions d'interpolation appelées des *fonctions splines complètement régularisées* (op.cit., p.644), lesquelles permettent d'obtenir des dérivées spatiales de tout ordre. Pour la courbure en profil, l'équation proposée par ces auteurs est:

$$C_{\text{profil}} = \frac{((\partial^2 z / \partial x^2) (\partial z / \partial x)^2 + 2(\partial^2 z / \partial x \partial y) (\partial z / \partial x) (\partial z / \partial y) + (\partial^2 z / \partial y^2) (\partial z / \partial y)^2)}{((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2) * \sqrt{(((\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2) + 1)^3}}$$

L'image produite a alors été traduite en format *d'Idrisi* où nous l'avons re-classifiée suivant son histogramme et puis, nous l'avons traité avec le filtre de la médiane sur un opérateur local de 3x3 pixels (soit 30 x 30 mètres). Nous remarquons que ce document (figure 128) montre une division moins nette à la jonction entre feuillets topographiques au 50 000 ième et au 10 000 ième que celle que nous avons montré dans le chapitre quatre (figure 37).

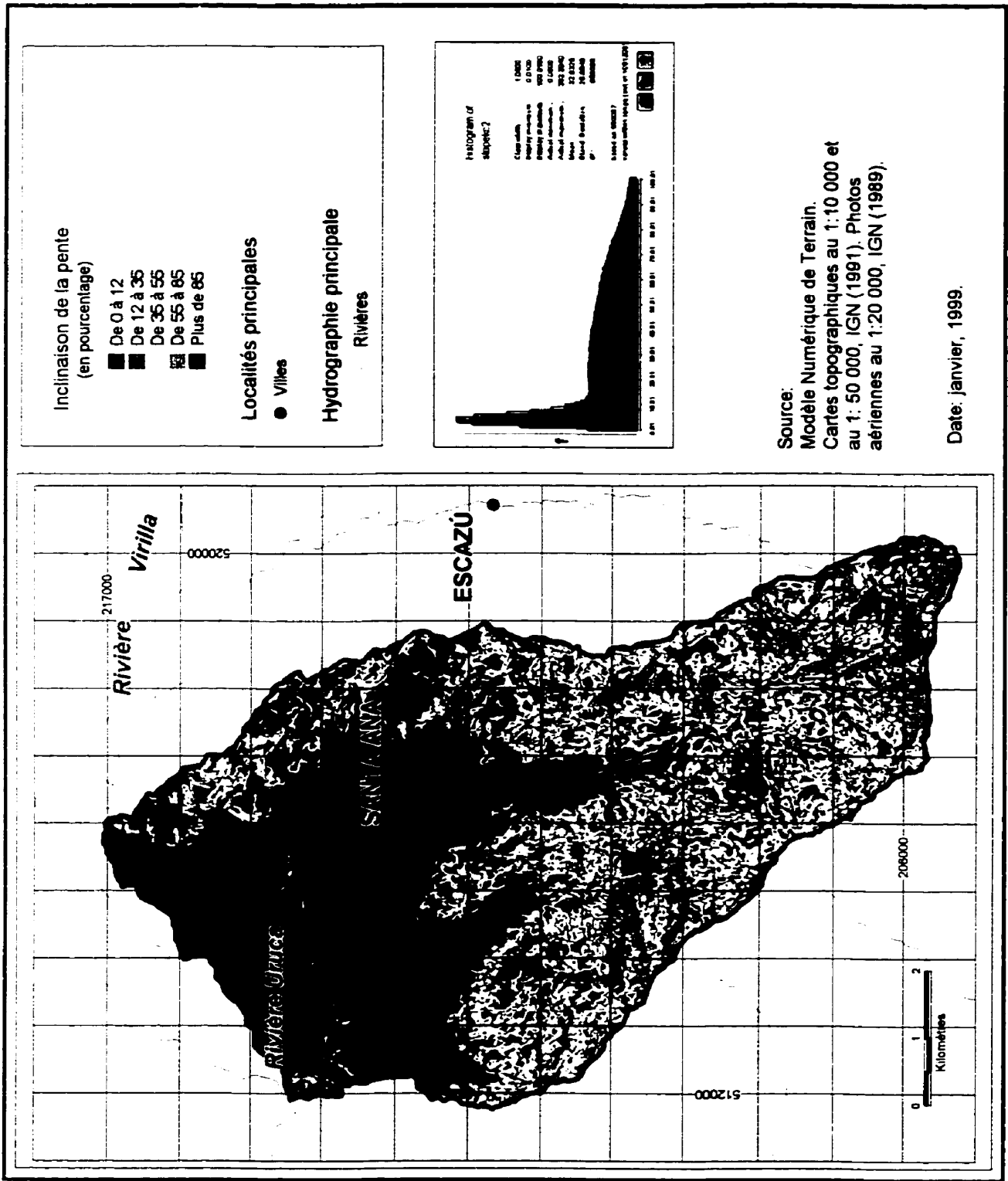


Fig. 126 Carte d'inclinaison de la pente (mode vectoriel) dans le bassin-versant Uruca

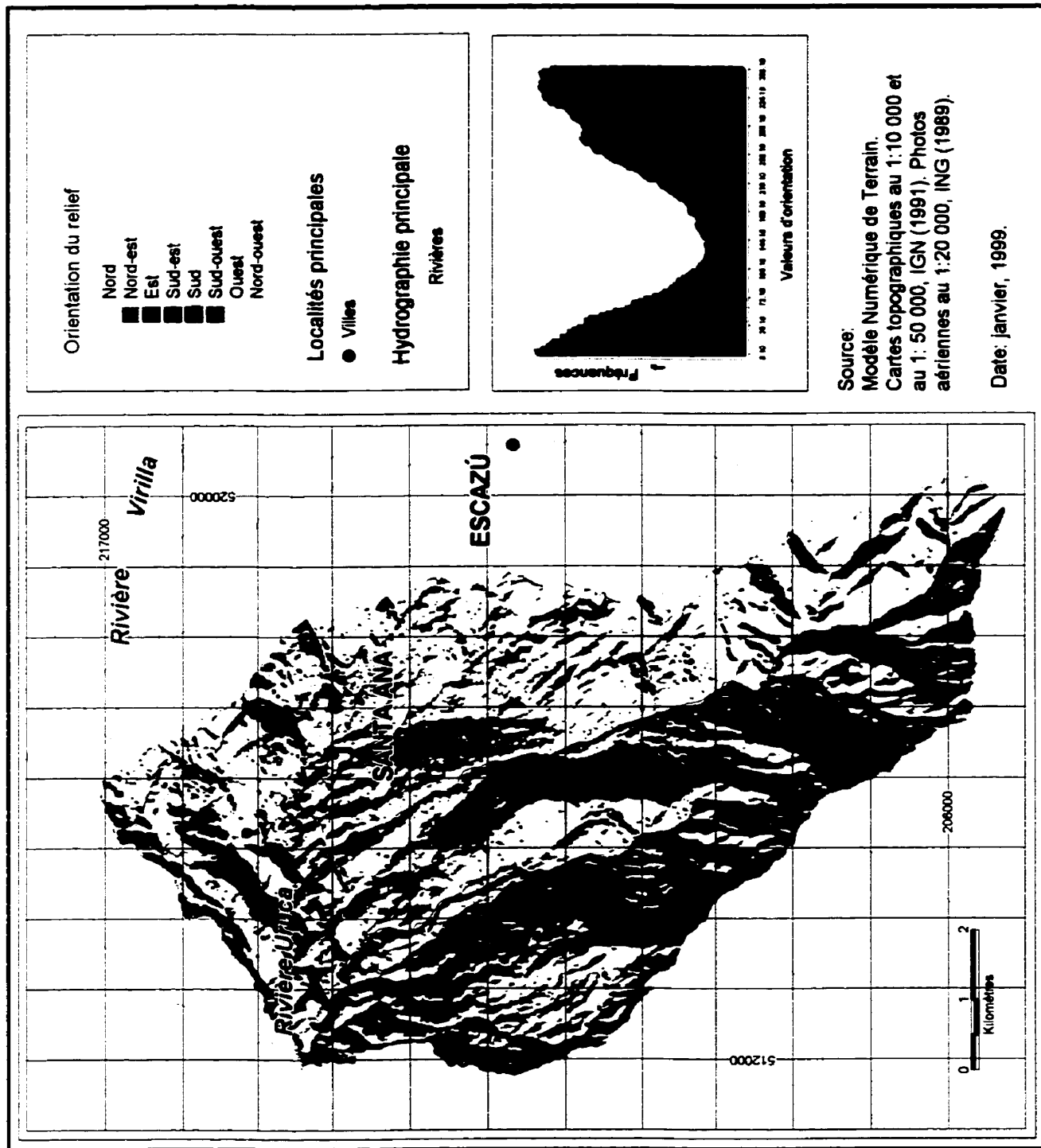


Fig. 127 Exposition du relief dans le bassin-versant Uruca

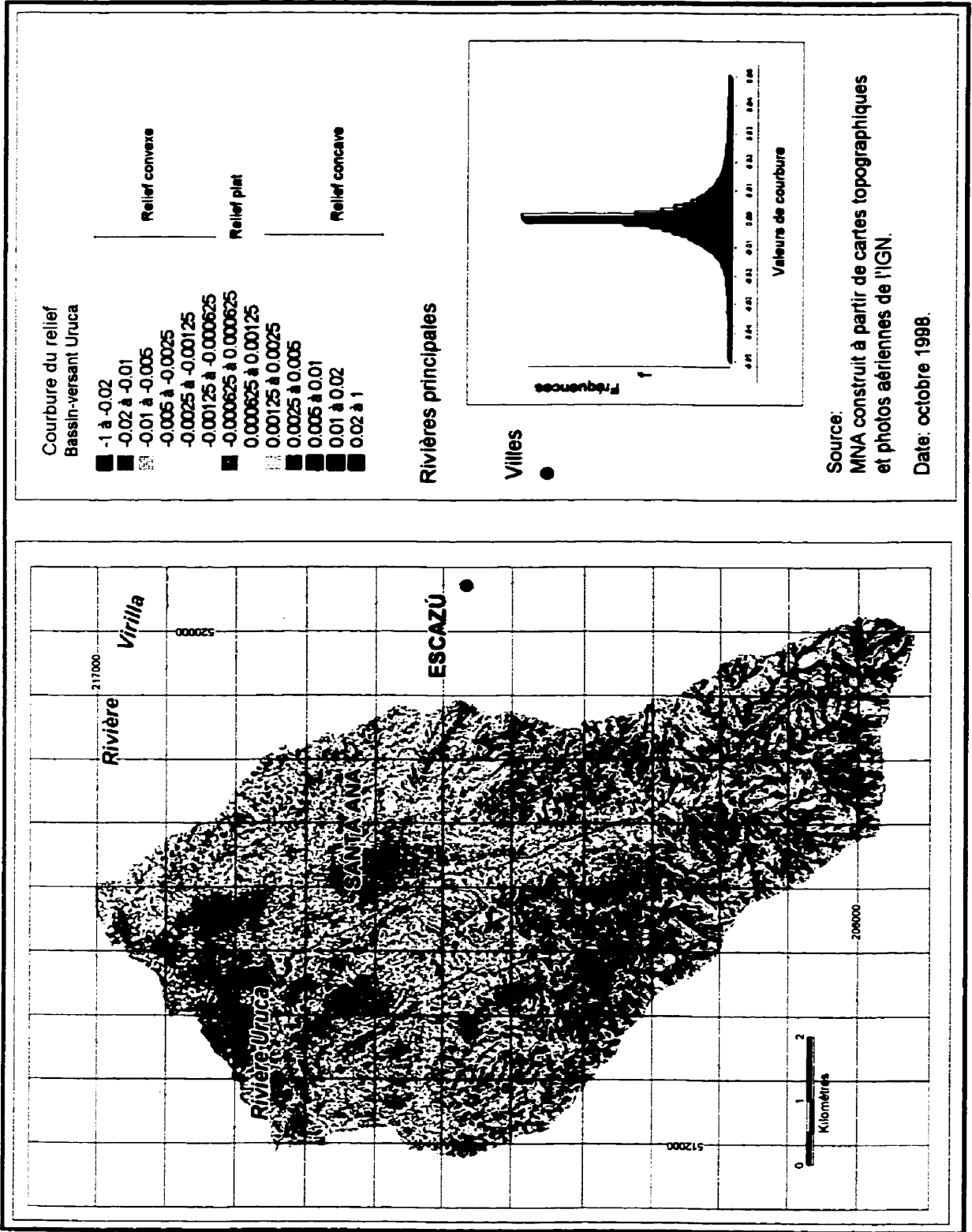


Fig.128 Courbure du relief (mode vectoriel) du bassin-versant Uruca

6.9 Vérification du MNA et des produits dérivés

D'après notre relevé de la littérature, la vérification de la qualité des *Modèles Numériques de Terrain* n'a pas reçu autant d'attention que certains autres sujets concernés, tels que les algorithmes et les procédures d'interpolation, l'échantillonnage, ou la qualité des documents dérivés.

Polidori *et al.* (1991) signalent que "*la plupart des techniques d'évaluation des MNA consistent à estimer leur précision globale par rapport à une surface de référence (Strory et Congalton, 1986, cités par Polidori et al., 1991:1329)*". Cette approche montre deux faiblesses importantes:

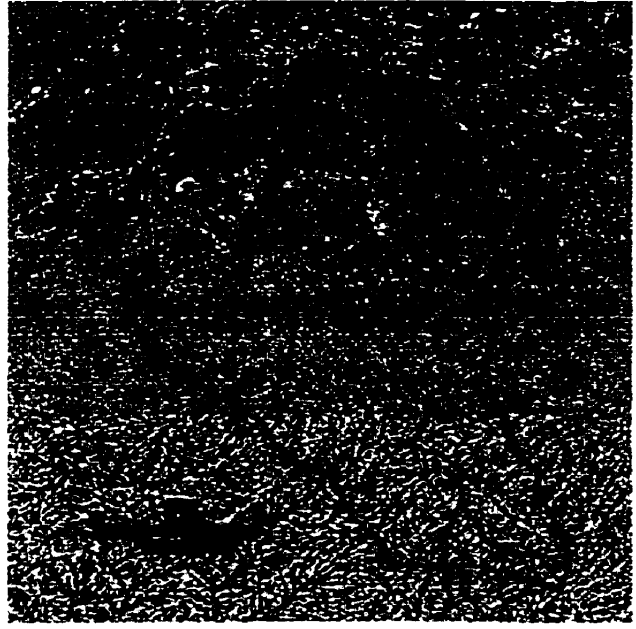
- a) on ne dispose pas toujours d'une telle surface de référence pour comparer et déterminer la qualité du MNA, et
- b) cette approche ne permet pas de détecter les artifices comme ceux qui sont produits lors de l'interpolation.

L'auteur propose donc d'utiliser le concept de *dimension fractale* d'une surface pour évaluer la qualité des MNA en grille régulière. D'après Mandelbrot (1982) la dimension fractale d'une surface (D) est une dimension Euclidienne allant de 2 (le plan) jusqu'à 3 (surface si pliée qu'elle remplit au complet un volume). Notamment, Polidori *et al.* (1991) proposent d'utiliser la valeur fractale du MNA pour déterminer le degré de lissage lors d'une procédure d'interpolation, ainsi que l'effet des anisotropies directionnelles sur la consistance de l'interpolation.

Son travail a montré que la dimension fractale (D) restait beaucoup plus proche de la surface plate ($D = 2.07$) dans le domaine d'interpolation (distance moyenne inférieure à la distance horizontale entre les *contours*) par rapport à la surface fractale ($D = 2.25$) obtenue lorsqu'on répète les calculs pour les distances supérieures à la distance horizontale moyenne des contours. Ceci montre que le processus d'interpolation a produit un *lissage excessif* et artificiel de la surface dans un contexte *local*. En plus, l'auteur a montré que ce effet de lissage avait une composante *directionnelle*. (Polidori *et al.*, 1991:1330-1331).

Une autre technique souvent utilisée consiste à construire la carte des différences ou résidus d'interpolation. Celle-ci est construite à partir des différences résultantes lorsqu'on soustrait la valeur observée dans les points de contrôle des valeurs estimées pour le modèle numérique de terrain. Certains auteurs conseillent d'inclure dans l'échantillon de contrôle autant de points non utilisés lors de l'interpolation que de points utilisés, mais, dans notre cas, on doit se souvenir que l'algorithme du *Krigeage* dans *Surfer* est un interpolateur

Figure 129 Résidus d'interpolation montrant une forte anisotropie, donc autocorrélation spatiale. Vert foncé surestimation; jaune-cyan sousestimation.



exact lorsqu'on ne définit pas une composante de la variance due aux *erreurs de mesure* ("error variance"). Alors on peut s'attendre à des résidus égaux à zéro lorsqu'on soustrait les valeurs Z mesurées des valeurs Z^* estimées. Ceci n'est pas tout à fait vrai que si on utilise une grille suffisamment dense pour que les points d'échantillon et les noeuds de la grille soient confondus. Dans le cas contraire, *Surfer* calcule des différences qui ne seront pas une mesure de la qualité de l'interpolation mais de la résolution de la grille.

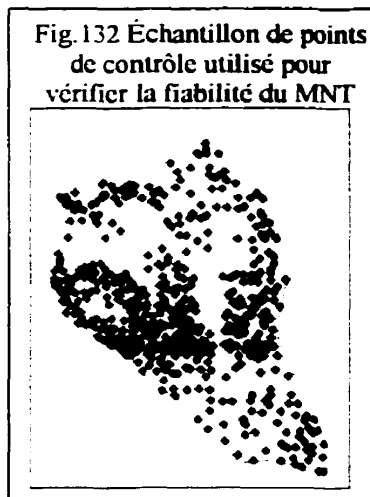
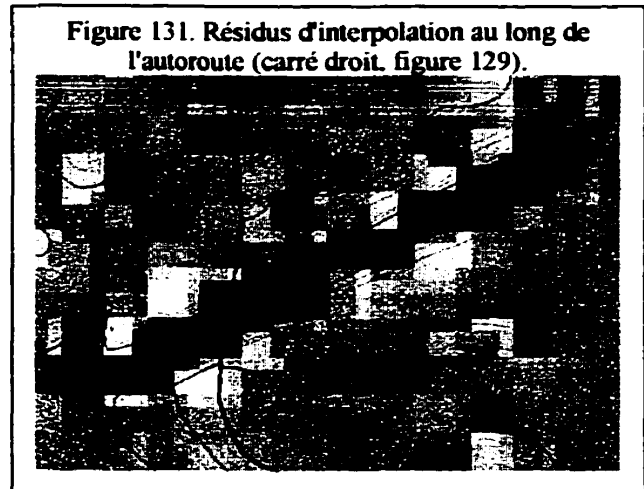
Reprenant uniquement les mêmes points d'échantillon utilisés pour l'interpolation, nous avons construit la carte des différences pour le MNA interpolé avec *Krigeage* à la résolution de 10m x 10m (figures 129 à 131); aucun *résidu* cependant, n'est resté lorsque nous avons répété cette expérience (juste pour *zexpcolo*) mais avec une résolution de 1m x 1m. Ceci empêche d'inclure les points d'échantillon utilisés pour l'interpolation avec le *Krigeage* et zéro erreurs de mesurage lorsqu'on veut estimer la qualité de l'interpolation.

Les figures 129 à 131 correspondent à la matrice de résidus d'interpolation. Dans la figure 129, on constate que les résidus (Z estimée - Z mesurée) sont positifs dans le fond des vallées



(couleur vert) et négatifs dans les lignes de partage des eaux (couleur jaune). Les figures 130 et 131 montrent la zone des résidus maximaux (près des canyons fluviaux) et les résidus au long des coupes artificielles (comme l'autoroute vers Santa Ana), respectivement.

Tenant compte des limitations signalées de ce type d'analyse de résidus, nous avons préparé un échantillon de points de contrôle *strictu sensu*²¹ (figure 132), qui ont servi à créer une *carte de différences* (figure 133) permettant de valider le MNA en référence avec la carte topographique et par rapport aux meilleures



données de terrain disponibles. Ce échantillon inclut des points sélectionnés le long des *isohypses* qui n'ont pas été retenus pour l'interpolation, ainsi que des points de repère géodésiques et des cotes photogrammétriques. Un total de 500 points ont été considérés. En moyenne, les différences ont été légèrement négatives (-0.15 m) indiquant qu'il y a eu une légère surestimation des

Total de points	500
Somme	-72.66224
Moyenne	-0.145325
Écart type	3.716582
Écart minimum	-22.94763
Écart maximum	16.526

altitudes par le modèle (figure 133, tableau 10). L'écart type étant de 3.72 m., on peut considérer les résultats acceptables, même s'il a des différences locales allant jusqu'à -22.9 et plus 16.5 mètres, qui doivent être corrigées par édition manuelle dans *Surfer*.

²¹ C'est-à-dire, non inclus dans l'ensemble de points utilisés pour l'interpolation.

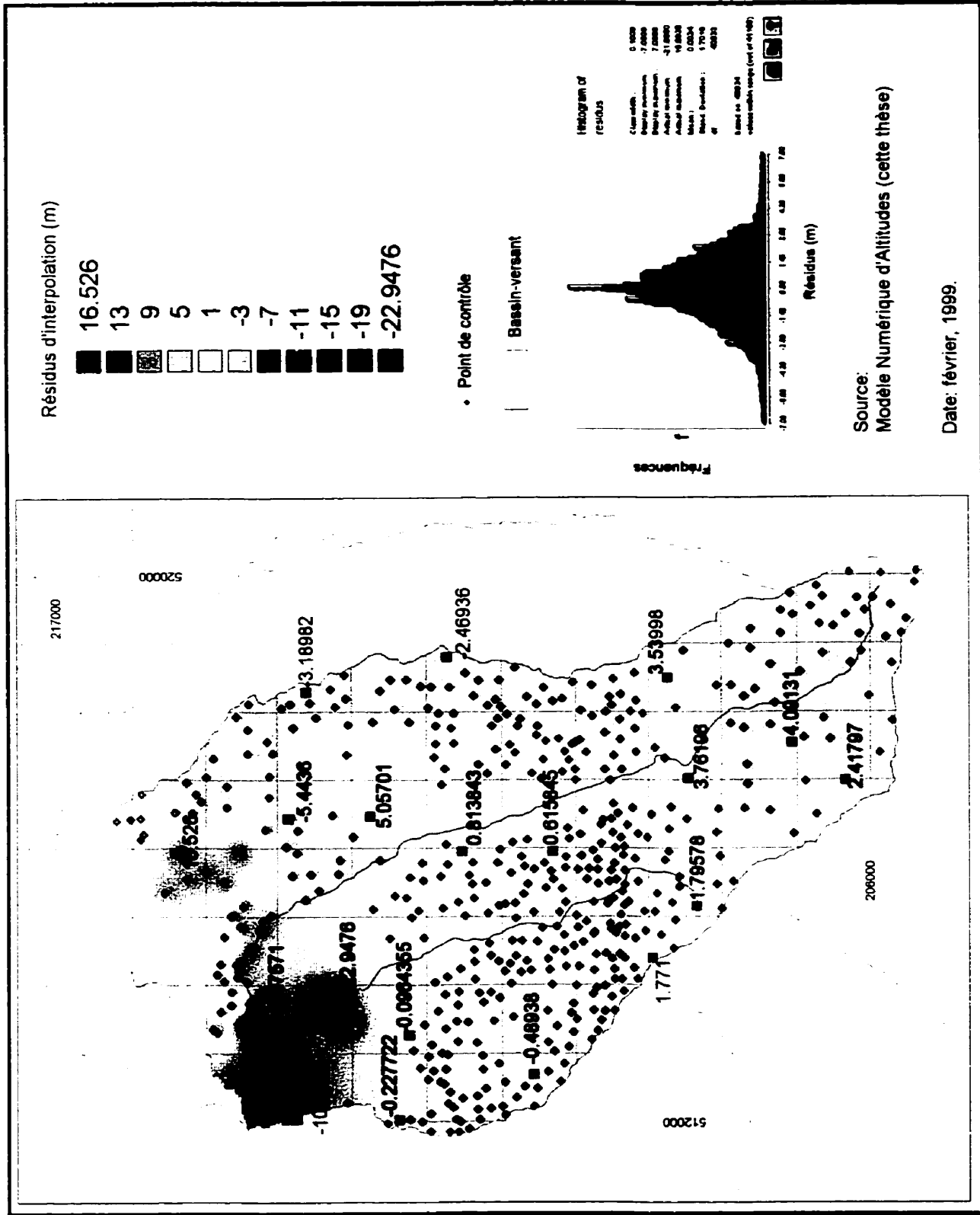


Fig. 133 Résidus d'interpolation par rapport à l'échantillon de 500 points (figure 132), permettant de vérifier la qualité locale du MNA

6.10 Références bibliographiques du chapitre

- ACKERMANN, F.** 1994. Digital elevation models – Techniques and application, quality standards, development. Roy Welch and Marguerite Remillard (eds). Dans: *Proceedings of the Symposium "Mapping and Geographic Information Systems"*. Vol. 30. Tome 4. Athens, Georgia. May 31-June 3.
- ACKERMANN, F.** 1978. Experimental investigation into the accuracy of contouring from DTM. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 44(12):1537-1548.
- AGTERBERG, F.** 1970. Autocorrelation Functions in Geology. Daniel F. Merriam (ed.) Dans: *Geostatistics. a colloquium*. Plenum Press. pp 113-141.
- AKIMA, H.** 1974. A methode of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures. *Communications of the ACM*. 17:18-20.
- ARCE, R.** 1993. *Les modèles numériques d'élévation*. Travail final du cours "Communication Cartographique", sous supervision du professeur Jean Raveneau. Université Laval. (non publié).
- AYENI, O.** 1982. Optimum sampling for digital terrain models: a trend towards automation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 48(11):1687-1694.
- AYENI, O.** 1976a. Considerations for automated digital terrain models with applications in differential photo mapping, Ph.D. dissertation, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- AYENI, O.** 1976b. Objective terrain description and classification for digital terrain models, *XIII ISP Congress Proceedings*. Vol 3, paper 3-12.
- BALCE, A.** 1987. Determination of optimum sampling interval in grid digital elevation models (DEM) data acquisition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(3):323-330.
- BAND, L.** 1986. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*. 22(1):15-24.
- BARNHILL, R.** 1983. Computer aided surface representation and design. Dans: Barnhill, R.E. et Boehm, W. (eds.). *Surfaces in computer Aided Geometric Design*. North-Holland Publ. Co. New York, pp. 1-24.
- BARNES, R.** 1991. The variogram sill and the sample variance. *Mathematical Geology*. 23(4):673-678.
- BEVEN, K. J. et MOORE, I. D.** (eds). 1993. Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. John Wiley & Sons. England.

- BINLEY, A. et BEVEN, K.** 1993. Three-dimensional modelling of hillslope hydrology. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section II: Distributed Hydrological Modelling*. John Wiley & Sons. England. pp:107-119.
- BOURGAULT, G.** 1994. Robustness of noise filtering by kriging analysis. *Mathematical Geology*. 26(6):733-752.
- BRIGGS, I.** 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*. 39(1):39-48.
- BURGESS, T.M. et WEBSTER, R.** 1980 a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties:1. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*. 31:315-331.
- BURGESS, T.M. et WEBSTER, R.** 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 2. Block kriging. *Journal of Soil Science*. 31:333-341.
- BURGESS, T.M. et WEBSTER, R. et MCBRATNEY, A.B.** 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 4. Sampling Strategy. *Journal of Soil Science*. 32:643-659.
- BURROUGH, P.** 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford, Clarendon Press. Chap 3: 39-56 pp.
- BURROUGH, P.** 1991. Sampling designs for quantifying map unit composition. Dans : M.J. Mausbach et L.P. Wilding (eds.). *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA special publication number 28. Wisconsin, USA. pp. 89-125.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. et REICHENBACH, P.** 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Process and Landforms*. 16:427 - 445.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F. et REICHENBACH, P.** 1996. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. Dans: *Internet: <http://158.deis.unibo.it/gis/chapt1.htm>*.
- CHEN, Z. et GUEVARA, A.** 1987. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. *Auto-Carto*. 8:50-56.
- COLLINS, S.** 1975. Terrain parameters directly from a digital terrain model. *The Canadian Surveyor*. 29:507-518.
- COSTA, M. et BURGESS, S.** 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*. 30(6): 1681-1692.

- CRESSIE, N.** 1990. The origins of kriging. *Mathematical Geology*. 22 :239-252.
- CRESSIE, N.** 1993. Geostatistics : a tool for environmental modelers. Dans : M.F. Goodchild, B.O. Parks et L.T. Steyaert (eds.), *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press. New York. pp. 414-421.
- DAS, A.** 1950. Two dimensional systematic sampling and associated stratified and random sampling. *Sankhya*. Vol 10.
- DAVIS, J.** 1975. Contouring algorithms. *Proceedings of the Second International Symposium on Computer Assisted Cartography, Auto-Carto II*. pp 352-359
- DAWES, W. et SHORT, D.** 1994. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes. *Water Resources Research*. 30(4):1045-1055
- DE FLORIANI, L et MAGILLO, P.** 1994. Visibility algorithms on triangulated digital terrain models. *International Journal of Geographical Information Systems*. 8(1): 13-41.
- DELAUNAY, B.** 1934. Sur la sphère vide. *Bulletin of the Academy of Sciences of the URSS, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*. 8:793-800.
- DELAY, F. et DE MARSILY, G.** 1994. The integral of the semivariogram: a powerful method for adjusting the semivariogram in geostatistics. *Mathematical Journal*. 26(3):301-321.
- DESMET, P.** 1993. The use of digital elevation models in geomorphology. *Bulletin de la Société belge d'études géographiques (SOBEG)*. 1:47-66
- DIKAU, R.** (1993). Geographical information systems as tools in geomorphology. *Z. Geomorphology*, 92:231-239
- DIKAU, R.** 1990. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. *Z. Geomorphology*, 80:45-55
- DIKAU, R.** 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. Dans: Johathan Raper (ed). *Three dimensional applications in geographical information systems*, Taylor and Francis, London.
- DOUGLAS, D.** 1986. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model. *CARTOGRAPHICA*, 23(4):29-61
- DRAYTON, R. S., WILDE, B. M. et HARRIS, J. H. K.** 1993. Geographical information system approach to distributed modelling. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section II: Distributed Hydrological Modelling*. John Wiley & Sons. England. pp:193-200.

- DUTTON, K. E.** 1988. *Principles of interpolation procedures in the display and analysis of spatial data: a comparative analysis of conceptual and computer contouring*. Thesis. Department of Geography, Calgary University, Alberta, Canada.
- DYMOND, J., DEROSE, R. et HARMSWORTH, G.** 1995. Automated mapping of land components from digital elevation data. *Earth surface Processes and Landforms*. 20:131-137.
- EASH, D.** 1994. A geographic information system procedure to quantify drainage-basin characteristics. *Water Resources Bulletin*. 30(1):1-8
- EASTMAN, J. R.** 1992. *Idrisi DOS 4.0 User's manual*. Clark University, Massachusetts, USA.
- ENGLUND, E.** 1988. *Geo-EAS 1.1 User's guide*. US EPA. Las Vegas, USA.
- EYTON, J. R.** 1991. Rate of change maps. *Cartography and Geographics Information Systems*. 18(2):87-103.
- FOWLER, R. et LITTLE, J.** 1979. Automatic extraction of irregular network digital terrain models. *Computer graphics*. 13:199-207.
- GARDNER, T. CONNORS, K. et DAY, R.** (1990). Automated extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. *Z. Geomorphology*. 80:57-68
- GOLDEN SOFTWARE.** 1995. *Surfer for Windows v.6.0 User's Manual*. Golden Software Inc., Golden, Colorado. USA.
- GOODRICH, D., WOOLHISER, D. et KEEFER, T.** 1991. Kinematic routing using finite elements on a triangular irregular network. *Water Resources Research*. 27(6):995-1003
- GRAYSON, R., MOORE, I., O'LOUGHLIN, E., TURNER, A.** 1988. *The development of a hydrologic model for erosion prediction*. Conf. on Agr. Eng., 25-29 September, Sydney, Australia.
- GRAYSON, R., MOORE, I. et MCMAHON, T.** 1992 a. Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*. 28(10):2639-2658
- GRAYSON, R. MOORE, I. et MCMAHON, T.** 1992 b. Physically based hydrologic modeling, 2. Is the concept realistic?. *Water Resources Research*. 26(10):2659-2666
- GREENBERG, D. A.** 1965. *Mathematics for introductory science courses: calculus and vectors*. W.A. Benjamin Inc. New York.
- GUPTA, R. P. et JOSHI, B. C.** 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach - A case study from the Ramganga Catchment, Himalayas. *Engineering Geology*. 1990-28:119-131.

- HALL, G. et OLSON, C.** 1991. Predicting variability of soils from landscape models. Dans : M.J. Mausbach et L.P. Wilding (eds.). *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA special publication number 28. Wisconsin, USA. pp. 9-24.
- HAMLETT, J., MILLER, D., DAY, R., PETERSON, G., BAUMER, G. et RUSSO, J.** 1992. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention. *Journal of Soil and Water Conservation*. 47(5):399-404.
- HORN, B.** 1982. Hill shading and the reflectance map. *Geo-processing*. 2:65-146.
- HUTCHINSON, M.** 1995. Interpolation mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*. 9(4):385-403.
- HUTCHINSON, M.** 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. 106:211-232
- ICHOKU, CH. et CHOROWICZ, J.** 1994. A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns. *Water Resources Research*. 20(2): 161-174.
- IMHOF, E.** 1982. The topographic foundations. Dans: Cartographic relief presentation. Chap 2. Walter de Gruyter. New York.
- JENSON, S et DOMINGUE, J.** 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(11):1593-1600
- JONES, N., WRIGHT, S., et MAIDMENT, D.** 1990. Watershed delineation with triangle based terrain models. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*. 116(10):1232-1251.
- JOURNEL, A. et HUIJBREGTS, C.** 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press. London.
- KITANIDIS, P.** 1993. Generalized covariance functions in estimation *Mathematical Geology*. 25(5):525-540.
- KUMLER, M.** 1994. An intensive comparison of triangulated irregular network (TINs) and digital elevation models (DEMs). *Cartographica*. 31(2). Monograph 45.0
- LAM, N.** 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer*. 10(2):129-149.
- LAMOREY, G. et JACOBSON, E.** 1995. Estimation of semivariogram parameters and evaluation of the effects of data sparsity. *Mathematical Geology*. 27(3):327-358.
- LANYON, L. et HALL, G.** 1983. Land-surface morphology: 1. Evaluation of a small drainage basin in Eastern Ohio. *Soil Science*. 136(5):291-299.

- LASLETT, G., McBRATNEY, A., PAHL, P. et HUTCHINSON, M.** 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*. 38:325-341.
- LEE, J.** 1991. Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models. *International Journal in Geographical Information Systems*. 5(3):267-285.
- LEGATES, D. et WILLMOTT, C.** 1986. Interpolation of point values from isoline maps. *The American Cartographer*. 13(4):308-323.
- MACEACHREN, A. et DAVIDSON, J.** 1987. Sampling and isometric mapping of continuous geographic surfaces. *The American Cartographer*. 14(4):299-320.
- MAKAROVIC, B.** 1973. Progressive sampling for digital terrain models. *I.T.C. Journal*. 3:397-416.
- MAKAROVIC, B.** 1975. Amended strategy for progressive sampling. *I.T.C. Journal*. 1:117-128.
- MAKAROVIC, B.** 1976. A digital terrain model system. *I.T.C. Journal*. 1:57-83.
- MAKAROVIC, B.** 1977. Composite sampling for digital terrain models. *I.T.C. Journal*. 3:406-433.
- MANDELBROT, B.** 1982. *The fractal geometry of the nature*. Freeman, New York.
- MARK, D. M.** 1975. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. *Geografiska Annaler*. vol 3-4, series A. pp165-177.
- MARK, D. M.** 1978. Concepts of data structure for digital terrain models. Dans: *Proceedings of the DTM symposium. American Society of Photogrammetry – American Congress on Survey and Mapping*. St. Louis, Missouri, pp. 24-31.
- MATHERON, G.** 1971. The theory of regionalized variables and its applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleu. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- MAUSBACH, M. et WILDING, L.** 1991. *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA special publication number 28. Wisconsin, USA.
- MCCULLAGH, M. et SAMPSON, R.** 1972. User desires and graphics capability in the academic environment. *Cartographic Journal*. 9:109-122.
- MEJIA, M., WOHL, E. et OAKS, S.** 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*. 10-1994:331-354.

- MITSOVA, H. et HOFIERKA, J.** 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*. 25(6):657-669.
- MITSOVA, H. et MITAS, L.** 1993. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*. 25(6):641-655.
- MOELLERING, H. et KIMERLING, A.** 1990. A new digital slope-aspect display process. *Cartography and Geographic Information Systems*. 17(2):151-159.
- MONTGOMERY, D. et DIETRICH, W.** 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. 30(4):1153-1171
- MONTGOMERY, D. et FOUFOULA, E.** 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *American Geophysical Union*:3925-3934.
- MOORE, I. D. et GRAYSON, R. B.** 1991. Terrain-based catchment partitioning and Runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*. 27(6):1177-1191.
- MOORE, I. D. et GRAYSON, R. B.** 1989. Hydrologic and digital terrain modelling using vector elevation data. *Trans. Am. Geophys. Union*. 70:1091.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. et LADSON, A. R.** 1993. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological application. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology*. Section I: Digital Terrain Analysis. John Wiley & Sons. England. pp:7-34.
- MOORE, I., O'LOUGHLIN, E. et BURCH, G.** 1988. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13:305-320.
- MORRISON, J.** 1971. Method produced error in isarithmic mapping. American Congress on Surveying and Mapping Cartography Division. Technical Monograph: CA-5.
- MULLA, D.** 1988. Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13: 389-405.
- OLIVER, M. et WEBSTER, R.** 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 4(3):313-332.
- O'LOUGHLIN, E.** 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*. 22(5):794-804

- ONSTAD, C. et BRAKENSIEK, D.** 1968. Watershed simulation by stream path analogy. *Water Resources Research*. 4:965-971.
- PALACIOS, O. et CUEVAS, B.** 1986. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. *Journal of Hydrology*. 86:299-314
- PALACIOS, O. et CUEVAS, B.** 1992. SHIFT: a distributed runoff model using irregular triangular facets. *Journal of Hydrology*. 134:35-55
- PAN, G.** 1994. Restricted kriging: a link between sample value and sample configuration. *Mathematical Geology*. 26(1):135-155.
- PANNATIER, Y.** 1996. Variowin: software for spatial data analysis in 2D. Springer. New York, USA.
- PANUSKA, J., MOORE, L. et KRAMER, L.** 1991. Terrain analysis: Integration into the agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model. *American Journal of Alternative Agriculture (AJAA)*. January-February.
- PEUCKER, T.** 1979. Digital terrain models: An overview. *Auto-Carto 4*. 1:97-107.
- PEUCKER, T.** 1980. The Impact of Different Mathematical Approaches to Contouring. Dans: Kerr, A. (ed.). The dynamics of oceanic cartography. *Cartographica 17, Monograph*. 25:73-95.
- PEUCKER, T. et DOUGLAS, D.** 1975. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer graphics and Image Processing*. 4:375-387.
- POLIDORI, L., CHOROWICZ, J. et GULLANDE, R.** 1991. Description of terrain as a fractal surface, and application to digital elevation model quality assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57(10):1329-1332.
- RANZI, R. et ROSSO, R.** 1995. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin. *Journal of Hydrology*. 6:461-478.
- SHEPPARD, D.** 1984. Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm. Dans: Gayle, G. et Willmott, C (eds). *Spatial statistics and models*. D. Reidel Pub. Co. Boston.
- SMITH, M. et BRILLY, M.** 1992. Automated grid element ordering for GIS-based overland flow modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58(5):579-585.
- SMITH, W. et WESSEL, P.** 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*. 55(3):293-305.
- SPEIGHT, J.** 1974. A parametric approach to landform region. *Institute of British Geographers Special publication*. 7:213-230.

- STRORY, M. et CONGALTON, R.** 1986. Accuracy assessment: user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 52(3):397-399.
- TACHIKAWA, Y., SHIIBA, M. et TAKASAO, T.** 1994. Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure. *Water Resources Bulletin*. 30(1).
- TARBOTON, D.G., BRAS, R.L., et RODRÍGUEZ, I.** 1993. On the extraction of channel networks from digital elevation data. Dans: Beven, K.J. et Moore, I. D. (eds). *Terrain analysis and distributed modeling in hydrology. Section I: Digital Terrain Analysis*. John Wiley & Sons. England. pp:85-104.
- TSAI, V.** 1993. Delaunay triangulations in TIN creation: overview and a linear-time algorithm. *International Journal of Geographical Information Systems*. 7(6):501-524.
- TRIBE, A.** 1991. Automated recognition of valley heads from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*. 16:33-49.
- VERDIN, K. L.** 1997. A system for topologically coding global drainage basins and streams networks. <http://cdcwww.cr.usgs.gov/landdaac/etopo30/hydro/>
- VOLTZ, M. et WEBSTER, R.** 1990. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *Journal of Soil Science*. 41 : 473-490.
- WADGE, G., WISLOCKI, A. P. et PEARSON, E. J.** 1993. Spatial analysis in GIS for natural hazard assessment. Dans: Goodchild, M., Parks, B. et Steyaert, L. (eds). *Environmental Modeling With GIS*. Oxford University Press. New York. Chap. 31:333-338.
- WEBER, D. et ENGLUND, E.** 1992. Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators. *Mathematical Geology*. 24(4):381-391.
- WEBER, D. et ENGLUND, E.** 1994. Evaluation and Comparison of Saptial Interpolators II. *Mathematical Geology*. 26(5):589-603.
- WEBSTER, R.** 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Dans: Stewart, B. (ed). *Advances in Soil Science*. New York Vol. 3:2-70.
- WEBSTER, R. et BURGESS, T.** 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III canging drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*. 31:505-524.
- WEBSTER, R. et OLIVER, M.** 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey. Spatial Information Series*. Oxford University Press, Oxford.

- WEBSTER, R. et OLIVER, M.** 1989. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditional probability. *Journal of Soil Science*. 40:497-512.
- WU, W.** 1993. Distributed slope stability analysis in steep, forested basins. Ph.D. dissertation. Utah State University, Logan.
- WU, W. et SIDLE, R.** 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*. 31(8): 2097-2110.
- YOUNG, D.** 1962. The numerical solution of elliptic and parabolic partial differential equations. Dans: Todd, J. (ed). Survey of numerical analysis. McGraw-Hill Book Co. New York.
- ZHANG, W., CAMBELL, J. et HARALICK, R.** 1990. Automatic delineation of drainage basins within digital elevation data using the topographic primal sketch. *Mathematical Geology*. 22(2):189-209
- ZHANG, W. et MONTGOMERY, D.** 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*. 30(4):1019-1028.

CHAPITRE 7

EXPLOITATION DU SIRS ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

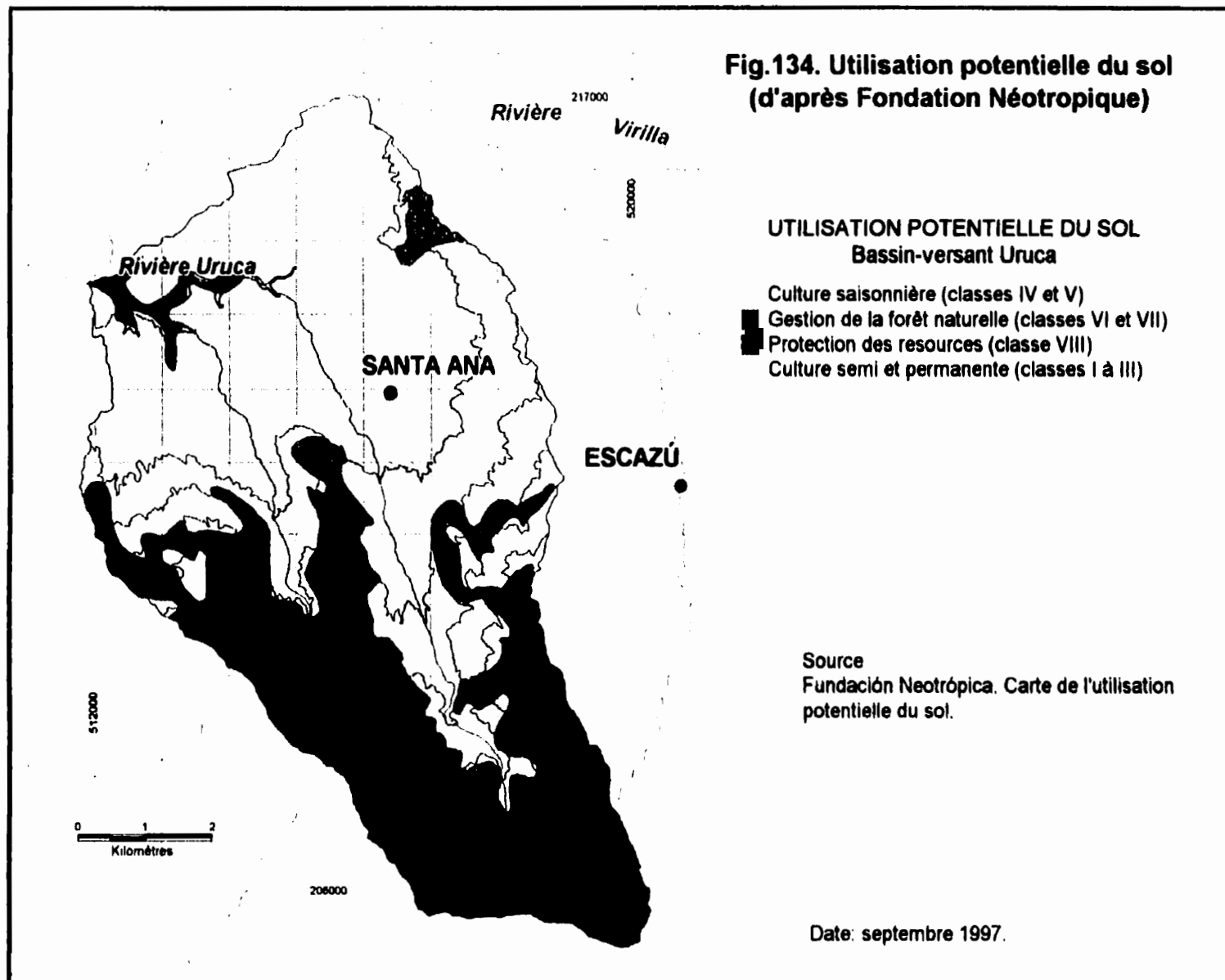
Maintenant nous allons essayer de donner un aperçu général des possibilités d'exploitation du SIRS prototype développé au chapitre 5, ainsi que des opportunités pour leur intégration dans le processus de gestion du territoire, particulièrement dans la gestion des bassins-versants. Nous aboutirons finalement à une stratégie pour l'insertion de l'aménagement des bassins-versants dans une perspective globale d'aménagement, que se soit au niveau communautaire, municipal, régional, national et même international. À ce niveau, nous proposerons un plan plutôt spéculatif et nous essayerons de définir un cadre suffisamment consistant pour justifier l'adoption pratique de notre approche.

7.1 Exemples d'exploitation du SIRS.

7.1.1 Carte des différences entre l'utilisation actuelle et potentielle du sol.

La carte d'utilisation potentielle du sol (figure 134) a été réalisée par la *Fundación Neotrópica*¹ suivant la *Méthodologie pour la détermination du potentiel d'utilisation des terres du Costa Rica* (MAG/MINAE, 1991). Elle comporte huit *classes* d'utilisation du sol tenant compte des contraintes et des potentiels pour la production agricole, l'élevage et la pro-

¹ Fundación Neotrópica (1998). *Mapa de Capacidad de Uso del Suelo*. Esc.1:200000, San José, Costa Rica.



duction forestière. Les classes I à III permettent tous les types de production agricole dont la sélection de l'une ou l'autre est faite suivant des critères socio-économiques. Les classes IV à VI permettent la production de cultures semi-permanentes et permanentes uniquement. La classe VII présente des limitations sévères permettant seulement l'exploitation contrôlée de la forêt naturelle (primaire ou de reconstitution). Réservée pour la protection des ressources naturelles, la classe VIII ne permet aucune exploitation agricole.

Par ailleurs la carte d'utilisation du sol (figure 135) est basée sur la carte topographique au 10 000 ième de l'IGN, datée de 1991. Nous l'avons complétée pour la partie sud du bassin (non couverte au 10 000 ième) par une interprétation de l'image satellite SPOT de 1988 et des photos aériennes de 1989. De nombreuses catégories d'utilisation sont décrites sur cette carte. Toutefois, nous les avons regroupées selon leurs niveaux d'exigence dans quatre catégories équivalentes aux classes de potentiel d'utilisation.

Ces cartes ont été superposées (fonction *overlay*)² afin de déterminer les divergences entre l'utilisation actuelle et l'utilisation potentielle des sols du bassin-versant Uruca (figure 136). Il s'agit de l'exploitation de la relation USO-INTERSECTER-USOPT (*utilisation du sol en intersection avec le potentiel d'utilisation*) prévue dans le MCD (figure 66, dans l'annexe). La table USOXUSOPT représente la relation INTERSECTION et permet de faire la jonction (fonction JOIN) relationnelle. Soulignons l'importance d'ajouter en plus des *identifiants* de chacune des tables superposées, les *attributs* particuliers de la relation (*dif, état*) dans la table USOXUSOPT. C'est l'attribut *état* dans cette table qui a été cartographié dans la figure 136.

La carte des divergences montre une surutilisation du sol au sud du bassin où nous trouvons beaucoup de pâturages dans des terrains plutôt destinés à la gestion de la forêt naturelle ou pour la protection des ressources naturelles. Au nord, par contre, on détecte des opportunités pour intensifier l'utilisation du sol.

Nous avons aussi superposé la carte d'utilisation potentielle du sol (figure 134) avec la carte du *plan d'utilisation du sol* qui fait partie du *Plan Régulateur Urbain* (Schéma d'aménage-

² Un programme d'*overlay* pour MapInfo est disponible dans l'internet et fut créé par Bart Adriannse.

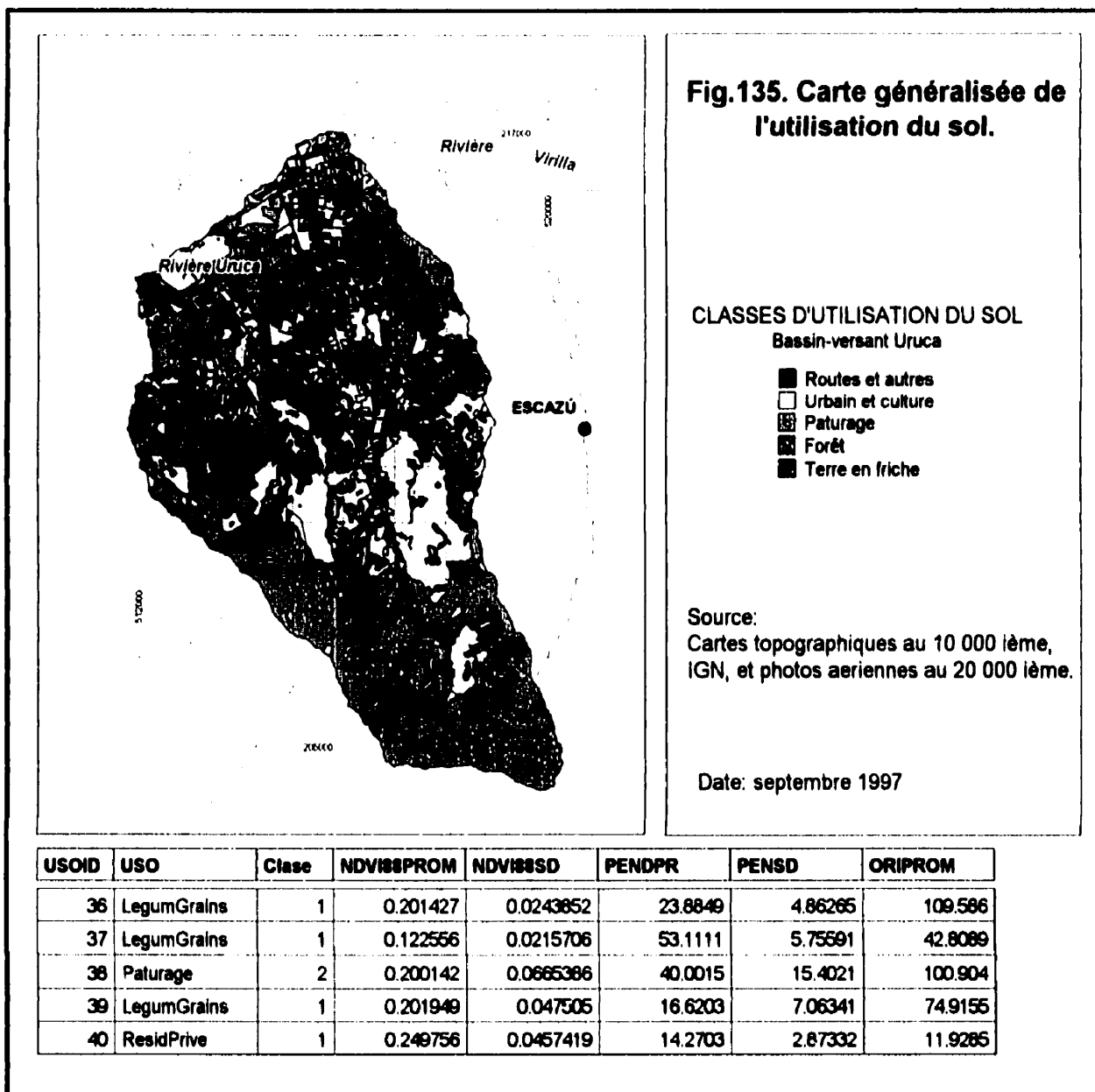
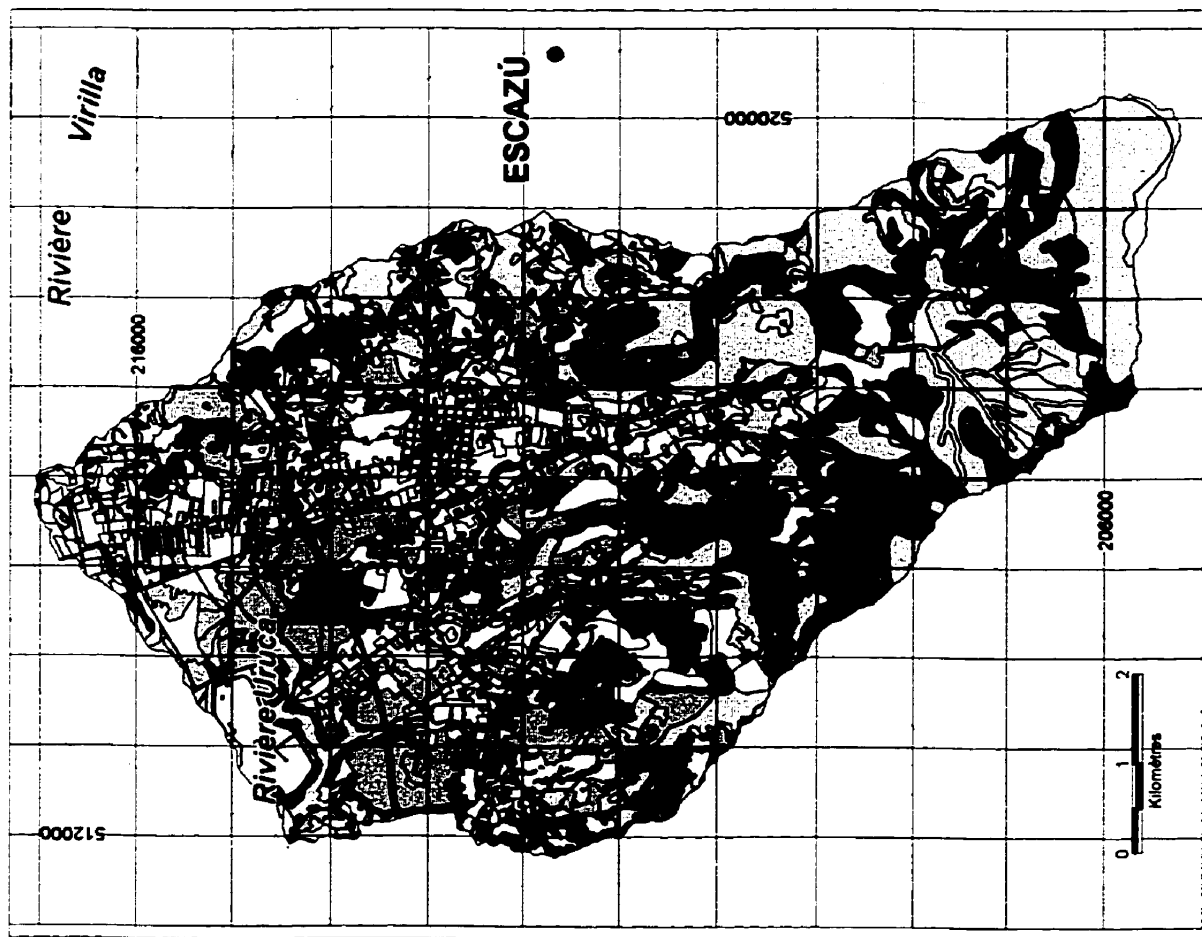


Fig. 136. Discordances entre l'utilisation actuelle et l'utilisation potentielle du sol.

- CONDITION D'UTILISATION**
 Bassin-versant Uruca
- Non considéré
 - Forte surutilisation
 - Moyenne surutilisation
 - Faible surutilisation
 - Correspondance
 - Faible sous utilisation
 - Moyenne sous utilisation
 - Forte sous utilisation

Source:
 Carte d'utilisation actuelle du sol et carte
 de l'utilisation potentielle du sol.

Date: décembre, 1998



ment) de la municipalité de Santa Ana (figure 137). Certaines divergences entre ces deux propositions d'utilisation du sol étaient attendues puisque la première est faite dans le but général de maximiser le rendement des terres rurales dans l'ensemble du pays, tandis que la deuxième tient compte principalement des besoins de la municipalité, particulièrement de tout ce qui concerne la gestion urbaine. Cette opération de superposition était prévue dans le MCD (figure 66, en annexe) et traduit la relation plusieurs à plusieurs (N:N), USOPT-INTERSECTER-USOPR.

La table résultante USOPTXUSOPR fut interprétée et cartographiée pour montrer les zones d'affectation positive, neutre et négative de l'utilisation du sol proposée par la municipalité, par rapport à l'utilisation agraire potentielle (figure 138). On note beaucoup de coïncidence entre les deux propositions pour la partie montagneuse du bassin-versant (zone de protection dans les deux cartes), mais des utilisations plus intensives que suggérées pour la partie plane. De son côté, la carte d'utilisation proposée par la municipalité tient compte des menaces représentés par les coulées de débris potentielles provenant des quelques glissements actifs ou qui peuvent se réactiver dans la haute montagne (notamment celles reliées au glissement d'Alto Tapezco – chap.4). Ceci apparaît comme une zone d'exclusion d'activités intensives, ce qui permettrait une récupération d'un écosystème déjà perturbé. Tout ceci, évidemment, si l'on assume que le plan d'utilisation proposé par la municipalité, le seul ayant un caractère de loi, sera respecté. Signalons, en tout cas, que cette zone dangereuse (*zona de peligro*) est bien plus réduite que la zone de danger cartographiée par Mora (1989) et Molina (1990).

Ensuite, nous avons exploité la relation USO-INTERSECTER-USOPR (figure 66, annexe) pour interpréter les types de transformations espérées depuis la mise en marche du *Plan Régulateur Urbain* (schéma d'aménagement) dans la municipalité de Santa Ana. De telles transformations pourraient ne jamais être atteintes puisque le *Plan* n'est qu'un guide d'action et non un plan imposé. Remarquons que cette modélisation répond à une question du type : que se passerait-t-il ... (*condition*)?. Le tableau 11 permet de répondre à cette question en terme de type et de superficies affectées par les transformations. Le tableau 12 résume les transformations les plus importantes.

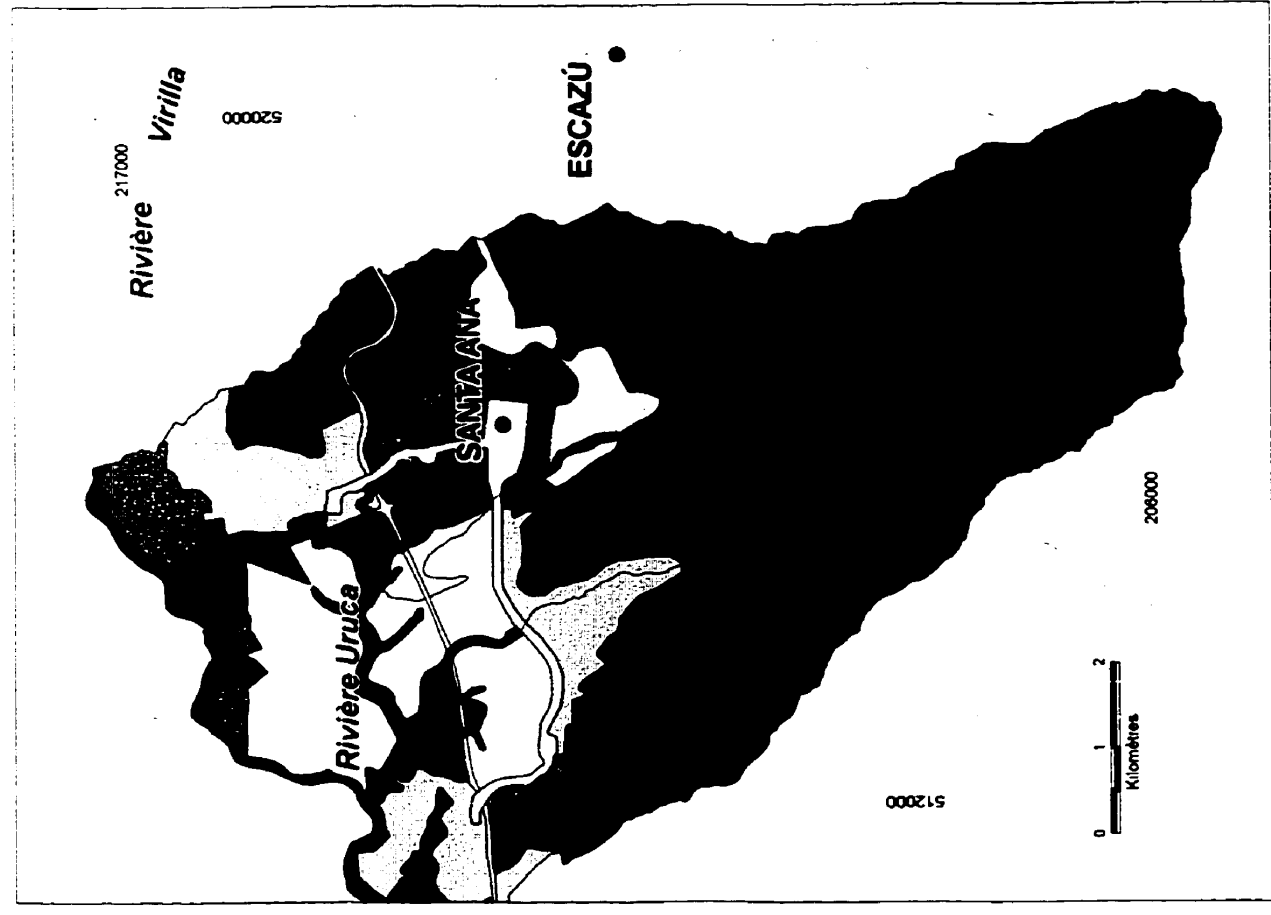
Figure 137. Carte schéma d'aménagement (Plan Régulateur Urbain) de la municipalité de Santa Ana

Plan d'utilisation du sol

- Parc zoologique
- Zone verte
- Zone agricole
- Zone artisanale et commerciale
- Zone d'appui à l'industrie
- Zone industrielle agricole
- Zone industrielle
- Zone de contrôle spécial
- Zone à risque
- Zone de protection
- Zone résidentielle à faible densité
- Zone résidentielle à moyenne densité
- Zone résidentielle à forte densité

Source:
Municipalité de Santa Ana

Date: décembre 1998



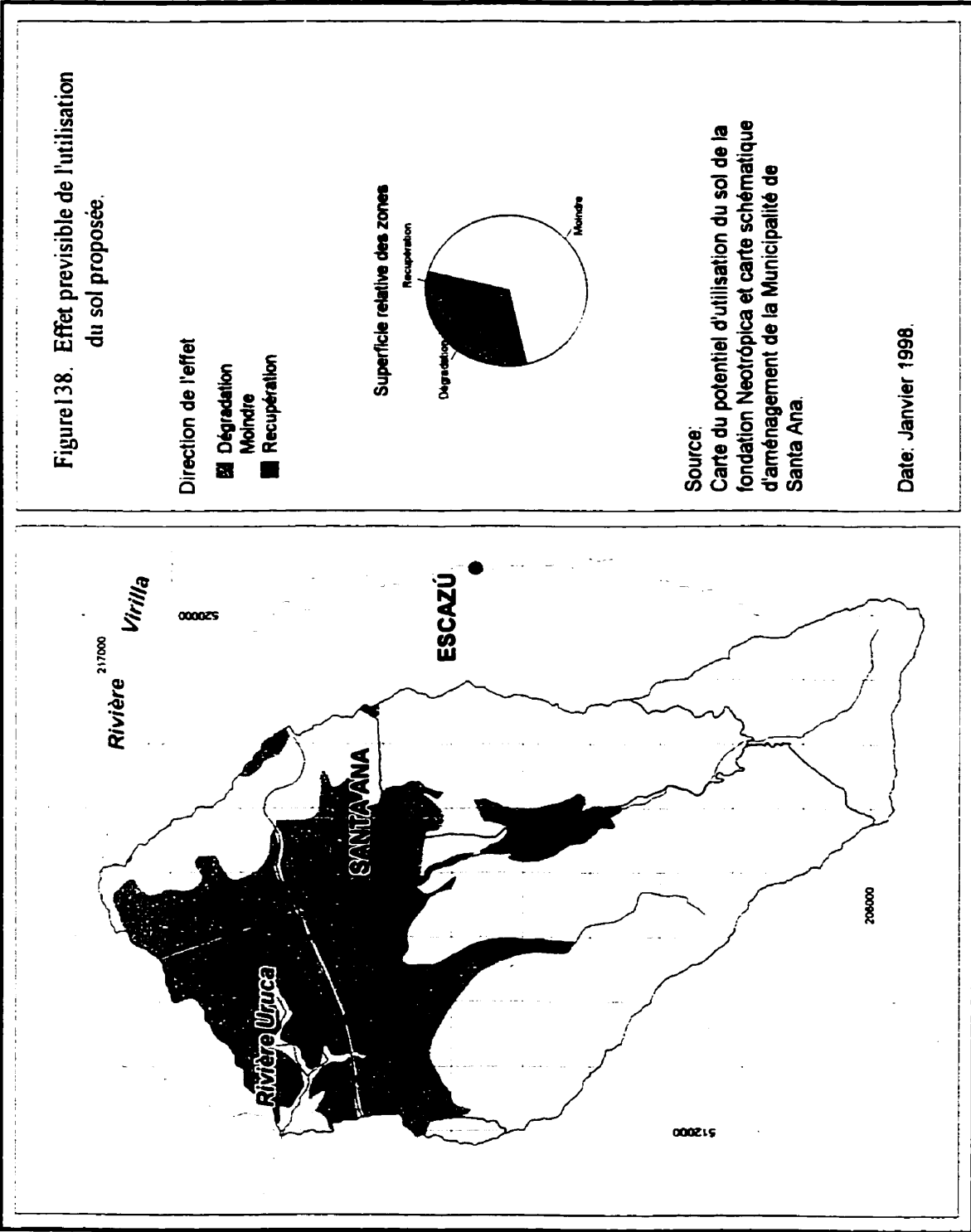


Tableau 11. Superficie (en hectares) des différentes combinaisons d'utilisation actuelle et proposée du sol.

UTILISATION ACTUELLE	UTILISATION PROPOSÉE											
	Aire verte	Artisanat commercial	Contrôle spécial	Industrie	Parc zoologique	Production agricole	Protection des ressources	Protection contre risques	Résidentiel faible densité	Résidentiel moyenne densité	Résidentiel haute densité	Services à l'industrie
Agriculture de serre			1.764		0.567		1.036		9.036	3.376	8.722	
Auto services urbains							0.334		0.159	0.005		
Bâtiment du gouvernement			0.808			0.021				0.005	0.083	
Café	10.172	0.974	1.303	10.171	5.801	16.701	736.278	53.755	62.496	47.863	33.343	0.004
Canne à sucre							1.109			0.459		
Cimetière			0.017								1.764	
Commerce et services		0.689	5.494	1.573			0.101		0.351	0.429	0.588	
Education et culture			5.553			2.498	0.153	0.209	0.397	2.722	0.458	
Forêt		2.694	2.211	1.867	4.833	5.139	899.835	4.375	24.842	24.845	16.812	2.051
Fruits		2.476	1.392	0.016		0.712	21.179	1.547	28.306	21.552	6.998	0.812
Grains			0.081				0.165				0.474	
Industrie			0.903	6.120		0.605	1.127	0.542	1.097	0.534	6.988	
Lacs							0.180		0.351		0.233	
Légumes et fruits associés									0.271	2.136	0.706	
Légumes et grains associés	0.541	3.523	3.671	1.001	2.015	18.295	73.709	22.866	16.043	52.965	42.956	3.724
Pâturage	0.803	38.451	3.594	18.565	2.326	7.946	1319.794	4.836	155.517	73.507	88.449	34.475
Pâturage et arbres isolés		1.455	0.825	0.600	0.026		15.016		25.594	7.918	23.712	
Plantes ornementales						0.071	0.928	0.420	1.485	2.019	0.323	
Reboisement			0.202			0.922	10.705			3.433	0.140	
Résidentiel privé		2.356	59.656	0.281	1.297	36.172	37.865	13.255	63.312	77.295	107.401	
Routes	0.235	1.560	12.322	0.886		4.285	24.436	1.110	19.169	12.401	14.692	0.000
Santé et bien être			0.261						1.478	1.563	0.421	
Santé et récréation			0.164								1.437	
Sport et récréation			3.085			3.115	0.949	0.829	3.242	0.944		
Terre en friche		0.338	0.463	5.570	19.502	2.943	456.547	4.959	18.732	24.613	8.020	1.199
Terres détruites		0.509				0.667	28.745			0.733	1.761	
Terres humides					0.191		0.007					
Transport et entreposage			0.336								1.609	
En voie d'urbanisation		3.918	6.807	12.498		0.4280	13.433		143.624	30.773	40.029	
Zone verte – parc			0.145	0.001			0.302		0.485	0.040	0.097	

D'après les cartes concernées et le tableau 12, plus de 900 Ha de *café* passeraient à d'autres usages, notamment à la protection des ressources (736 Ha) et à la protection contre les risques (54 Ha). Quelques hectares de *café* passeraient aussi à l'utilisation urbaine (144 Ha). De façon similaire, plus de 1300 Ha actuellement en pâturage deviendraient des zones de protection de ressources. De plus, quelques 80 Ha de *légumes, grains, zones en voie d'urbanisation et zones résidentielles* passeraient à la

catégorie de protection, soit des ressources ou des risques. Nous avons établi la carte correspondant aux changements d'utilisation du sol d'importance majeure (figure 139), et nous avons identifié ceux qui pourraient créer le plus de conflits (figure 140). Rappelons que la culture du *café* est devenue une activité principale dans les hauts versants et que le *Plan Régulateur Urbain* propose de la remplacer par une *zone de protection* créant des conflits d'intérêt entre l'utilisation actuelle moyennement rentable et l'utilisation proposée qui exclut toute productivité économique.

TABLEAU 12. Extrait des principales transformations d'utilisation du sol proposées dans le schéma d'aménagement de la municipalité de Sta. Ana

UTILISATION ACTUELLE	UTILISATION PROPOSÉE	SUPERFICIE
Agriculture de serre	Résidentiel haute densité	8.722
Agriculture de serre	Résidentiel faible densité	9.036
Café	Parc zoologique	5.801
Café	Aire vert	10.172
Café	Protection / risques	53.755
Café	Protection / ressources	736.278
Café	Industrie	10.171
Café	Résidentiel haute densité	33.343
Café	Résidentiel faible densité	62.496
Café	Résidentiel moyenne densité	47.863
Forêt	Résidentiel haute densité	16.812
Forêt	Résidentiel faible densité	24.842
Forêt	Résidentiel moyenne densité	24.845
Fruits	Résidentiel faible densité	28.306
Fruits	Résidentiel moyenne densité	21.552
Industrie	Résidentiel haute densité	6.988
Legumes et grains associés	Protection/risques	22.866
Legumes et grains associés	Résidentiel haute densité	42.956
Legumes et grains associés	Résidentiel moyenne densité	52.965
Pâturage	Artisanat commercial	38.451
Pâturage	Protection / ressources	1319.794
Résidentiel privé	Production agricole	36.172
Résidentiel privé	Protection / risques	13.255
Résidentiel privé	Protection / ressources	37.865
Terres détruites	Protection / ressources	28.745
Zone en voie d'urbanisation	Protection / ressources	13.433
Zone en voie d'urbanisation	Industrie	12.498

Au contraire, la conversion du *café* vers le secteur résidentiel dans la partie plane pourrait convenir aux propriétaires qui veulent profiter de revenus spéculatifs, mais elle semble moins intéressante dans une perspective socio-écologique. La conversion de la forêt vers l'activité résidentielle est discutable. Par contre, la transformation de la culture de fruits et de la culture de légumes vers les activités résidentielles est acceptable, si l'on tient compte que l'agriculture n'est pas particulièrement rentable dans ce bassin-versant. Puisque le pâturage ne

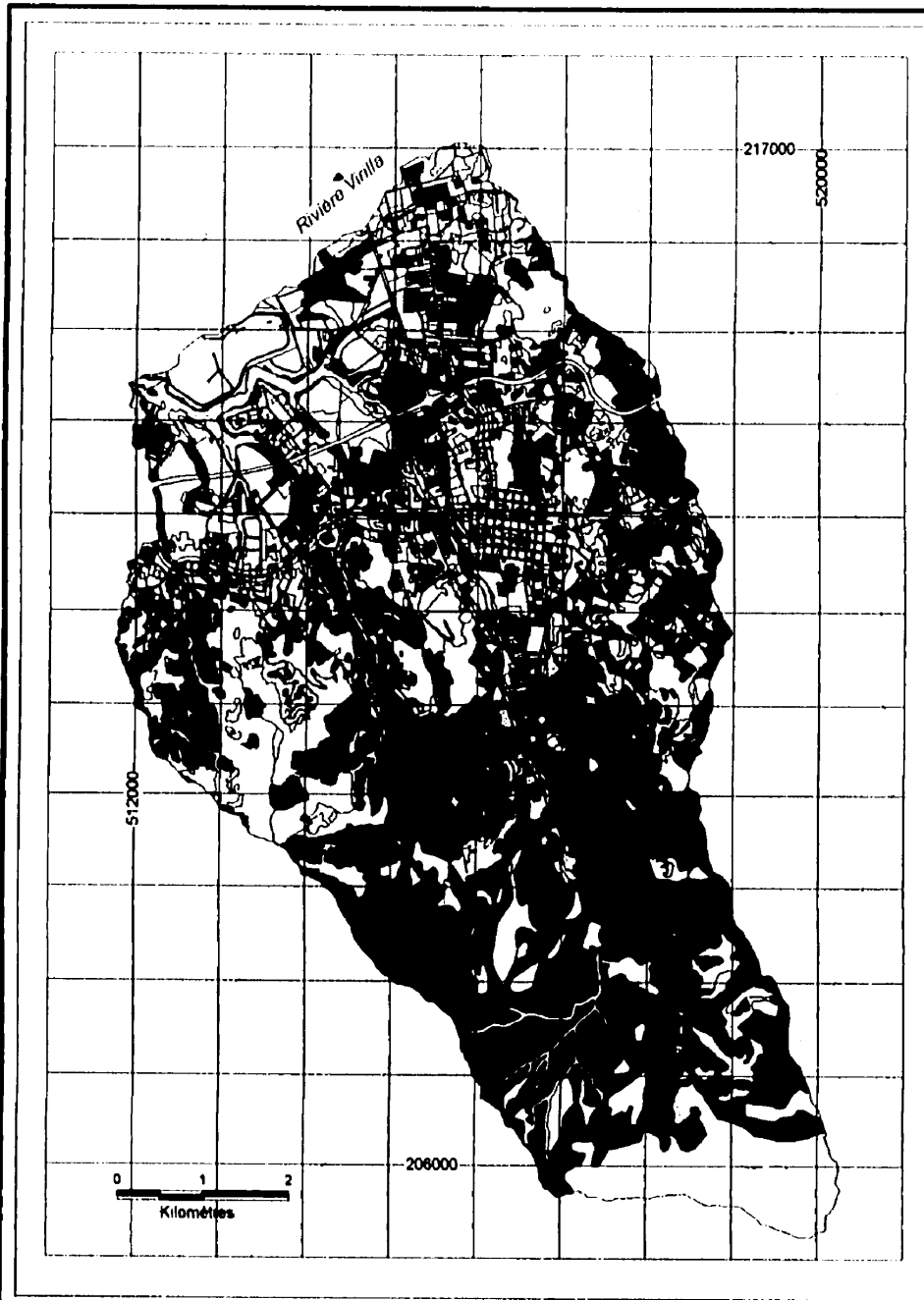









Fig. 139 Utilisation du sol actuelle et proposée (principaux changements)

- ☐ Changement mineur
- Agriculture de serre - Résidentiel haute densité
- Agriculture de serre - Résidentiel faible densité
- Café - Parc zoologique
- ☐ Café - Aire vert
- Café - Protection contre risques naturels
- Café - Protection de ressources
- Café - Industrie
- Café - Résidentiel haute densité
- Café - Résidentiel faible densité
- Café - Résidentiel moyenne densité
- Forêt - Résidentiel haute densité
- Forêt - Résidentiel faible densité
- ☐ Forêt - Résidentiel moyenne densité
- Fruits - Résidentiel faible densité
- Fruits - Résidentiel moyenne densité
- ☐ Industrie - Résidentiel haute densité
- ☐ Légumes et grains - Protection contre risques
- Légumes et grains - Résidentiel haute densité
- Légumes et grains - Résidentiel moyenne densité
- Paturage - Artisanat commercial
- Paturage - Protection de ressources
- Résidentiel privé - Production agricole
- Résidentiel privé - Protection contre risques naturels
- ☐ Résidentiel privé - Protection de ressources
- ☐ Terres détruites - Protection de ressources
- ☐ Zone en voie d'urbanisation - Protection de ressources
- ☐ Zone en voie d'urbanisation - Industrie

Source:
 Carte topographique, IGN, 1:10000, 1989.
 Image satellitaire SPOT, 1988
 Image satellitaire LANDSAT, 1997
 Plan Régulateur Urbain, Municipalité de Santa Ana

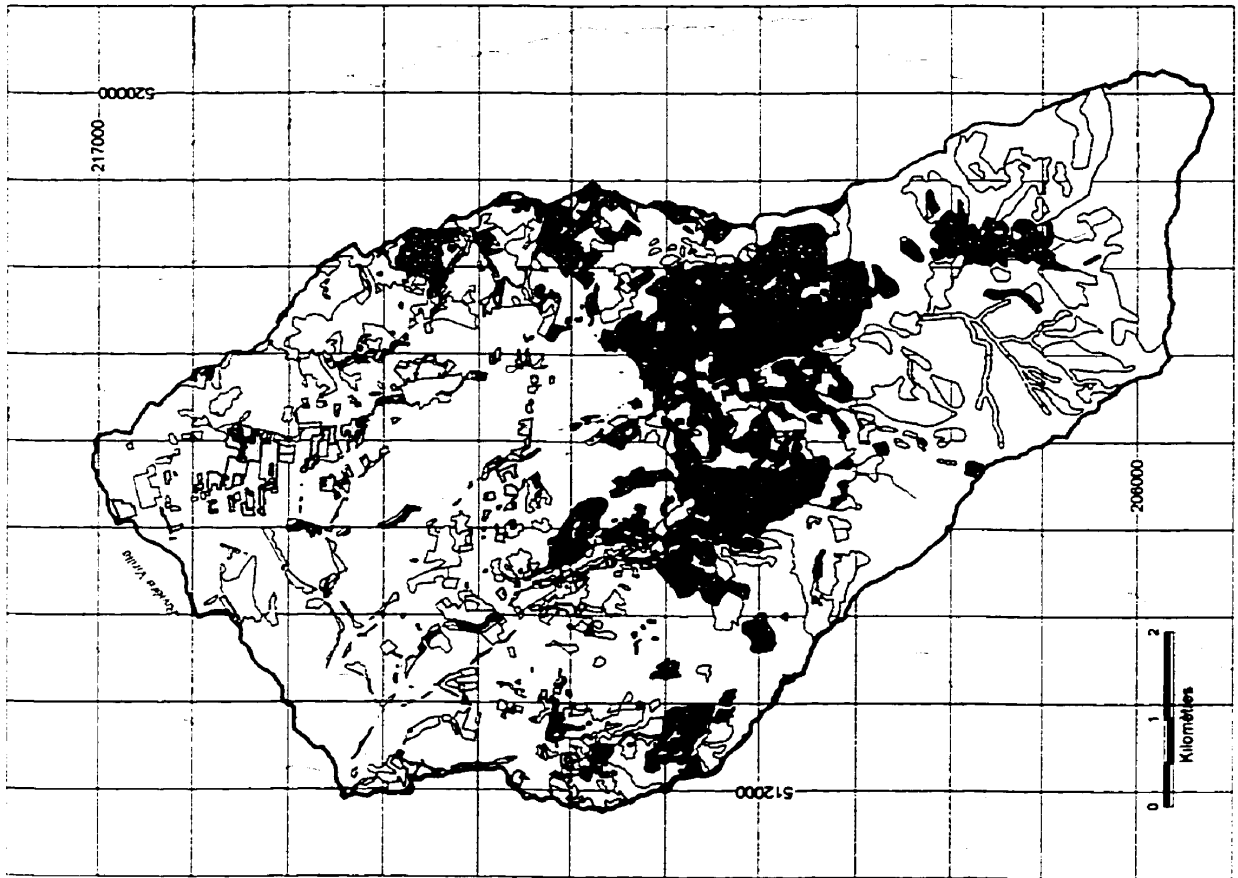
Date: janvier, 1999

Fig. 140 Utilisation du sol actuelle et proposée
(principales sources de conflit)

-  Café vers protection
-  Café vers résidentiel
-  Forêt vers résidentiel
-  Fruits vers résidentiel
-  Légumes et grains vers résidentiel
-  Pâturage vers protection
-  Résidentiel vers protection

Source:
Carte topographique, IGN, 1:10000, 1989.
Image satellitaire SPOT, 1988
Image satellitaire LANDSAT, 1997
Plan Régulateur Urbain, Municipalité de Santa Ana

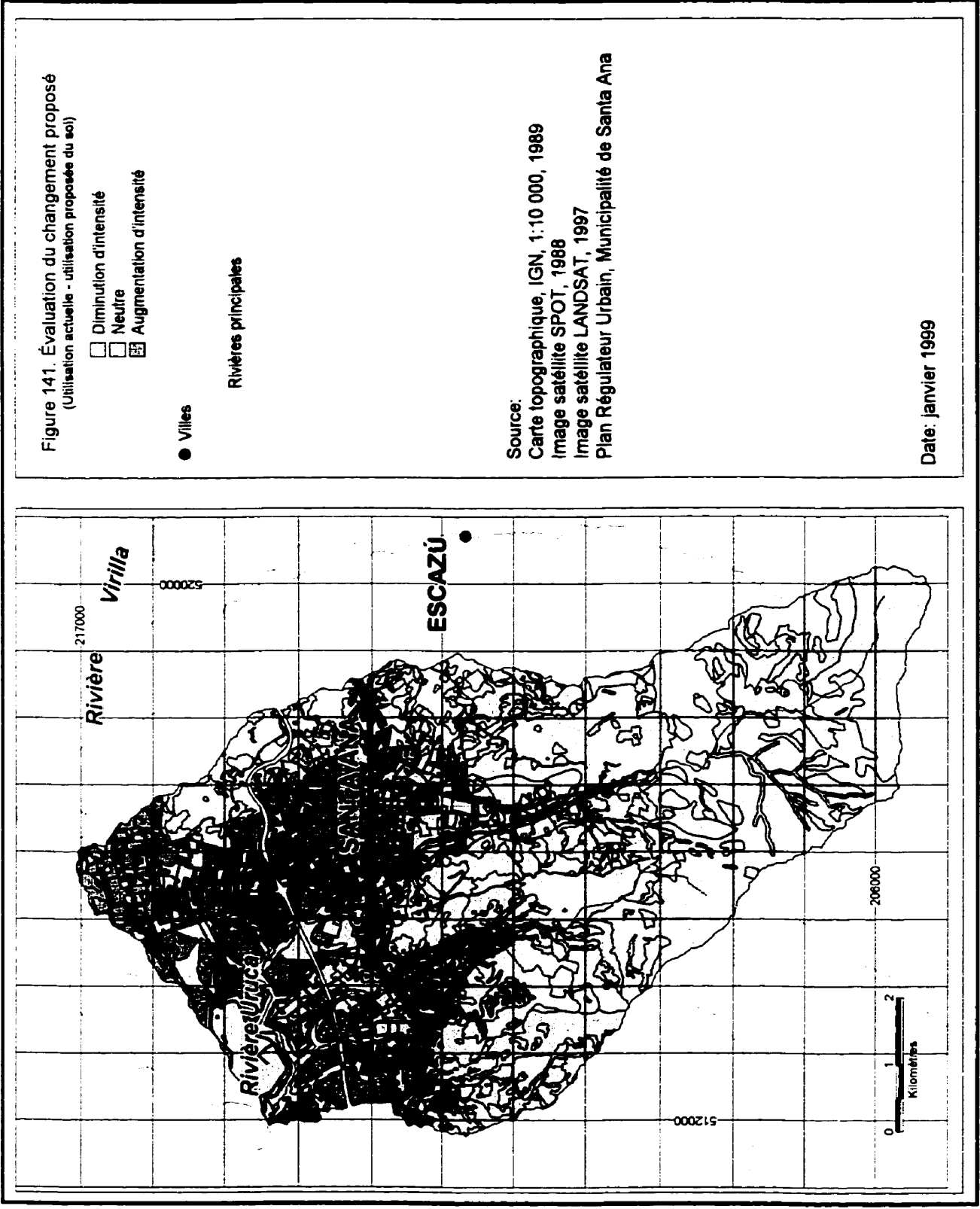
Date: janvier, 1999



produit que des revenus marginaux, la transformation proposée vers la protection semble correcte. Enfin, la transformation attendue du résidentiel vers la protection est forcée parce qu'on a détecté et cartographié une zone d'exclusion due aux risques naturels. Ceci fera, sans doute, le sujet d'une discussion animée si la municipalité prévoit des interdictions musclées ou encore l'évacuation de la zone.

Pour finir cet exercice, nous avons préparé une carte d'évaluation du changement d'utilisation du sol proposé par le *Plan Régulateur Urbain* (figure 141). Celle-ci traduit l'attribut "DT" (direction de la transformation) de la table USOXUSOPR générée par l'union relationnelle USO-INTERSECTER-USOPR. Cet attribut est une évaluation subjective – provenant de notre interprétation - des orientations positives (intensifications), neutres (changement mineur), ou négatives (diminution d'intensité) des changements d'utilisation proposés. On s'aperçoit que le schéma d'aménagement municipal a reconnu l'importance de protéger les terrains dans le haut des versants et l'opportunité d'intensifier l'exploitation des terres dans la plaine ou les terrains bas.

Alors, ce premier exemple d'exploitation du SIRS a permis d'explorer quelques-unes des relations existant entre les entités USO, USO POTENTIEL et USO PROPOSÉ. Trois tables nouvelles, USOXUSOPT, USOPTXUSOPR et USOXUSOPR ont été créées. Celles-ci permettent non seulement de relier les tables mères, comme c'est le cas le plus usuel dans les bases de données relationnelles non spatiales, mais aussi d'ajouter des qualifications particulières pour les relations. La première de ces tables-lien, USOXUSOPT a permis de valoriser les conditions d'utilisation actuelle par rapport à l'usage potentiel proposé par la méthodologie des ministères de l'agriculture et des ressources naturelles. Les zones de sur-et sous-exploitations ont été identifiées (figure 136). La deuxième table-lien, USOPTXUSOPR a été utilisée pour montrer l'effet attendu de l'utilisation proposée dans le *Plan Régulateur Urbain* par rapport à l'utilisation potentielle du sol. Les zones de dégradation et de récupération ont été cartographiées (figure 138). Enfin, de la troisième table-lien, USOXUSOPR, nous avons dérivé les figures 139, 140 et 141. La première montre les changements d'utilisation envisagés que nous avons considéré les plus importants (attribut *classe de transformation, ct*); la deuxième présente les changements d'utilisation que nous



croyons les plus conflictuels, et la troisième montre l'orientation du changement suggéré, soit vers une intensification ou une diminution d'intensité dans l'utilisation du sol.

Dans son ensemble, l'exercice montre l'utilité de la carte d'utilisation actuelle du sol au moment de définir les stratégies pour obtenir un meilleur rendement. Ceci permet de réduire les propositions inconsistantes avec la réalité existante et de minimiser celles qui poseront des conflits inévitables. En plus, des contradictions entre différentes propositions officielles pour l'utilisation du sol peuvent être révélées facilement à l'aide du SIRS.

7.1.2 Évaluation des risques naturels

Dans le bassin-versant Uruca il existe différents phénomènes que nous pourrions appeler des risques "naturels". Nous allons donc essayer d'aboutir à une *cartographie des risques naturels* en exploitant des relations déjà envisagées lors de la conception du MCD (figure 66).

Puisque nous n'avons pas de données de contamination, notamment celles de la contamination des sols et des eaux, nous avons décidé de modéliser ce phénomène à l'aide de données indirectes. Il s'agit d'un exercice simple, visant à construire un scénario schématique pour la distribution de la contamination dans les sols et qui permet en même temps de tester la flexibilité de notre MCD.

Pour arriver au but fixé (obtenir des cartes schématiques de la distribution du *risque de contamination* dans les sols et les eaux, nous avons commencé par choisir et donner des poids relatifs aux variables. Nous avons assigné des "poids" arbitraires (0 à 3) pour les diverses *classes* d'utilisation du sol. Ces valeurs constituent ce que nous appelons *l'index de contamination potentielle*, IC (entité ICUSO). En plus, nous avons supposé que le *risque potentiel de contamination*, IRC (table USXCUXPEXVER) était affecté non seulement par le IC mais aussi par la courbure et la pente du relief. Puisque les relations entre les entités utilisation du sol (USO), courbure du relief (COUREL), et pente (PENITE) sont toutes du type N:N, il a fallu faire les superpositions physiques des trois cartes pour créer les unités

territoriales élémentaires sur lesquelles serait évalué l'IRC. La courbure du relief a été classifiée en trois types (plane, concave et convexe) et des *Index de Contamination Potentielle* de 0.25, 0.60 et 0.15 ont été assignés de façon correspondante (table ICUR). L'inclinaison de la pente à son tour a été classifiée en cinq catégories (0-12, 12-35, 35-55, 55-85, 85 et plus) pour lesquelles nous avons donné des poids relatifs de 0.4, 0.30, 0.15, 0.10 et 0.05.

L'IRC est obtenu en multipliant la valeur IC de la carte d'utilisation sol par la valeur CURPC (potentiel de contamination par l'effet de la courbure du relief) et PENPC (potentiel de contamination par l'effet de la pente du relief) des cartes de courbure et pente du terrain. Ceci est illustré à la figure 142.

Notons que l'index du risque de contamination devient plus grand le long des axes de développement économique, des zones agricoles, du fond des vallées, et dans les terrains plats. Notons aussi que la superposition des trois couches d'information mentionnées a produit 51 730 polygones dont le tiers (17 775) ont des surfaces inférieures à 100 m² et sont, sans doute des artifices. Ces 17 775 polygones représentent ensemble un territoire de 588 900 m², soit, environ 1% des 56 km² du bassin.

Si nous voulons alors analyser le potentiel de contamination du sol par versant, il faudrait faire l'intersection de la couche précédente USOXCURXPENT, avec la couche des versants. Ceci d'après la relation USOXCURXPEN-INTERSECTER-VERSANT (figure 66). Comme résultat de ce long travail, nous avons créé l'entité-relation USXCUXPEXVER ayant produit 80 989 polygones dont plus du tiers sont probablement des artifices. Ensuite nous avons multiplié la valeur IRC de chaque polygone par sa surface pour effectuer une pondération relative de chaque unité de terrain.

Une image plus compréhensible du phénomène a été alors produite en additionnant la valeur des IRC par versant (*attribut* SumIRC) de l'entité VERSANT (figure 143). Pour y arriver nous avons formulé des requêtes multi-tables avec le langage SQL du logiciel *MapInfo* (figure 144).

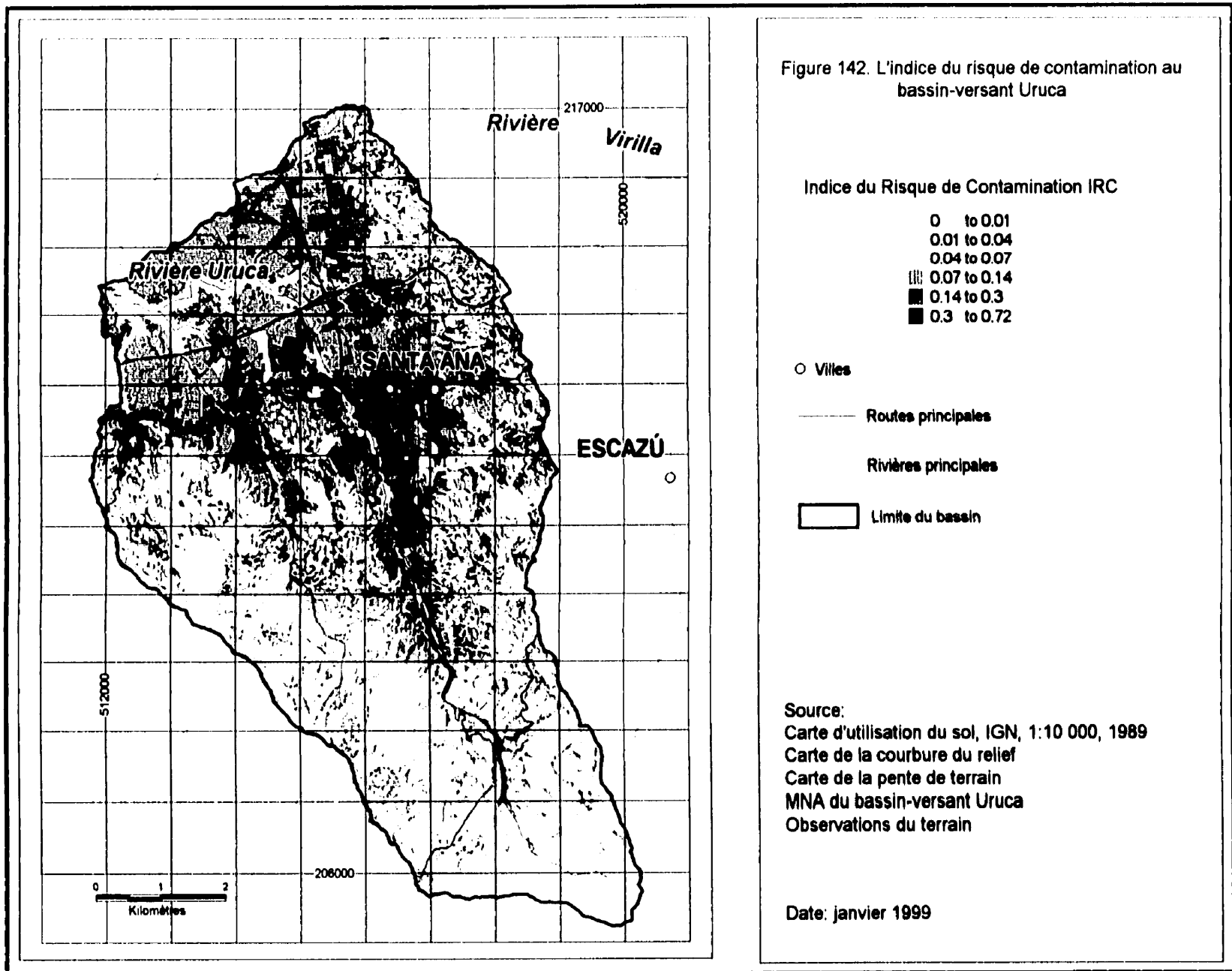
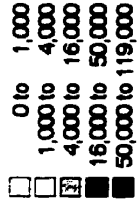


Figure 143. Indice cumulé du risque de contamination par versant. Bassin-versant Uruca.

Indice cumulé du risque de contamination (IRC par versant)



● Villes

Rivières principales

* Cet indice tient compte de la superficie de chaque versant.

Source:

Carte d'utilisation du sol, IGN, 1:10 000, 1989

Images satellites de 1986 et 1997

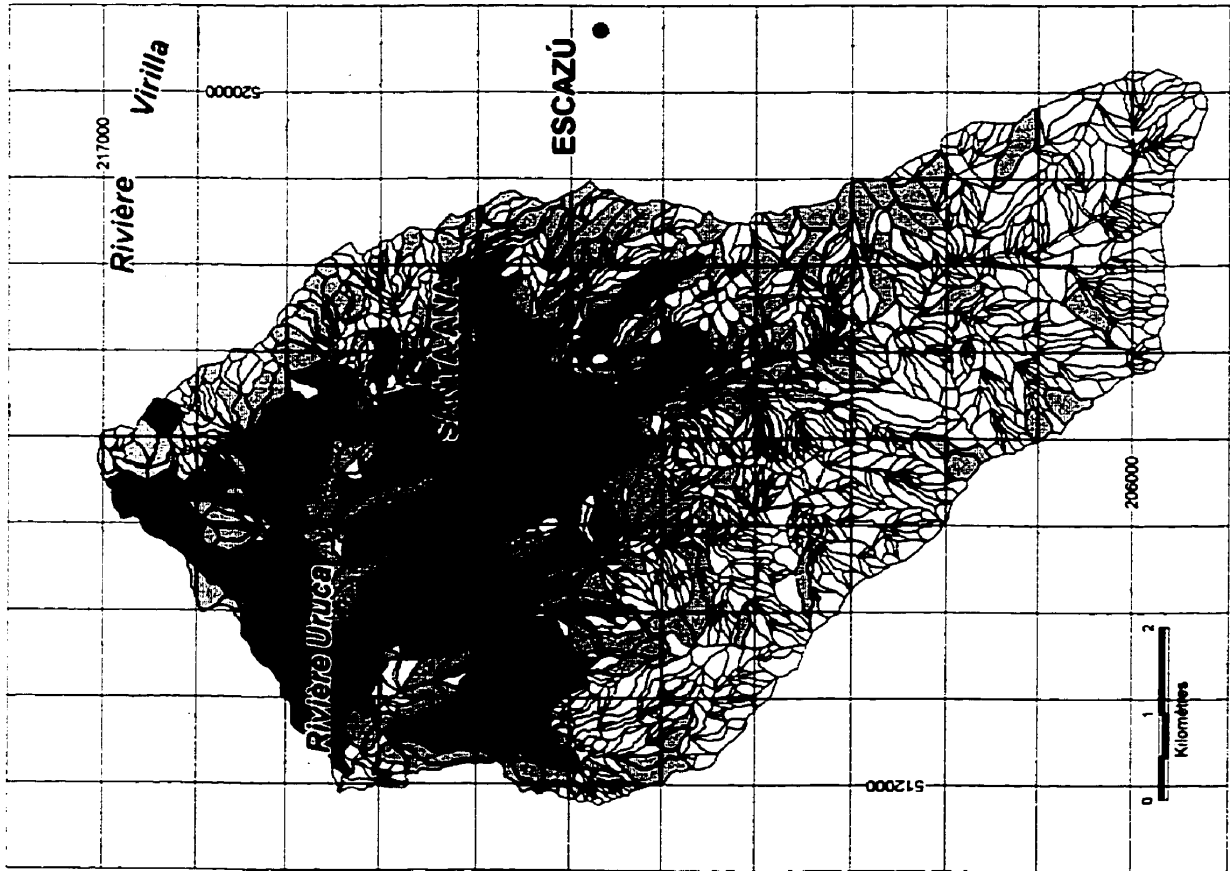
Carte de la courbure du relief

Carte d'inclinaison de la pente

MNA du bassin-versant Uruca

Observations du terrain

Date: février 1999



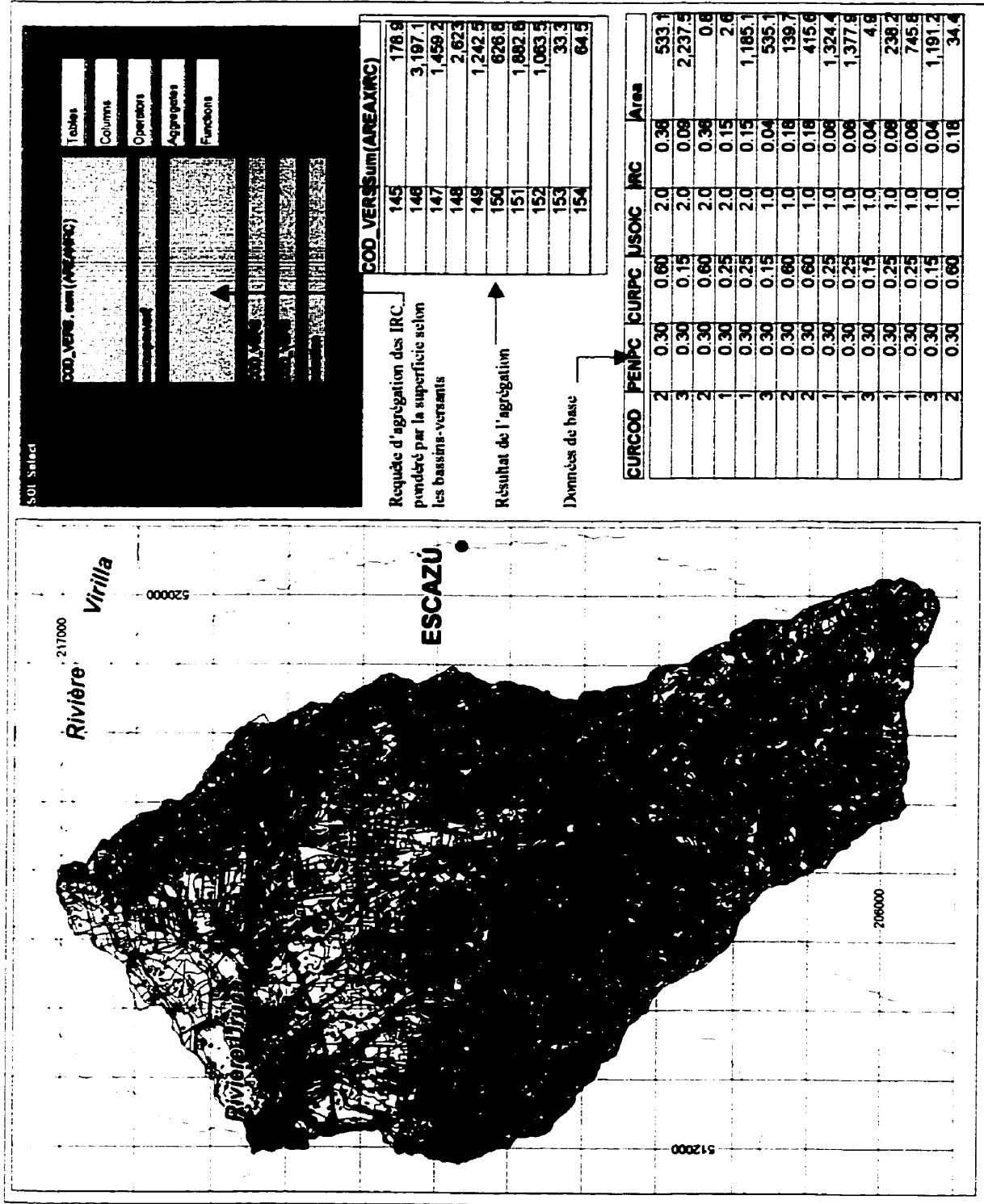


Fig. 144. Intersection produite par l'exploitation de plusieurs relations N : N qui se sont traduites en opération de superposition (*overlays*) multiples.

Il est évident que la multiplication de l'indice IRC par la surface du polygone et l'agrégation par versant allait produire une image dans laquelle les versants les plus grands sembleraient aussi les plus affectés par la contamination. Nous avons donc normalisé l'index IRC par unité de surface, et nous avons cartographié les résultats (figure 145). Le modèle obtenu semble intéressant pour l'aménagement et la gestion du territoire et pourrait être vérifié sur le terrain.

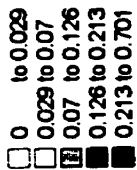
Ensuite, nous avons assumé un modèle simple dans lequel tous les contaminants du sol se déversent dans le réseau hydrographique à travers des flux superficiels et sous-épidermiques. Aucun effet de dilution n'a été considéré parce que nous n'avons pas de données de terrain. Cela nous a obligé à cumuler par simple addition l'IRC par segment fluvial (exploitation de la relation SECTFLUV - DRAINER - VERSANT, figure 66). La figure 146 montre la valeur d'IRC accumulée sur chaque section fluviale par les deux ou trois versants contributifs³. D'après les résultats obtenus, les sections fluviales proches de la ville de Santa Ana recevraient le plus grand flux de contaminants, suivies par les sections fluviales du piedmont, où on pratique une culture trop intensive par rapport au potentiel du terrain (figure 136).

Enfin, nous voulions créer une carte synthétique montrant l'accumulation supposée des valeurs IRC le long du réseau fluvial. Dans ce but, nous avons inclus dans notre MCD la relation SECTFLUV-DÉFINIR-PARCOURS qui produisait l'entité-relation RÉSEAU. Il s'agit d'une relation complexe, N : N, puisque chaque section fluviale fait partie de nombreux *parcours* et chaque *parcours* est composé, le plus souvent, de plusieurs sections fluviales. Le *parcours fluvial* (PARCOURS) a été défini comme le trajet suivi par le flux d'eau de n'importe quelle section du réseau fluvial jusqu'à son débouché dans un collecteur particulier. Les figures 147 et 148 illustrent l'utilisation du langage SQL pour ce type d'analyse du réseau fluvial. La figure 149 montre une carte d'accumulation potentielle des contaminants produits en amont de chaque section dans le réseau fluvial. Bien que les résultats semblent intéressants, l'approfondissement des études de terrain pour valider ce modèle constitue une tâche débordant le cadre de cette thèse.

³ D'après le schéma de codification dans la figure 68.

Figure 145. Indice normalisé du risque de contamination par versant dans la rivière Uruca

Indice normalisé du risque de contamination *
(IRC par versant et mètre carré)



● Villes

Rivières principales

* Les unités sont arbitraires, d'après les poids assignés lors de la simulation (voir texte). Le niveau de mesure est ordinal.

Source:
Carte d'utilisation du sol, IGN, 1:10 000, 1989
Images satellitaires de 1986 et 1997
Carte de la courbure du relief
Carte d'inclinaison de la pente
MNA du bassin-versant Uruca
Observations du terrain

Date: février 1999

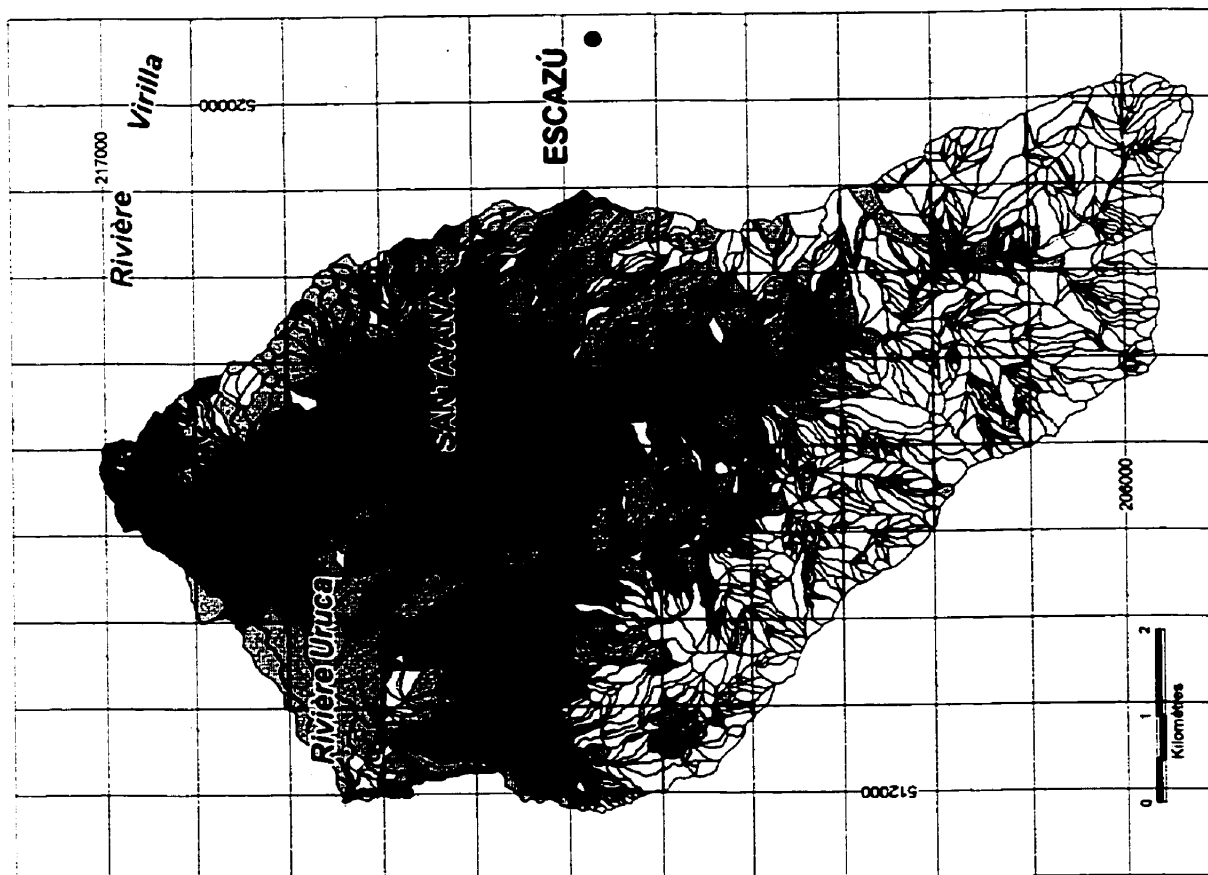


Figure 146. Indice du risque de contamination par section fluviale et versant contributif

Indice du risque de contamination*
(IRC par versant et section fluviale)

- 0 to 1,000
- 1,000 to 2,000
- 2,000 to 10,000
- 10,000 to 50,000
- 50,000 to 243,000

● Villes

— Routes principales

— Rivières principales

□ Limite du bassin-versant

* Les valeurs indiquées tiennent compte de la superficie de chaque versant, de la courbure du relief, de la pente, et de l'utilisation du sol, et ne sont pas rapportées à des échelles physiques conventionnelles.

Source
Carte d'utilisation du sol, IGN, 1:10 000, 1989
Images satellitaires de 1988 et 1997
MNA du bassin-versant Uruca
Carte du IRC cumulatif par versant

Date: février 1999

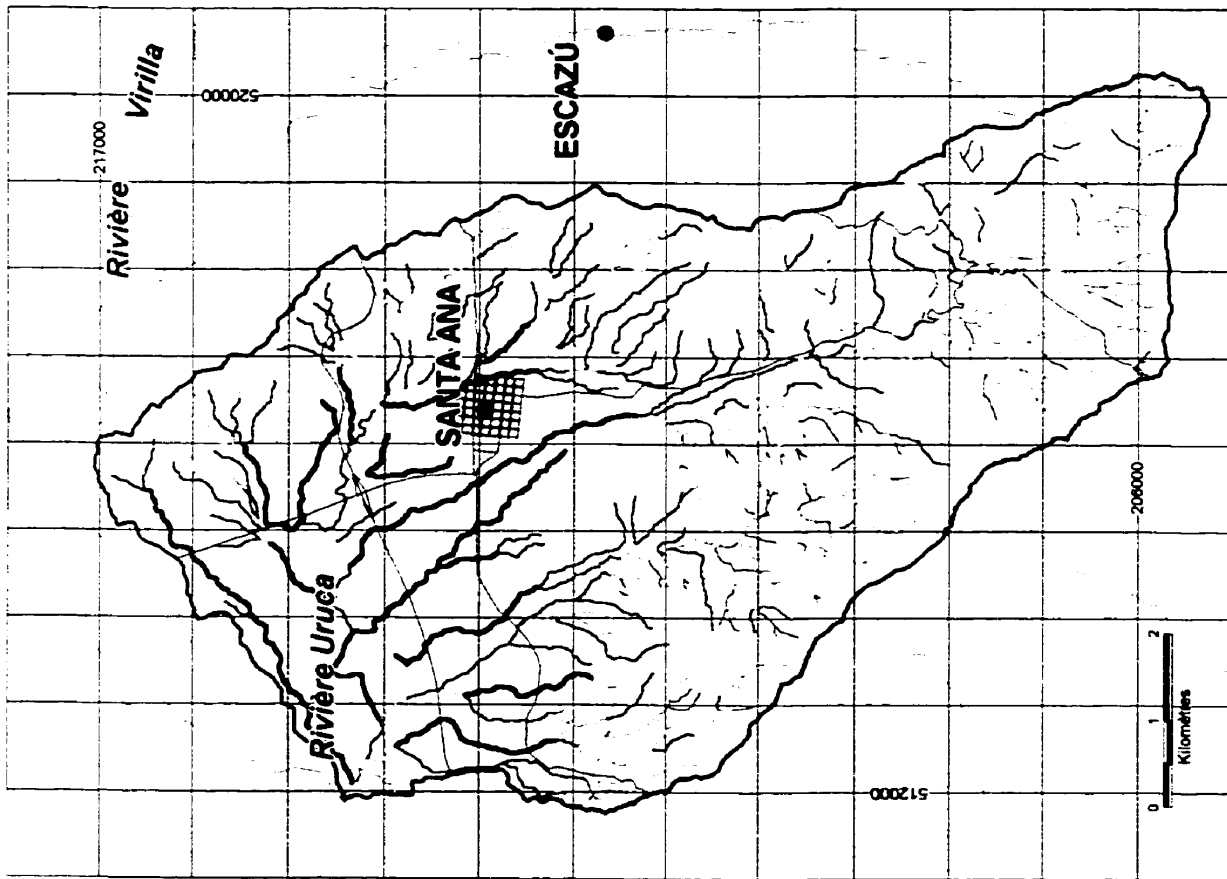


Figure 147. La sélection du réseau hydrographique à l'aide du langage SQL et d'un système de codage approprié

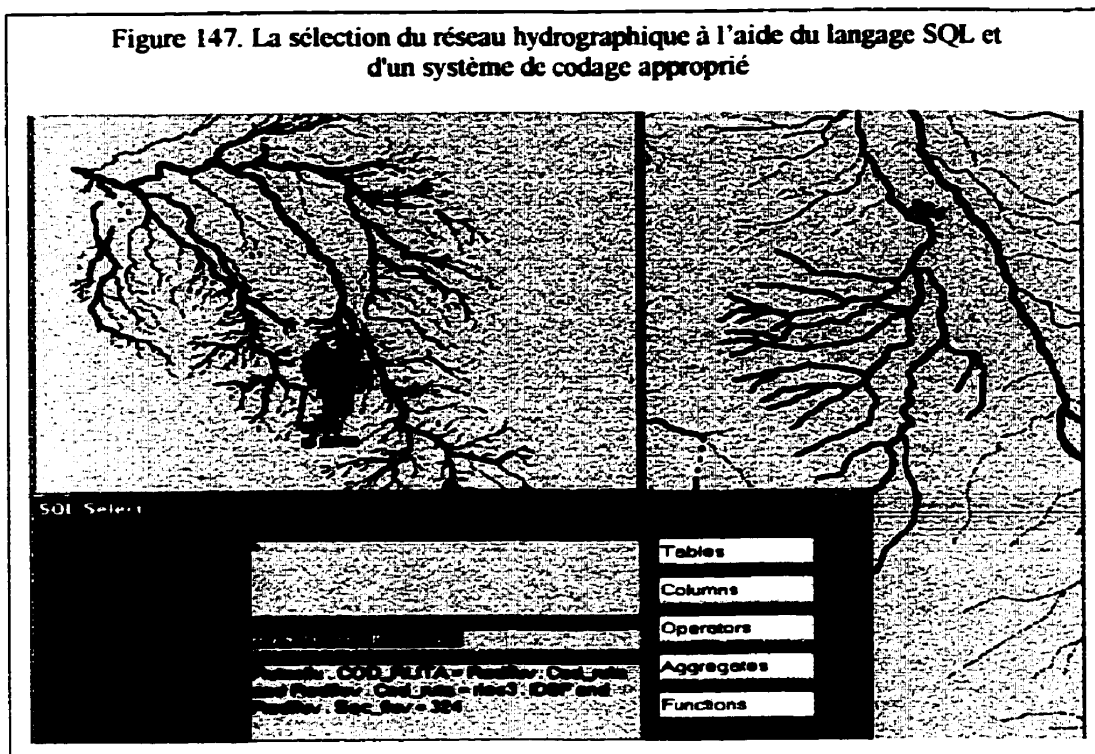


Figure 148. L'utilisation des fonctions d'agrégation avec jointure relationnelle pour additionner l'indice IRC dans le réseau hydrographique

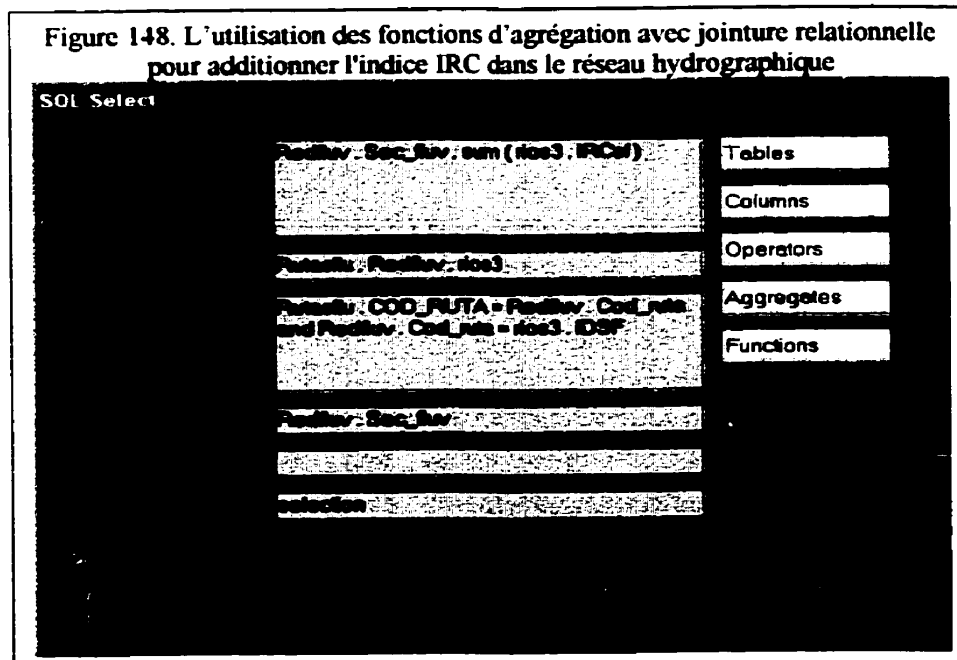


Figure 149. Indice cumulé du risque de contamination par section fluviale*

Indice cumulé du risque de contamination (IRC cumulé sur le réseau hydrographique)

- 0 to 20,000
- 20,000 to 130,000
- 130,000 to 650,000
- 650,000 to 3,160,000
- 3,160,000 to 5,770,000

● Villes

— Routes principales

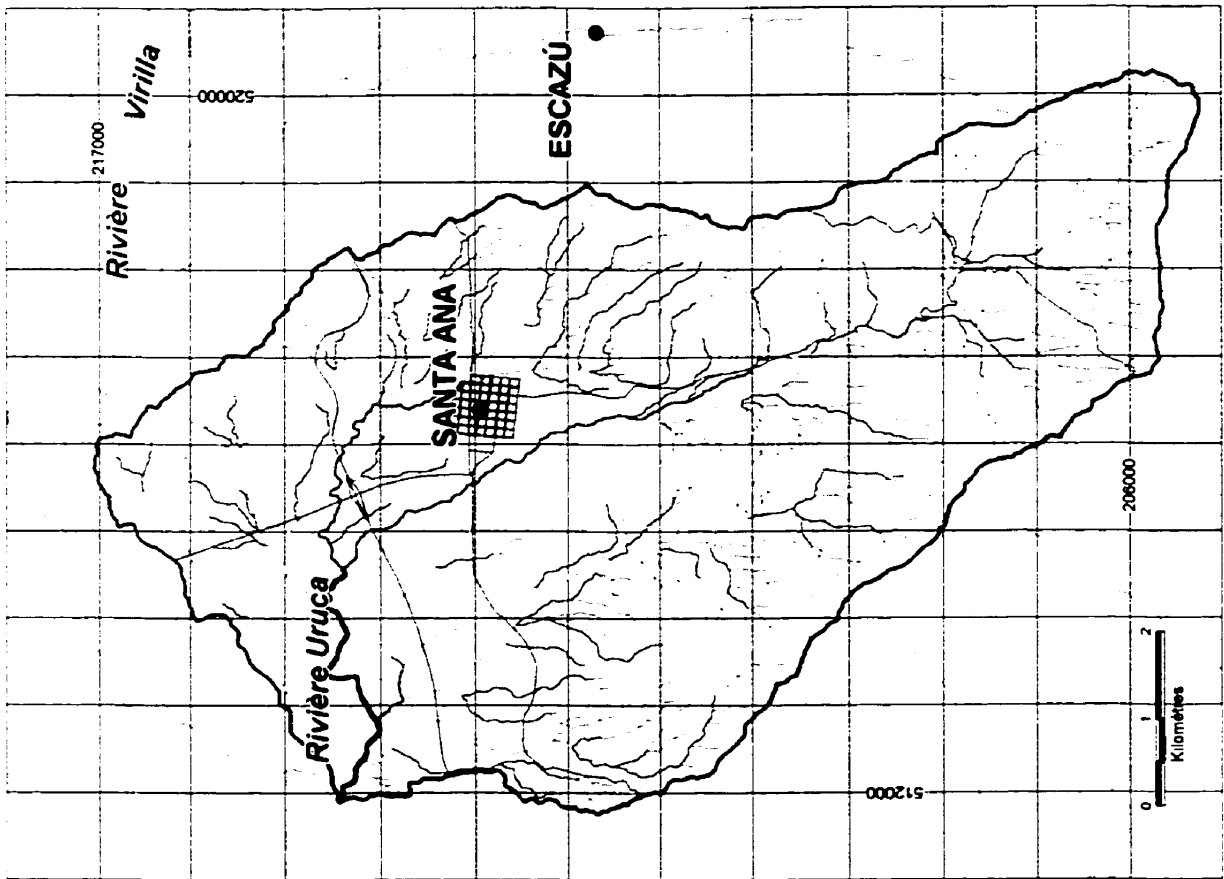
— Rivières principales

□ Limite du bassin-versant

* Les valeurs indiquées tiennent compte de l'accumulation progressive du IRC sur le réseau hydrographique lorsque la zone de drainage augmente. Ces valeurs ne sont pas rapportées à des unités physiques conventionnelles.

Source:
Carte d'utilisation du sol, IGM, 1:10 000, 1989
Images satellitaires de 1988 et 1997
MNA du bassin-versant Uruca
Carte du IRC cumulatif par versant

Date: février 1999



Pour terminer cet exercice, nous avons utilisé les principaux résultats obtenus lors de l'analyse précédente pour construire une carte générale des principaux risques et menaces naturelles présentes dans le bassin-versant Uruca (figure 150).

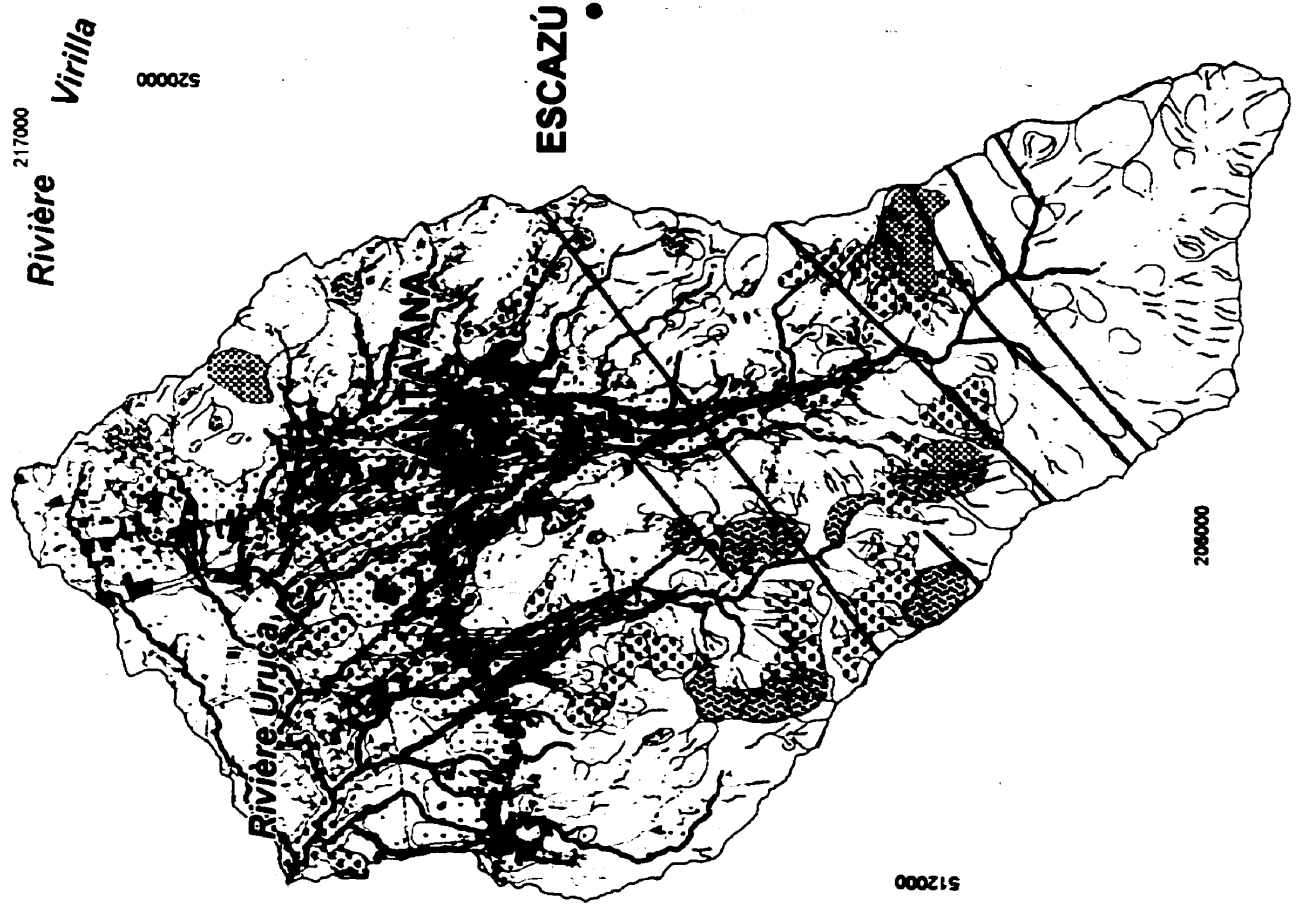
Nous y avons inclus la valeur de l'IRC (Indice de Risque de Contamination) modélisé. Pour ne pas surcharger la carte, nous n'affichons que les catégories d'IRC les plus fortes. Celles-ci, cependant, ont été re-codées du minimum au maximum. Egalement, nous montrons les plus fortes valeurs d'IRC cumulatives, re-codées, sur le réseau hydrographique. Tel que noté auparavant, l'IRC atteint son maximum dans la zone plane, où les activités agricoles sont plus contaminantes et où est concentrée la majorité de la population.

La carte montre aussi les *risques et menaces hydro-géomorphologiques*. La moindre menace correspond, dans ce cas, aux flux des colluvions localisés dans le piedmont, tandis que la menace la plus grave se rapporte aux glissements actifs. Cependant, nous voulons souligner que la menace de flux catastrophiques tout au long de la rivière Uruca paraît l'événement le plus redoutable malgré son faible taux de récurrence (le seul flux important dont on se souvienne étant celui de 1916)⁴. Rappelons aussi que de tels événements sont à la fois le résultat d'une action de déclenchement (pluie excessive, séisme, formation et rupture d'un barrage) et d'un long processus de préparation où tous les facteurs jouent ensemble (météorisation, déboisement, rupture de la pente d'équilibre lors de la construction des chemins de montagne, activation des processus mineurs d'érosion par mauvaises pratiques de l'utilisation du sol, pluies antécédentes, séismes antécédents), de sorte que la menace peut difficilement être associée en exclusivité à l'un ou l'autre des phénomènes mentionnés.

Les zones affectées par les coulées de débris récentes, ainsi que les axes offrant des conditions adéquates pour de nouveaux flux ont été identifiés. Ces événements, tel que discuté au chapitre quatre, ne sont pas, pour l'instant, trop importants dans le bassin-versant Uruca. Toutefois, si le déboisement des fonds de rivière continue, nous prévoyons un taux croissant

⁴ Des flux moins importants se sont produits "récemment", lors du passage des ouragans Gilbert et Johan. Une coulée de débris de moyenne importance s'est produite en association avec le déclenchement du glissement de Matinilla.

Fig. 150. Carte des risques et menaces naturelles



Risque de contamination du sol

- Très faible
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Risques hydro-géomorphologiques

- Flux colluviaux
- Flux catastrophiques peu probables
- Chutes par gravité
- Érosion linéaire intensive
- Inondations et coulées de débris sporadiques
- Glissements récurrents
- Glissements actifs ou recement actifs

Coulées de débris observées

IRC cumulatif sur le réseau hydrographique (IRC : Indice de risque de contamination)

- Petit
- Moyen
- Fort
- Flux de débris potentiels
- Faibles principales
- Cicatrices de glissement
- Drainage

Source: IGN (1989), photos aériennes. IGN (1989), cartes topographiques. Travail du terrain. IRC modélisé. Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Date: mars, 1989

d'incidence. Ce phénomène est appréciable dans l'ensemble du pays et a été bien décrit par Mora (1985).

Enfin, la carte montre les failles principales ainsi que les cicatrices de glissement nettes, zones où on peut s'attendre à une instabilité accrue du terrain, que ce soit par la fracturation mécanique et l'altération chimique de la roche (usuelle dans les zones de failles), ou par l'existence d'une rupture de pente (comme on le voit dans les cicatrices de glissements fraîches ou jeunes).

7.2 Aménagement du territoire et des bassins-versants : schéma d'intégration

Au Costa Rica, comme ailleurs, on parle souvent d'aménagement de bassins-versants. La popularité du concept, cependant, contraste avec la faiblesse des réflexions conceptuelles sur le sujet, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique.

7.2.1 Réflexion conceptuelle.

D'après nous, l'aménagement des bassins-versants consiste à disposer et arranger l'utilisation du territoire en tenant compte des opportunités et des contraintes spécifiques de chacune des portions de terrain que nous appelons *versants*, ainsi que du rôle de chaque versant en tant que pièce de la mosaïque spatiale qui sert de support physique et traduit le fonctionnement des sous-systèmes hydro-géomorphologique⁵ et socio-économique.

Définir les potentiels et les contraintes ainsi que les politiques d'intervention est la tâche des techniciens et des politiciens, mais la pratique de l'aménagement ne se fera en totalité que lorsque la population prendra conscience de son rôle dans la gestion du territoire. Un travail d'éducation et de sensibilisation, accompagné d'un stimulus matériel, doit être fait pour atteindre ce but.

⁵ Biophysique dans un sens plus large.

Faire comprendre et convaincre le propriétaire d'un terrain dans un versant affecté par l'érosion, que son terrain ou une partie de ce dernier sera socialement plus utile si elle demeure en friche, est à la fois un problème d'éducation et de culture, mais aussi de coûts et implique une législation pertinente.

Quoi que le niveau d'éducation soit en progrès au Costa Rica, le développement culturel semble reculer (chapitre 3). Les difficultés augmentent malgré une situation économique meilleure que par le passé, mais qui doit aussi s'adapter à la transculturation -la globalisation comprise-, ce qui provoque des besoins insatisfaits qui excèdent les progrès matériels. Ajoutons à cela les difficultés légales dans une société qui a privilégié les droits individuels sur les droits collectifs, ce qui permet tout type d'actions abusives contre les biens et les droits de la collectivité (chapitre 3).

Par ailleurs, les politiques d'aménagement doivent énoncer des directions générales et flexibles, de sorte qu'il y ait une certaine harmonie (ou équilibre) entre la direction centralisée du progrès social, essentiellement dicté par le gouvernement, et le libre choix des communautés et des individus, d'après les conditions du commerce et du marché.

Quoique les concepts de *versant* et de *bassin-versant* ne posent pas de grands problèmes théoriques, des difficultés pratiques résultent du fait que la taille des unités est assez variable. Au contraire, on constate une grande simplicité morphologique et une unité fonctionnelle.

D'après Verdin (1997:1), "*le bassin-versant prend sa place du côté des éco-régions, limites de propriété, segments de recensement, divisions politiques et zones de protection, comme unité fondamentale du paysage sur laquelle, la recherche, l'analyse, le dessin et l'administration sont basées*". -Traduction libre.

Cette affirmation nous semble très juste et nous essayerons de montrer la façon d'intégrer toutes ces approches dans un contexte d'aménagement territorial. Ceci n'empêche pas de discuter des avantages conceptuels de l'une ou de l'autre des approximations du sujet, selon que l'objectif poursuivi, consiste à optimiser le profit économique, la productivité,

l'autosuffisance, la biodiversité, etc. La possibilité d'intégrer tous ces efforts de recherche, analyse, conception et gestion fait du SIRS un outil privilégié pour l'aménagement du territoire.

7.2.2 Discussion pratique de la méthode.

L'essentiel de l'effort fait dans ce travail a porté sur la définition d'une structure et d'un système d'interrelations permettant de gérer les données et de produire de l'information utile à l'analyse et à la gestion du territoire, notamment à l'échelle locale. Nous allons maintenant réfléchir sur la façon d'intégrer cette méthode dans un contexte d'aménagement plus large.

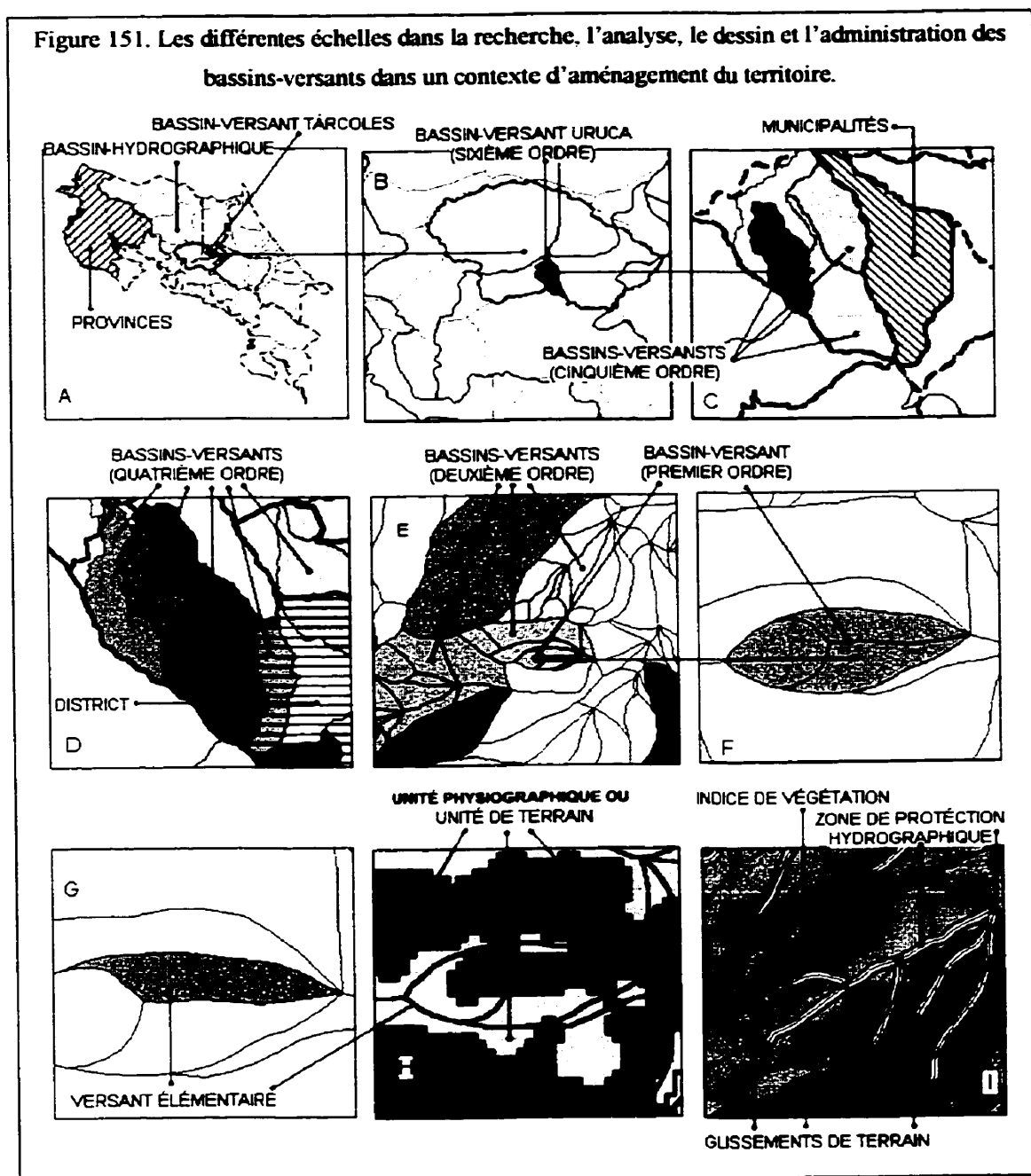
Nous avons mentionné (chapitre 3) que l'aménagement du territoire s'occupe de tracer les grandes lignes de la gestion territoriale. Celles-ci tiennent compte seulement des grands traits biophysiques (ensembles géomorphologiques, minéralogiques, climatiques et biotiques par exemple) et donnent plus de poids aux aspects globaux du profil social et économique actuel et envisagé (spécialisation de la production, capital humain, économies d'agglomération, coûts de transport, marchés, contexte international, etc.).

Quoi qu'il semble nécessaire de se détacher un peu du manque de ressources naturelles pour envisager des opportunités de développement non nécessairement déterminées par ces contraintes, il faut néanmoins en tenir compte pour éviter des investissements et des dégâts difficilement justifiables. C'est donc à ce niveau de *planification stratégique*, y compris l'évaluation des potentiels et des contraintes, que nous situons l'importance des *mega bassins-versants* dans la gestion territoriale à l'échelle nationale.

La figure 151-A illustre la division du Costa Rica en 7 provinces et les 34 bassins-versants⁶ définis par les institutions de l'état. En principe, ce sont le gouvernement central et l'administration provinciale qui devraient harmoniser les politiques du développement stratégique avec la macro-structure physique fournie par les méga bassins-versants. Toutefois, on sait bien que l'administration provinciale n'a aucun pouvoir au pays. Du même, elle n'a pas

⁶ Nous n'avons pas de méga bassins-versants étant donné la taille restreinte du pays

l'autorité politique nécessaire en matière de gestion des bassins-versant ni en matière d'aménagement régional.



Citons un exemple. Au Costa Rica, on connaît assez bien quelles sont les plaines fluvio-littorales soumises à de fortes inondations chaque année. Cependant, aucun plan de substitution d'activités économiques n'a été mis en marche et on continue à investir dans le sauvetage d'un système de production agricole qui produit autant de pertes que des gains. On

se demande alors: **peut-on aménager les bassins-versants torrentiels pour éviter les crues exceptionnelles?; quelles interventions faut-il initier ou privilégier?**

Pour répondre à ces questions, on a besoin d'un plus grand niveau de détail dans une approche structurée d'aménagement des bassins-versants (figure 151). À l'aide du SIRS, on pourrait faire des modélisations pour estimer s'il existe des moyens de réduire au maximum les dégâts produits par les inondations. En plus, on pourrait trouver les sites les plus susceptibles d'être affectés et y minimiser les investissements en infrastructure.

Lorsqu'on élabore les politiques d'aménagement à l'échelle infra-nationale, les actions envisagées et proposées sont de plus en plus influencées par les caractéristiques du territoire affecté. Ce sont, par exemple, les politiques ministérielles traditionnelles de régionalisation du territoire en matière de production agricole et forestière, en industrie, en services de santé, en éducation et sécurité, en commerce, etc. Avec un SIRS, l'analyse serait effectuée à l'échelle des bassins-versants d'ordre intermédiaire (figure 151-B).

Mentionnons cependant qu'on a besoin d'une structure administrative forte en matière de gestion territoriale à ce niveau: autorité du bassin-versant ou autorité régionale d'aménagement du territoire. En l'absence d'une telle structure au Costa Rica, nous tombons dans l'anarchie administrative où le pouvoir est trop sous-divisé et où personne n'est responsable des mauvaises décisions. L'autorité manquant et le corps légal étant faible et dispersé, nous ne pouvons que constater l'absence d'un niveau *administratif* important dans l'aménagement et la gestion des bassins-versants. Une telle structure constitue un handicap important pour atteindre un développement harmonieux et durable.

Toujours dans le cadre des actions dirigées, nous pouvons considérer les politiques locales, généralement dictées par les gouvernements municipaux. Définies dans les *Plans Régulateurs*, ces politiques sont fortement dépendentes des ressources locales, et leur planification stratégique peut être abordée à l'échelle des mini bassins-versants. C'est le niveau de la *gestion opérationnelle de responsabilité municipale*. L'exploitation du SIRS, à ce niveau, est pertinente pour presque toutes les actions d'analyse et de gestion du territoire. Les quelques

exemples développés dans ce chapitre font référence à cette échelle d'analyse et de planification territoriale.

Quelque part entre le niveau *administratif* et la *gestion opérationnelle à l'échelle municipale*, on devrait insérer la *planification physique*. Celle-ci n'existe pas, non plus, au Costa Rica. Chaque institution gouvernementale fait des études particulières selon ses besoins et ses intérêts, mais aucune étude intégrée d'aptitude n'est faite pour l'ensemble des bassins-versants.

En dessous des politiques municipales, nous trouvons les actions *d'intervention et d'aménagement* faites par les organisations communautaires oeuvrant à l'échelle des districts municipaux. Ce sont aussi des actions dirigées mais d'application locale et ponctuelle. La communauté participe, généralement avec sa force de travail, dans l'exécution des tâches élémentaires. Ces dernières comprennent des actions telles que la construction d'aqueducs ruraux, l'ouverture de nouvelles voies, la mise en place des égouts, la construction des terrains de jeux, etc. Ces actions affectent un milieu local et sont compatibles avec l'échelle des versants élémentaires et des micro bassins-versants (figure 151-E y 151-F).

En ce qui concerne la gestion privée du territoire, les actions se placent le plus souvent à l'échelle de la ferme. Le choix des interventions, notamment la stratégie d'utilisation du sol, est du ressort exclusif du propriétaire du terrain, bien qu'il soit soumis à certaines réglementations et interdictions, notamment dans l'espace urbain. C'est le niveau de la *planification et de l'intervention privée*, lequel est fait en cherchant le profit individuel plutôt que le bien-être collectif.

Pour le bassin-versant Uruca, nous avons un territoire totalisant de 5603 Ha comprenant 1756 versants. Ceci donne une taille moyenne de 3.2 ha/versant. Tenant compte que la quantité de propriétés⁷ dans le territoire municipal est de 10000, nous pouvons estimer qu'il existe 8500 propriétés dans le bassin-versant, c'est-à-dire une taille moyenne de 0.66 Ha/propriété. Ceci montre que l'échelle du versant est dans le même ordre de grandeur et est très appropriée pour décrire et intégrer la gestion privée dans un contexte d'aménagement territorial. Certaines

⁷ Au moins celles recensées dans les chiffres officiels de la Municipalité de Santa Ana.

distorsions dans ce modèle sont introduites dans le cas des grandes propriétés. Les plantations de bananes, par exemple, couvrent de grandes aires territoriales (plusieurs niveaux dans la structure hiérarchique des versants) et montrent une forte "immobilité" en ce qui concerne l'agencement des activités productives⁸. Dans ces derniers cas, cependant, l'intégration des actions privées dans un contexte d'aménagement de bassins-versants, peut se faire aux niveaux hiérarchiques supérieurs.

Autant les propriétaires que les planificateurs peuvent bénéficier d'une approche d'aménagement intégrée par bassin-versants, comme celle que nous proposons ici. Les unités "naturelles" ou physiographiques du terrain (figures 151-H et 36), sont par exemple des unités de planification mais aussi des documents de base pour décider, en ajoutant les critères économiques, entre différentes options d'utilisation du sol concurrentes. Les contraintes, qu'elles soient imposées par des restrictions légales ou par des limites bio-physiques (figures 151-I et 152) viennent compléter cet encadrement opérationnel de l'aménagement et de la gestion du territoire.

7.2.3 Vers un approche universelle d'aménagement et de gestion des bassins-versants.

Reprenant le travail de Pfafstetter (1989), Verdin (1997) a proposé un *système pour la codification topologique des bassins-versants et des réseaux hydrographiques à l'échelle planétaire*. A l'aide d'un Modèle Numérique d'Altitudes pré-traité⁹ suivant la stratégie de Jenson et Domingue (1988), il montre la possibilité de construire de façon automatisée les objets représentant les versants ainsi que le réseau fluvial. Puis, un schéma simplifié de codage hiérarchique basé sur le critère d'aire de drainage, permet de décrire les relations topologiques fondamentales. La distinction entre *bassins*¹⁰ et *interbassins*¹¹ et le calcul au préalable de la superficie de drainage de chaque section du système fluvial constitue la base de son approche.

⁸ Une telle situation n'existe pas dans le bassin-versant Uruca, mais dans d'autres régions du pays.

⁹ Pour éliminer les fausses dépressions produites par interpolation.

¹⁰ L'aire drainée par une rivière tributaire.

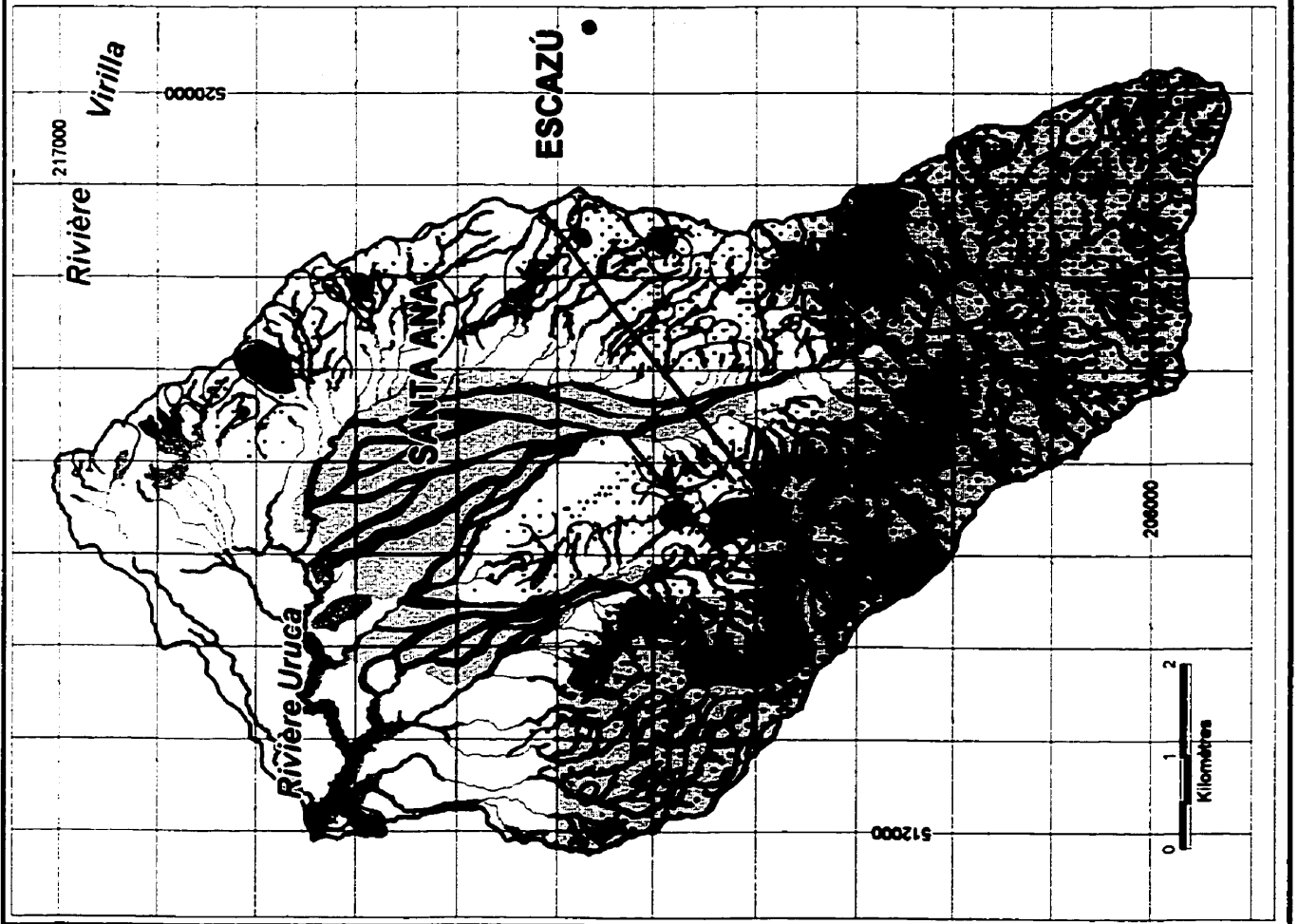
¹¹ L'aire drainée directement par la section du collecteur général située entre deux rivières tributaires.

Fig. 152 Contraintes au développement socio-économique

- Pentes limitantes**
- De 35% à 55%
 - De 55% à 65%
 - ◐ Plus de 65%
- Ménaces géomorphologiques**
- ▨ Couloirs de colluvions
 - ▩ Couloirs catastrophiques peu probables
 - ▧ Chutes par gravité
 - ▦ Erosion linéaire intensive
 - ▥ Inondations et coulées de débris sporadiques
 - ▤ Glissements réactivables
 - ▣ Glissements actifs ou récemment actifs
- Autres**
- Failles principales
 - Couronnes de glissement
 - Drainages, inondable
 - Protection de rivières
 - ▨ Protection de ressources naturelles
 - Aucune restriction identifiée

Source:
 Molina (1990), thèse IGN (1989),
 photos aériennes. MINAE (1998),
 carte des zones de protection.
 IGN (1989), cartes topographiques.
 Modèle Numérique de Terrain.

Date: mars, 1999



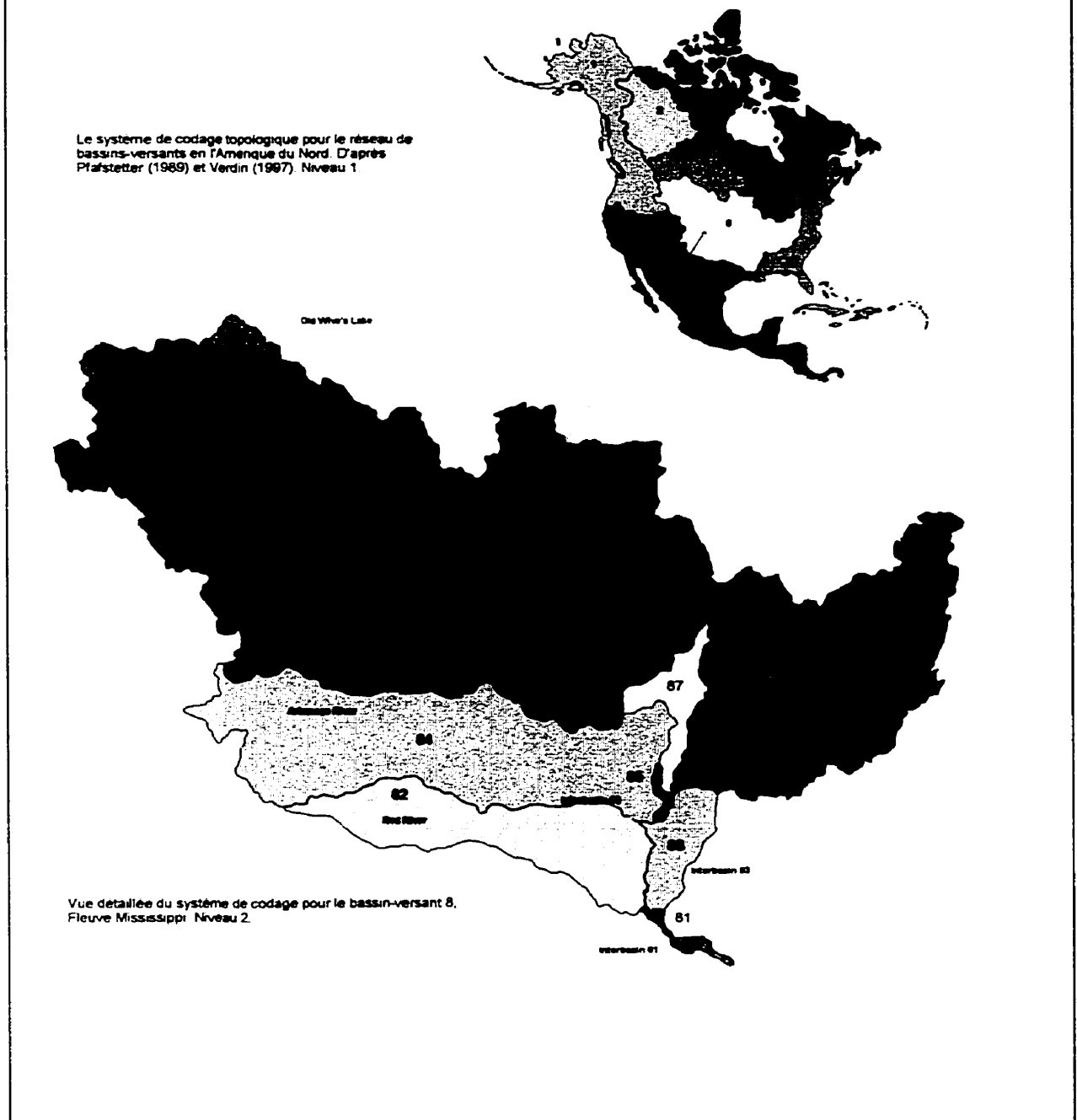
Son approche va du général au particulier, commençant par les bassins et interbassins d'échelle continentale (figure 153), puis subdivisant et re-codifiant à l'intérieur de chacun des grands ensembles. Pour chaque niveau hiérarchique, on doit être capable de sélectionner les quatre plus grands bassins, pour lesquels on assigne les codes 2, 4, 6 et 8 allant de l'embouchure vers l'amont, ainsi que les cinq interbassins, codés 1, 3, 5, 7 et 9 dans la même direction. Pour les bassins endoréiques, on assigne le code 0.

Grâce à un tel système de codification, on peut facilement déterminer les sections fluviales, les bassins-versants et les interbassins qui sont en amont ou en aval de n'importe quel autre. Ceci constitue la porte d'entrée pour toute analyse du système hydrographique ainsi que pour la construction de scénarios en aménagement et en gestion des bassins-versants.

L'approche du SIRS suivie dans notre thèse, et conçue de façon complètement indépendante du travail fait par Pfafstetter et Verdin, a aussi mis l'accent sur la possibilité d'établir ce type d'analyse topologique permettant de balayer l'ensemble du réseau hydro-géomorphologique à la recherche de connaissances sur la structure, l'organisation et la fonctionnalité spatiale de toutes les propriétés distribuées dans les bassins. Il s'agit d'une propriété fondamentale pour un SIRS spécialisé dans l'aménagement de bassins-versants.

Contrairement à la stratégie de codage hiérarchique proposée par Pfafstetter et Verdin, nous avons décidé de construire la hiérarchie moyennant une description explicite des *parcours fluviaux* (un *parcours* pour chaque section jusqu'à son débouché), puis reliant les sections fluviales avec leurs versants contributifs. Notre approche est, évidemment, beaucoup plus laborieuse mais elle est ouverte, ne demande pas de connaissances préalables de la structure globale et permet d'intégrer des travaux faits par des chercheurs indépendants dans des bassins-versants quelconques. Elle a été conçue pour aller du particulier au général, des micro bassins-versants jusqu'aux méga bassins. Une question se pose donc, y a-t-il moyen de relier notre approche avec la stratégie de classification et de codage proposée par Pfafstetter et Verdin?

Figure 153. Système de classification et codage des bassins-versants et réseau hydrographique
(D'après Pfafstetter, 1989 et Verdin, 1997).



Bien que notre travail n'ait pas été conçu pour être intégré avec un tel système, nous croyons que sa flexibilité devrait permettre une intégration éventuelle dans ce cadre global. Des recherches plus approfondies en ce sens restent à faire. Pour cette recherche, nous nous sommes contentés de recoder notre réseau d'après le système global proposé par les chercheurs mentionnés (figure 154). Pour ceci, nous avons utilisé des requêtes simples, tel qu'illustrée dans la figure 155. Puisque nos versants sont les unités structurales élémentaires du réseau hydrographique, aucune édition des objets cartographiques n'a été nécessaire pour faire cette conversion. On peut donc utiliser notre approche, puis l'intégrer dans une structure planétaire conforme aux travaux de Pfafstetter et Verdin.

En conclusion, nous avons montré dans ce chapitre, qu'on pourrait se servir du Modèle Conceptuel de Données (MCD) pour conduire des essais de modélisation d'une façon ordonnée. Pour ce faire, nous pouvons exploiter les relations 1 : 1 ou 1 : N directement, ou encore les relations N : N, qui impliquent souvent un processus de superposition (*overlay*) des objets graphiques de deux ou de plusieurs thèmes.

Nous avons montré aussi une particularité des relations N : N lorsqu'on travaille dans le domaine des SIRS. *Dans les SIRS, l'opération JOIN (union relationnelle) est faite principalement pour créer une table mixte qui peut être enrichie avec des attributs complémentaires à ceux qui sont hérités des entités parents. Dans les bases de données non spatiales, cependant, cette opération a pour but principal de relier les deux entités-parents pour exploiter leurs attributs simultanément. De plus, dans les SIRS, il est très fréquent que l'entité-fils produite par une relation N : N soit, à son tour, mise en rapport N : N avec une troisième entité et ainsi de suite. Connaître les principes de la modélisation de données et suivre soigneusement les règles de normalisation des MCD permet, à ce moment là, d'éviter les redondances et d'optimiser la performance dans l'exploitation d'une base de données géo-relationnelle.*

En troisième lieu, nous donnons quelques exemples d'exploitation du langage d'interrogation structuré ou SQL, qui facilite la modélisation et la cartographie thématique de synthèse.

Figure 154. Classification et codage du système de bassins-versants de la rivière Uruca suivant l'approche de Pfafstetter, 1989 et Verdin, 1997.

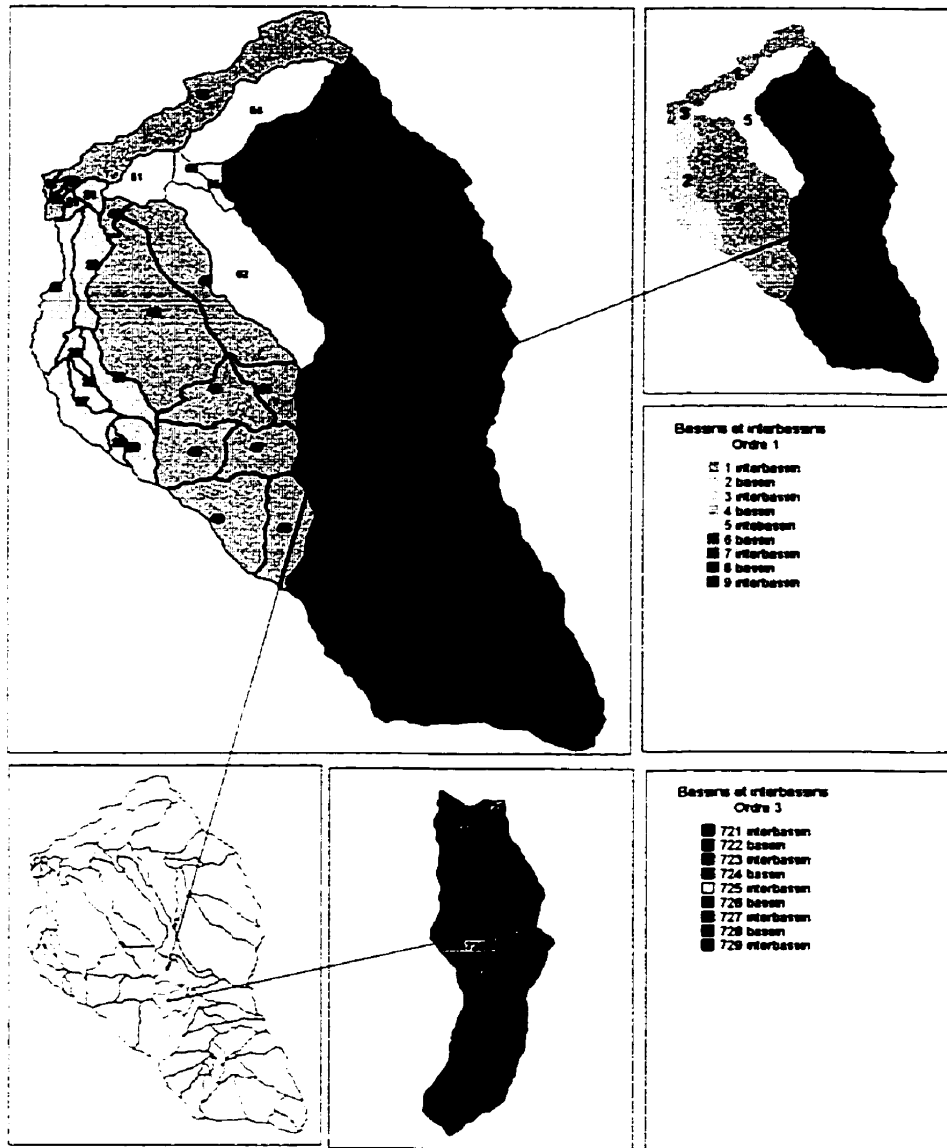
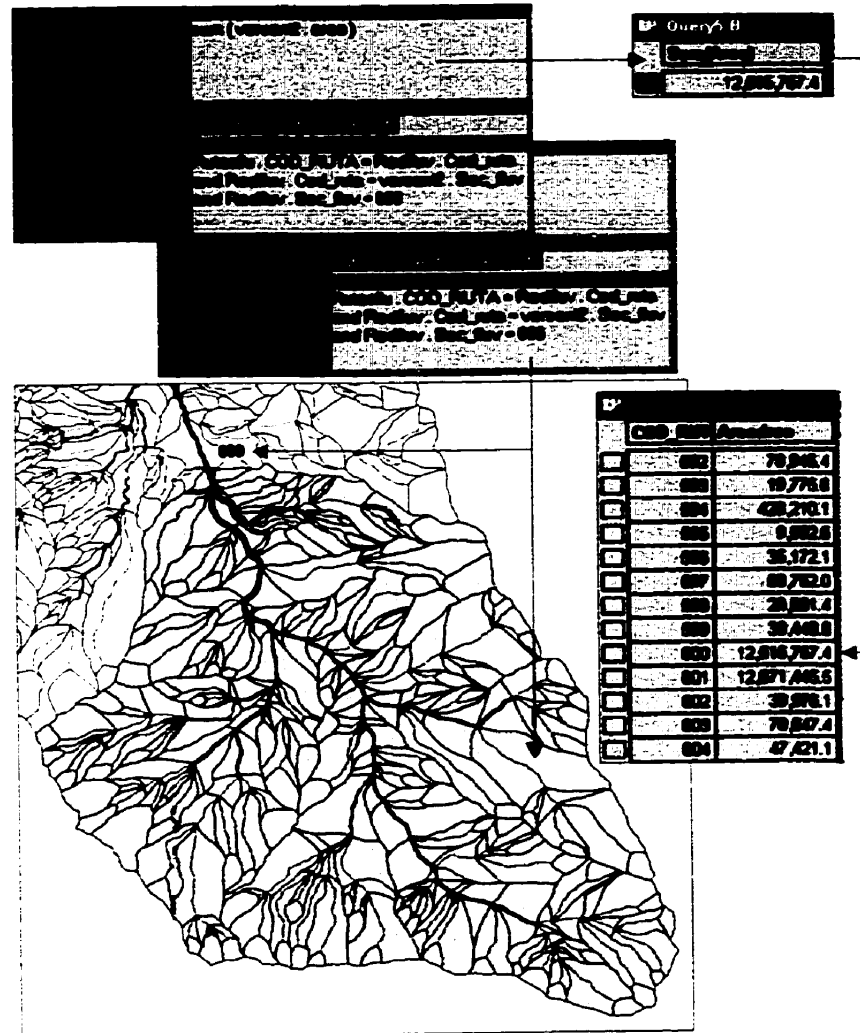


Figure 155. Exploitation de la base de données permettant d'adapter notre système de codage à celui proposé par Pfafstetter, 1989 et Verdin, 1997.



Dans une perspective opérationnelle, certaines contraintes du mode vectoriel ressortent. La première concerne l'atomisation excessive du territoire lors du processus de superposition des thèmes. Par exemple, la superposition de quatre couches a produit environ 100 000 polygones dont une proportion élevée semble dénuée de signification physique. La façon de résoudre ce problème est déjà discutée dans la littérature (Smith et Campbell, 1989; Burrough, 1986). La deuxième consiste en une perte d'information lorsqu'on doit classer les données afin de simplifier la structure spatiale de chaque thème. Dans ce contexte, le mode matriciel peut paraître avantageux¹².

Les exercices pratiques ont montré l'utilité des SIRS pour l'évaluation des *plans d'affectation du sol*, que ce soit pour choisir entre des scénarios alternatifs, ou pour modéliser l'ampleur des transformations proposées. De plus, nous avons produit deux cartes qui s'avèrent importantes pour l'élaboration des stratégies de développement socio-économique du bassin-versant Uruca. La première, celle des *risques et menaces naturelles* donne une image de la répartition spatiale des phénomènes potentiellement dangereux. Plusieurs autres sources de danger, notamment les dangers industriels, n'ont pas été évalués. Une véritable carte de *risques* devrait les inclure. La deuxième, c'est-à-dire la carte des *contraintes au développement*, présente une image de la distribution spatiale des principales contraintes que la "géographie" impose à la libre occupation de l'espace. D'autres contraintes, éducationnelles, sociales, culturelles, etc., déterminent aussi le développement socio-économique. Une étude plus exhaustive était possible mais débordait largement les objectifs de cette thèse.

¹² L'approche suivie par la famille de logiciels ArcView et extensions (Annaliste Spatial, Annaliste 3-D. etc.) permettant une intégration assez rapide entre les produits et fonctionnalités du matriciel et du vectoriel semble prometteuse de nos jours. La fusion des deux systèmes fait encore l'objet de recherche et pose plus de problèmes opérationnels que conceptuels.

7.3 Références bibliographiques du chapitre

- BURROUGH, P.** 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford, Clarendon Press. Chap 6: 103-135 pp.
- MOLINA, F.** 1990. Deslizamiento del Alto de Tapezco. Santa Ana, Provincia de San José, Costa Rica. Tesis para optar al grado de Licenciado en Geología. Escuela Centroamericana de Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- MORA, S.** 1985. Las laderas inestables de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. (3):129-161.
- MORA, S.** 1989. Extent and social-economic significance of slope instability in Costa Rica. Dans: Landslides: Extent and Economic Significance. Brabb et Harrod (eds):93-99.
- SMITH, J. et CAMPBELL, I.** 1989. Error in Polygon Overlay Processing of Geomorphic Data. *Earth Surface Processes and Landforms*. 14:703-717.
- PFAFSTETTER, O.** 1989. Classification of hydrographic basins: coding methodology. Unpublished manuscript. Cité par: Kristine Verdin (1997), *A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks*.
- VERDIN, K.** 1997. A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks. <http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/hydro/>

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS

En intégrant certains concepts reliés à la conception des bases de données ainsi que les éléments fondamentaux de l'approximation par *prototypage*, nous avons développé une application de SIRS pour l'aménagement des bassins-versants. La taille et la complexité de ce SIRS sont apparues gérables avec la technologie actuelle et la base conceptuelle repose sur une approche *mixte*, soit, moins complexe que le cadre conceptuel global comptant des centaines ou des milliers de relations –caractéristique des grands projets de base de données-, mais plus structuré que l'approche empirique qui caractérise souvent les SIRS élaborés dans les pays ayant une expérience limitée de la géomatique.

Selon cette approche, le SIRS n'est pas seulement un outil pour faire de la cartographie -ce qui est la pratique dominante dans les pays sous développés -mais un instrument puissant pour la gestion des bases de données à référence spatiale (BDRS) et pour l'analyse spatiale- l'une des approches en cours d'implantation dans les pays développés.

En partie, cette opposition dans les approches des pays développés et non développés résulte du fait que dans les derniers, nous ne disposons pas de beaucoup de données en format numérique et que l'effort principal est dirigé vers son acquisition. Cette thèse en

témoigne: toutes les données utilisées, sauf l'image satellite, étaient à l'origine en format analogique (imprimé) ou n'existaient pas du tout.

Le SIRS développé est enrichi aussi par l'utilisation des *formalismes de modélisation conceptuelle et logique des bases de données* (MCD et MLD). Il s'agit d'une contribution et d'une adaptation des stratégies de conception de bases de données traditionnelles vers une application géographique. Ceci constitue un champ de recherche dans les pays développés et une nouveauté pour les applications de SIRS dans la plupart des pays en voie de développement. Cette approche complète la *modélisation des traitements* qui est plus répandue.

L'application de notre modèle de SIRS pour l'analyse de la problématique socio-environnementale du bassin-versant Uruca (application prototype) a permis de montrer la flexibilité du MCD élaboré ainsi que la possibilité de créer des modèles et d'évaluer des scénarios d'intervention en utilisant de simples requêtes SQL.

Une carte des *risques et des menaces naturelles* et une autre des *contraintes au développement socio-économique* ont été élaborées. Elles montrent la fragilité du milieu montagneux dans la moitié sud du bassin-versant et l'exposition dangereuse dans la partie centrale, le long des rivières Uruca et Oro. La divergence entre l'utilisation actuelle du sol et les diverses utilisations proposées a montré la puissance des SIRS pour créer et analyser des scénarios d'intervention. Un exercice de modélisation de contamination a montré la flexibilité des SIRS exploitant des bases de données géo-relationnelles.

8.1 Sur le plan conceptuel

Les SIRS sont un outil essentiel pour la gestion de données localisées dans les projets d'aménagement territorial et d'aménagement de bassins-versants.

Grâce à un développement d'approches conceptuelles robustes, l'élaboration des SIRS est passée de l'empirisme et des applications *ad hoc*, vers les approches plus rigoureuses basées sur des démarches systématiques, sémantiques et intégratrices (modélisées). Ceci n'est cependant pas d'usage courant dans les pays peu développés où il reste beaucoup à faire dans ce domaine.

L'élaboration des MCD et MLD ainsi que la documentation du SIRS à l'aide d'un dictionnaire de données enrichissent énormément les applications de SIRS obligeant à faire une réflexion approfondie sur les besoins, la disponibilité et les relations entre les thèmes et les données correspondantes avant la mise en marche du processus d'acquisition et de transformation en format numérique.

Les formalismes *entités-relations* utilisés depuis longtemps pour la modélisation de bases de données traditionnelles ont été adaptés¹ avec satisfaction pour la modélisation des données spatiales.

Les relations N : N donnent lieu à des opérations de superposition qui produisent des informations croisées conservées dans des *tables de lien*. Nous rappelons que lorsqu'il s'agit d'une superposition géométrique, cette *table de lien* doit garder non seulement les identifiants des deux tables parentes, comme c'est le cas pour les bases de données traditionnelles, mais aussi les *objets spatiaux* résultant de l'intersection. Bien que ceci introduise de la redondance dans la base de données (effet souvent indésirable selon les principes de la normalisation), elle demeure la meilleure façon de réaliser les calculs géométriques conjuguant plusieurs tables.

Dans les SIRS, les *tables de lien* sont souvent celles qui apportent l'information la plus importante au système, ceci parce qu'elles résultent des processus d'analyse spatiale permettant de dériver des informations nouvelles à partir des données de base. Il semble donc nécessaire d'augmenter la flexibilité du MCD moyennant l'élaboration d'une connexion avec certains aspects du Modèle Conceptuel des Traitements (MCT), notamment

avec les opérations de superposition. De telles extensions pourraient faciliter le travail des professionnels responsables de concevoir et modéliser le SIRS et rester cachées pour les utilisateurs non spécialisés afin de minimiser les difficultés pour adopter un langage commun.

Pour enchaîner plusieurs relations $N : N : N : N$, etc., cas commun dans les SIRS, nous proposons de garder les identifiants des tables parentes mais aussi d'ajouter un identifiant particulier pour la *table de lien* à chaque étape du processus de superposition ou *overlay*. De ce fait, toute table dérivée reste reliée avec les tables parentes, grâce à cette pseudo-clé. Une telle procédure donne lieu, après plusieurs opérations, à des *tables de lien* ayant de multiples identifiants hérités des tables initiales, avec cependant une contrainte de taille (nombre maximal d'attributs) héritée du modèle relationnel en usage.

La modélisation du réseau hydrographique à l'aide du système de gestion des données attributives offert par les logiciels de SIG est possible mais laborieuse. Toutefois, le pouvoir analytique qui en dérive, justifie l'effort consenti. Idéalement, cependant, on utiliserait un logiciel spécialement conçu à cet effet. Par opposition, une stratégie de codage topologique, comme celle proposée par Pfafstetter et Verdin, semble plus simple mais requiert au préalable une description globale du système fluvial, laquelle n'était pas disponible au moment de commencer le travail.

Une procédure de découpage et de codification du réseau fluvial (rivières et versants) a été proposée. Elle est exhaustive, allant jusqu'aux plus fins détails facilement reconnaissables sur le terrain : *sections fluviales* et *versants*. Ceux-ci constituent le niveau élémentaire d'agrégation de l'information en ce qui concerne la gestion des bassins-versants. Ces données sont facilement agrégées dans des niveaux hiérarchiques supérieurs, dans un parcours qui va de la seule gestion opérationnelle du système fluvial, jusqu'aux niveaux de l'aménagement territorial et de la planification stratégique.

¹ Il s'agit principalement de l'adaptation iconographique pour introduire des symboles exprimant la spatialité et la temporalité des entités et attributs.

Si les *sections fluviales* et de *versants* constituent la matrice spatiale élémentaire de la gestion et de la planification territoriale –notamment dans le domaine des bassins-versants, des matrices plus fines sont nécessaires pour supporter l'analyse des variables distribuées ou régionalisées où les configurations spatiales sont irrégulières et parfois hasardeuses. Trois structures spatiales sont souvent utilisées pour supporter les données et les traitements de données à ce niveau là : les grilles régulières, les triangles irréguliers et les trapézoïdes irréguliers.

Chacune de ces structures présente des avantages et des inconvénients qui se rapportent à la taille des fichiers, au besoin d'interpoler, aux difficultés pour construire le réseau spatial, aux difficultés pour le calcul des dérivées, à la continuité spatiale, à la compatibilité avec d'autres structures de données, etc.

Indépendamment du maillage choisi, la structure spatiale du phénomène, la densité et la distribution des points d'échantillon choisis, et l'algorithme d'interpolation utilisé affectent la précision et l'exactitude de la représentation sous forme de modèle numérique de tout phénomène distribué.

D'après nos essais, la qualité de la sélection est plus importante que la quantité totale de points d'échantillonnage, pour modéliser adéquatement la réalité du terrain. Cependant, la sélection correcte est un concept vague lorsqu'il s'agit de variables à *structure spatiale* inconnue. C'est là que les techniques géostatistiques peuvent éclaircir un peu la démarche, permettant de la découvrir, par un processus itératif : échantillonnage - traitement - image spatiale - amélioration d'échantillon.

Lorsqu'il s'agit de modéliser la topographie, il est avantageux d'utiliser les photos aériennes, puisqu'on peut percevoir directement la structure spatiale et la saisir avec le niveau de détail nécessaire pour l'application envisagée. En premier lieu, on tiendra compte des *lignes de force* du relief (talwegs, lignes de partage des eaux, ruptures de pente, cuvettes, sommets, cols, etc.) et par la suite, des points d'appui suffisants pour décrire les variations plus régulières du relief.

Parmi les algorithmes d'interpolation dédiés à la création d'une matrice spatiale régulière (une *grille*), le *krigeage* et les fonctions *splines* se sont avérés les plus performants pour interpoler les données topographiques. Les deux reproduisent assez bien les détails particuliers de la surface, à condition que la distribution des données initiales ait été soigneusement choisie. Cependant, le *krigeage* comporte l'avantage d'utiliser la riche théorie géostatistique des variables régionalisées et fournit des extensions pour effectuer l'analyse d'autocorrelation spatiale et la modélisation des erreurs d'estimation.

Quant au maillage spatial, les modèles en *Réseau de Triangles Irréguliers* et des *trapézoïdes* semblent supérieurs pour la modélisation topographique et hydrologique permettant décrire de façon explicite la structure spatiale. Mais, faute des outils adéquats, notre thèse n'a pas pu le démontrer.

Même si le maillage et l'algorithme d'interpolation sont choisis de manière optimale, le MNT reste toujours une approximation plus ou moins fidèle de la réalité. Ceci vient du fait que la plupart des variables régionalisées montrent une composante aléatoire impossible à modéliser et qu'elles sont aussi des surfaces fractales dont la configuration spatiale est dépendante de l'échelle d'analyse sélectionnée.

Sauf pour les surfaces très simples, aucun algorithme d'interpolation ne peut reproduire tous les détails de la surface topographique, à l'échelle d'analyse choisie. Donc, des efforts importants doivent être dirigés vers l'optimisation des autres étapes dans la construction des MNT, tels que l'échantillonnage et le post-traitement. Ce dernier permet de créer la continuité requise pour les calculs de dérivées spatiales qui seront intégrées dans les modèles de diffusion.

Une fois le maillage spatial construit, les algorithmes de calcul de dérivées spatiales permettent obtenir de précieuses informations complémentaires dont les plus communes sont l'inclinaison, l'orientation et la courbure du relief. D'autres propriétés importantes du

terrain, cependant, peuvent être dérivées, comme par exemple, le réseau fluvial et les bassins-versants, ce qui n'a pas été présenté dans ce travail.

Différents algorithmes pour le calcul de dérivées spatiales sont appliqués selon les propriétés géométriques du maillage spatial construit, et selon le modèle de variation spatiale adopté. De tels algorithmes essaient de fixer des surfaces linéaires, quadratiques ou cubiques définies par rapport aux quelques vertex appartenant à une ou à un nombre limité de cellules. La surface dérivée est donc construite à partir d'un ensemble de pièces avec une continuité mathématique qui les relie.

Des cellules élémentaires du maillage spatial, en passant par les lots et les versants et en montant jusqu'aux grands ensembles de bassins-versants et de régions de planification, les SIRS se montrent des intégrateurs d'information très utiles. Dans cette progression ascendante, on passe des niveaux plutôt analytiques, aux niveaux de gestion, de conception, de planification stratégique et d'aménagement du territoire.

8.2 Sur le plan méthodologique

L'élaboration du Modèle Conceptuel de Données, du Modèle Logique de Données, et du Dictionnaire de Données, nous semble très pertinente pour tout projet de SIRS en aménagement.

L'élaboration du Diagramme de Flux de Données semble bien plus important dans les projets de SIRS institutionnalisés, lorsque la quantité d'intervenants s'accroît et que les échanges de données doivent respecter des normes rigoureuses.

Un Modèle Conceptuel des Traitements doit accompagner les précédents, dans la conception d'un projet de SIRS. Ceci parce que dans un SIRS plusieurs des données sont dérivées par traitement et pourraient apparaître comme des entités dans le MCD, permettant ainsi d'enrichir la pratique de l'aménagement grâce à l'introduction de nouveaux concepts synthétiques.

Une schéma méthodologique pour l'intégration des tâches d'analyse, de gestion et de planification dans l'aménagement des bassins-versants et l'aménagement territorial a été brièvement esquissé, bien qu'il devrait être complété par une recherche théorique et expérimentale plus détaillée.

8.3 Sur le plan expérimental

Un prototype de SIRS a été élaboré pour le bassin-versant Uruca. Celui-ci facilite l'analyse et la recherche et peut servir de base pour la gestion et la planification municipale. Il peut s'intégrer aussi avec le SIT en développement dans la municipalité de Santa Ana.

Une carte morphodynamique a été construite et sa représentation superposée au modèle en estompage du terrain s'est montrée très utile pour faciliter la communication de l'information ainsi que pour préciser les limites des formes et des processus cartographiés. Cette carte constitue la base pour évaluer les opportunités offertes par le milieu physique, comme pour détecter les contraintes qu'il impose au développement.

Les propositions d'utilisation du sol faites par la municipalité de Santa Ana et par le Ministère de l'Agriculture présentent des inconsistances importantes entre elles et par rapport à la carte d'utilisation actuelle du sol. Le SIRS s'est montré très efficace pour évaluer les changements espérés des plans d'utilisation du sol. Nous soulignons encore l'importance fondamentale de disposer de cartes d'utilisation actuelle du sol à jour.

Malgré les inconsistances signalées, le plan d'utilisation du sol et la carte du potentiel d'utilisation soulignent la nécessité de préserver la partie sud de bassin-versant Uruca pour la protection des ressources et la réduction des risques naturels. Ceci, cependant, contraste avec l'utilisation actuelle dominée par le pâturage et la production croissante du café.

Une carte des risques naturels a été réalisée. Les principaux risques sont les glissements de terrains et les coulées de débris dans la partie montagneuse et le piedmont. Les pluies

intenses et les fréquents séismes qui affectent la zone sont les principaux agents de déclenchement de ces événements.

Une carte des contraintes et des potentiels pour le développement socio-économique du bassin-versant a été dressée. Elle tient compte des risques et autres limitations des terrains. En général, le potentiel économique du secteur montagneux est très réduit par les problèmes de l'érosion, des glissements de terrain, et des fortes pentes. Dans le secteur plat, le potentiel est plus grand, mais avec des restrictions le long des lits fluviaux actuels et anciens. Rappelons qu'il s'agit d'un cône de déjection dont les lits anciens peuvent être repris lors d'événements exceptionnels.

L'importance d'un SIRS appliqué à l'aménagement des bassins-versants a été démontrée grâce à des exemples de la cartographie produite ainsi que les recommandations qui en découlent. Toutefois, ceci a une utilité pratique très limitée si le pays ne dispose pas d'un cadre institutionnel et légal adéquat pour la gestion des bassins-versants et l'aménagement du territoire.

D'une part, ces concepts viennent juste d'être incorporés dans la législation du Costa Rica et leur application réelle ne viendra que dans plusieurs années, c'est-à-dire lorsque surgiront des conflits aigus qui seront résolus devant les tribunaux. D'autre part, l'encadrement institutionnel reste trop faible et anarchique. En définitive, c'est le Ministère de l'Environnement (MINAE) qui devrait s'occuper de la gestion correcte du territoire et des bassins-versants, mais actuellement il n'a pas l'infrastructure, l'organisation ni le personnel nécessaires. Les autres institutions sont principalement des utilisateurs des ressources, notamment l'eau. Elles entreprennent des actions de protection lorsque les projets présentent un risque. Évidemment, ces interventions ne reposent pas sur une véritable politique d'aménagement territorial.

Les opportunités pour l'intégration de multiples institutions de l'état dans le processus de l'aménagement territorial et la gestion de bassins-versants semblent trop affaiblies dans le

contexte socio-politique actuel où les institutions souffrent d'une réduction de personnel et subissent un processus interne de redéfinition des champs de compétence.

Nous avons vu cependant que les quelques et faibles SIRS existants ou en développement dans ces institutions ont bien résisté aux forces de démembrement et ont plutôt gagné du prestige dans les sphères décisionnelles. Une telle considération pour les SIRS est surprenante si l'on considère que les applications réalisées sont très modestes. En tout cas, ceci permet de croire que les SIRS peuvent servir de noyau pour supporter une gestion institutionnelle intégrée du territoire.

Matérialiser cette opportunité requerra, sans doute, un niveau d'expertise en SIRS qui doit être développé. Pour y parvenir, les institutions d'éducation supérieure du pays, dont, l'Université de Costa Rica, seront appelées à jouer un rôle déterminant.

NOTE TO USERS

Oversize maps and charts are microfilmed in sections in the following manner:

**LEFT TO RIGHT, TOP TO BOTTOM, WITH
SMALL OVERLAPS**

UMI

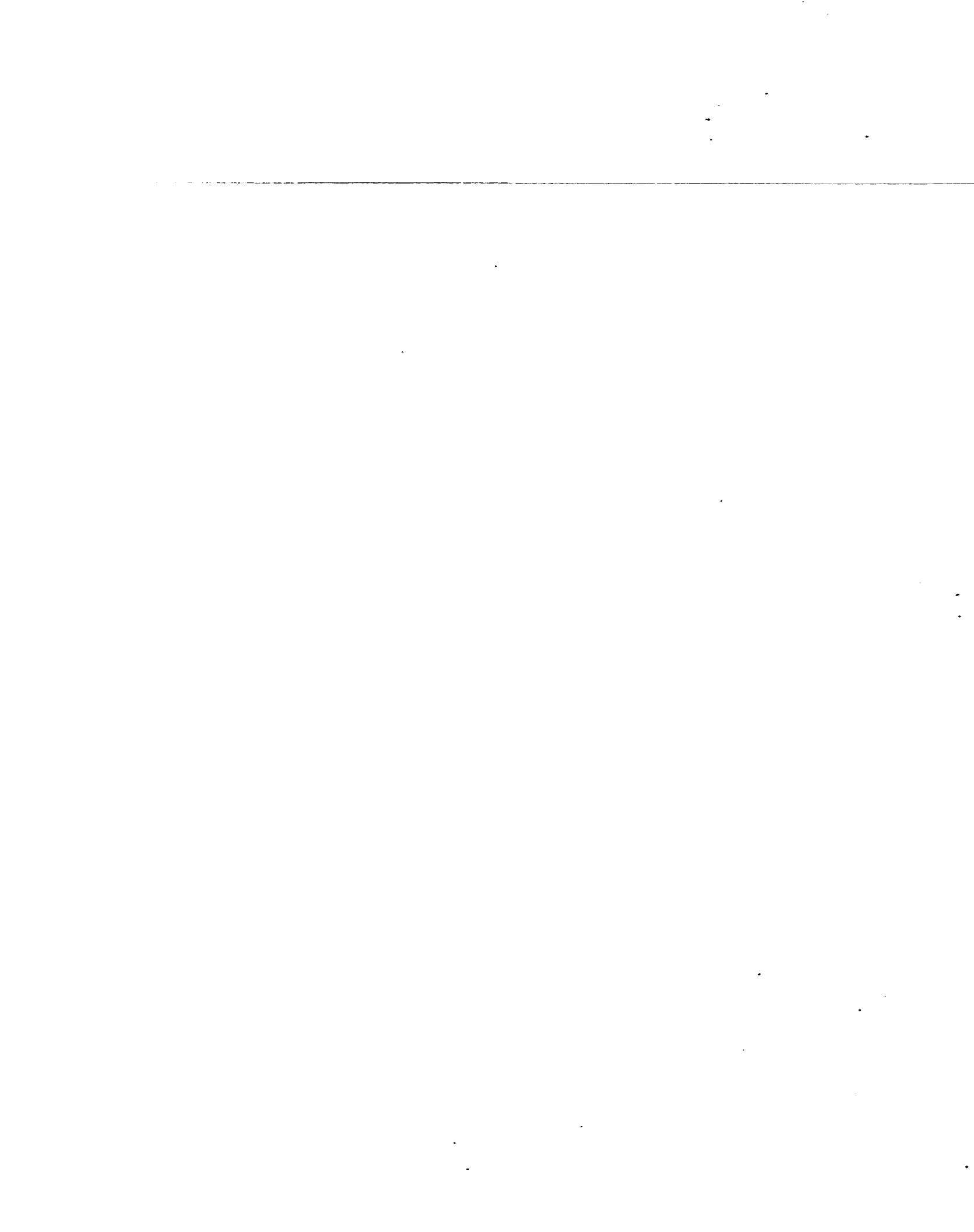
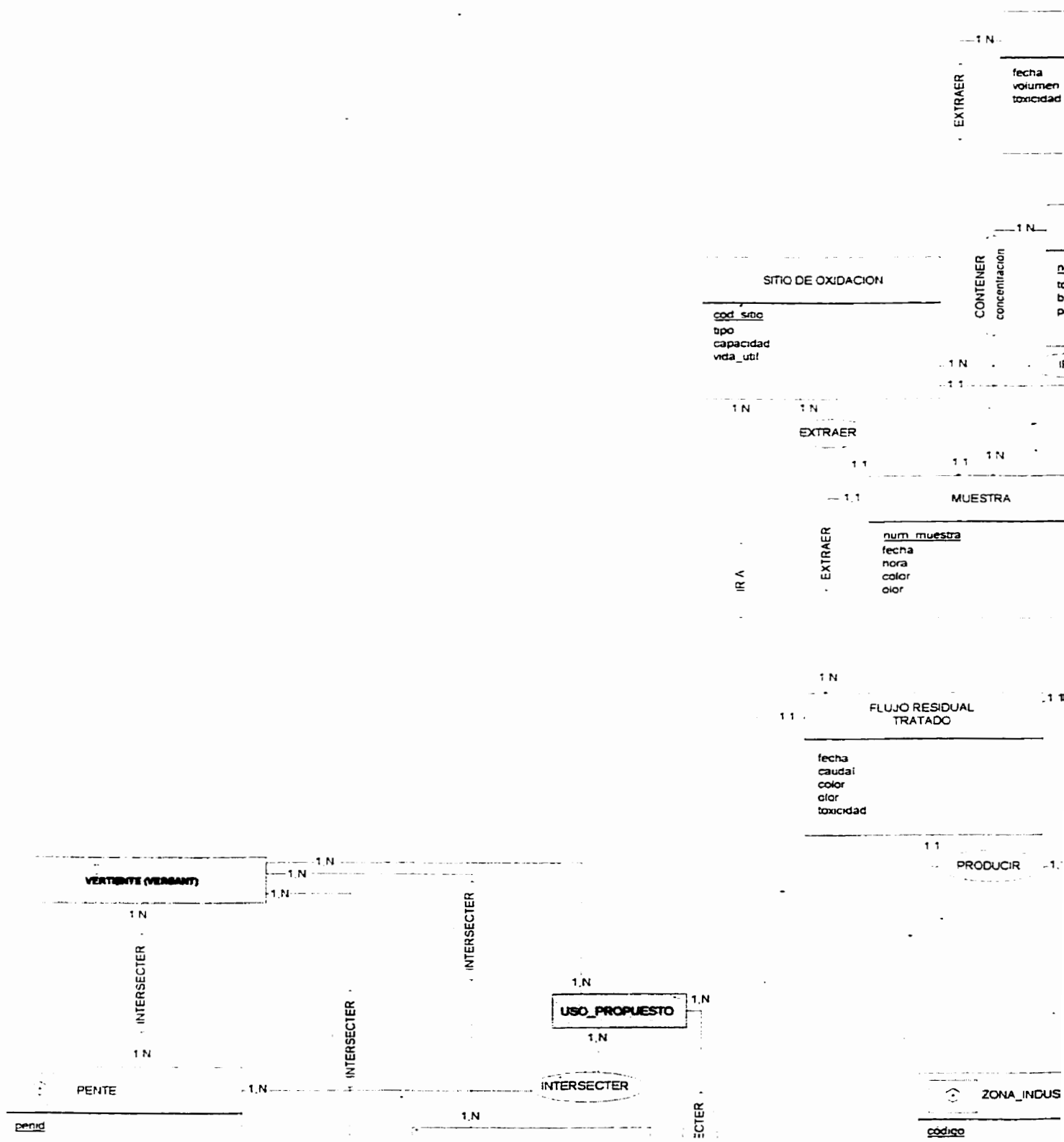
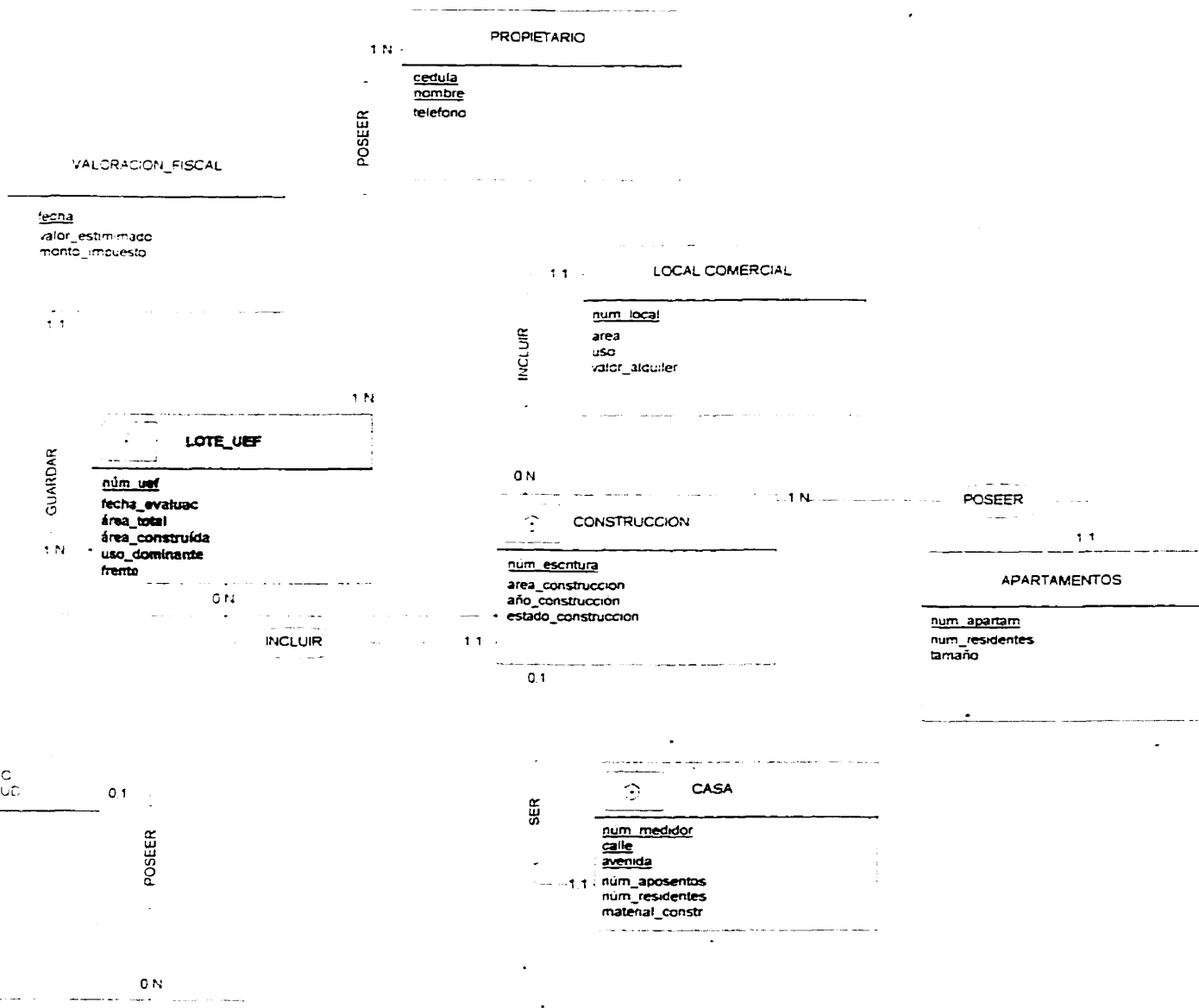


FIGURE 66. MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES





VALORACION_FISCAL

fecha
valor_estimado
monto_impuesto

1 1

GUARDAR

1 N

LOTE_UF

num_uf
fecha_evaluac
área_total
área_construida
uso_dominante
frente

0 N

INCLUIR

PROPIETARIO

1 N

POSEER

cedula
nombre
telefono

LOCAL COMERCIAL

1 1

INCLUIR

num_local
area
uso
valor_alquiler

0 N

CONSTRUCCION

num_escritura
area_construccion
año_construccion
estado_construccion

0 1

POSEER

1 1

APARTAMENTOS

num_apartam
num_residentes
tamaño

PUESTO DE SALUD

0 1

POSEER

nombre
director
telefono

CASA

SER

num_aposentos
num_residentes
material_constr

0 N

PLAN REGULADOR URBANO

SUSTANCIA CONTAMINANTE

nom_sustancia
toxicidad
biodegradabilidad
permanencia

CONTENER

UNIDAD_PROD_PECUARIA

cod_parcela
tipo_prod
numero_animales
raza
productividad
rentabilidad

PLAGUICIDA

nom_plaguicida
uso_recomendado
toxicidad

USAR
cantidad

1.1- ES UNA

UNIDAD_PROD_FORESTAL

cod_parcela
especie
edad
altura_prom
diametro_prom

UNIDAD_PROD_AGRICOLA

cod_parcela
uso_actual
grado_desarrollo
estado

nom_cultivo
variedad
productividad
rentabilidad

ES UNA

PROPONER

USO_PROPUESTO

cod_zona
tipo_uso

MICROFORMAS

codigo_microforma
espacialidad
nombre_microforma
tamano
edad
frecuencia_espacial
frecuencia_temporal
estado_actividad
intensidad

CONTENER

cod_mf
uso_act
grado_d
estado

INCLUIR

INCLUIR

DESPLIZAMIENTOS

cod_deslizamiento
area_cubierta
volumen_inestable
tipo
edad
estado_movimiento

origen
indice_amenaza

CONTENER

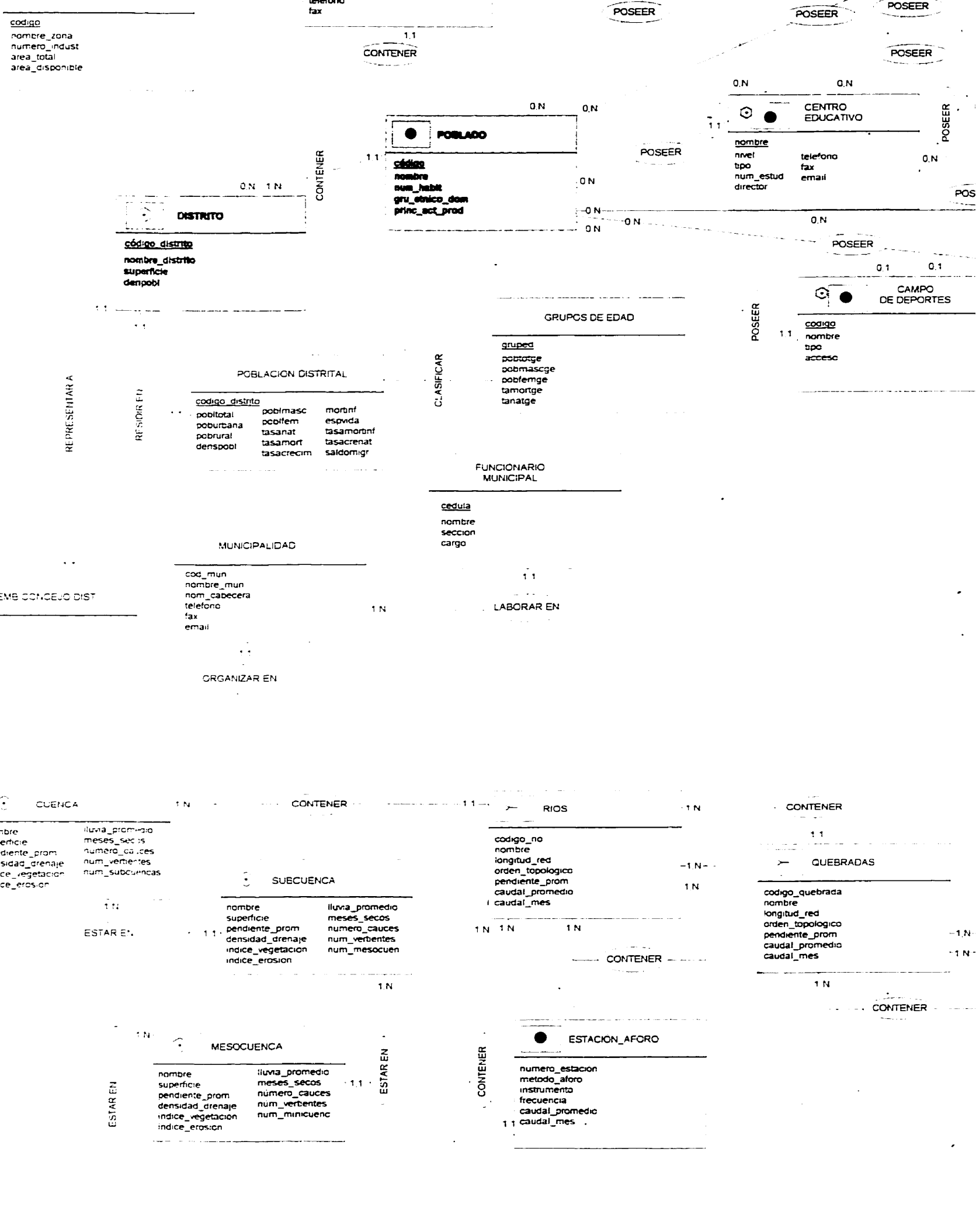
cod_ur
nombr
tipo_re
morfolo

CONTENER

INCLUIR

UNIDADES GEOLOGICAS

cod_undgeo
formacion
litologia



codigo
 nombre_zona
 numero_indust
 area_total
 area_disponible

telefono
 fax
 1.1
 CONTENER

POSEER POSEER POSEER
 POSEER

0.N 1.N
 DISTRITO
 código_distrito
 nombre_distrito
 superficie
 denpobl

0.N 0.N
 POBLADO
 código
 nombre
 num_habit
 gru_étnico_dom
 princ_act_prod
 0.N
 0.N
 0.N
 0.N

0.N 0.N
 CENTRO EDUCATIVO
 nombre
 nivel
 tipo
 num_estud
 director
 telefono
 fax
 email
 0.N
 POSEER

REPRESENTAR A
 RESIDIR EN
 POBLACION DISTRITAL
 código_distrito
 pobltotal
 poburbana
 pobrural
 denspobl
 poblmasc
 poblfem
 tasanat
 tasamort
 tasacrecim
 mortnf
 espvida
 tasamortnf
 tasacrenat
 saldomicr

CLASIFICAR

GRUPOS DE EDAD
 gruped
 pobtotge
 pobmascge
 pobfemge
 tamortge
 tanatge

0.1 0.1
 CAMPO DE DEPORTES
 código
 nombre
 tipo
 acceso
 POSEER

FUNCIONARIO MUNICIPAL
 cédula
 nombre
 seccion
 cargo

MUNICIPALIDAD
 cod_mun
 nombre_mun
 nom_cabecera
 telefono
 fax
 email

LABORAR EN

ORGANIZAR EN

CUENCA
 nombre
 superficie
 pendiente_prom
 densidad_drenaje
 indice_vegetacion
 indice_erosion
 lluvia_promedio
 meses_secos
 numero_cauces
 num_verbentes
 num_subcuencas

SUECUENCA
 nombre
 superficie
 pendiente_prom
 densidad_drenaje
 indice_vegetacion
 indice_erosion
 lluvia_promedio
 meses_secos
 numero_cauces
 num_verbentes
 num_mesocuen

RIOS
 código_no
 nombre
 longitud_red
 orden_topologico
 pendiente_prom
 caudal_promedio
 caudal_mes

QUEBRADAS
 código_quebrada
 nombre
 longitud_red
 orden_topologico
 pendiente_prom
 caudal_promedio
 caudal_mes

MESOCUENCA
 nombre
 superficie
 pendiente_prom
 densidad_drenaje
 indice_vegetacion
 indice_erosion
 lluvia_promedio
 meses_secos
 número_cauces
 num_verbentes
 num_minicuenc

ESTAR EN

ESTACION_AFORO
 numero_estacion
 metodo_aforo
 instrumento
 frecuencia
 caudal_promedio
 caudal_mes

CONTENER

CONTENER

0 N

AREA DE RECREO

0 1

codigo
nombre
tipo
acceso

POSEER

0 N

0 N

POSEER

POSEER

POSEER

1 1

CENTROS CULTURALES

codigo
nombre telefono
tipo fax
responsable

CONTENER

1 N

ARROYO

1 N

codigo_arroyo
nombre
ongitud_red
orden_topologico
pendiente_prom
caudal_promedio
caudal_mes

1 N

1 1

1 N

CONTENER

INCLUIR

FALLAS_NEOTECTONICAS

nom_falla
cod_falla
 nom_falla
 tipo_falla
 año_activacion
 indice_amenaza
 estado_actividad

1,N

INTERSECAR

1,N
cod_undgeo
 formacion
 litologia
 edad
 grado_alteracion
 grado_fracturacion

1,N

AREA_C

nom_zcon
cod_zcon
 categoria
 tipo ?
 fecha
 numero
 superficie

1,N

ZONE_EROSION

cod_zeros
 codigo_evento
 espacialidad
 nombre_evento
 tamaño
 intensidad
 frecuencia_espacial
 frecuencia_temporal
 indice_amenaza
 estado_actividad
 tasa_erosion

1,N

EROSIONAR

ZONE_ACUMULATION

cod_zacum
 nombre_evento
 superficie
 estado_actividad
 intensidad
 tasa_sedimentacion

1,N

RELLENAR

ZONA_POT_ESCENICO

cod_zpe
 tipo_atractivo
 potencial

1,N

UNIDADES_GEOLOGICAS

1 N

SUBYACER

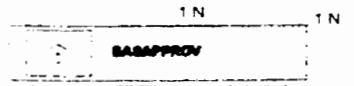
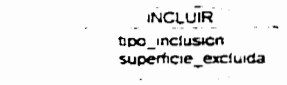
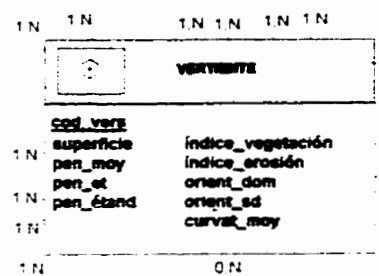
edgoc
ion
a
atteracion
rfracturacion

AREA_CONSERVACION

1 N

nom_zoon
cod_zoon
categoria
tipo
fecha_creacion
numero_decreto
superficie

YACER EN
condicion
area_incluida



LOCALIDAD
nombre_localidad
poblacion_servida
numero_clientes
caudal_demandado
uso_principal
consumo_prom_cliente

SERVIR A

REGISTRAR EN

CLIENTE

nombre_cliente
identificacion
direccion
tipo
consumo_promedio
consumo_mes

SERVIR A

LINEA_DISTRIBUCION

codigo_seccion
caudal
longitud
grosor_tuberia

ABASTECER A

COLINDAR
cod_canton
long_colind

HALL

1,1

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

CANTON

cod_canton
nombre_canton

DISTRITO

codigo_distrito
nom_distrito

1,N

ESTAR EN

PROYECTO

nombre_proyecto
codigo_proyecto
año_puesta_en_operacion
vida_ubl
cantidad_poblacion_beneficiada
numero_clientes
tpo_recurso_hidrico
caudal_total

ABASTECER

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,1

1,N

1,1

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,1

1,N

1,1

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

HALLARSE EN

MICROCUECNA

nombre
superficie
pendiente_prom
densidad_drenaje
indice_vegetacion
indice_erosion

1,N

1,N

1,N

1,N

1,1

1,N

1,1

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

1,N

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

ESTAR EN

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

POSER

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

FORMADA POR

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

TENER

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

ABASTECER A

RESERVA_AGUA_SUBT

cod_resub
status
volumen_reserva
valor_promedio

1 N

codigo_seccion	car_solo
longitud	velocidad_topo
ancho_prom	tipo_topo
caudal_prom	
orden_topografico	
pendiente_promedio	

13

BASAPPROV

cod_basapp	lluvia_promedio
nombre	meses_secos
superficie	numero_cauces
pendiente_prom	num_verdames
densidad_drenaje	
indice_vegetacion	
indice_erosion	

1 N

1 N

1 N

1 N

RED_FLUVIAL

codigo_red
nombre_rector
caudal_prom
caudal_mes
longitud_red
orden_topologico

1 N

COMPOSERSE DE

ABASTECER

REPRESA

codigo_represa
nombre
tipo ?
material
año_construccion
estado

PROVOCAR

ZONA_VIDA

1 N

codigo_zona
nombre

INCLUIR

PROPIEDAD_PRIVADA

1 N

numero_registro
propietario
pendiente_promedio
indice_vegetacion
potencial_hidrico
valor_hectarea

TENER

ESTACION_METEO

numero_estacion
tipo_estacion
estado ?
lluvia_promedio
lluvia_mes
intensidad_maxima

1 N

CONTENER

PATRON_DRENAJE

codigo_unidad
patron_drenaje
tipo_control

1 N

TENER

INCLUIR

1 N

CONCESIONES_SNE

codigo_concesion
tipo_recurso
caudal_explotado
vigencia_concesion
caudal_maximo_otorgado



ZONA_POT_ESCENICO

cod_zpe

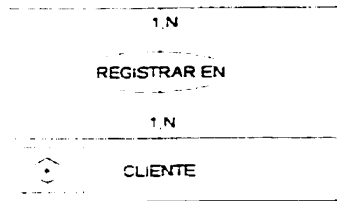
tpo_atractivo

potencial

uso_principal
consumo_prom_cliente

INCLUIR

1,1
nombre
superficie
indice_vegetacion
uso_dominante
lluvia_promedio



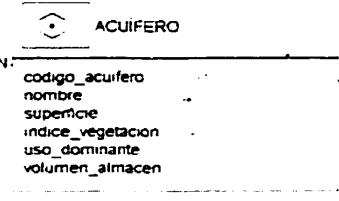
CLIENTE

nombre_cliente
identificacion
direccion
tipo
consumo_promedio
consumo_mes

1,1

SERVIR A

INCLUIR

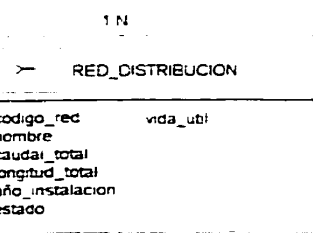


ACUIFERO

codigo_acuifero
nombre
superficie
indice_vegetacion
uso_dominante
volumen_almacen

POSEER

ABASTECER A

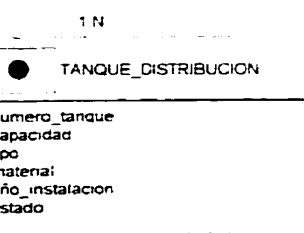


RED_DISTRIBUCION

codigo_red
nombre
caudal_total
longitud_total
año_instalacion
estado

FORMADA POR

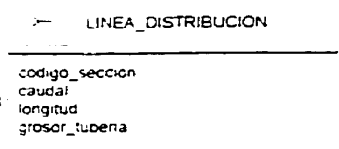
ALIMENTAR



TANQUE_DISTRIBUCION

numero_tanque
capacidad
tipo
material
año_instalacion
estado

ABASTECER A

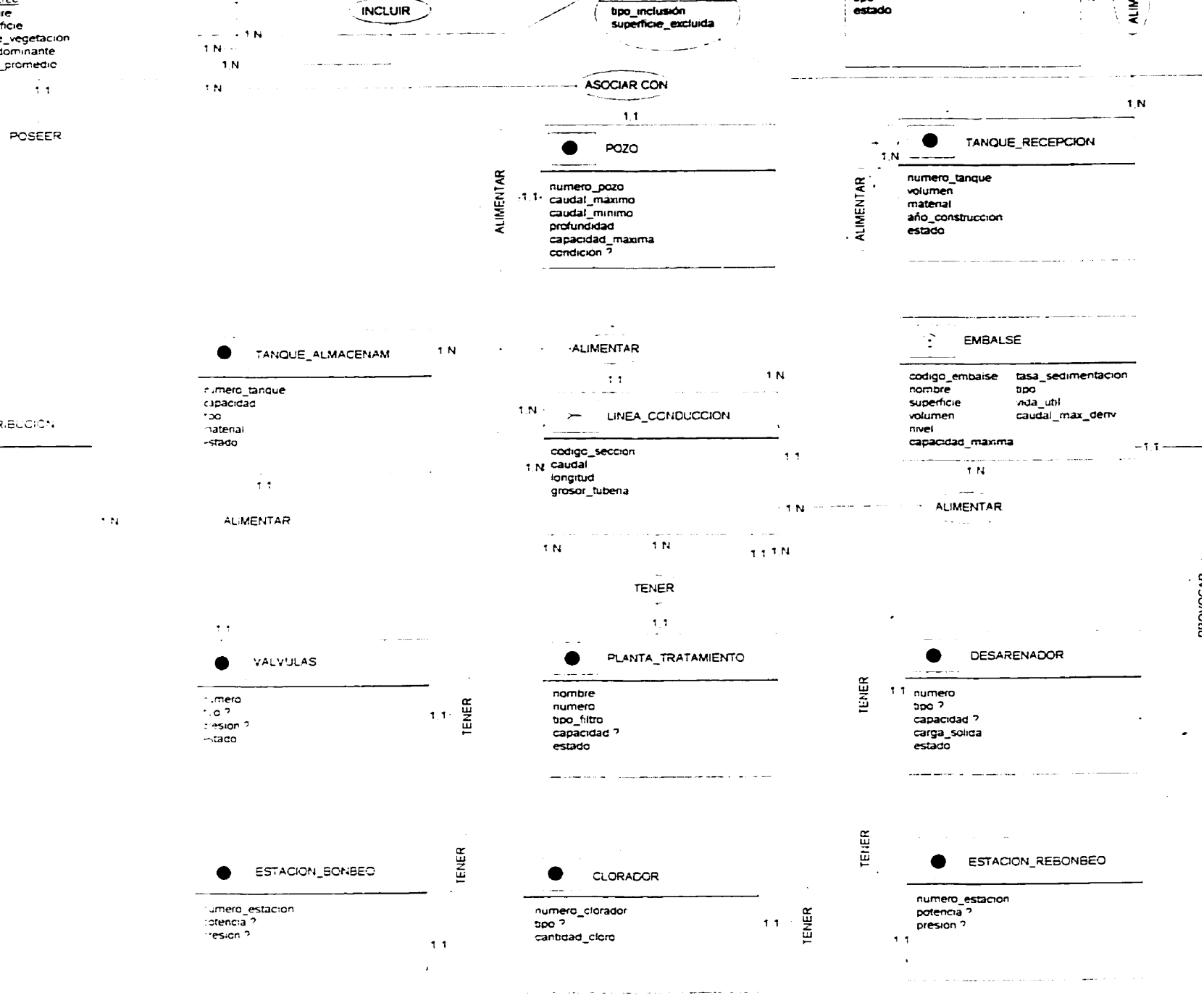


LINEA_DISTRIBUCION

codigo_seccion
caudal
longitud
grosor_tuberia

1,1

TENER



re
 ficie
 e vegetacion
 dominante
 promedio
 1:1

POSEER

REBUCION

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

estado

ALIM

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

1:1

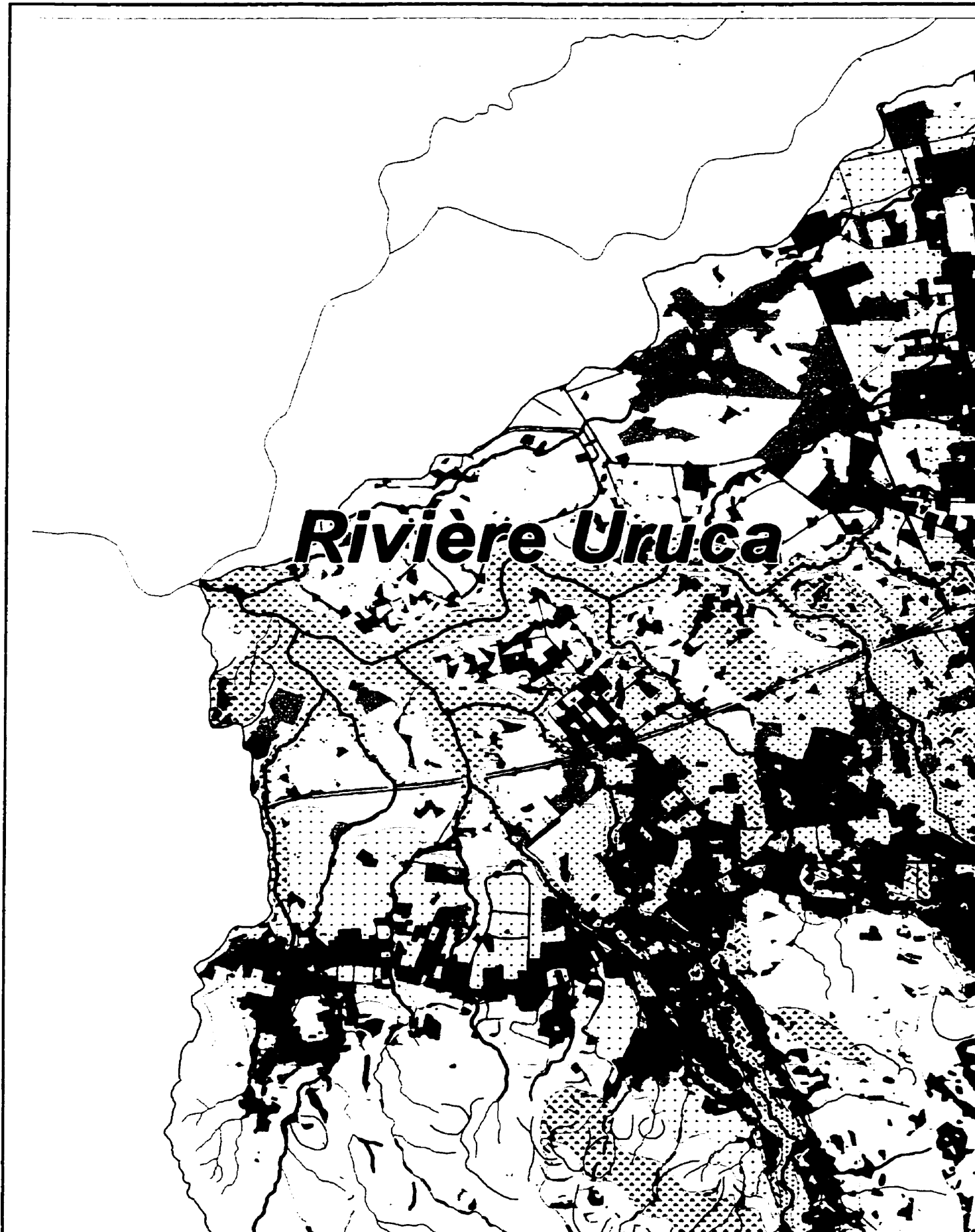
NOTE TO USERS

Oversize maps and charts are microfilmed in sections in the following manner:

**LEFT TO RIGHT, TOP TO BOTTOM, WITH
SMALL OVERLAPS**

UMI

Rivière Uruga



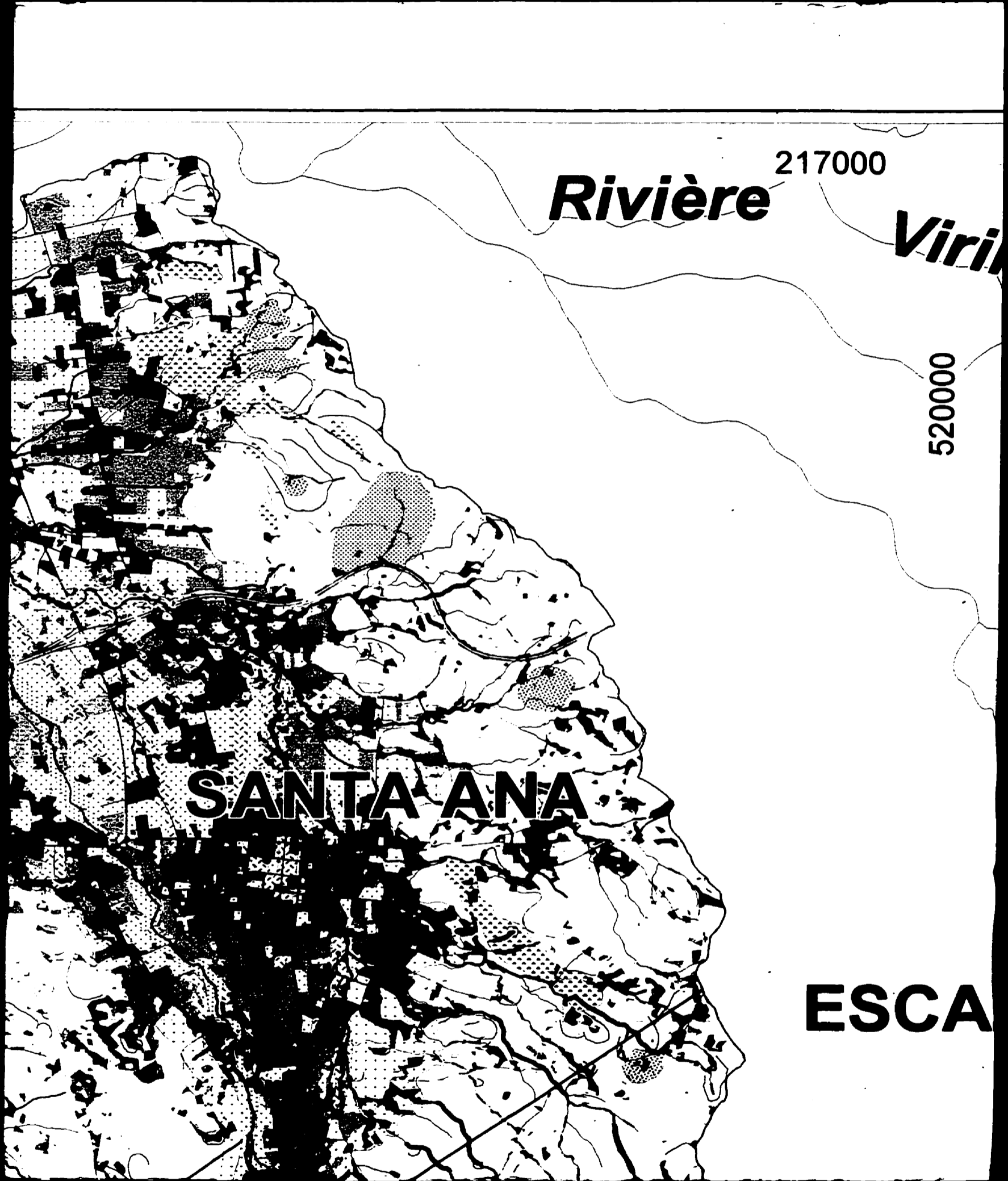


Fig. 150. Carte des risques et menaces naturelles

Virilla

520000

Risque de contamination du sol

- Très faible
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Risques hydro-géomorphologiques

- Flux colluviaux
- Flux catastrophiques peu probables
- Chutes par gravité
- Érosion lineaire intensive
- Inondations et coulées de débris sporadiques
- Glissements réactivables
- Glissements actifs ou récemment actifs

■ Coulées de débris observées

IRC cumulatif sur le réseau hydrographique
(IRC : indice de risque de contamination)

— Petit

CAZÚ

0. Carte des risques et menaces naturelles

Contamination du sol

- Très faible
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

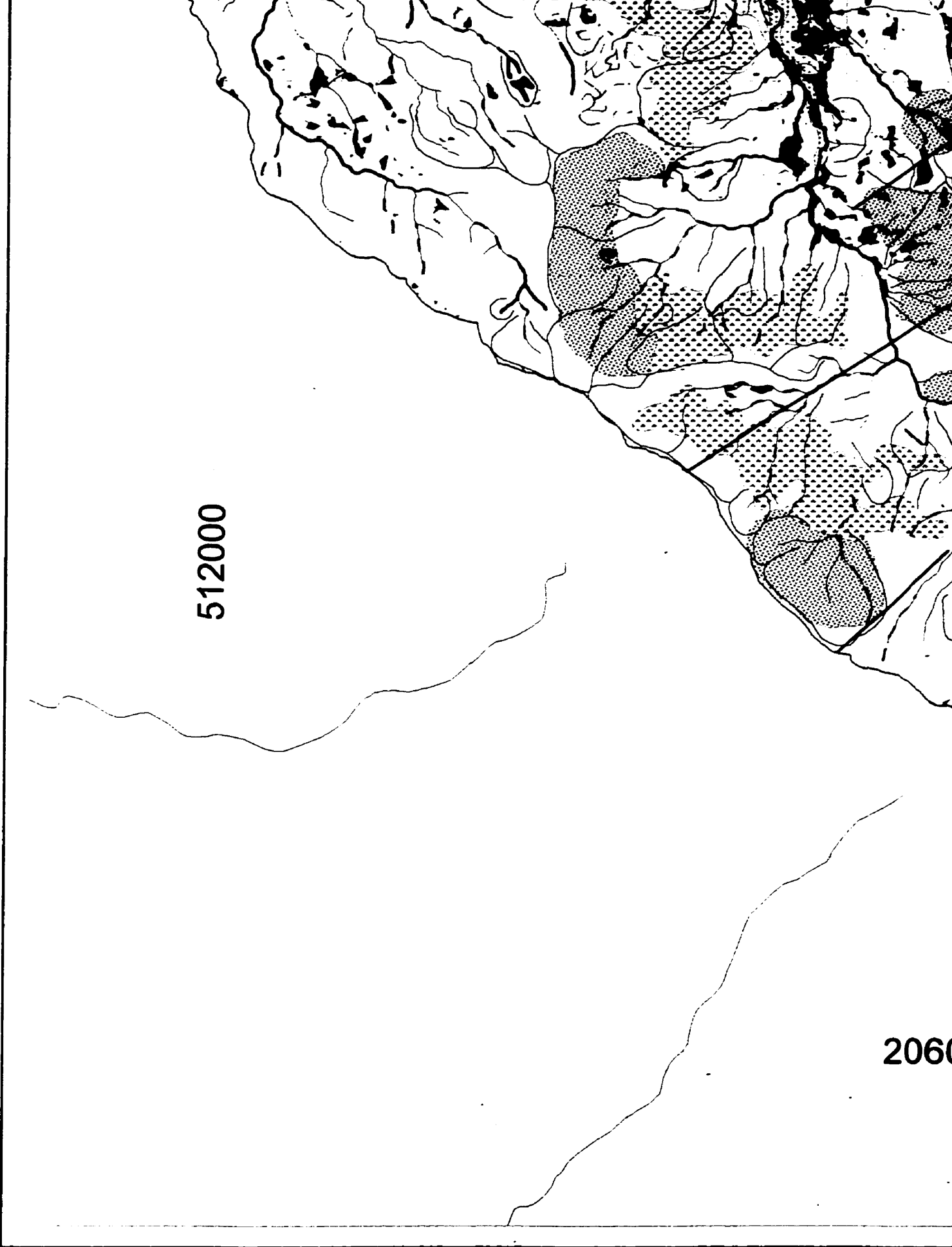
Hydro-géomorphologiques

- aux
- topographiques peu probables
- gravité
- faible intensive
- glissements et coulées de débris sporadiques
- glissements réactivables
- glissements actifs ou récemment actifs

de débris observées

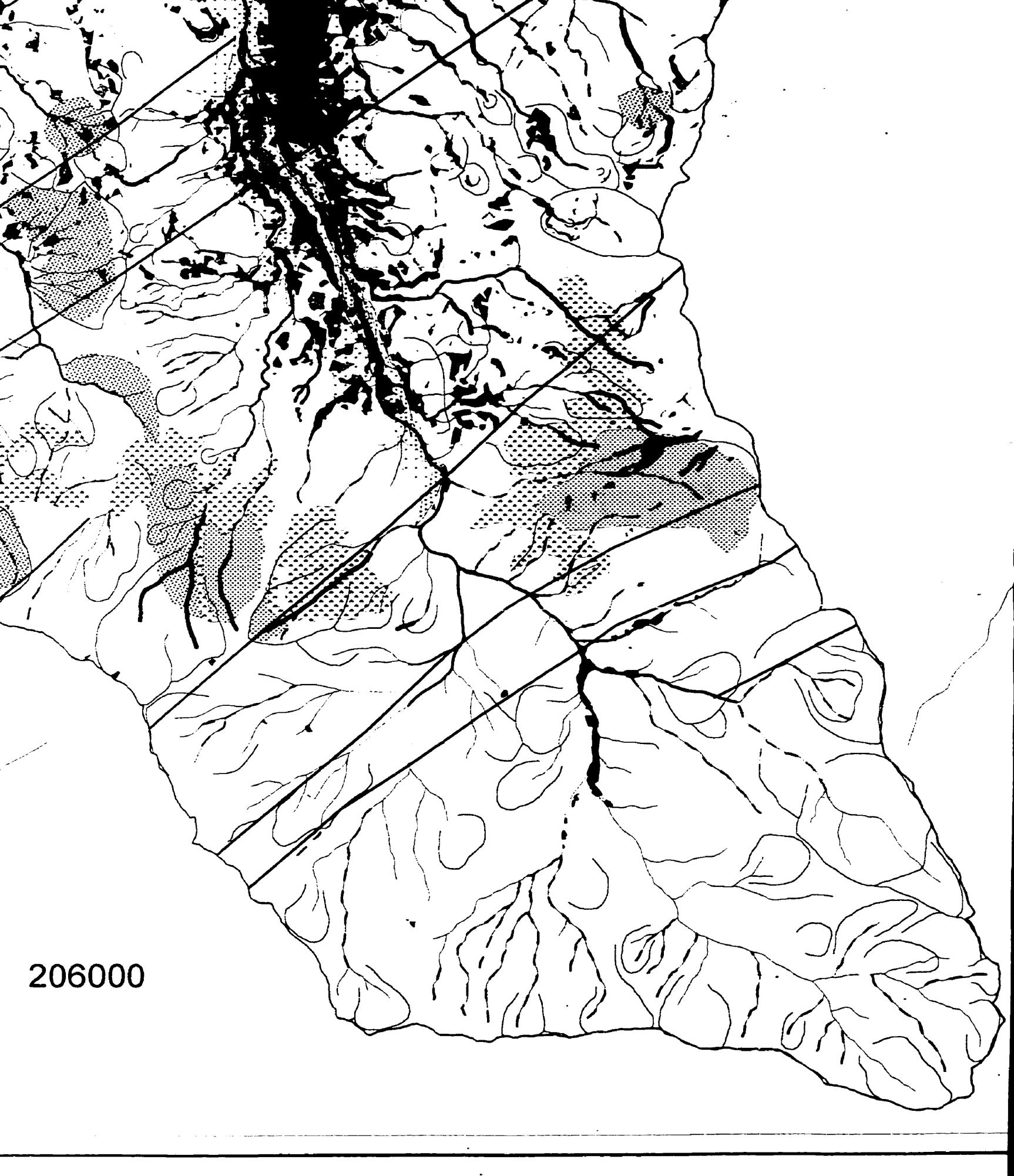
risque sur le réseau hydrographique
(de risque de contamination)

Petit



512000

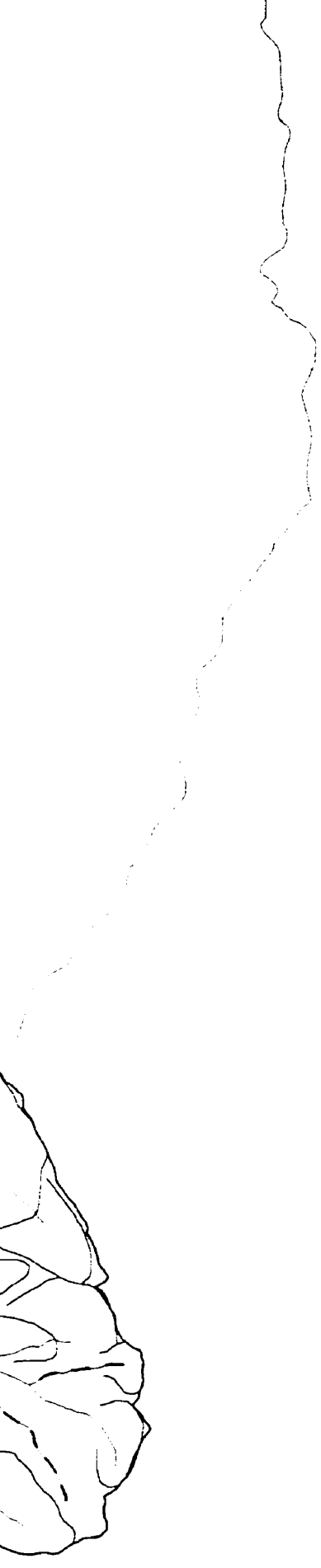
2060



206000

- Petit
- Moyen
- Fort

- - - Flux de débris potentiels
- Failles principales
- Cicatrice de glissement
- Drainage



Source:
IGN (1989), photos aériennes. IGN (1989), cartes topographiques. Travail du terrain. IRC modélisé. Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Date: mars 1999

...nce de risque de contamination)

- Petit
- Moyen
- Fort

débris potentiels

principales

e de glissement

ge

...ps aériennes. IGN (1989), cartes topo-
...ail du terrain. IRC modélisé. Modèle
...rain (MNT).

NOTE TO USERS

Oversize maps and charts are microfilmed in sections in the following manner:

**LEFT TO RIGHT, TOP TO BOTTOM, WITH
SMALL OVERLAPS**

UMI





Fig.152 Contraintes au développement soci

Virilla

520000

CAZÚ

Pentes limitantes

- ⋯ De 35% à 55%
- ⋯ De 55% à 85%
- ⋯ Plus de 85%

Ménaces géomorphologiques

- Coulées de colluvions
- Coulées catastrophiques peu probables
- Chutes par gravité
- Erosion linéaire intensive
- Inondations et coulées de débris solides
- Glissements reactivables
- Glissements actifs ou récemment actifs

— Failles principales

— Couronnes de glissement

— Drainages, inondables

■ Protection de rivières

■ Protection de ressources naturelles

□ Aucune restriction identifiée

Contraintes au développement socio-économique

Facteurs limitants

35% à 55%

55% à 85%

au-dessus de 85%

Ménaces géomorphologiques

Coulées de colluvions

Coulées catastrophiques peu probables

Glissements par gravité

Érosion linéaire intensive

Chutes de pierres et coulées de débris sporadiques

Glissements reactivables

Glissements actifs ou récemment actifs

Fautes principales

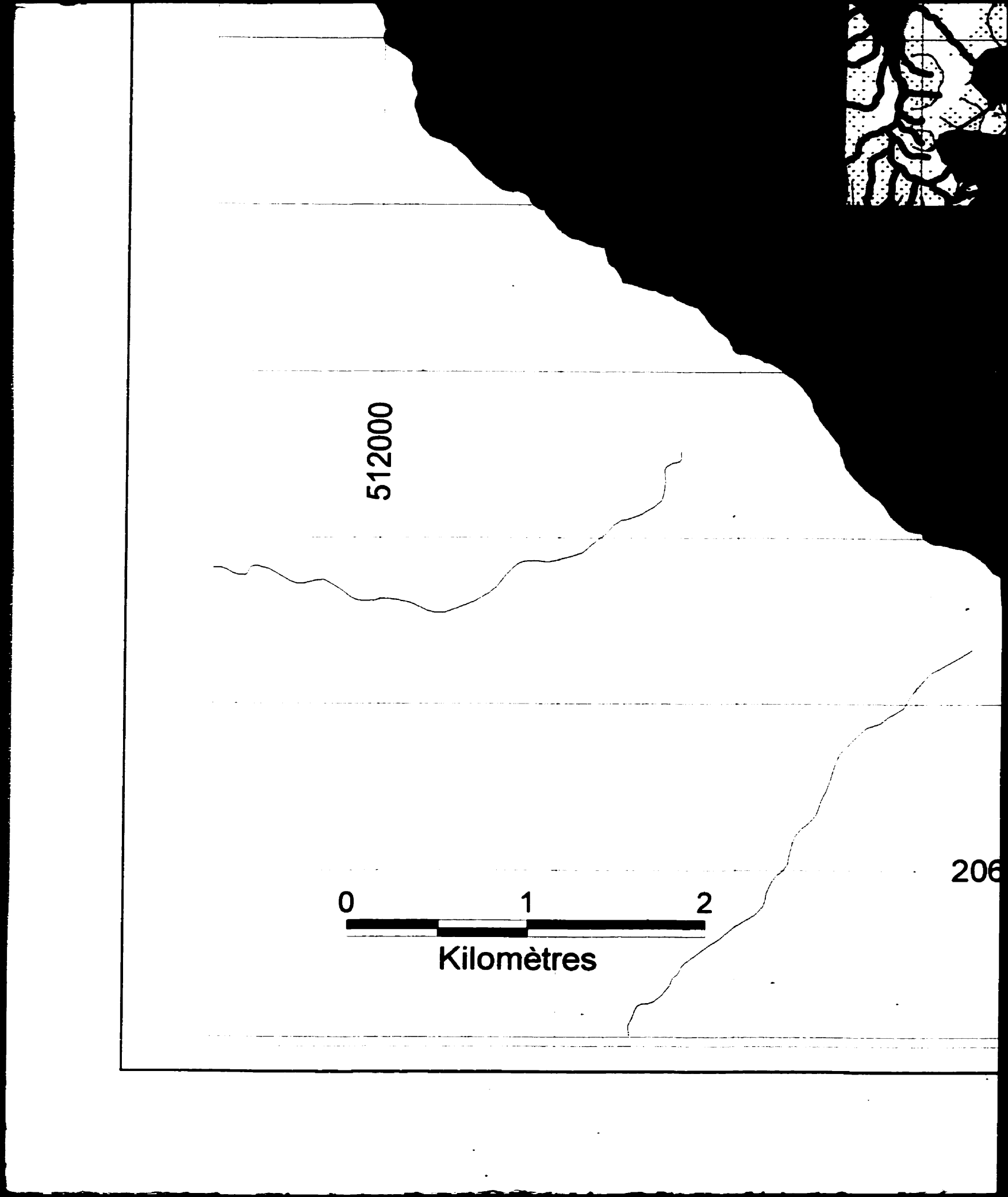
Couronnes de glissement

Crues, inondable

Protection de rivières

Protection de ressources naturelles

Aucune restriction identifiée

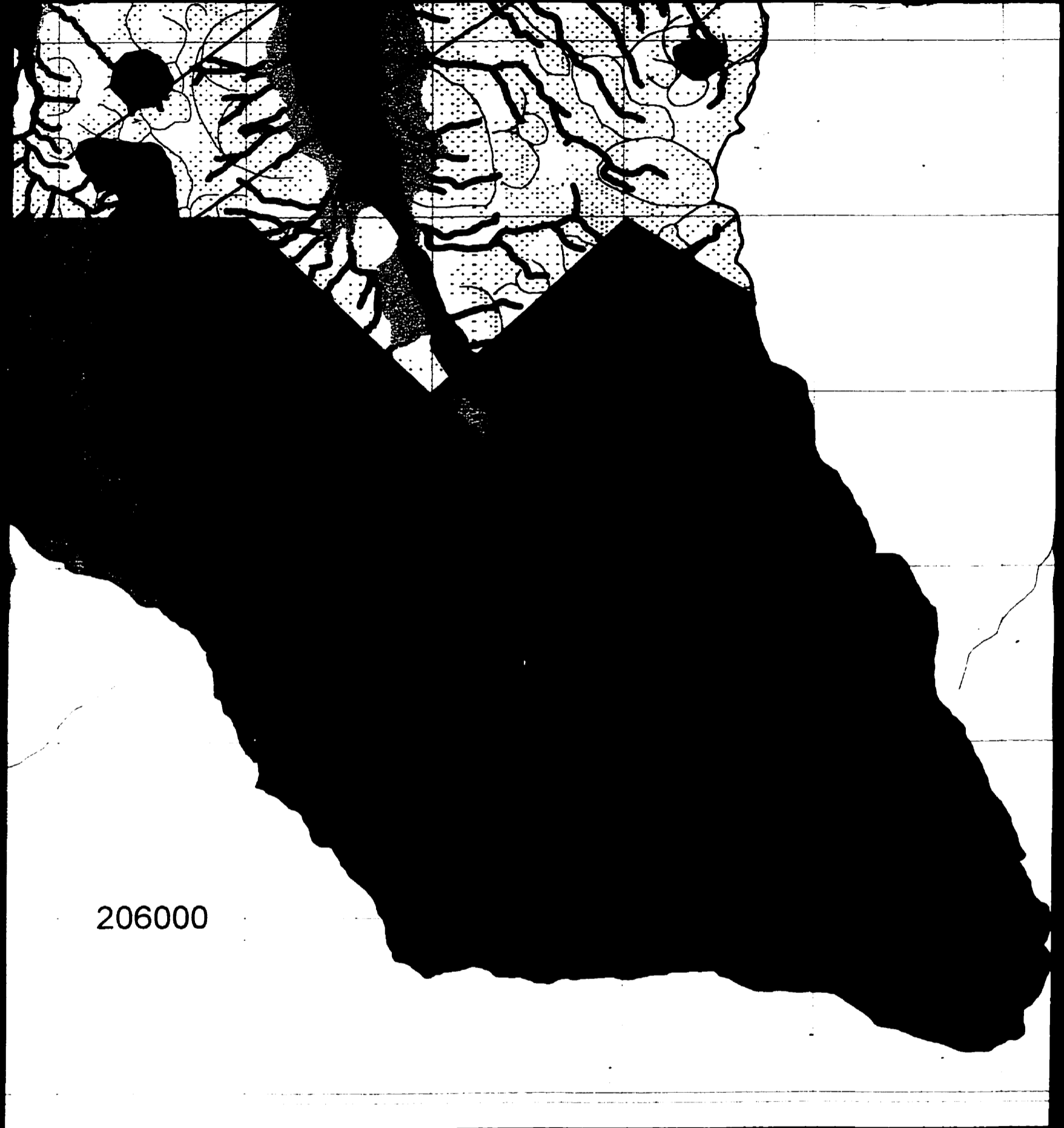


512000

0 1 2
Kilomètres

206





206000

□ Aucune restriction identifiée

Source:

Molina (1990), thèse. IGN (1989),
photos aériennes. MINAE (1998),
carte des zones de protection.
IGN (1989), cartes topographiques.
Modèle Numérique de Terrain.

Date: mars 1999

■ Protection de ressources naturelles

□ Aucune restriction identifiée

, thèse. IGN (1989),
nes. MINAE (1998),
es de protection.
artes topographiques.
erique de Terrain.