

**POTENTIELS ET LIMITES
DE LA CARTE ECOLOGIQUE POUR LA
DISCRETISATION DES BASSINS-VERSANTS**

THESE PRESENTEE COMME EXIGENCE PARTIELLE DU GRADE DE
PHILOSOPHIAE DOCTOR (PH.D).

par
MARIE-HELENE DE SÈDE

*Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau
2800, Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7*

JUIN 1995

à MIRAUCK

*« Et de même que chacun d'entre vous
se dresse seul dans le savoir divin,
chacun doit rester seul dans sa
connaissance de Dieu et sa
compréhension de la terre ».*
Gibran, Le Prophète.

Avant-propos

Cette recherche, entamée sous les rigueurs de l'hiver québécois, marqué par le cheminement majestueux des glaces sur le Fleuve, s'achève aujourd'hui dans la douceur de l'été vaudois, illuminé par le scintillement du Léman. D'un continent à l'autre, tout au long de ce voyage, le cap n'a pas toujours été facile à maintenir. C'est pourquoi, au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement les nombreuses personnes qui m'ont soutenue et guidée dans ce périple et m'ont permis d'accoster à bon port.

Plus précisément, je remercie le Professeur J-P. Fortin, mon directeur de thèse, pour le soutien constant et les nombreux conseils qu'il m'a donné tout au long de cette recherche. Avec lui, j'aimerais également remercier les professeurs et les collaborateurs de l'INRS-Eau pour leur contribution et leur aide.

Je voudrais également exprimer ma gratitude au Professeur M. Thériault, du Département de Géographie de l'Université Laval, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse mais surtout pour ses précieux conseils, ses encouragements et son amitié.

Je remercie les Professeurs F. Bonn, du Département de Géographie de l'Université de Sherbrooke et J-P. Villeneuve de l'INRS-Eau pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Ma reconnaissance s'adresse également à mon ami J-P. Ducruc, de la division du patrimoine écologique du Ministère de l'Environnement du Québec, avec qui j'ai travaillé en étroite collaboration durant toutes ces années, au fil de discussions nombreuses et passionnées. Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes de la division qui ont largement contribué à cette recherche, notamment V. Gérardin et L. Gaudreau, son responsable, qui a donné le feu vert à l'élaboration de la carte écologique du bassin-versant supérieur de la Eaton.

Je n'oublierai pas non plus le soutien moral que m'ont apporté mes collègues helvétiques. Je les remercie pour leur aide, leurs conseils informatiques et leurs critiques et suggestions. Je pense tout particulièrement à R. Caloz, R. Prélaz-Droux, R. Husler et P. Bregnard ainsi qu'à L. Vidale et C. Claramunt. Je suis également reconnaissante aux professeurs A. Musy et F. Golay qui m'ont permis de poursuivre et d'achever ce travail dans les meilleures conditions possibles. Je n'oublierai pas enfin l'aide que m'a apporté P. Logent, de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, au niveau de l'exploitation du logiciel LEUROC. Je tiens ici à le remercier de sa collaboration.

Enfin, je tiens tout particulièrement ici à exprimer ma gratitude et mon affection à mes parents ainsi qu'à ma petite famille pour leurs encouragements, leur soutien et leur tendresse.

RESUME

La compréhension des phénomènes qui régissent le fonctionnement des bassins-versants et la production de la ressource en eau doit s'appuyer sur une appréhension à la fois sectorielle mais également globale du système dans son ensemble. Les études décrivant les processus physiques conditionnant les écoulements, selon le type de milieu ou l'interface considérée sont nombreuses et identifient relativement précisément les paramètres clés expliquant le fonctionnement local, voir micro-local du système. En revanche, leur intégration et leur généralisation à un niveau de perception et d'analyse que l'on pourrait qualifier de régional, demeure aujourd'hui encore un véritable casse tête pour les hydrologues.

Pourtant, le bassin-versant est actuellement unanimement reconnu comme l'unité fonctionnelle fondamentale à laquelle doit se référer toute tentative de gestion et de planification des ressources hydriques. C'est pourquoi, même si son fonctionnement systémique interne est mal connu, le bassin-versant constitue le niveau privilégié d'entrée pour toute démarche d'analyse et de modélisation ayant pour objectif la prévision quantitative ou qualitative de débits, non pas sur des bases statistiques ou exclusivement mathématiques, mais en fonction des caractéristiques physiques du milieu.

Dans cette optique, de nombreux modèles hydrologiques tentent de décrire et d'intégrer au mieux ce niveau de perception global donné par le bassin-versant, en essayant de traduire la diversité spatiale qui le caractérise. Différentes solutions permettent ainsi d'exprimer la variabilité des nombreux paramètres physiques qui conditionnent la réponse hydrologique du système. Toutes se fondent cependant sur une discrétisation du bassin, fonction tantôt de critères physiques, uniques ou combinés, tantôt de décisions arbitraires. Ces différentes méthodes de discrétisation transmettent alors des visions partielles, orientées (en fonction notamment des préoccupations des modélisateurs ou des exigences des modèles avals) ou tout simplement erronées de la réalité et contribuent à fausser les résultats obtenus en transmettant une vision dénaturée des systèmes à la base de la production des ressources en eau.

La recherche de critères et la définition de méthodes de discrétisation capables d'intégrer la variabilité spatiale des caractéristiques physiques des bassins-versants, apparaît dans ce contexte, pertinente et nécessaire. La carte écologique, document de synthèse élaboré par les écologues de la Direction du Patrimoine Ecologique du Ministère de l'Environnement du Québec, propose un découpage du milieu naturel en fonction d'une

intégration de ses caractéristiques physiques stables, à savoir une combinaison de caractéristiques de dépôts, de drainage et de pentes. Cette discrétisation, variable et adaptée au niveau de perception requis en fonction de l'application, propose une grille de lecture du milieu en apparence pertinente dans un contexte de discrétisation à finalité hydrologique.

L'objectif de ce travail, basé sur le postulat d'une adaptation du concept proposé par la carte écologique aux problèmes de discrétisation, tente de confirmer cette hypothèse par une justification théorique et une validation pratique des liens entre les informations fournies par la carte et les exigences de la modélisation hydrologique. Il propose d'autre part la définition d'une approche méthodologique d'intégration des données écologiques dans une démarche de discrétisation de bassins-versant. L'ensemble de la démarche s'appuie sur l'exploitation d'outils de type Système d'Information Géographique. L'exercice de validation pratique est effectué sur le bassin-versant supérieur de la rivière Eaton.

Au terme de cette recherche, diverses conclusions s'imposent. La carte écologique, document de synthèse et d'intégration par excellence propose une grille de lecture du milieu pertinente dans une optique de discrétisation. Le découpage qu'elle définit, fruit de l'intégration d'un ensemble de variables physiques stables du milieu, garantit la pérennité de la description et guide la compréhension et la prise en compte cohérente de la diversité du bassin-versant. En revanche, la caractérisation "écologique" des unités spatiales définies impliquent sans nul doute le recours à des informations complémentaires plus adaptées aux exigences de l'hydrologie, notamment pour ce qui touche aux informations de nature topographique. De plus, le niveau de détail imposé par la carte écologique induit le recours à des méthodes de synthétisation de l'information (méthodes statistiques multi-variées notamment) aptes à rendre l'information accessible et interprétable en termes hydrologiques.

La carte écologique intègre une information d'une extrême richesse. Cette intégration, dans le cas d'applications hydrologiques peut apparaître comme un facteur limitant à son exploitation. Mais au delà des contingences liées au domaine applicatif particulier que constitue l'hydrologie, l'exploitation de ce document nous interpelle plus largement sur la problématique du numérique face aux données de synthèse et nous permet de porter un regard critique sur l'exploitation qui en est généralement faite dans le but de favoriser une plus juste exploitation d'informations complexes, fruits des connaissances de l'expert, nécessaires dès lors que l'on s'attache à la compréhension globale des systèmes naturels et anthropiques.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE: PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL.....	4
1.1. NOTIONS D'HYDROLOGIE.....	4
1.1.1. <i>Quelques mots sur la science hydrologique</i>	4
1.1.2. <i>Le bassin-versant: unité fonctionnelle fondamentale pour la gestion, l'aménagement et la protection de la ressource eau</i>	5
1.1.3. <i>La modélisation en hydrologie</i>	7
1.2. SPATIALISATION ET MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	10
1.2.1. <i>Une spatialisation pour quels modèles et dans quel but ?</i>	10
1.2.2. <i>Quelques exemples de spatialisation</i>	12
1.2.2.1. La spatialisation par regroupement "logique" ou zonage.....	12
1.2.2.2. La spatialisation par maillage arbitraire	17
1.2.3. <i>Discrétisation et changement d'échelle</i>	23
1.2.3.1. Remarques préliminaires.....	23
1.2.3.2. Le passage des modèles stationnaires aux modèles régionaux.....	25
1.3. LES TENDANCES ACTUELLES EN HYDROLOGIE: TROUVER DES FONDEMENTS COHERENTS A LA SPATIALISATION.	31
1.3.1. <i>Spatialisation et approche objet, une convergence nécessaire</i>	31
1.3.1.1. Discrétisation spatiale intégrée ou différentielle	31
1.3.1.2. Les atouts d'une approche objet	34
1.3.2. <i>La morphologie du bassin, une variable clé pour la compréhension des processus hydrologiques et l'identification de fondements cohérents à la spatialisation.</i>	38
1.4. LA CARTOGRAPHIE ECOLOGIQUE, UNE EBAUCHE DE SOLUTION	41
1.4.1. <i>Concepts et fondements de la cartographie écologique</i>	41
1.4.1.1. L'écologie du paysage, une école de pensée et une nouvelle perception du milieu naturel	41
1.4.1.2. La cartographie écologique au Canada.	44
1.4.2. <i>Quelques exemples d'application</i>	48
1.4.2.1. Application à la foresterie.....	48
1.4.2.2. Etude sur la vulnérabilité des nappes.....	49
1.4.3. <i>Pertinence de la cartographie écologique pour l'hydrologie</i>	51
1.4.3.1. L'échelle d'analyse	52
1.4.3.2. Les apports de la typologie écologique.....	53
1.4.3.3. Les apports de la cartographie écologique	59

DEUXIEME PARTIE: DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE ET APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE EATON.....	62
2.1. LES OBJECTIFS: PROPOSER UNE SPATIALISATION PERTINENTE POUR L'HYDROLOGIE, DANS L'OPTIQUE D'UNE GESTION INTÉGRÉE DES BASSINS VERSANTS.....	62
2.1.1. <i>Gestion intégrée et développement durable</i>	62
2.1.2. <i>Hydrologie et aménagement intégré du milieu</i>	63
2.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	68
2.2.1. <i>Localisation</i>	68
2.2.2. <i>Topographie</i>	68
2.2.3. <i>Géologie et dépôts de surface</i>	70
2.2.4. <i>L'occupation actuelle: éléments descriptifs</i>	71
2.2.5. <i>Le climat</i>	71
2.3. LES DONNEES.....	73
2.3.1. <i>La carte écologique</i>	73
2.3.1.1. Le niveau de découpage de la carte.....	73
2.3.1.2. L'axe cartographique.....	74
2.3.1.3. La typologie des zones écologiques.....	76
2.3.2. <i>La topographie</i>	78
2.3.3. <i>L'occupation actuelle</i>	79
2.3.4. <i>Le réseau hydrographique</i>	82
2.4. CONCEPTS DE BASE ET METHODOLOGIE.....	84
2.4.1. <i>Objectifs de la démarche</i>	84
2.4.2. <i>Identification des différentes étapes</i>	84
2.4.2.1. L'analyse des informations fournies par la carte écologique.....	85
2.4.2.2. L'extraction de données topographiques à partir du modèle numérique d'altitude.	88
2.4.2.3. La caractérisation des unités écologiques en regard des écoulements de surface.	96
2.4.2.4. Traitements et analyses statistiques en vue de la constitution de zones significativement pertinentes pour l'aménagement intégré des bassins versants.....	104
2.4.3. <i>Options méthodologiques et justifications</i>	114
2.4.3.1. Prise en compte des informations au niveau des unités de référence	114
2.4.3.2. Prise en compte des informations au niveau du polygone cartographique.....	115
2.5. LES OUTILS	122
2.5.1. <i>Les outils de saisie, de stockage et de traitement des informations</i>	122
2.5.2. <i>Les outils d'analyse et de représentation des données</i>	123
2.5.2.1. Les Systèmes d'Information Géographique.....	123
2.5.2.2. Les outils de cartographie.....	124
2.5.3. <i>Les outils de statistiques multivariées</i>	125

2.6. INTERPRÉTATION ET COMMENTAIRES DES RESULTATS.....	126
2.6.1. <i>Quelques remarques sur la qualité des données sources.</i>	126
2.6.2. <i>Le choix des variables</i>	129
2.6.3. <i>Interprétation des différentes analyses</i>	139
2.6.3.1. Tentative 1, menée avec l'ensemble des variables fournies par la carte écologique.....	139
2.6.3.2. Tentative 2; introduction des variables de relation et suppression des variables dont le poids factoriel est très faible.....	140
2.6.3.3. Tentative 3, réalisée sur la base de 26 variables jugées pertinentes.....	144
2.6.3.4. Prise en compte des informations au niveau du polygone cartographique.....	151
2.6.3.5. Commentaires.....	155
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	162
REFERENCES.....	166
ANNEXES.....	176

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU MODELE I.H.D.M.....	13
FIGURE 2: TOPMODEL. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU MODELE DE SOUS-BASSIN.....	13
FIGURE 3: DISTRIBUTION SPATIALE DES VALEURS LN (A /TAN B).....	14
FIGURE 4: REPRESENTATION DE NEUF TYPES DE VERSANTS DE BASE.....	15
FIGURE 5: PROBLEMES RENCONTRES LORS DE L'ELABORATION DES CARTES DE SYNTHESE.....	17
FIGURE 6: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU MODELE S.H.E.....	19
FIGURE 7: STRUCTURE SPATIALE DU MODELE CEQUEAU.....	19
FIGURE 8: SCHEMA DE PRODUCTION DU MODELE CEQUEAU PAR MAILLE.....	20
FIGURE 9: STRUCTURE MODULAIRE DU LOGICIEL HYDROTEL.....	22
FIGURE 10: STRUCTURE SPATIALE DU LOGICIEL HYDROTEL.....	22
FIGURE 11 A ET B: IMPRECISIONS LIEES AU NIVEAU DE DISCRETISATION DES MAILLES.....	33
FIGURE 12: DIFFERENCE ENTRE L'APPROCHE ENREGISTREMENT ET L'APPROCHE OBJET.....	35
FIGURE 13 EXEMPLE DE BASSIN COMPLEXE COMPOSE PAR DIFFERENTS TYPES D'OBJETS.....	37
FIGURE 14: HETEROGENEITES HORIZONTALES ET VERTICALES DU PAYSAGE, OBJET D'ETUDE DE L'ECOLOGIE DU PAYSAGE.....	43
FIGURE 15: LE PAYSAGE EN TANT QU'ECOSYSTEME.....	44
FIGURE 16: CARTE DES NIVEAUX D'APTITUDE A L'EROSION PAR L'EAU APRES DEBOISEMENT.....	50
FIGURE 17: PRINCIPES D'INTERPRETATION DE LA CARTE ECOLOGIQUE.....	52
FIGURE 18: RELATION ENTRE LE FLUX ET LA PERTE DE CHARGE SELON LA LOI DE DARCY.....	57
FIGURE 19: LA CARTOGRAPHIE ECOLOGIQUE ET SES APPORTS POUR UNE DEFINITION D'AIRES DE CONTRIBUTION.....	61
FIGURE 20: APPROCHES TRADITIONNELLE ET " INTEGREE " DANS LE DOMAINE DE LA GESTION DES BASSINS-VERSANTS.....	67
FIGURE 21: LOCALISATION DE LA ZONE TEST.....	69
FIGURE 22: MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN VISUALISE EN 2 DIMENSIONS.....	70
FIGURE 23: CARTE ECOLOGIQUE DU BASSIN-VERSANT DE LA EATON SUPERIEURE.....	75
FIGURE 24: OCCUPATION ACTUELLE DU BASSIN SUPERIEUR DE LA EATON.....	81
FIGURE 25: RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN SUPERIEUR DE LA EATON.....	83
FIGURE 26: SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DES TYPES GEOMORPHOLOGIQUES ISSUS DES DEPOTS GLACIO-LACUSTRES ARGILO-LIMONEUX.....	86
FIGURE 27: DIFFERENTES REGLES DEFINISSANT LE VOISINAGE D'UN NOEUD A ESTIMER.....	91
FIGURE 28: METHODES DE CALCUL D'INDICES THEMATIQUES PAR PIXEL.....	92
FIGURE 29: MODES DE CALCUL DES PARAMETRES DE CONCAVITE ET DE CONVEXITE.....	94

FIGURE 30: DEFINITION HYDROLOGIQUE D'INTERRELATIONS SPATIALES ENTRE LES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	97
FIGURE 31: DOCUMENT DE TRAVAIL DEFINISSANT LES INTERRELATIONS ENTRE POLYGONES CARTOGRAPHIQUES DU POINT DE VUE DES ECOULEMENTS.....	100
FIGURE 32: CAPACITE DIFFUSANTE, RECEPTRICE ET TRANSMETTRICE DES POLYGONES DE LA CARTE ECOLOGIQUE.....	103
FIGURE 33: DEMARCHE BASEE SUR LA PRISE EN COMPTE DES UNITES DE REFERENCE.....	115
FIGURE 34: DEMARCHE BASEE SUR LA PRISE EN COMPTE DES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	116
FIGURE 35: LOCALISATION DE LA ZONE TEST DE 81 POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	118
FIGURE 36: SCATTEROGRAMME PERMETTANT DE DEFINIR LES CLASSES D'HOMOGENEITE CARACTERISANT LA ZONE TEST.....	119
FIGURE 37: INDICES D'HOMOGENEITE INTRA-ZONE.....	120
FIGURE 38 : PROCEDURE D'ANALYSE ET DE TRAITEMENT DES INFORMATIONS EN VUE DE LA CONSTITUTION DE GROUPES D'UNITES CARTOGRAPHIQUES SIMILAIRES.....	127
FIGURE 39: TYPES DE DEPOTS PRESENTS SUR LE BASSIN-VERSANT DE LA EATON.....	131
FIGURE 40: CARACTERISTIQUES DE DRAINAGE.....	132
FIGURE 41: PENTE MOYENNE DES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	134
FIGURE 42: CONCAVITE/CONVEXITE PREDOMINANTE PAR POLYGONE CARTOGRAPHIQUE.....	135
FIGURE 43: ORIENTATION PREDOMINANTE DES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	136
FIGURE 44: RESULTATS DE LA CLASSIFICATION ETABLIE A PARTIR DE 35 VARIABLES.....	143
FIGURE 45: REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VECTEURS PROPRES NORMES UNITAIRES POUR LES SIX FACTEURS (AFC AVEC 26 VARIABLES).....	145
FIGURE 46: CARTOGRAPHIE DES NOTES EN FACTEUR ETABLIE POUR LE FACTEUR 3.....	148
FIGURE 47: RESULTATS DE LA CLASSIFICATION ETABLIE A PARTIR DE 26 VARIABLES.....	150
FIGURE 48: REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VECTEURS PROPRES NORMES UNITAIRES POUR LES SIX FACTEURS (AFC AVEC 22 VARIABLES, SUR LA BASE DE 81 POLYGONES).....	153
FIGURE 49: CARTE DES GROUPEMENTS EFFECTUES SUR LA BASE D'UNE ANALYSE DES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES POUR UNE ZONE TEST DE 81 ZONES.....	154
FIGURE 50: SUPERPOSITION DES GROUPES ETABLIS SUR LA BASE DE 26 VARIABLES, AUX LIMITES DE SOUS- BASSINS.....	157
FIGURE 51: SUPERPOSITION DES GROUPES ETABLIS SUR LA BASE DE 22 VARIABLES, AUX LIMITES DE SOUS- BASSINS.....	158
FIGURE 52: SUPERPOSITION DES GROUPES ETABLIS SUR LA BASE DE 26 VARIABLES, AUX GRANDES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES.....	159
FIGURE 53: SUPERPOSITION DES GROUPES ETABLIS SUR LA BASE DES 22 VARIABLES, AUX GRANDES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES.....	160

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: PARAMETRES TYPIQUES EN MODELISATION HYDROLOGIQUE DISCRETISEE.....	11
TABLEAU 2: PROPRIETES HYDROLOGIQUES DES SOLS PAR TYPES DE TEXTURES	58
TABLEAU 3: CLASSES TEXTURALES FIXEES PAR LA CLASSIFICATION CANADIENNE DES SOLS	59
TABLEAU 4: DONNEES CLIMATIQUES ENREGISTREES A LA STATION DE LENNOXVILLE	72
TABLEAU 5: EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DE CERTAINES CLASSES DE DRAINAGE	87
TABLEAU 6.: TEXTURE ET PIERROSITE DES PRINCIPAUX DEPOTS DE SURFACE PRESENTS DANS LE BASSIN SUPERIEUR DE LA EATON	87
TABLEAU 7: EXTRAIT DU TABLEAU RECAPITULATIF REPERTORIANANT LES CAPACITES DIFFUSANTES, TRANSMETTRICES ET RECEPTRICES DES POLYGONES CARTOGRAPHIQUES.....	101
TABLEAU 8: TOTALITE DES VARIABLES DE BASE PRISES EN COMPTE LORS DES ANALYSES STATISTIQUES.....	105
TABLEAU 9: REPERTOIRE DE L'ENSEMBLE DES VARIABLES DESCRIPTIVES DES 119 MODELES DU BASSIN DE LA EATON SUPERIEURE.	137
TABLEAU 10: LISTE DES 35 VARIABLES PRISES EN COMPTE DANS L'ANALYSE INTERMEDIAIRE	140
TABLEAU 11: LISTE DES 26 VARIABLES PRISES EN COMPTE DANS L'ANALYSE FINALE	144
TABLEAU 12: LISTE DES 22 VARIABLES PRISES EN COMPTE DANS L'ANALYSE DES 81 POLYGONES DE LA ZONE TEST.....	151

INTRODUCTION

La gestion des ressources hydriques doit se faire dans l'optique d'une gestion globale et intégrée du milieu, fondée sur une vision à long terme et favorisant un développement harmonieux et durable. Elle se doit de prendre en compte les contextes physique et écologique mais également économique et sociaux supports et producteurs de la ressource. La conception des modèles hydrologiques déterministes discrétisés s'inscrit dans cette dynamique, sans offrir actuellement de solution optimale (si tant est qu'un optimum existe !!!).

La spatialisation est l'une des étapes clés de la constitution de ces modèles hydrologiques déterministes prévisionnels. Par spatialisation, nous entendons la traduction par une discrétisation du bassin-versant, des principales caractéristiques et par là même de l'hétérogénéité spatiale de celui-ci. Malheureusement, jusqu'à ce jour, le découpage ne garantit jamais l'homogénéité des paramètres physiques propres au bassin, à l'intérieur de chaque entité définie, homogénéité évidemment relative et théorique puisque par nature, le milieu ne peut être que profondément hétérogène. Ainsi, les tentatives de spatialisation, motivées par la nécessité d'une connaissance des caractéristiques et de la variabilité intrinsèque du milieu, transmettent généralement des images partielles ou erronées des systèmes hydrologiques et faussent les résultats des simulations.

A l'origine de ce problème, nous supposons une difficulté d'appréhension du milieu naturel et de son organisation complexe ou plus exactement une incapacité à traduire cette dernière. Cette difficulté n'est pas inhérente au domaine de l'hydrologie. Elle peut être généralisée à toute démarche de gestion et de planification des ressources.

Les problèmes engendrés par cette méconnaissance des caractéristiques du milieu et de son fonctionnement ont entraîné une exploitation souvent irraisonnée, menée à court terme, des ressources naturelles. Les erreurs accumulées ont ainsi motivé l'apparition puis le développement de concepts et de méthodologies aptes à répondre à cette complexification croissante des problématiques. Parallèlement, les progrès dans les domaines de l'acquisition et du traitement des données, la multiplication des données numériques ainsi que l'explosion des capacités de stockage et de traitements de ces dernières, ouvrent aujourd'hui de nouveaux horizons aux planificateurs et aux

aménagistes, offrant une vision différente du territoire (Thériault, 1992) de sa dynamique et des entités qui le composent.

Ainsi, la diffusion de plus en plus large des Systèmes d'Informations à Référence Spatiale (SIRS) ainsi que les développements enregistrés dans le domaine des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) offrent, par une combinaison appropriée de leurs potentiels d'analyse, de traitement et de gestion, des possibilités nouvelles quand à la mise en place de programmes de gestion environnementale globale et raisonnée des ressources. Fournissant une vision plus globale et plus synthétique du milieu, ces outils favorisent, en s'appuyant sur des méthodologies et des concepts appropriés, une meilleure compréhension des milieux étudiés et permettent ainsi une modélisation plus juste de ceux-ci.

Des travaux menés dans le domaine hydrologique confirment cette tendance et exploitent cette dimension nouvelle, tentant d'établir des fondements cohérents à la spatialisation et par là même, visant à une compréhension accrue des systèmes hydriques (Beven, 1989; Kirby et al., 1976). Cependant, ces recherches exploitent encore trop peu les potentiels méthodologique et technologique issus de l'apparition des Systèmes d'Informations à Référence Spatiale.

Devant ce constat, face aux insatisfactions qu'engendrent les tentatives de découpages arbitraires ou "à vision partielle" et dans une optique de compréhension globale du milieu générateur de la ressource (en l'occurrence le Bassin-Versant), il nous a semblé pertinent d'évaluer le potentiel qu'offrirait une combinaison appropriée d'informations spatialisées synthétiques cohérentes pour la modélisation, enrichies de données externes et intégrées au sein d'un SIG.

Dans le domaine des informations synthétiques offrant une base de spatialisation pertinente, une approche a retenu notre attention. Cette approche, qui puise ses fondements dans l'écologie du paysage (Naveh et Liebermann, 1984; Zonneveld, 1988; Rougerie et Beroutchachvili, 1991), trouve une application directe au Québec (Jurdant et al, 1977; Ducruc et de Sède, 1991), à travers la constitution des cartes écologiques mises en place par le Ministère de l'Environnement et de la faune. Ces documents proposent un découpage du milieu naturel basé sur une combinaison des paramètres climat-géologie-dépôts-drainage-pente dans un cadre bioclimatique. Dans le détail la spatialisation écologique s'appuie sur la géologie du socle rocheux intervenant au niveau de la

structure, du relief et des éléments géologiques quaternaires déterminants pour la topographie et la morphologie du terrain. Au niveau typologique, les milieux sont caractérisés par le climat, la géologie du socle, les matériaux de surface, le régime hydrique des sols et la couverture végétale.

De par ses propriétés intrinsèques, la méthode présente un intérêt certain pour la modélisation hydrologique. En traduisant l'organisation spatiale naturelle du paysage, le découpage écologique structure l'espace selon ses propriétés fondamentales, propriétés dont découlent l'ensemble des caractéristiques et des phénomènes propres au milieu naturel, en particulier les phénomènes liés à l'hydrologie.

Nous nous proposons donc dans un premier temps, d'évaluer dans une optique de gestion intégrée des bassins, la pertinence des concepts mis de l'avant par l'écologie du paysage à travers la cartographie écologique. Cette adaptation devrait aboutir idéalement à la constitution d'un découpage définissant des entités primaires significatives pour l'hydrologie, ces entités devenant alors la base de spatialisation pertinente des bassins-versants et de leur désagrégation en sous-bassins. Afin de valider nos hypothèses, une application de ces principes sur le bassin-versant de la rivière Eaton supérieure illustre notre approche.

Cette première phase d'évaluation du potentiel de la carte écologique nous amène également à prendre conscience de ses limites d'application. Ainsi, naturellement la méthodologie suivie s'oriente vers un enrichissement des données de base par des informations externes adaptées à la problématique hydrologique. Cet enrichissement illustre le potentiel qu'offre ces informations globales lorsqu'elles sont valorisées par leur intégration au sein d'un SIG. Par cette démarche, nous pouvons ainsi déterminer les limites et les atouts des informations cartographiques synthétiques fournies et démontrer la nécessaire convergence entre une approche purement numérique et une approche plus géographique, qualifiée par un degré élevé de synthétisation et d'abstraction. En d'autres termes, cette recherche tente de démontrer comment à partir d'informations que l'on suppose pertinentes et d'un haut niveau informationnel (la carte écologique), et en s'appuyant sur une exploitation rationnelle des moyens, des technologies et des concepts aujourd'hui à disposition, il est possible d'améliorer la vision et la compréhension du fonctionnement des bassins versants, considérés comme l'entité pertinente dans une optique de gestion et de planification hydrique.

PREMIERE PARTIE: PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

1.1. NOTIONS D'HYDROLOGIE

1.1.1. Quelques mots sur la science hydrologique

La définition du terme "eau" donnée par le dictionnaire Robert (eau: "liquide incolore, inodore, transparent et insipide lorsqu'il est pur") laisse bien peu présager de la richesse, de la complexité et des enjeux liés à ce simple mot. L'eau, à la fois ressource, vecteur et milieu se trouve au centre des préoccupations actuelles de gestion, d'aménagement et de planification. Agent puissant dans de nombreux processus, elle est l'objet d'enjeux considérables tant au niveau écologique qu'économique (Ambroise, 1991). C'est pourquoi, de tout temps, les hommes ont cherché par tous les moyens à "domestiquer" les cours d'eau. S'installant à leurs abords, les grandes civilisations de la Mésopotamie ou de l'Egypte par exemple ont développé très tôt des techniques d'alimentation et d'irrigation.

Cependant, si au départ, les problèmes posés par la gestion demeuraient relativement simples, peu à peu les exigences d'une multi-utilisation de la ressource et la multiplication du nombre des demandeurs a conduit à une complexité des problématiques liées à son exploitation. Aujourd'hui, face à l'ampleur des pressions exercées sur les ressources, l'eau en particulier, il devient urgent de mettre en place une approche globale et cohérente tenant compte des interactions et des interdépendances complexes agissant sur les acteurs et les composantes du système pris dans son intégralité.

La science hydrologique suit cette évolution. C'est une science ancienne, qui a évolué très lentement suivant les besoins du moment. On peut réellement dire que l'hydrologie moderne n'a connu un essor véritable que depuis les années 30 (Llamas, 1985) sous l'impulsion du développement agricole, industriel et économique. La croissance, en engendrant des besoins nouveaux, s'est accompagnée d'une augmentation de

l'exploitation et de la dégradation de la ressource Eau. Il est alors devenu primordial pour les ingénieurs et les planificateurs de comprendre le système et d'en planifier l'exploitation dans un souci de rationalisation et de conservation.

Aujourd'hui, en se référant à la définition du Conseil Fédéral pour la Science et la Technologie (U.S.A, 1962), "L'hydrologie est la science qui étudie les eaux terrestres, leur origine, leur mouvement et leur répartition sur notre planète, leurs propriétés physiques et chimiques, leurs interactions avec l'environnement physique et biologique et leur influence sur les activités humaines". C'est une science complexe qui doit faire appel à de nombreuses autres disciplines telles que la physique, la météorologie, les mathématiques, la statistique, la géographie et bien d'autres encore.

Cette complexité a amené, dans l'optique d'une meilleure compréhension et d'une simplification de l'analyse des phénomènes hydrologiques, la recherche d'une unité géographique restreinte ayant une signification hydrologique. C'est dans cette optique que peu à peu, les concepts de bassin-versant et autres zones contributives aux écoulements ont vu le jour et sont devenus une base d'analyse reconnue.

1.1.2. Le bassin-versant: unité fonctionnelle fondamentale pour la gestion, l'aménagement et la protection de la ressource eau

Le bassin-versant peut être défini comme: "un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les précipitations et dont les excès en eau ou en matières solides transportées par l'eau forment, à un point unique de l'espace, une embouchure ou un exutoire" (Llamas, 1985). Cette définition reste bien partielle, excluant d'emblée les problèmes de délimitation de bassin en regard des écoulements souterrains. Cependant, comme le souligne Ambroise (1991), l'entité bassin-versant s'impose aujourd'hui comme unité fonctionnelle fondamentale pour la gestion, l'aménagement et la protection des ressources en eau. Le bassin-versant apparaît comme une unité spatiale intégratrice, applicable à différents niveaux de perception sous une large gamme d'échelles.

Le concept paraît séduisant mais sa mise en pratique pose des problèmes majeurs. La notion de bassin implique un raisonnement appliqué à des surfaces. La globalité du

concept sous-tend une imbrication étroite de processus physiques et biologiques. La compréhension du fonctionnement hydrologique dépend de l'identification et de la maîtrise d'un grand nombre de facteurs interagissant, variables dans le temps et dans l'espace. Les débits sont générés dans la plupart des cas par plusieurs processus simultanément ou successivement, dans des combinaisons très variables dans le temps et l'espace et dépendant, dans chaque cas, de plusieurs facteurs contrôlant la présence / absence de chaque processus et son intensité. Cette affirmation, confirmée dans la pratique nous laisse présager des difficultés d'exploitation de ce concept, s'appuyant aujourd'hui sur des bases théoriques bien floues.

De fait, les processus de génération de débits demeurent relativement méconnus. La théorie Hortonienne, fondée sur un partage des eaux de pluies disponibles au sol après interception par la végétation entre l'infiltration et le ruissellement ne permet pas, malgré sa pertinence, de répondre à l'ensemble des cas concrets identifiés. Cette théorie néglige entre autres, des phénomènes tels que le ruissellement hypodermique, les contributions aux écoulements aériens des nappes phréatiques, le rôle des macropores actifs sous conditions de saturation etc... Les processus à l'origine de la génération des débits sont conditionnés par de nombreux facteurs fixés par:

- les conditions aux limites marquant les échanges du système avec l'atmosphère
- les conditions initiales décrivant l'état hydrique et hydrologique du bassin-versant
- la variabilité spatio-temporelle des paramètres et leur organisation spatiale (pour les sols et la végétation notamment)
- les caractéristiques géométriques du milieu avec notamment la morphométrie et la topographie du bassin.

Ce dernier point est particulièrement important dans la mesure où les facteurs topographiques et morphométriques influent sur la répartition spatiale des facteurs précédemment cités. Les effets orographiques illustrent parfaitement cette dépendance. Autre exemple, et non des moindres relativement à l'hypothèse de base de cette recherche, l'influence de la topographie sur la répartition spatiale des formations superficielles et des types de sols.

Cependant, et malgré les réserves exprimées quant à la compréhension du fonctionnement hydrologique global du milieu, le bassin-versant n'en demeure pas moins l'entité spatiale de base. Considéré en tant que système dynamique non linéaire, lieu où interagissent de nombreux processus identifiés globalement par l'appellation de "cycle de l'eau", il demeure le pivot central de recherches fondamentales pour lesquelles les progrès ne se feront qu'au prix d'une approche interdisciplinaire assurant une meilleure intégration des phénomènes identifiés individuellement.

1.1.3. La modélisation en hydrologie

Dans le langage usuel, le terme de modèle reste très ambigu, désignant indifféremment ce qui sert ou doit servir d'objet d'imitation (le modèle du peintre ou du photographe) et une représentation simplifiée d'un processus ou d'un système dans son ensemble (un modèle mathématique par exemple). En hydrologie, c'est à la deuxième définition qu'il faut se référer et interpréter la modélisation comme une démarche visant à reproduire, dans une certaine mesure, le comportement de systèmes réels, bien souvent dans une optique prévisionnelle.

En hydrologie, un modèle peut être défini comme la représentation simplifiée sous une forme physique ou mathématique d'un système complexe (de la génération de débits à l'échelle du bassin à la simulation d'écoulements en zone non saturée par exemple) pour lequel, les réponses produites par une sollicitation externe sont difficilement prévisibles à cause du très grand nombre de facteurs pris en compte et de la complexité des interrelations existant entre ces derniers.

Chaque modèle peut être caractérisé par:

- un ensemble de variables mesurables représentatives du système considéré.
- un ensemble de relations mathématiques entre ces variables, aptes à retranscrire son fonctionnement. Ces relations mathématiques font intervenir un certain nombre de paramètres permettant de calculer à partir des variations spatio-temporelles imposées à ces variables, les variations correspondantes des autres variables. Les paramètres

peuvent donc être définis comme des valeurs constantes affectant les variables du modèle considéré.

Il est important de souligner qu'un modèle doit être vu comme une interprétation de la réalité et non comme une reproduction de celle-ci. Interprétation sous-entend obligatoirement point de vue. Tout modèle est donc conçu et développé pour répondre à certains objectifs. Il est fondé sur une représentation orientée de la réalité. C'est pourquoi, la manipulation de modèles, en hydrologie ou dans d'autres disciplines doit être faite avec prudence en tenant compte du domaine de validité et du champ d'application pour lesquels ils ont été conçus (Ambroise, 1991). Cette remarque fondamentale vaut particulièrement pour l'hydrologie, science aux multiples points de vues, pour laquelle il n'existe encore pas de théorie et de concepts uniques mais aussi science aux multiples objectifs, de l'ingénierie à la recherche en passant par des préoccupations de gestion et d'aménagement.

Il existe une multitude de modèles hydrologiques et les tentatives de classification sont nombreuses dans ce domaine. En restreignant le champ d'investigation aux modèles applicables à l'échelle du bassin-versant, Ambroise (1991) distingue les grands types suivants:

- les modèles déterministes, par opposition aux modèles stochastiques¹ selon la nature des variables et des paramètres
- Les modèles globaux, spatialisés ou locaux, en référence avec leur intégration de la dimension spatiale
- les modèles évolutifs ou statiques selon qu'ils prennent en compte le temps ou non
- Les modèles empiriques ou physiques, avec pour intermédiaire, le modèle conceptuel, mi-empirique, mi-physique

La multiplicité des approches hydrologiques transparaît clairement à travers cette liste non exhaustive des modèles développés dans le domaine. Tous applicables à l'échelle du bassin-versant, ils ne prennent pas tous en compte la dimension spatiale de ce dernier.

¹ L'hydrologie stochastique traite des phénomènes soumis aux lois du hasard, du moins en partie. Par opposition au déterminisme, tout phénomène stochastique comporte la présence d'une variable aléatoire.

Intéressons nous à présent à la perception et à l'intégration de la variabilité spatiale des variables hydrologique en modélisation.

1.2. SPATIALISATION ET MODELISATION HYDROLOGIQUE

1.2.1. Une spatialisation pour quels modèles et dans quel but ?

Il existe de nombreux travaux concernant les modèles hydrologiques et leurs objectifs mais peu d'entre-eux s'intéressent aux problèmes de spatialisation. Pourtant, dans certains cas, la spatialisation est l'une des étapes majeures de la modélisation hydrologique. En effet, certains modèles requièrent impérativement une discrétisation du bassin-versant. Il s'agit des modèles déterministes paramétriques régionaux qui généralement font appel à une connaissance poussée des caractéristiques physiques du milieu. Ces modèles, orientés essentiellement vers la gestion et la planification des ressources hydriques, demandent d'une part la connaissance des phénomènes physiques et des processus hydrologiques qui contrôlent la réponse du bassin-versant et d'autre part un découpage apte à traduire au mieux la variabilité spatiale des paramètres qui régissent ces processus. Ils ont un objectif prévisionnel avant tout et la finesse de l'information qu'ils requièrent leur permet de simuler les effets de tout changement sur une partie ou la totalité du bassin. Ces modèles permettent également (Beven, 1989) de prévoir les mouvements des polluants et des sédiments sur un bassin et d'évaluer les débits des bassins-versants non jaugés. Malheureusement, bien souvent, les avantages qu'ils procurent, notamment le fait que ce type de modèle reste valide même sous des conditions extrêmes, sont masqués par d'énormes difficultés pratiques (masse des données manipulées, temps d'exécution, etc...) rendant leur mise en oeuvre difficile.

Dans d'autres cas, la discrétisation n'est pas une étape impérative de l'analyse, mais elle peut améliorer les performances des modèles. Ainsi, Hromadka et al. (1988) nous prouvent l'intérêt d'une discrétisation du bassin dans le cas de l'emploi de modèles hydrologiques linéaires basés sur des hydrogrammes unitaires. Partant de l'hypothèse que par une discrétisation du bassin-versant en quelques zones liées par le réseau hydrographique, on améliore les performances de simulation, Hromadka montre par la mise au point d'un estimateur de la variance des différentes pointes de crue, que cette dernière décroît avec l'augmentation du nombre de zones. La connaissance de la distribution effective des pluies n'augmentant pas avec le niveau de discrétisation, l'auteur

en conclut que la discrétisation entraîne plutôt un rapprochement du comportement hydrologique réel du bassin.

En fait, dans le domaine, si le consensus semble s'être établi au sujet des processus mis en cause et des paramètres fondamentaux (Cf. tableau 1), le problème demeure quant à la façon optimale de discrétiser le bassin-versant. Malgré le fait de poursuivre un objectif commun, à savoir de traduire au mieux la complexité du milieu pour améliorer les performances des simulations, les tentatives de spatialisation s'appuient sur des fondements divers où chacun puise selon ses besoins, en fonction des exigences des modèles.

Tableau 1: Paramètres typiques en modélisation hydrologique discrétisée
(d'après Beven et O'Connell, 1982)

Végétation	<ul style="list-style-type: none"> • Paramètres de résistance dynamique • Paramètres de résistance du couvert • Indice foliaire
Topographie	<ul style="list-style-type: none"> • Altitude moyenne • Pente
Zone non-saturée	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution et profondeur racinaire • Conductivité hydraulique • Humidité du sol • Tension capillaire
Zone saturée	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité dans la direction de chaque axe • Coefficient de stockage
Ecoulement de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosité • Dimension des canaux • Coefficients de Flux
Fonte des neiges	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosité de surface de la neige • Conductivité/teneur en eau/taille des grains/densité • Conductivité thermique • Température

1.2.2. Quelques exemples de spatialisation

1.2.2.1. La spatialisation par regroupement "logique" ou zonage

La spatialisation par regroupement logique tente de composer un zonage du bassin-versant en s'appuyant sur un paramètre clé ou une combinaison de paramètres clés du milieu naturel mais surtout en tenant compte du modèle qui sera utilisé à l'aval. De ce fait, la majorité des types de découpages que nous allons présenter, ont été conçus spécifiquement pour des modèles précis et non en fonction des caractéristiques propres au milieu considéré et à son fonctionnement. Cette approche, orientée "application" génère d'emblée un certain nombre de problèmes, comme nous le verrons ultérieurement.

- **Le modèle I.H.D.M.**

Le modèle I.H.D.M. (Institute of Hydrology Distributed Models) mis au point en 1980 nous donne une assez bonne idée d'une spatialisation logique à un paramètre. Développé dans la tradition Hortonienne, c'est à dire privilégiant les interactions infiltration-éléments de surface, ce modèle subdivise le bassin en unités topographiques. Les flux de surface et le réseau de canaux sont représentés de façon unidimensionnelle alors que le milieu saturé-non saturé est bi-dimensionnel (Cf. figure 1). Dans cet exemple, il apparaît clairement qu'il sera très difficile d'appréhender le comportement de chaque unité étant donné que son homogénéité tient uniquement aux caractéristiques topographiques. Ce type de discrétisation mise donc avant tout sur le poids prépondérant de la topographie sur le comportement hydrologique des bassins-versants.

- **Le TOPMODEL.**

Le TOPMODEL, dont les fondements théoriques ont été posés par Kirby en 1976 et dont la première formulation et le premier test ont été établis sur le bassin de Crimple Beck (G.B) par Kirby et al. (1976), part de l'hypothèse suivante: le bassin-versant à l'étude doit être divisé en unités de sous-bassins relativement homogènes dans leur réponse hydrologique. Ces unités peuvent alors être modélisées séparément.

Les sols et la topographie étant des paramètres fondamentaux pour la génération des écoulements, la division en unités homogènes est basée sur la prise en compte de ces caractéristiques.

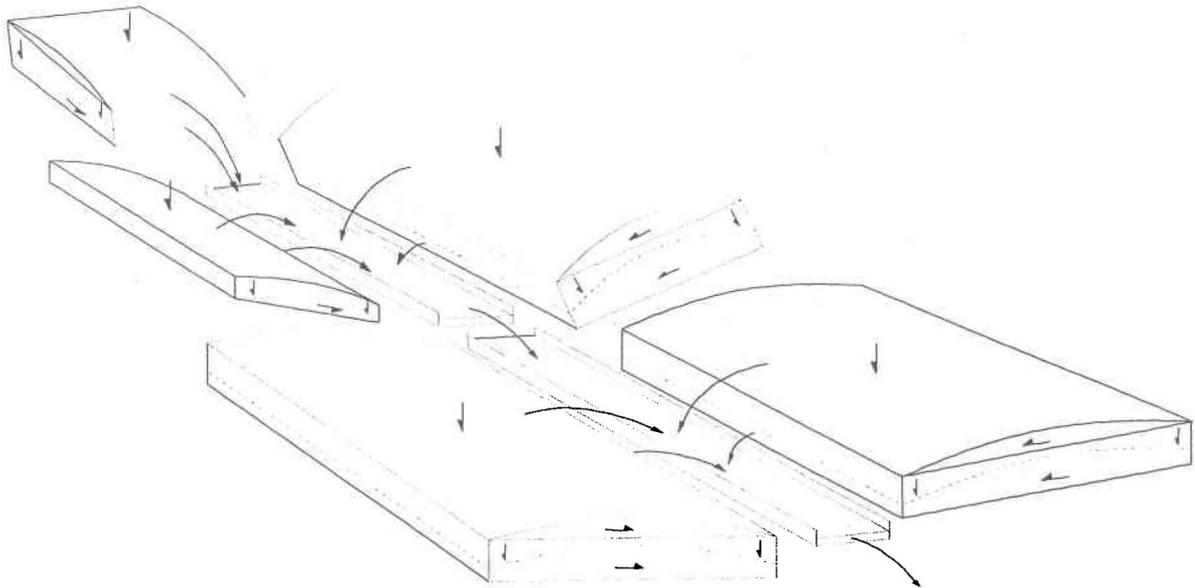


Figure 1. Représentation schématique du modèle I.H.D.M.
(Morris, 1980)

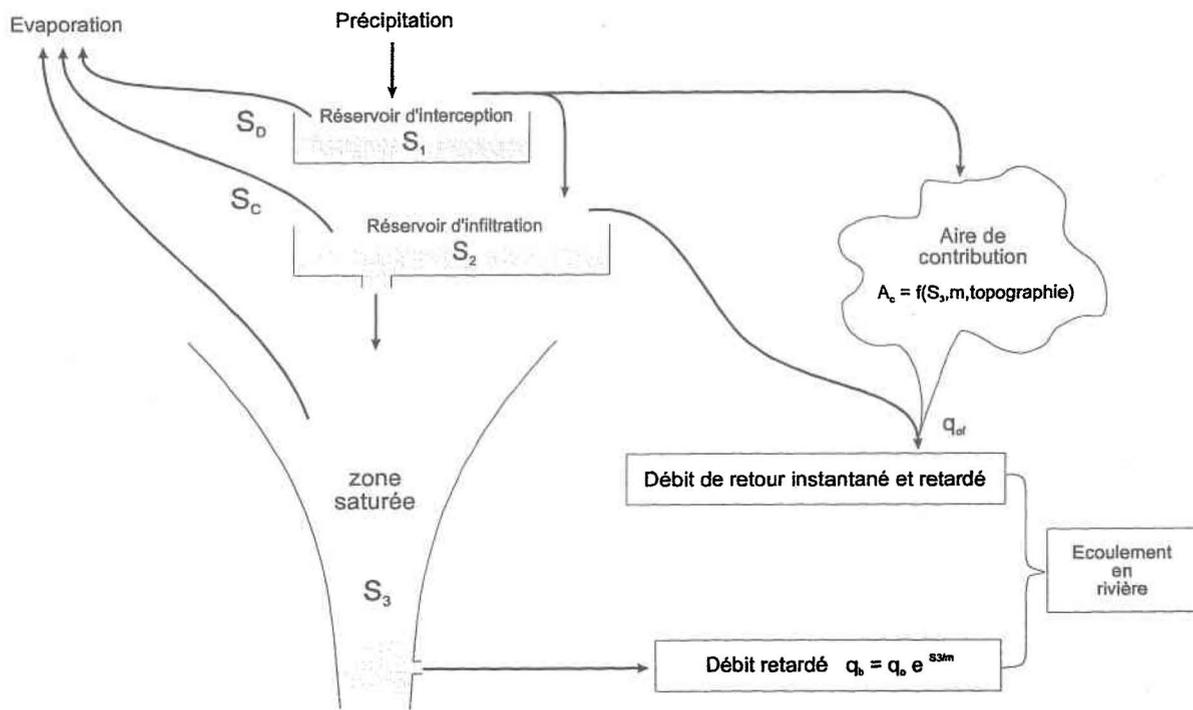


Figure 2: TOPMODEL. Représentation schématique du modèle de sous-bassin.
(d'après Beven et al., 1984).

Sans entrer dans les détails, chaque sous-bassin est ensuite modélisé de manière indépendante sous la forme d'un système de réservoirs (cf. figure 2).

Les paramètres du modèle sont basés sur les caractéristiques physiques du bassin-versant. Leur estimation se fait en deux phases:

- une première phase de discrétisation selon les unités de pente, à partir de cartes topographiques et de photographies aériennes.
- une deuxième phase de travaux de terrains, afin d'évaluer les taux d'infiltration et le type de végétation.

A la suite de cette étude, chaque sous bassin peut être divisé en unités de drainage homogènes (notion de surface contributive dont la dynamique est reproduite à l'aide de l'indice de Kirby²), (Cf. figure 3).

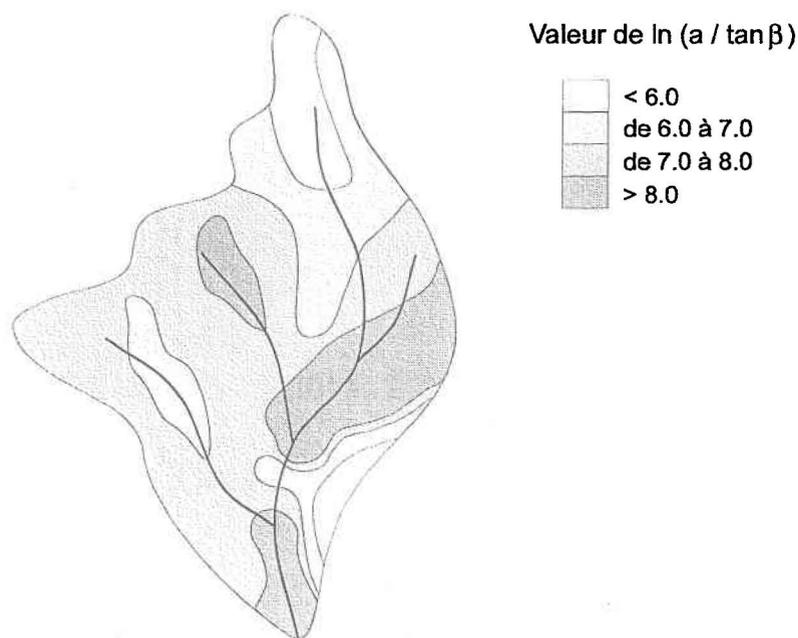


Figure 3: Distribution spatiale des valeurs $\ln(a / \tan \beta)$.

² L'indice topographique de Kirby est défini comme le logarithme népérien de $(a/\tan \beta)$, où a est défini par la surface partielle en amont du bassin par unité de longueur de courbe de niveau et $\tan \beta$ est la pente du terrain en un point.

Nous reviendrons ultérieurement sur l'approche théorique et les implications du TOPMODEL ainsi que sur l'apport de notions telles que l'indice topographique de Kirby. Cet indice illustre parfaitement le poids donné aux paramètres de type topographique en matière de génération des écoulements et de réponse des bassins-versants. De nombreux travaux vont d'ailleurs dans ce sens, tentant d'établir une classification des versants par type de topographie afin d'identifier par la suite sur le terrain divers mécanismes en fonction de la nature des versants et de la position de la pente (Jordan, 1992) (cf. figure 4).

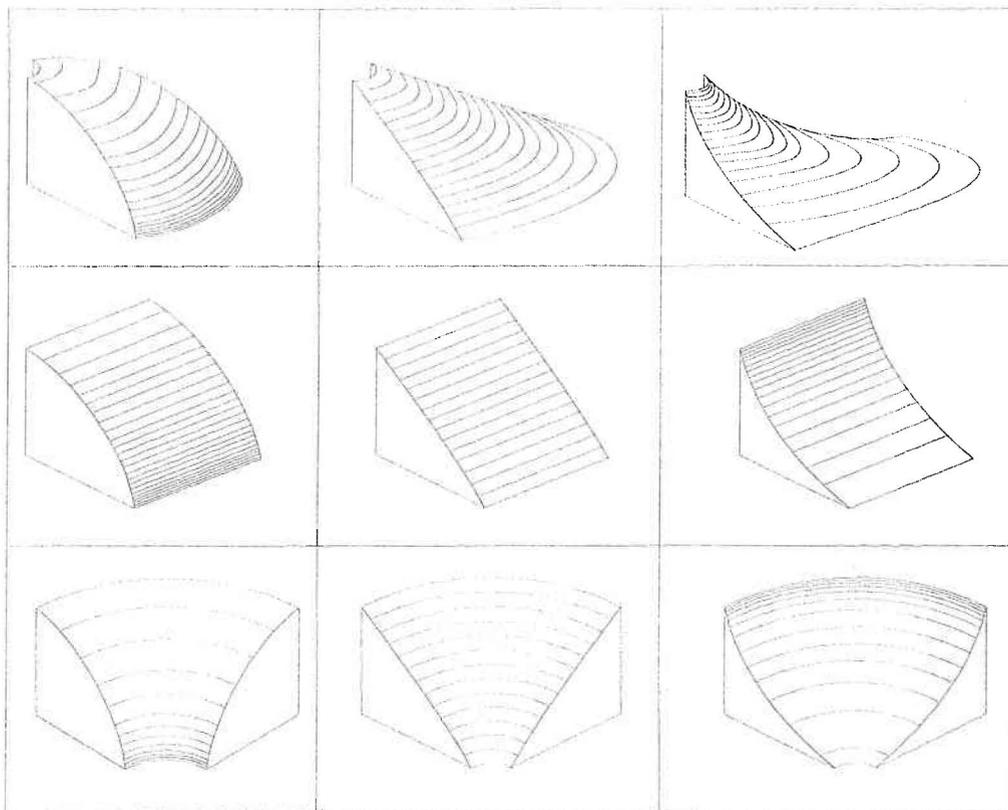


Figure 4: Représentation de neuf types de versants de base.
(d'après Tsukamoto et Ohta, 1988)

Les procédés de superposition de cartes (map overlay).

Certaines tentatives visent à prendre en compte une combinaison de paramètres pour constituer un découpage adapté à des exigences préétablies. C'est le cas des cartes de synthèse (map overlay). Contrairement aux méthodes que nous venons de décrire brièvement, cette méthode n'est pas spécifiquement rattachée à un modèle particulier, ni au domaine hydrologique, mais vise à une meilleure compréhension du milieu en tentant de synthétiser de l'information en provenance de plusieurs sources. En utilisant des procédés de surimposition de cartes thématiques, on tente d'identifier des aires pertinentes en matière d'aménagement ou de modélisation. Le développement actuel des Systèmes d'Informations à Références Spatiales (S.I.R.S.) conditionnent fortement la mise en place de ce type de méthodes. Cependant, celles-ci génèrent de nombreuses imprécisions (Cf. figure 5, Bailey, 1988).

- imprécisions dans le positionnement des limites de zones (Cf. figure 5A)
- imprécisions dues au manque d'uniformité des régions (Cf. figure 5B)
- imprécisions dans l'assemblage des documents (Cf. figure 5A,B,C)
- dans le cas de cartes matricielles, imprécisions dues à l'impossibilité de traduire les détails contenus à l'intérieur du pixel
- imprécisions dues au fait que chaque facteur est étudié indépendamment des autres, ce qui est différent d'une synthèse réelle.
- à cet ensemble d'imprécisions, nous pouvons également ajouter le fait que l'"overlay" ne permet qu'une combinaison logique de variables ce qui restreint considérablement l'analyse.

Bailey (1985) propose une solution alternative pour limiter ce genre de problème. Il préconise l'utilisation d'un nombre limité de paramètres pour établir la synthèse. Lors de son étude, appliquée à la cartographie des écosystèmes, il aborde également un point fondamental en mettant de l'avant le rôle que joue le niveau de perception auquel se situe l'analyse sur le choix des facteurs environnementaux qui contrôlent les écosystèmes. Nous verrons ultérieurement quelle peut être l'importance de cette remarque pour la suite de notre recherche. La régionalisation fondée sur une simple superposition d'informations spatialisées demeure toutefois insatisfaisante, contribuant davantage à un cumul d'imprécisions issues de données agrégées et donc par définition synthétiques et

difficilement interprétables, qu'à une amélioration de la compréhension du territoire étudié quelle que soit la finalité de la démarche.

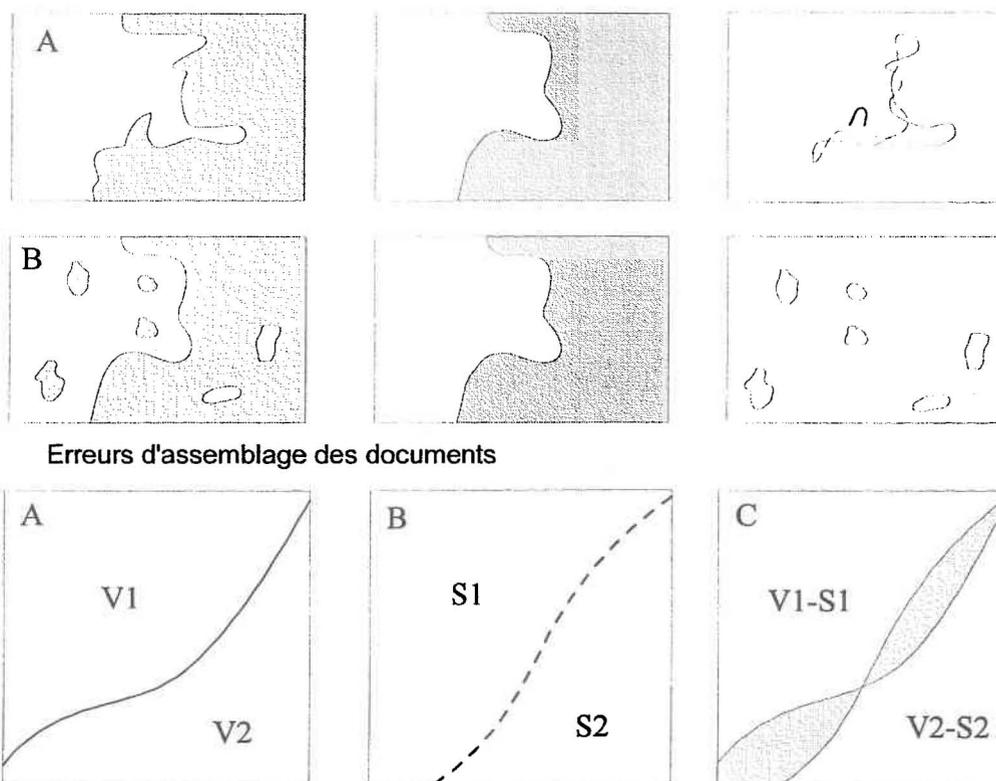


Figure 5: Problèmes rencontrés lors de l'élaboration des cartes de synthèse (d'après Bailey, 1988).

1.2.2.2. La spatialisation par maillage arbitraire

Devant la difficulté à traduire par un découpage "logique" la diversité du milieu naturel, certains travaux se sont orientés vers un découpage arbitraire basé sur un maillage superposé au bassin-versant. Cette approche était rendue facile par l'évolution des moyens techniques, supprimant le facteur limitant que pouvait constituer la masse de données générées par ce type de procédé.

Un certain nombre de modèles ont été développés selon cette approche. Parmi ceux-ci nous pouvons citer:

- **Le modèle S.H.E.**

Le modèle SHE. (Système Hydrologique Européen) a été développé conjointement par la Grande Bretagne, le Danemark et la France (Jonch-Clausen, 1979). SHE simule chacun des processus hydrologiques présumés importants du mouvement de l'eau (fonte des neiges, interception, évaporation, ruissellement, écoulement en rivière, en milieu saturé et non saturé) soit au travers d'équations différentielles de conservation de la masse, des moments ou de l'énergie, soit à l'aide d'équations empiriques basées sur des recherches expérimentales (Abbott et al., 1986). Ce modèle à discrétisation par maillage arbitraire est caractérisé par un flux de surface et de zone saturée bi-dimensionnel et un réseau de canaux unidimensionnel. Les calculs d'infiltration pour la zone non-saturée sont effectués sur chaque carreau séparément et de façon unidimensionnelle (Cf. figure 6). Le développement du modèle a pris de nombreuses années. Actuellement SHE se heurte à un certain nombre de problèmes liés à la masse de données préalables qu'il exige (Beven et al., 1980). Par ailleurs, les simulations effectuées ne semblent pas donner de résultats probants (nécessité de calibrage du modèle afin de minimiser les différences entre les hydrogrammes simulés et observés. Dans ce domaine, comme le souligne Jordan (1992), la surparamétrisation apparaît alors comme un inconvénient de taille.

- **Le modèle CEQUEAU**

Un deuxième modèle maillé a retenu notre attention. Il s'agit du modèle CEQUEAU mis au point à l'I.N.R.S-Eau. CEQUEAU a été développé au cours des années 70 par une équipe de l'Institut (Charbonneau et al, 1977). La structure spatiale de CEQUEAU est organisée sur la base d'un maillage arbitraire en carreaux entiers dans un premier temps puis en carreaux partiels en fonction des sous-bassins (Cf. figure 7). Pour chaque carreau entier, on simule le flux vertical de l'eau (Cf. figure 8: fonction de production). Le transfert de l'eau à travers le bassin-versant est ensuite calculé à partir de chaque carreau partiel. La fonction de production est symbolisée par un système à réservoirs. Cette caractéristique fait de CEQUEAU un modèle conceptuel discrétisé.

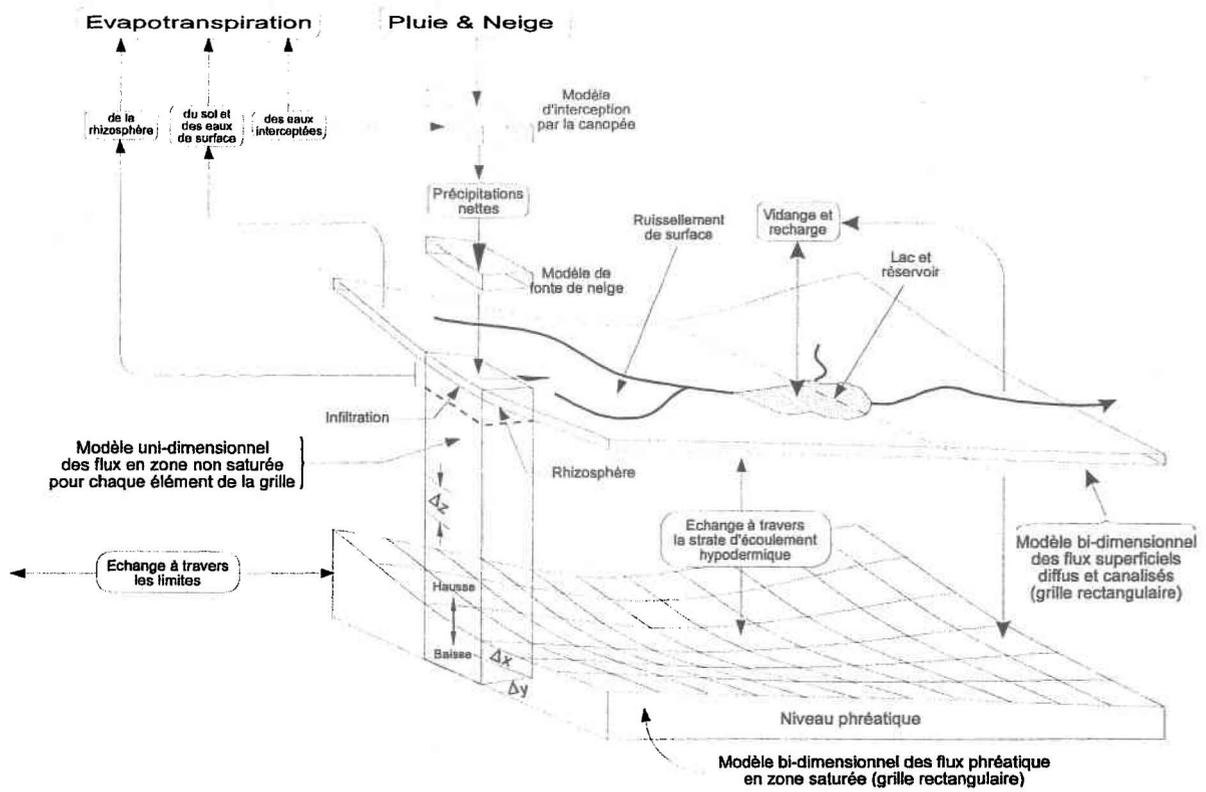


Figure 6: Représentation schématique du modèle S.H.E.

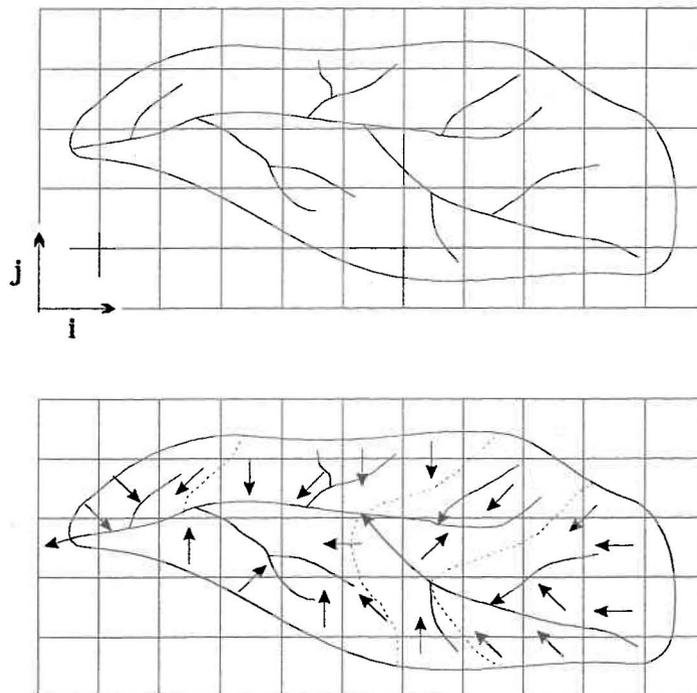


Figure 7: Structure spatiale du modèle CEQUEAU.

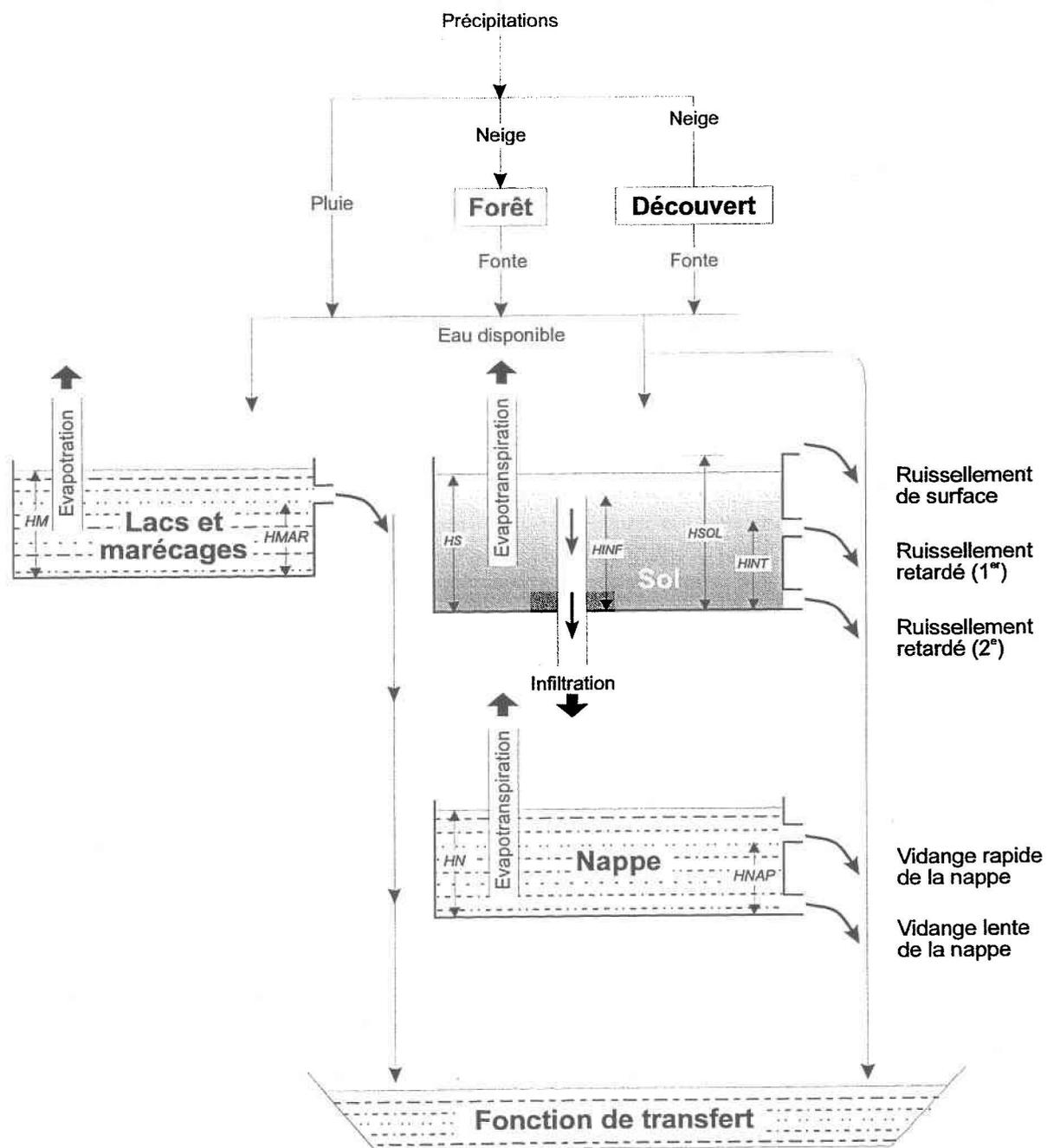


Figure 8: Schéma de production du modèle CEQUEAU par maille.

- **Le modèle HYDROTEL.**

Le modèle HYDROTEL développé depuis 1985 à l'INRS-Eau est un modèle hydrologique prévisionnel capable de prendre en compte les données fournies par les satellites. L'objectif de cette intégration est une amélioration de la capacité prévisionnelle du modèle, s'appuyant sur la richesse des informations synoptiques fournies par la télédétection.

HYDROTEL puise ses fondement dans les différents travaux menés à l'INRS-Eau depuis de nombreuses années, notamment suite aux développements du modèle CEQUEAU (voir paragraphe précédent) et du modèle MDOR (Villeneuve et Isabel, 1984) portant tout particulièrement sur les problèmes d'optimisation de paramètres. Dans le domaine de la télédétection, diverses applications ont été réalisées au sein de cet institut, traitant des couplages entre télédétection et modélisation hydrologique (Fortin et al, 1990).

HYDROTEL est conçu pour permettre un emploi rationnel de la télédétection, sans exiger impérativement son recours. Il permet, en fonction des données disponibles et de leur nature, de choisir des algorithmes de simulation adaptés. La structure du modèle est de type distribué. Le pas de discrétisation est choisi en fonction de la taille du bassin versant à l'étude. Les débits sont alors estimés par le biais de différents modules (Cf. figure 9) permettant d'évaluer des valeurs de précipitation, d'évapotranspiration, le bilan vertical par maille de discrétisation ainsi que l'impact des données physiographiques, en tenant compte de la variabilité spatiale des variables topographiques, d'occupation du sol, etc...(Cf. figure 10). Les données acquises par télédétection sont préalablement traitées afin d'obtenir les variables de transition désirées. A titre d'exemple, l'occupation du sol peut être déduite de l'analyse d'images SPOT ou Landsat, classifiées selon diverses méthodes propres au traitement d'image. Cette information dérivée, reportée sur le maillage hydrologique, vient ensuite enrichir les données d'entrée du modèle. Reste ensuite à définir des relations entre ces classes d'occupation et différents processus identifiés, pertinents en hydrologie (tels que la fonte des neiges par exemple), aux différentes mailles définies sur le bassin.

L'objectif d'intégrer et de valoriser la masse d'informations fournies par les satellites a permis le développement d'un ensemble de fonctionnalités intéressantes tant au niveau des traitements que doivent subir les données pour répondre aux besoins de l'hydrologie que dans le domaine de la définition des paramètres pertinents. Cependant, ce type d'approche demeure encore très limitée, tout simplement par le fait d'une très faible

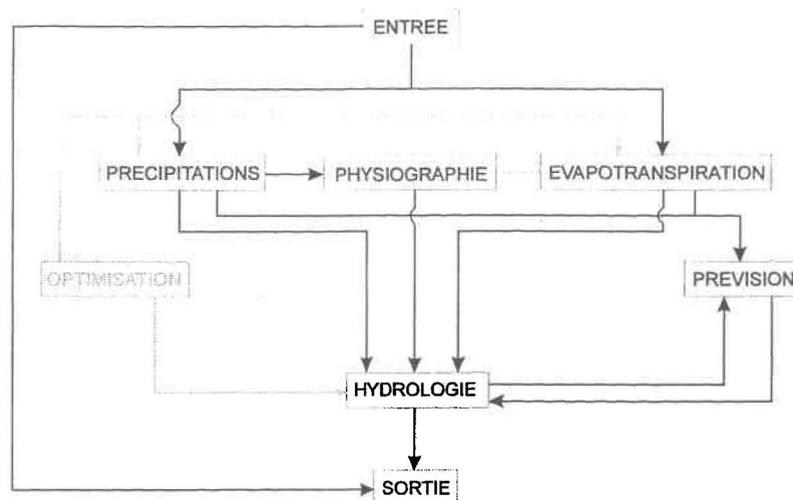


Figure 9: Structure modulaire du logiciel HYDROTEL

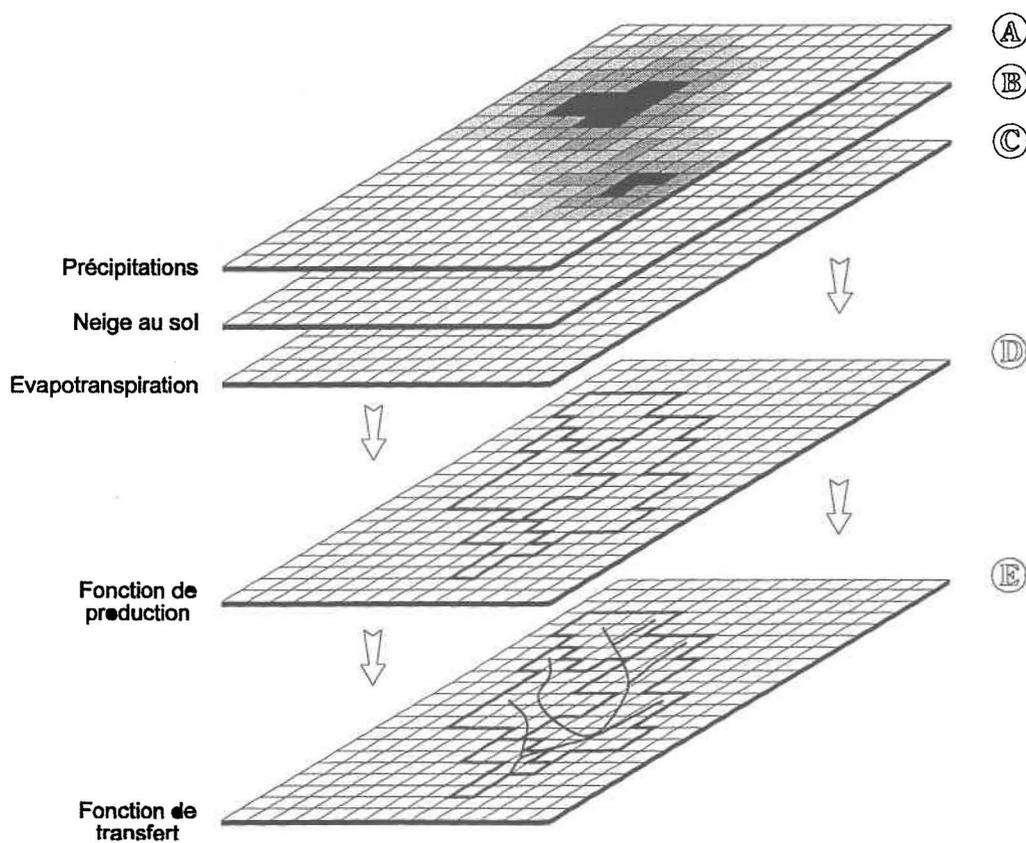


Figure 10: Structure spatiale du logiciel HYDROTEL

compréhension des phénomènes qui nous permettraient de passer d'une observation locale à une valeur régionale extrapolée à partir de données ponctuelles. Ce problème, soulevé ici dans le cadre d'une exploitation de données satellitaires à des fins hydrologiques peut être généralisé à l'ensemble des domaines touchant à l'analyse d'informations spatiales pour une meilleure compréhension des processus qui régissent le fonctionnement du milieu.

1.2.3. Discrétisation et changement d'échelle

Comme nous venons de le voir, les tentatives de spatialisation sont nombreuses (et nous n'avons pas fait ici de revue exhaustive !). Cette revue partielle avait essentiellement pour objectif d'illustrer la diversité des approches et des solutions retenues dans ce domaine. Malheureusement peu d'entre-elles semblent satisfaisantes. Pour quelles raisons ? En fait la spatialisation, paraissant garantir une meilleure représentation du milieu, génère une série de problèmes capables de fausser l'ensemble de la démarche et de réduire à néant les efforts consentis pour une meilleure représentativité des bassins-versants. Ces problèmes sont de différentes natures et ne sont pas propres à l'analyse hydrologique.

1.2.3.1. Remarques préliminaires

Quelle que soit la solution retenue, maillage arbitraire ou zonage, il est extrêmement difficile de choisir la taille de la maille optimale en fonction des caractéristiques du territoire ou dans le cas de découpage "logique", le paramètre qui conditionnera la spatialisation. Le bassin-versant est un milieu profondément hétérogène et complexe. Cette complexité est due aux nombreuses interactions entre les phénomènes physiques, chimiques et biologiques, variables dans le temps et l'espace, à l'origine de la structure et du fonctionnement du milieu.

Actuellement, la compréhension de cette complexité prend une importance toute particulière. Les changements globaux (global change) pour parler en des termes qui résonnent davantage à nos oreilles suite à la médiatisation de leur emploi, ne pourront être réellement appréciés que lorsque l'on aura décortiqué les différents concepts et les lois qui nous permettront de passer du local au régional voir au global sans aucun

problème. Comme le souligne Carol A. Wessman (1992), ce passage du local au régional ne sera réalisable:

- qu'après avoir réellement compris l'ensemble des phénomènes locaux conditionnant le système global,
- après avoir apprécié correctement le concept d'échelle,
- enfin après avoir clairement défini de nouvelles stratégies d'acquisition et de traitement des informations, en sachant toutefois que la complexification du système induit généralement une instabilité accrue (effet Papillon).

A ces quelques points j'ajouterais les remarques suivantes. La démarche scientifique a longtemps été marquée par une attitude réductionniste, relative au niveau d'incompréhension des phénomènes. De fait, le niveau de perception auquel sont étudiés les processus est bien souvent déterminé par les limites de l'ignorance. L'incompréhension des relations pouvant exister entre des processus à l'échelle régionale a bien souvent cantonné les recherches dans des domaines pointus faisant intervenir un nombre limité de processus sur un espace très restreint. Cette approche, bien que réductionniste, demeure nécessaire à la compréhension locale des phénomènes. Elle ne peut cependant suffire à une compréhension globale et cela en référence au fait, chaque jour vérifié, que le tout n'est jamais égal à la somme des parties. Cette tendance a fortement limité les investigations touchant à la définition de variables explicatives, abordant le milieu en temps que système complexe du point de vue phénoménologique, spatial et temporel.

L'apparition de l'approche systémique, sur laquelle nous reviendrons plus en détail ultérieurement, a initié cette nouvelle vision que nous avons aujourd'hui du monde qui nous entoure. La complexité était depuis longtemps pressentie (la théorie du cycle de l'eau, par exemple, avait déjà été ébauchée par Aristote (384-322) avant J.C. avant d'être formulée plus explicitement par Léonard de Vinci au XV siècle). Cependant, les moyens de vérifier ces hypothèses manquaient, tant au niveau des données nécessaires que des traitements possibles. Et sans doute des théories telles que la théorie mathématique de l'information (Shannon, 1948) permettant de quantifier et de codifier les informations au moyen d'un système binaire ainsi que les progrès dans le domaine de l'électronique ont permis le véritable décollage des approches intégratrices de compréhension du milieu. Ainsi depuis plus d'un demi siècle, l'approche systémique s'est étendue à de nombreuses

disciplines parmi lesquelles figurent la géographie physique (avec notamment les travaux de Tricart (1968) en géomorphologie) et l'hydrologie. Cette perception holistique ouvre de nouvelles perspectives de recherche et contribue sans doute à une meilleure appréhension de la dynamique globale des systèmes qui composent notre milieu. Elle amène également de nombreuses questions sur ce problème délicat et non encore résolu du passage d'une perception et d'une description locale à une perception et une compréhension régionale voire même globale des éléments qui composent à la fois notre milieu et notre environnement.

1.2.3.2. Le passage des modèles stationnaires aux modèles régionaux

Ces quelques remarques résument en fait l'un des problèmes majeurs de la modélisation à l'échelle régionale, le problème de la variabilité spatiale et de l'échelle d'analyse (peut-être serait-il plus judicieux de parler de niveau de perception). Yves Brunet, dans une étude menée sur les modèles de bilans énergétiques et hydriques (Brunet, 1989) nous livre des réflexions très pertinentes sur ce sujet. Pour lui également, l'un des principaux problèmes tient au fait qu'il est extrêmement difficile d'établir des relations entre les modèles dits stationnaires développés pour des petites zones et les modèles régionaux capables de cerner le comportement de zones plus vastes. La variabilité spatiale des paramètres peut être telle qu'elle rende caduques les lois élaborées à l'échelle locale tout en suscitant l'émergence de phénomènes nouveaux, impliquant de nouvelles contraintes en terme de modélisation et de mesure.

De fait, le passage à un niveau régional implique nécessairement l'apparition d'une hétérogénéité difficilement maîtrisable. En terme de modélisation, cette hétérogénéité induit un certain nombre de problèmes qu'il faudra bien régler. Brunet définit trois approches permettant selon lui d'appréhender les problèmes de variabilité spatiale et d'échelle d'analyse. Il fonde sa démonstration sur les échanges thermo-hydriques dans les sols.

Pour Brunet, le modèle permettant d'évaluer les transferts de masse et d'énergie dans les sols, modèle fondé sur un ensemble de dérivées partielles fortement non linéaires et dépendant de relations variables spatialement, ne peut être valable que très localement. Pourtant dans quelques cas, cette variabilité spatiale des relations (notamment de pression et de conductivité) peut être mise en relation avec les pressions et conductivités

moyennes de la parcelle, en faisant intervenir un facteur d'échelle " a_i " (facteur d'échelle au point i , de nature stochastique).

- d'entrée il devient alors possible, connaissant la distribution de " a_i " et les courbes moyennes de pression et de conductivité à partir de mesures expérimentales, de simuler les transferts thermo-hydriques à l'échelle de la parcelle. Cette simulation peut se faire par le biais de la méthode Monte-Carlo en considérant la parcelle comme un ensemble de n colonnes auquel on affecte n valeur de a . Ensuite, on calcule la moyenne des variables de sortie afin de simuler le comportement de l'ensemble de la parcelle.
- Une autre méthode consiste à définir un paramètre moyen " a_m " permettant de considérer d'emblée la parcelle hétérogène localement comme homogène à une échelle supérieure. Ce paramètre moyen peut alors être calculé par ajustement, sur la base d'une valeur de a qui minimise les écarts.
- Enfin, il est possible de définir un nouveau modèle, adapté d'emblée à l'échelle régionale et pour lequel il est nécessaire de définir d'autres paramètres et d'autres variables

Un petit bilan des trois méthodes explicitées précédemment nous permet d'identifier le problème majeur que pose la régionalisation. Conceptuellement, la troisième approche, raisonnant dès le départ à un niveau global est de toute évidence la plus satisfaisante. Malheureusement, elle demeure très difficile à mettre en oeuvre, vu la méconnaissance des processus régissant le fonctionnement des systèmes au niveau régional, cette méconnaissance étant sans doute dûe en partie au manque d'études menées dans ce domaine, au profit de recherches plus spécifiques et locales. C'est pourquoi, comme le souligne Brunet (1989), les tendances semblent aujourd'hui s'orienter vers la deuxième solution, c'est à dire la tentative d'exploiter au niveau régional des modèles locaux réadaptés à un niveau plus global par le biais de la définition de paramètres moyens.

Cette réadaptation doit alors se baser sur un choix judicieux des modèles de départ. Ceux-ci devront posséder un nombre minimum de paramètres intervenant de façon aussi linéaire que possible dans les équations. Il faudra également avoir recours aux paramètres les moins sensibles. Brunet propose d'ailleurs de "court-circuiter" ce qui

touche à la formalisation directe des processus (comme la conductivité hydraulique, fortement hétérogène spatialement) en paramétrant les équations par l'introduction de modèles simples aux relations semi-empiriques. Pour les paramètres intervenant de façon linéaire dans le modèle (comme l'albédo), l'intégration spatiale pourra se faire par le calcul simple de la moyenne arithmétique des paramètres locaux, pondérés par la fraction de surface correspondante. Brunet suggère enfin d'avoir recours, dans le cas de paramètres non linéaires à des méthodes d'inversion de modèle, en soulignant toutefois que cette approche n'est valable que dans les limites de validité du modèle lui-même, les paramètres devenant des paramètres d'ajustement sans grande réalité physique.

L'exemple précédent, décrivant les problèmes liés au passage du local au régional était ciblé sur un domaine d'application pointu visant à décrire et simuler les échanges thermohydriques dans les sols. Cependant, cet exemple illustre relativement fidèlement les problématiques typiques de l'hydrologie prévisionnelle, problématiques traitées de façon similaire et s'appuyant sur une connaissance des processus physiques locaux faisant intervenir des paramètres non linéaires spatialement. Les solutions proposées dans ce contexte sont essentiellement statistiques et comme nous l'avons constaté, il demeure très difficile de mettre en place une approche régionale cohérente s'appuyant sur des concepts préétablis et permettant de définir des variables et des paramètres significatifs au niveau global.

D'autres approches, plus déterministes et conceptuelles tentent de trouver des solutions à ce problème d'intégration spatiale. Dans le domaine de la biologie, particulièrement concerné par le grand courant du "global change" de la conférence de Rio, les problèmes de régionalisation présentent un intérêt particulier. En biologie, le niveau d'échelle d'analyse des phénomènes est conditionné par le niveau de connaissances accumulées sur les différentes composantes du milieu et sur les contraintes environnementales fixées par les niveaux supérieurs. Localement, les milieux sont appréhendés comme hétérogènes et leur organisation fait généralement apparaître des "patterns"³. mélangés. Au niveau local, la dynamique propre aux différents systèmes est souvent ignorée et les milieux paraissent stables. Aux niveaux de perception supérieurs, la dynamique des systèmes semble très lente et les patterns définis sont perçus comme uniformes sous des conditions locales. A travers cette vision, les problèmes sont donc appréhendés dans leur

³ La terminologie de Pattern, terme anglais qui désigne littéralement un modèle, un patron, sera employée sans traduction dans ce travail, l'équivalent français étant difficilement traduisible puisque véhiculant un sens plus restreint, faisant abstraction de toute la connotation d'organisation propre au terme anglais.

dimension spatio-temporelle et pas uniquement spatiale comme pour l'exemple précédant. Selon C. A. Wessman (1992) c'est à partir d'une modification dynamique du système aux fines échelles que la configuration globale est modifiée et qu'il devient nécessaire de redéfinir les perceptions que l'on a des phénomènes aux différents niveaux. C'est pourquoi, pour comprendre l'organisation et la réponse des systèmes selon les échelles, il faut connaître:

- l'hétérogénéité du système sous observation, notamment la fréquence de ses variations naturelles
- les liens entre les patterns temporels et spatiaux et les processus qui les dirigent.

En s'appuyant sur la théorie de la hiérarchie, C. A. Wessman propose une approche intéressante dans le domaine de l'intégration spatio-temporelle des phénomènes. L'échelle est définie comme le concept reliant les différents procédés à différents niveaux de perception. Il est donc nécessaire d'identifier les facteurs signifiants selon ces niveaux, cette définition s'appuyant sur une approche hiérarchique conjointe de bas en haut et de haut en bas.

L'approche de bas en haut est définie comme une approche partant d'entités individuelles auxquelles sont ajoutées un ensemble de contraintes permettant d'expliquer la genèse des phénomènes observés à une échelle supérieure. Cette démarche permet d'exploiter des informations disponibles à des échelles inférieures lorsque les données définies empiriquement au niveau de perception supérieur manquent.

L'approche de haut en bas analyse des patterns et déduit les processus et les facteurs explicatifs à l'origine de cette structure organisationnelle supérieure. En biologie, le concept de contrainte permet de prédire à une échelle plus fine les phénomènes qui conditionnent l'organisation du milieu. L'objectif est alors d'identifier les facteurs explicatifs aux différents niveaux de perception.

Les remarques de C.A. Wessman sont particulièrement intéressantes. Elles mettent en effet l'accent sur la nécessité d'évaluer des variables significatives et des facteurs explicatifs en fonctions des échelles d'analyse, chaque échelle étant déterminée par un jeu de contraintes. Cette approche semble similaire à la méthodologie suivie dans le domaine de l'écologie du paysage et sur laquelle nous reviendrons plus en détail à la section 1.4. Enfin, selon l'auteur, la perception des phénomènes locaux et leur

extrapolation au niveau régional ne peuvent qu'être facilitées par une approche intégrée basée sur une large gamme d'informations diverses (satellitaires, cartographiques, d'inventaire etc...) combinées avec des modèles de processus et synthétisées à l'aide d'outils de type Systèmes d'Information Géographique (SIG).

En hydrologie, les problèmes de l'intégration spatiale sont également loin d'être résolus. La plupart des variables et des flux intervenant dans le cycle de l'eau ont une très forte variabilité spatio-temporelle, ce qui ne va pas sans poser de problèmes de représentativité et d'échantillonnage. En terme de modélisation, cette variabilité impose, pour obtenir une cohérence des résultats, une bonne adéquation entre les données disponibles et les termes du modèle. Quelques solutions peuvent être actuellement envisagées dans ce domaine:

- La définition d'aires élémentaires apparaît comme l'une des voies les plus répandues permettant de caractériser la réponse complexe d'un bassin versant.
- D'autres recherches s'orientent actuellement vers la définition d'invariants, de variables réduites indépendantes des échelles spatio-temporelles, permettant de comparer entre eux les fonctionnements de systèmes différents (Wood et al., 1990)
- Troisième axe de recherche, l'utilisation des fractales pour analyser l'hétérogénéité considérée comme auto-similaire sur une large gamme d'échelle. Ce type de recherche a déjà été menée dans le cadre notamment d'études topographiques et morphométriques des réseaux de drainages. La géométrie fractale permet ainsi de définir des descripteurs valables sur une échelle étendue d'espace et de temps facilitant ainsi les études par analogie (Moussa, 1991)

Les trois exemples cités précédemment traduisent assez fidèlement les grandes tendances de la recherche touchant aux problèmes d'intégration et de changement d'échelle. Divers types de solutions sont effectivement possibles en fonction notamment des thématiques abordées et de leur niveau de compréhension. Dans un contexte de recherche appliquée, pour lequel, à l'image des travaux de Brunet sur les transferts thermo-hydriques, les processus locaux sont relativement bien connus et donc modélisés, les approches statistiques de régionalisation offrent une réponse satisfaisante,

conditionnées bien évidemment par la qualité des données mesurées, leur niveau d'échantillonnage et la validité des modèles utilisés. En revanche, le contexte de la biologie, représentatif d'un ensemble de disciplines non exactes, dont la compréhension du domaine, fondée sur l'observation autant que sur la mesure, ne permet pas de numériser les informations et de modéliser en termes mathématiques les systèmes et les comportements, la statistique offre peu de solutions. Les approches de régionalisation et d'intégration spatiale sont davantage fondées sur des concepts de perception du milieu à l'étude et les recherches s'orientent vers la définition de variables globales et de facteurs explicatifs en fonction du niveau de perception. Enfin, de toute évidence, c'est en élargissant la vision des thématiciens, remplaçant la problématique traitée (hydrologie, biologie ou autre...) dans un cadre global et systémique, que les imbrications des milieux et des phénomènes et les mécanismes de passage d'une échelle à l'autre seront sans aucun doute les mieux perçus et compris.

1.3. LES TENDANCES ACTUELLES EN HYDROLOGIE: TROUVER DES FONDEMENTS COHERENTS A LA SPATIALISATION.

1.3.1. Spatialisation et approche objet, une convergence nécessaire

1.3.1.1. Discrétisation spatiale intégrée ou différentielle

La spatialisation est une démarche fréquente dans de nombreuses disciplines. Elle peut être définie comme un processus cognitif visant à déterminer, sur la base d'un certain nombre de paramètres clés, identifiés relativement au domaine d'application traité, un découpage en entités significatives, décrivant de manière synthétique un ensemble de caractéristiques statiques ou comportementales du milieu considéré. En géographie, les démarches de spatialisation sont nombreuses et ne s'attachent pas uniquement à des problématiques de géographie physique. Les recherches menées notamment autour de la régionalisation en géographie humaine procèdent de la même logique et reviennent à des approches de spatialisation en fonction d'un certain nombre de critères tant physiques que socio-économiques.

L'intérêt d'un tel type de démarche est alors de ramener au niveau de l'entité un ensemble de caractéristiques hétérogènes sur l'ensemble du territoire. La spatialisation est en ce sens une démarche de synthèse. Pour en revenir à la thématique qui nous préoccupe, la recherche d'unités de réponse hydrologique homogènes revient à tenter de mettre en place des entités⁴ de nature hydrologique formant un tout indivisible, pouvant être considérées par la suite comme une base de calcul et d'évaluation. Ce type d'approche en hydrologie est étroitement lié à l'apparition des modèles basés sur les mécanismes de production du ruissellement. Ces recherches sur le ruissellement ont de fait conditionné de nombreux travaux sur le comportement du bassin versant. Elles sont à l'origine de la modélisation à bases physiques (O'Connell, 1991). Ces types de modèles, appelés

⁴Entité: Une entité correspond à un phénomène du monde réel qui ne peut pas être divisé en unités similaires (Prélaud-Droux et Musy, 1994).

modèles descriptifs s'inspirent à la fois des lois théoriques de l'écoulement et des études de terrain.

La spatialisation en hydrologie s'attache à définir des éléments homogènes (ce que nous avons appelé des entités) permettant d'intégrer la variabilité spatiale des caractéristiques du bassin versant. Comme le souligne Jordan (1992), il est possible de définir deux types de discrétisation:

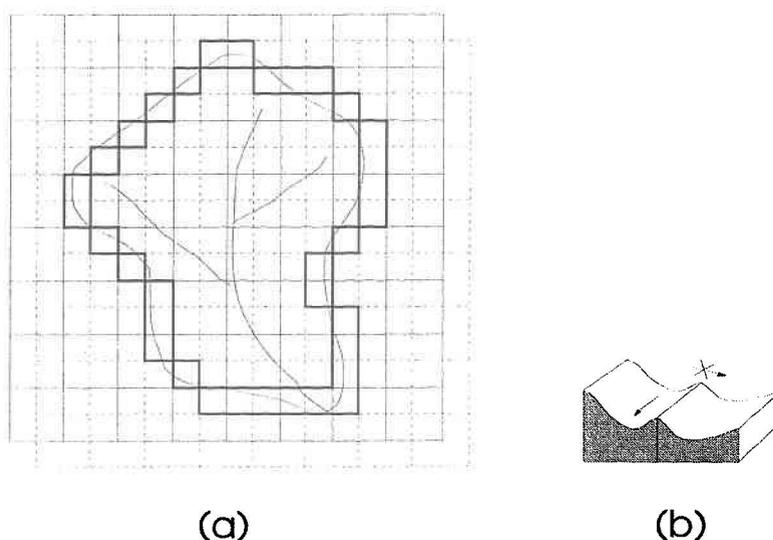
- une discrétisation irrégulière à base d'objets, ces objets étant généralement présentés sous la forme de sous bassins ou de segments
- une discrétisation régulière en mailles

Ces deux types de découpage sont à l'origine de divers types de modèles (cf. Chapitre 1.). Cependant, ils ne procèdent pas de la même logique. Les premiers (à base d'objets) découpent le bassin versant en entités suffisamment grandes, ces entités étant bien souvent des sous bassins, afin de limiter le nombre de paramètres à déterminer. Ce type de modèle peut être apparenté au modèle global puisque chaque entité est généralement modélisée sur les principes de ce dernier. Par ce biais on vise à une meilleure représentation du comportement global du bassin lorsque celui-ci est caractérisé par une forte variabilité spatiale de ses différentes variables. En revanche, le découpage en entités est dans ce cas peu propice à l'évaluation quantitative de flux internes à l'intérieur du bassin.

Les modèles à discrétisation par mailles s'appuient généralement sur une représentation du comportement du bassin en terme d'équations différentielles discrétisées dans le temps et dans l'espace. Il est donc possible, dans ces conditions de déterminer l'écoulement en n'importe quel point du bassin versant. La discrétisation par maille tend alors à décrire le bassin à micro-échelle. Ce type de modèle est généralement plus connu sous l'appellation de modèle à bases physiques. Le plus connu et le plus représentatif de ces modèles demeure sans doute le modèle SHE, décrit précédemment.

Les modèles à base physique ou modèles descriptifs s'appuient sur une base théorique importante. De ce fait, ils permettent d'aborder des problématiques complexes et de répondre à des requêtes difficiles (sur la prédiction d'une réponse hydrologique de bassin suite à changement d'occupation du sol par exemple). Pourtant, leur usage reste restreint. Pourquoi ? Comme le soulignent divers auteurs ayant mené des études

comparatives sur différents modèles dont le degré de conceptualisation était plus ou moins important, (Loague et Freeze., 1985, Richter et Schultz, 1987), les résultats obtenus avec des modèles élaborés ne sont pas plus satisfaisants que ceux obtenus avec des modèles relativement simples. Ce constat peut sans doute s'expliquer par la nature "simpliste" des modèles déterministes qui même s'ils s'appuient sur des recherches conceptuelles poussées, ne fournissent qu'une ébauche de compréhension des processus, sans en maîtriser réellement la nature ni le passage du niveau local voir micro-local au niveau régional. De plus, d'importantes imprécisions dans la description même du bassin peuvent découler du niveau de discrétisation retenu. Un maillage relativement grossier aura tendance à "lisser" un certain nombre d'informations, notamment des informations de nature topographique (cf. figure 11 a), tout comme il induira des imprécisions au niveau des limites (du bassin lui même, du réseau hydrographique etc...) (cf. figure 11 b) .



Pour toutes ces raisons, il semble intéressant de se pencher sur de nouvelles alternatives à l'approche maillée.

1.3.1.2. Les atouts d'une approche objet

Le raisonnement humain s'appuie sur la notion d'objet. Lorsque nous planifions, aménageons ou tout simplement gérons le territoire, nos bases de référence se traduisent en termes de cours d'eau, de lacs, de tronçons, entités du monde réel auxquelles sont rattachées par la suite un ensemble de caractéristiques et d'attributs. Les modèles que nous concevons sont composés d'éléments (ou objets) en interaction. Cette notion d'objet est intrinsèque au raisonnement humain. Cependant, elle est peu adaptée aux différents outils généralement utilisés pour résoudre les problèmes que nous pose la gestion des ressources⁵. Cette distorsion entre nos bases de réflexion et la nature même des données dont nous disposons rend difficile une exploitation de ce concept. Cependant, ces difficultés tendent à s'atténuer par le développement de recherches dans le domaine de la modélisation et de la gestion orientée objet, ainsi qu'avec l'apparition d'outils intégrant ces nouveaux concepts.

Laurini et Milleret-Raffort (1993) donne une assez juste définition de l'approche Orientée Objet en informatique (OO). L'approche objet a pour but une modélisation du monde réel plus proche de la réalité. Cette nouvelle branche de l'informatique matérialise une coupure entre les approches et les outils, ces dernières se désolidarisant de plus en plus des limitations purement techniques qu'induisaient ces outils. Les approches classiques dans le domaine des Bases de Données s'appuient sur le concept de BD relationnelle dans lequel des informations rattachées dans le monde réel à un même objet (informations sémantiquement liées) se trouvent éparpillées informatiquement à travers différentes tables. L'approche objet permet, sans éclater l'information, de décrire à la fois les caractéristiques et le comportement d'une entité au sein d'un même objet (cf. figure 12). Ce processus est appelé encapsulation. Ainsi, à un objet du monde réel correspond un objet dans la base de données alors que dans le cas d'une approche classique, un objet voit ses caractéristiques réparties dans différentes tables.

A partir du concept d'objet, il devient possible d'exprimer un certain nombre de notions telles que les classes de comportement et la notion d'héritage⁶ qui en découle. Ces

⁵ Les données accumulées sur le milieu (concentrations de polluants dans un lac, valeurs d'évapotranspiration d'un type de couvert...) sont généralement collectées sur l'ensemble du territoire, sous forme de "couches d'information, sans une définition précise et une identification de l'objet auxquelles elles se rapportent.

⁶ Un objet étant rattaché à une classe, il lui est possible d'hériter de l'ensemble des attributs de cette même classe tout en possédant des attributs qui lui sont propres.

différentes fonctionnalités de l'approche objet permettent de manipuler des objets complexes de haut niveau plutôt que (dans le domaine des données géoréférencées) des primitives graphiques de type point ligne ou polygone.

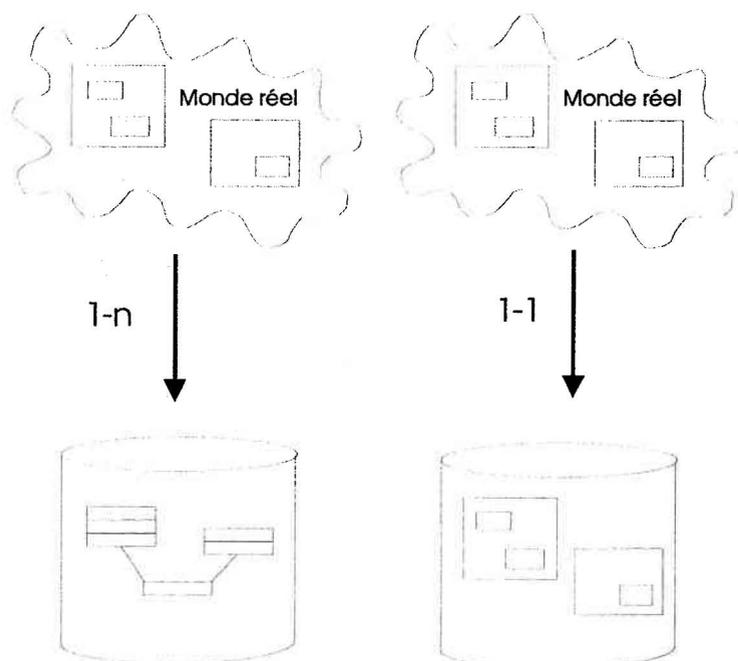


figure 12: Différence entre l'approche enregistrement et l'approche objet
(d'après Laurini et al, 1993).

La notion d'objet appliquée au domaine de la modélisation hydrologique paraît séduisante. Comme nous l'avons montré précédemment, de nombreuses recherches tentent de définir des unités d'analyse significatives (aires de contributions, unités de réponse ou même maillage) à l'échelle du bassin versant. Finalement, chaque tentative de discrétisation vise à définir des éléments, dont le comportement pourrait être synthétisé et globalisé, afin d'en extraire des variables pertinentes et de les introduire dans un processus de modélisation.

Ces éléments sont très proches de la notion d'objet. Ce constat a d'ailleurs été formulé par Abdenego (1989) dans le cadre de son travail sur les apports de la télédétection aux modèles de simulation hydrologique. C'est en réfléchissant et en travaillant sur la notion de maille telle qu'elle est exploitée au sein des modèles hydrologiques que ce dernier

propose de passer de cette notion à celle d'objet hydrologique. De fait, la maille est considérée au sein d'un modèle discrétisé comme une unité de base, homogène, dotée d'un certain nombre d'attributs caractéristiques d'un comportement hydrologique. A partir de ce constat, pourquoi effectivement ne pas considérer la maille comme un objet hydrologique indépendant, décrit par ses propres attributs. Cette approche présente l'avantage de garantir une libre définition de la forme et de la taille des objets en s'extrayant des contraintes étroites d'un maillage classique. La notion d'objet permet en outre de définir des objets hydrologiques de type vectoriel (telle qu'une canalisation) chacun d'entre eux étant défini par ses caractéristiques propres telles que le coefficient de rugosité. Ensuite par un mode de traitement adapté, l'ensemble des objets hydrologiques sont mis en relation en fonction de leurs entrées et sorties.

Les propositions d'Abdenego visent finalement à considérer la maille des modèles maillés comme un objet hydrologique dont le comportement peut être décrit par un certain nombre de variables. Pour ce qui est des modèles globaux, l'adaptation est directe puisque dans ce type de modèles, les unités définies, généralement des sous bassins, sont de toute façon considérées comme des objets hydrologiques.

Dans le contexte de notre recherche, cette approche nous a semblé particulièrement intéressante. Comme le souligne Abdenego, la notion d'objet hydrologique paraît tout à fait adaptée aux exigences de la modélisation hydrologique. Elle permet de décrire des entités complexes et de gérer les relations existant entre elles. Idéalement, une définition précise de l'ensemble des objets hydrologiques composant un bassin-versant pourrait aboutir à une schématisation de celui-ci en un arbre de relations liant les objets les uns aux autres. La modélisation du comportement global du bassin se ferait ensuite à partir de chaque objet, à l'aide des modèles les plus adaptés aux caractéristiques de chacun d'entre eux (cf. figure 13).

La notion d'objet permet globalement d'appréhender le monde réel d'une manière sans doute plus proche de ce que l'esprit humain perçoit. Les moyens informatiques d'aujourd'hui nous offrent la possibilité de modéliser cette notion et de l'exploiter dans des contextes de gestion et de planification. Pourtant, le problème demeure entier. L'existence du concept et sa matérialisation en termes informatiques ne résolvent toutefois pas les problèmes de définition et d'identification des entités (futurs objets informatiques) qui composent le monde réel. Cet enjeu reviendrait, en hydrologie, à définir des entités significatives permettant d'appréhender globalement la variabilité spatiale des différents paramètres conditionnant les écoulements. Et c'est bien là l'objet

de cette recherche; trouver des fondements cohérents à la définition d'objets hydrologiques.

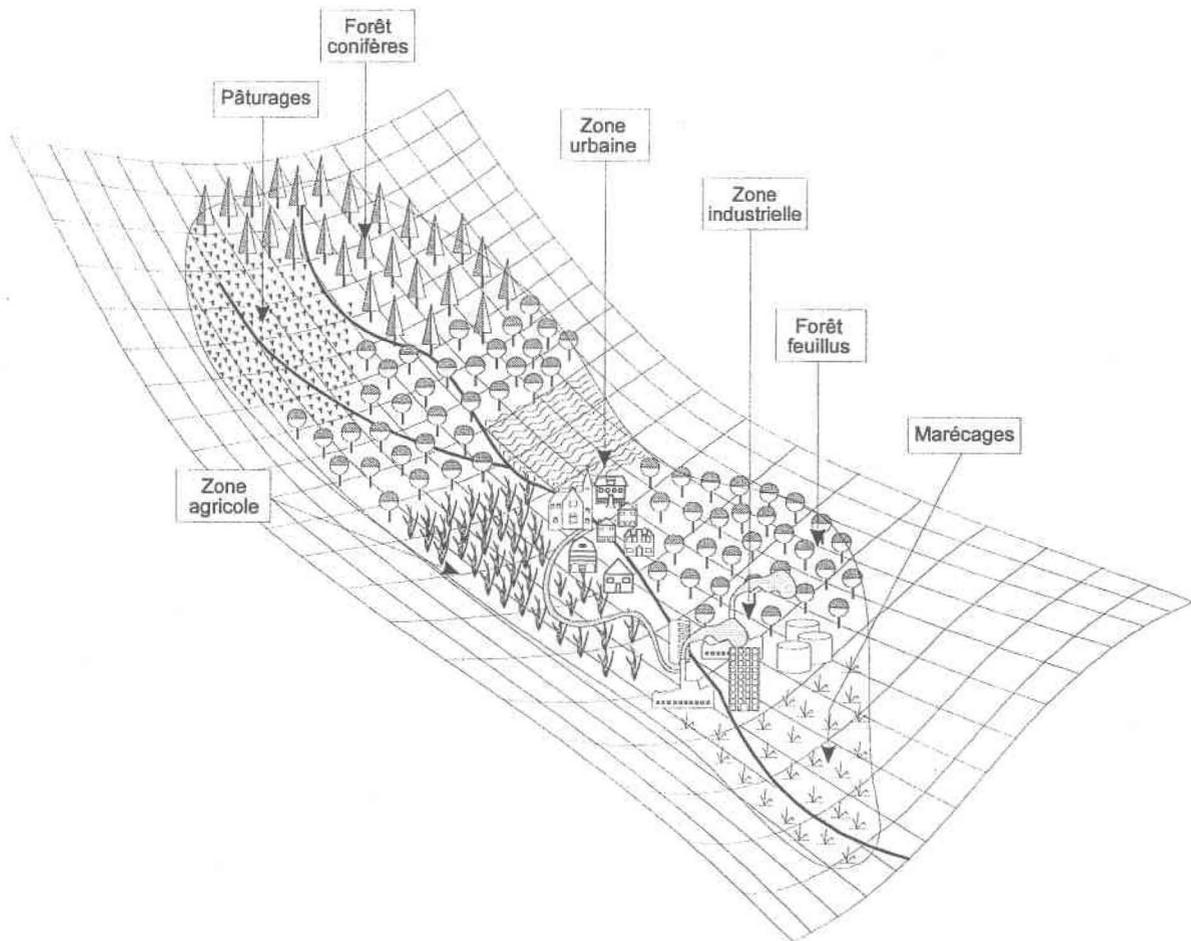


Figure 13: Exemple de bassin complexe composé par différents types d'objets

1.3.2. La morphologie du bassin, une variable clé pour la compréhension des processus hydrologiques et l'identification de fondements cohérents à la spatialisation.

Les difficultés inhérentes à la compréhension des systèmes naturels complexes, tel qu'un bassin versant, ont favorisé l'émergence de nombreuses recherches ayant pour principal objectif la définition d'entités significatives en terme d'hydrologie, ou plus précisément d'écoulement (superficiel ou souterrain). De nombreux chercheurs s'accordent aujourd'hui sur l'influence prépondérante de la morphologie du bassin versant sur les écoulements. Comme le souligne Beven et al (1988), "la morphologie du bassin et les processus hydrologiques sont intimement liés à travers les processus géomorphologiques de développement des sols, d'érosion et de déposition". Ce constat est plus que cohérent si l'on se réfère au fonctionnement du système bassin-versant et à son évolution. L'eau est en effet la force principale conditionnant l'évolution du modelé. Partant de ce principe, pourquoi l'étude et la description du modelé ne serait-elle pas un bon moyen d'appréhender les phénomènes hydrologiques? Cette interdépendance avait déjà été constatée et étudiée par des chercheurs tels que Horton (1932) ou Strahler (1957). Pourtant, comme le remarque Beven et al (1988), ces préoccupations ont largement échappé aux hydrologues par la suite, à l'exception d'études menées sur les limites de bassins et les réseaux d'écoulement. Beven propose d'ailleurs une explication à ce "désintérêt" pour l'étude des conditions géomorphologiques par les hydrologues. Pour lui, la difficulté majeure s'opposant à une réelle compréhension des liens existant entre les processus hydrologiques et les caractéristiques géomorphologiques du bassin est dûe au décalage temporel existant entre ces différents phénomènes. Les temps de réponse des systèmes hydrologiques sont généralement beaucoup plus courts que ceux qui permettent d'appréhender l'évolution du modelé. De ce fait, les caractéristiques du modelé d'un bassin versant sont un héritage de conditions passées. Elles n'en influent cependant pas moins sur les processus hydrologiques présents ! Les nombreuses études hydrologiques intégrant des informations topographiques sous la forme de modèles numériques d'élévation (Quinn et al, 1991) exploitent cette relation des plus évidentes, avec cependant toutes les restrictions qu'elle impose. En effet, l'intégration de modèles numériques d'altitude (MNA) dans les processus de modélisation impose une réflexion sur les impacts et les effets induits du niveau de discrétisation de l'information topographique fournie. La précision du MNA influe fortement sur la qualité des variables qui en seront

dérivées et donc sur la qualité de la description physiographique du bassin et indirectement sur la qualité des simulations hydrologiques (Zhang et Montgomery, 1994).

En fait, trois composantes fondamentales apparaissent comme des composantes clés pour l'hydrologie. Le modelé, les sols et les processus hydrologiques forment en effet un inextricable ensemble dont l'évolution de chacun des éléments reste éminemment liée à celle des deux autres. L'influence de la topographie sur la genèse des sols (Tricart, 1979) est depuis longtemps reconnue par les pédologues. Preuve en est l'élaboration du concept de catena ou chaîne de sol, dont l'appellation est aujourd'hui devenue toposéquence⁷. La genèse d'une toposéquence est conditionnée par le modelé influant sur les conditions et le régime hydrique des sols. Les toposéquences ou plus largement les caractéristiques pédologiques des bassins versants sont donc des indicateurs privilégiés des conditions d'écoulement.

Comme nous l'avons montré précédemment, certaines recherches ont tenté d'exploiter ces liens identifiés entre les caractéristiques géomorphologiques et les processus hydrologiques afin de pouvoir en déduire des moyens de décrire le bassin et surtout de définir des unités de réponses hydrologiques. Le TOPMODEL, décrit brièvement en tête de ce chapitre, s'inspire largement de ce constat et tente une description des conditions prévalant aux écoulements en s'appuyant sur des caractéristiques pédologiques et topographiques. C'est à partir de ce modèle que Wood et al (1988) ont tenté de définir des aires représentatives élémentaires⁸ pertinentes pour la modélisation hydrologique prévisionnelle à l'échelle du bassin versant. Le problème de ce type d'approche réside alors dans la nécessité d'intégrer à la fois les données pédologiques et topographiques. Dans le cas de cette recherche, le TOPMODEL et son concept de surfaces contributives étaient tout à fait appropriés en regard des objectifs fixés, la version du modèle utilisé étant capable de modéliser à la fois les excès conditionnant la réponse du bassin. en terme d'infiltration et de saturation.

Au terme de cette étude, Wood et al arrivent au constat suivant:

- La notion d'aire élémentaire représentative (REA) semble pertinente pour la compréhension de la réponse des bassins versants.

⁷ Une toposéquence est une succession de sols commandée par le relief (Tricart, 1979). Il est à noter cependant que l'appellation de catena peut également s'appliquer à la végétation.

⁸ REA: Representative Elementary Area

- Cette notion est étroitement liée aux caractéristiques topographiques ainsi qu'à la taille du bassin étudié
- Les résultats préliminaires de cette étude paraissent indiquer que la variabilité des sols et la distribution des chutes de pluie semblent jouer un rôle variable en fonction du niveau de perception auquel se fait l'étude. Quoiqu'il en soit, l'augmentation ou la diminution de cette variabilité se traduisent par une augmentation ou une diminution de la variabilité entre sous bassins.

Cette recherche menée par Wood et al (1988) met en évidence deux points fondamentaux:

- Elle met l'accent sur le rôle prépondérant du niveau de perception et sur son influence sur le choix des variables à prendre en compte lors de la modélisation des processus générateurs de débits
- Elle confirme le rôle prépondérant des variables morpho-topographiques pour l'évaluation de la réponse de bassin versant

Dans le domaine de l'hydrologie prévisionnelle à l'échelle du bassin versant, un consensus semble bien exister sur le rôle prépondérant des variables explicatives que représentent la topographie et les sols. Il semblerait également, aux vues de l'exploitation quasi constante dans ce type d'étude du TOPMODEL, que ce dernier soit particulièrement bien adapté, notamment de par l'utilisation qu'il offre de l'indice de Kirby (cf. 1.2.2.1.), à l'intégration de ces deux variables. Cependant, l'indice de Kirby est essentiellement basé sur des informations de nature topographique, la notion de gradient hydraulique (permettant d'évaluer la capacité de la zone à évacuer les eaux) n'étant appréhendée qu'à travers la pente locale du substratum considéré, elle même équivalente à la pente locale de la surface topographique. Il ne semble pas en revanche exister de méthode d'intégration numérique capable de prendre en compte et sur un même plan, l'ensemble des variables contribuant à la génération des écoulements et formant le complexe morpho-topographique propre à chaque bassin. En revanche, ce type d'approche est exploité depuis longtemps, notamment par le biais de la production de cartes hydromorphologiques, dérivées des cartes géomorphologiques.

1.4. LA CARTOGRAPHIE ECOLOGIQUE, UNE EBAUCHE DE SOLUTION

1.4.1. Concepts et fondements de la cartographie écologique

1.4.1.1. L'écologie du paysage, une école de pensée et une nouvelle perception du milieu naturel

En matière de cartographie écologique, il n'existe pas de consensus au niveau international. Deux grandes écoles de pensées s'affrontent à ce sujet.

Dans le monde latin, les fondements d'un découpage écologique du milieu sont basés sur le postulat suivant:

"La partie végétale de l'écosystème, c'est à dire la phytocénose, donne une image approchée de l'écosystème d'une manière satisfaisante en ce sens que la connaissance de celle-ci permet de déduire une foule de renseignements sur les conditions de climat, sur la nature et la qualité des sols qui lui sont liées et qui sont celles de l'écosystème tout entier." (Ozenda, 1986).

Ces principes trouvent leur application à travers la cartographie de la végétation telle qu'elle est appliquée en France, notamment depuis 1945 avec les travaux de H. Gaussen et de P. Rey à Toulouse.

Dans le monde anglo-saxon, l'approche est totalement différente. Baudry et Naveh nous en donnent une définition relativement claire.

"Partant du principe de l'hétérogénéité spatiale du paysage et de son rôle sur les phénomènes écologiques, le paysage devient lui-même un système écologique, c'est à dire un ensemble d'éléments physiques, chimiques, biologiques et socio-économiques dont les interactions déterminent des possibilités de vie." (Baudry).

"La division spatiale prend alors ses racines sur les caractéristiques physiques stables du milieu, éliminant la conception de climax et donc la supposition d'une relation privilégiée entre la végétation et son environnement, capable de palier à toute autre relation." (Naveh et Liebermann, 1984).

Evidemment, le fossé séparant ces deux perceptions du milieu est immense et les implications de chacune d'entre elles nous forcent à la réflexion.

Dans le premier cas, la végétation, apparaît comme un indicateur privilégié des conditions du milieu, influencée par un certains nombres de facteurs historiques et dynamiques. L'objectif de la cartographie est donc de dresser avec certitude une image non seulement de la répartition spatiale de la phytocénose mais plutôt du couvert dans son ensemble, qu'il soit végétal ou non. De cette vision seront alors déduites l'ensemble des caractéristiques physiques du milieu.

Cette théorie est attrayante puisqu'elle nous laisse entendre que seule une connaissance du couvert suffit à cerner le milieu. Elle ouvre des perspectives intéressantes en matière de télédétection et de traitement d'images puisqu'elle se fonde sur une analyse de la couverture du sol. Malheureusement l'adéquation n'est pas toujours évidente ni vérifiée. En effet, il est très rare qu'un milieu ait conservé ses conditions initiales. Bien souvent, les effets de facteurs externes comme l'anthropisation sont tels sur le couvert et notamment sur la végétation, que les phytocénoses "naturelles" ont complètement disparu.

Le cas des feux de forêt illustre ce fait. Suite à ce type d'agression, le couvert végétal se trouve modifié par un facteur extérieur. En lui même, le feu n'est pas mineur ni anormal. Au contraire, il a influencé le développement des écosystèmes terrestres depuis de nombreux siècles. La végétation résultant des impacts répétés des feux présente des caractéristiques différentes du couvert originel, si tant est que l'on parvienne à identifier réellement ce caractère originel. Selon le type de feu, il est possible de sélectionner telle ou telle espèce et généralement la présence de feux répétés sur un territoire est aisément identifiable.

Dans ce contexte, la logique voulant que la végétation soit un indicateur privilégié des conditions du milieu se trouve brisée par l'apparition de ce facteur externe. Comment, dans ce cas déduire des informations sans aucune équivoque?

Evidemment, à travers cet exemple, nous ne voulons pas rejeter en bloc la notion d'espèces indicatrices. Le développement de phytocénoses ou plus généralement l'apparition d'espèces végétales ou animales adaptées à certains types d'environnements imposant des conditions restrictives est indéniable. En écologie, de nombreuses méthodes se basent sur ce type d'interactions (Odum, 1971). Cependant, nous

considérons le lien trop ténu pour être efficacement utilisable en matière d'application à la modélisation hydrologique.

Dans le monde anglo-saxon, en Europe de l'Est, en Allemagne, les bases de la partition écologique de l'espace sont totalement différentes. En fait la cartographie écologique puise ses fondements dans l'écologie du paysage, née dans les années cinquante du "mariage" de la géographie et de la biologie (Troll, 1950). En écologie du paysage, le principal objet d'étude réside dans l'hétérogénéité verticale et horizontale du paysage, cette hétérogénéité se traduisant essentiellement à travers le modelé. Zonneveld (1988), illustre parfaitement ces concepts (cf. figures 14 et 15). A l'aide de quelques figures simples, il nous fait comprendre la dimension holistique de l'approche et la richesse des informations qui peuvent en être déduites.

Troll, après avoir suivi une formation en biologie puis en géographie, a été très impressionné par les travaux du biologiste Tansley pour tenter de comprendre le paysage à partir de photographies aériennes. En fait, le paysage est vu comme un écosystème et sa compréhension nécessite impérativement une vision holistique. L'axe cartographique fait partie intégrante de l'approche. Comme l'affirme Zonneveld, sans cartographie, les études topologiques sur le paysage n'offrent que peu d'intérêt.

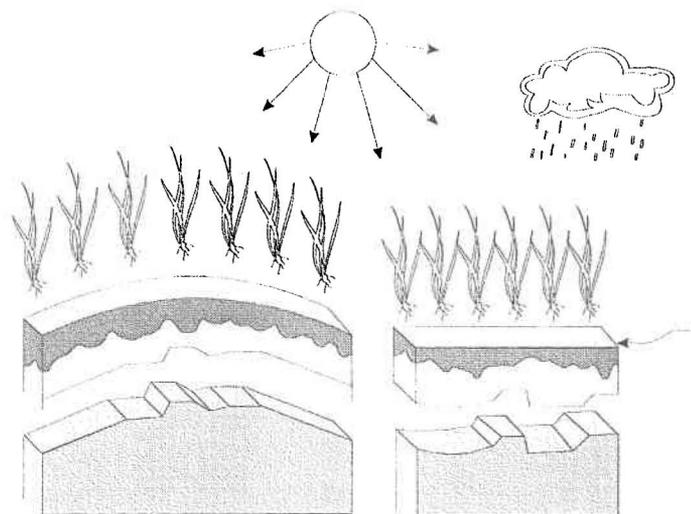


Figure 14: Hétérogénéités horizontales et verticales du paysage, objet d'étude de l'écologie du paysage.

(d'après Zonneveld, 1983)

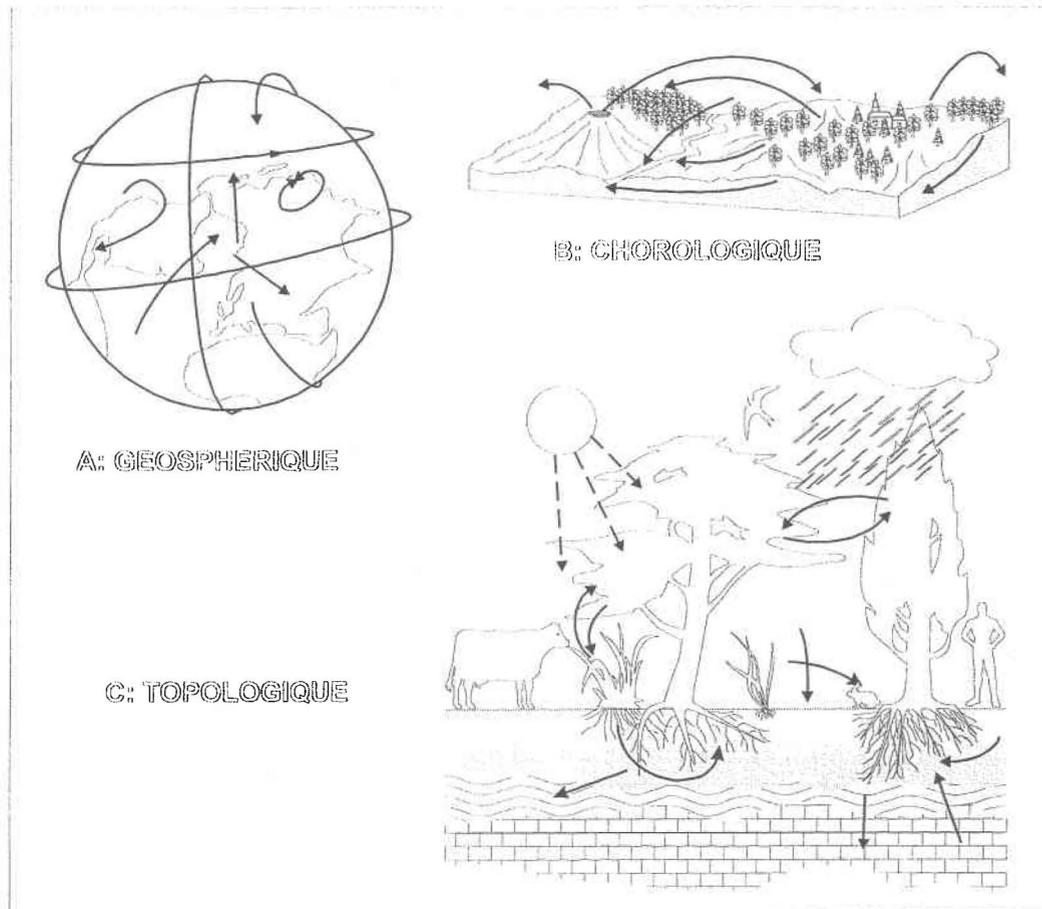


Figure 15: Le paysage en tant qu'écosystème
(d'après Zonneveld, 1983).

1.4.1.2. La cartographie écologique au Canada.

- **Principes.**

Au Canada, la cartographie écologique s'inspire très largement des préceptes de l'écologie du paysage. La méthodologie a été mise au point à la fin des années soixante par une équipe québécoise oeuvrant au sein d'Environnement Canada et faisant figure de

proue au niveau international dans le domaine. A l'époque, les travaux étaient commandités essentiellement par la Société de Développement de la Baie James et par la société Hydro-Québec. Ainsi d'immenses zones ont été cartographiées sur les territoires du Saguenay- Lac St-Jean (1967-1972), de la Baie James (1973-1978) et de la Moyenne et Basse Côte-Nord (1978-1981).

Depuis cette date, le groupe oeuvre directement au sein du Ministère de l'Environnement du Québec (M.E.N.V.I.Q.) en prenant soin d'adapter le cadre écologique de référence et donc la carte écologique, aux besoins particuliers des gestionnaires du territoire, des ressources naturelles et de l'environnement, généralement en relation avec les Municipalités Régionales de Comté (M.R.C.).

En Colombie Britannique, les principes du cadre écologique de référence diffèrent quelque peu de ceux suivis au Québec. La cause en est simple et vient de la nature du milieu physique de cette province. Le territoire est en effet majoritairement montagneux et l'étagement de la végétation selon l'altitude est un facteur prépondérant de l'organisation du paysage. En ce sens, la cartographie écologique levée dans cette zone pourrait se rapprocher davantage des cartes de végétations françaises.

Le cadre écologique de référence est basé sur une approche globale du milieu naturel. La définition, la description et la classification des écosystèmes terrestres se font donc à partir de paramètres stables du milieu physique que sont le régime bioclimatique, la physiographie, la topographie, la nature et l'épaisseur du dépôt de surface et le drainage du sol. La cartographie permet alors de dégager des unités naturelles de paysage correspondant à des écosystèmes terrestres et constituant un cadre de référence spatial permanent.

La cartographie écologique fait partie intégrante de ce cadre écologique de référence. Elle n'en est qu'une facette, incompréhensible sans les documents fondamentaux qui l'accompagnent et que sont les guides de terrain, les fichiers descriptifs et les documents interprétatifs.

La carte écologique découpe donc le territoire en unités permanentes de paysage spatialement organisées (pattern) et commandées par des variables majeures qui sont:

- La géologie du socle rocheux
- Le relief

- l'origine et la nature, la forme et l'épaisseur des dépôts de surface
- Le drainage des sols

Selon les fondements de l'écologie du paysage, ces paramètres ne se répartissent pas au hasard mais obéissent à une organisation spatiale (pattern) conditionnée par le passé géologique et géomorphologique du territoire.

Selon le niveau de perception auquel le milieu est analysé l'un de ces paramètres devient prépondérant et par conséquent guide le découpage.

Pour comprendre plus facilement ce concept fondamental en écologie du paysage, il suffit de lui substituer l'analogie suivante:

Imaginons deux personnes à qui l'on a confié la mission de cartographier la ville de New-York. La première personne devra lever sa carte du haut de l'une des tours du World Trade Center alors que l'autre survolera la métropole à 1000 mètres d'altitude. Evidemment, les deux documents ne pourront être comparables. Dans le premier cas, le carroyage des rues et des avenues marquera les principales limites et les îlots seront précisément reportés sur la carte. Dans le second cas, il est moins probable que ce niveau de détail soit atteint. Seules les grandes artères et les différentes structures des quartiers (variant selon leur âge) pourront être mis en évidence.

Cet exemple est simpliste mais il illustre assez clairement cette notion de niveau de perception et de paramètres directeurs.

En fait, la précision du découpage proposé différera selon la taille de la zone à cartographier. Les unités de base auront alors des significations différentes. Tout en restant des entités à part entière, elles pourront représenter de grands ensembles paysagers, dans le cas d'une analyse à petite échelle, ou des unités topographiques homogènes (tels que des versants) dans le cas d'études à de grandes échelles.

• **Réalisation pratique.**

La construction d'une carte écologique se fait en plusieurs étapes, faisant alterner des études de documents et des travaux de terrain. Elles peuvent se résumer de la façon suivante:

a. Analyse de la documentation existante.

Cette analyse consiste à regrouper l'ensemble des documents pertinents publiés sur le territoire à cartographier dans le but d'en faire une synthèse. Cette connaissance préalable sera un excellent point de départ, notamment pour la photo-interprétation et le plan d'échantillonnage.

b. Photo-interprétation et cartographie préliminaires.

Lors de cette étape, le photo-interprète découpe la zone d'étude en polygones cartographiques. Le découpage est essentiellement guidé par la recherche de discontinuités marquantes du paysage. Selon le niveau de perception et l'échelle d'analyse retenue, ces discontinuités mettront en évidence des assemblages plus ou moins complexes de formes de relief. C'est à ce moment que la campagne de terrain est mise en place à la suite du repérage de polygones typiques ou de zones "litigieuses"

c. Travaux de terrains (relevés et vérifications cartographiques)

Les travaux de terrain consistent essentiellement à confirmer le premier découpage levé par le photo-interprète. Ces vérifications se font à partir de plusieurs points de contrôle sur le terrain. Leur nombre est avant tout fonction de l'échelle de réalisation du travail. Cette confirmation se fait par le biais

- D'une caractérisation édaphique du milieu par la description d'une coupe témoin et d'un certain nombre de prélèvements de carottes de sol qui en cas de doute seront analysées en laboratoire. Cette étape permet alors de préciser l'origine géologique du socle rocheux, l'origine et la nature géomorphologique du sol, de ses caractéristiques texturales, de son épaisseur, de sa pierrosité et de son drainage
- D'une caractérisation topographique des polygones cartographiques en décrivant leur type de pente (simple ou complexe) et leur déclivité et leur morphologie (convexe, concave, etc...)
- D'une caractérisation phyto-écologique sur le site du point de prélèvement. La végétation est décrite dans ses aspects physiologiques, structuraux, ainsi qu'au niveau de sa composition floristique et si besoin est, de sa productivité

d. Classifications écologiques.

"La classification repose sur l'étude des relations statiques et dynamiques sol-végétation et ce dans un cadre bioclimatique supérieur. Dans l'établissement de ces relations, c'est le sol qui prime. Le fil directeur de l'analyse est la mise en évidence d'un milieu support homogène aux caractéristiques physiques particulières". (J. P. Ducruc).

L'étape de classification définit un cadre bio-climatique puis des milieux supports homogènes. Ensuite seulement, elle aborde l'étude du comportement de la végétation et de ses variations spatio-temporelles (dynamisme et chronoséquences).

e. Cartographie finale.

f. Interprétation des caractéristiques intrinsèques du milieu et représentation cartographique.

g. Elaboration de guides de terrain (lorsque nécessaire).

1.4.2. Quelques exemples d'application

1.4.2.1. Application à la foresterie.

La foresterie est le domaine pour lequel la cartographie écologique est la plus appliquée. Elle s'avère être un outil précieux pour la gestion et l'aménagement des territoires forestiers. A titre d'exemple, nous pouvons souligner l'application de la carte écologique à la détermination de zones de régénérescence forestière, à l'évaluation de potentiels ou d'aptitude à la traficabilité.

Ces applications de la carte écologique consistent généralement en une interprétation du cadre écologique de référence en fonction des "exigences" du domaine d'application. Cette interprétation se fait selon deux niveaux (Veillette et Gérardin, 1985), le niveau des données écologiques de base (définition de clés d'interprétation) et le niveau cartographique (conception de cartes interprétatives). La représentation cartographique des résultats est le mode de transmission des informations le plus adapté à la diffusion en vue de l'aménagement et de la planification du territoire considéré.

Afin de comprendre exactement la démarche suivie, détaillons les étapes permettant d'interpréter une carte écologique à travers le filtre des exigences que posent le domaine de l'exploitation forestière.

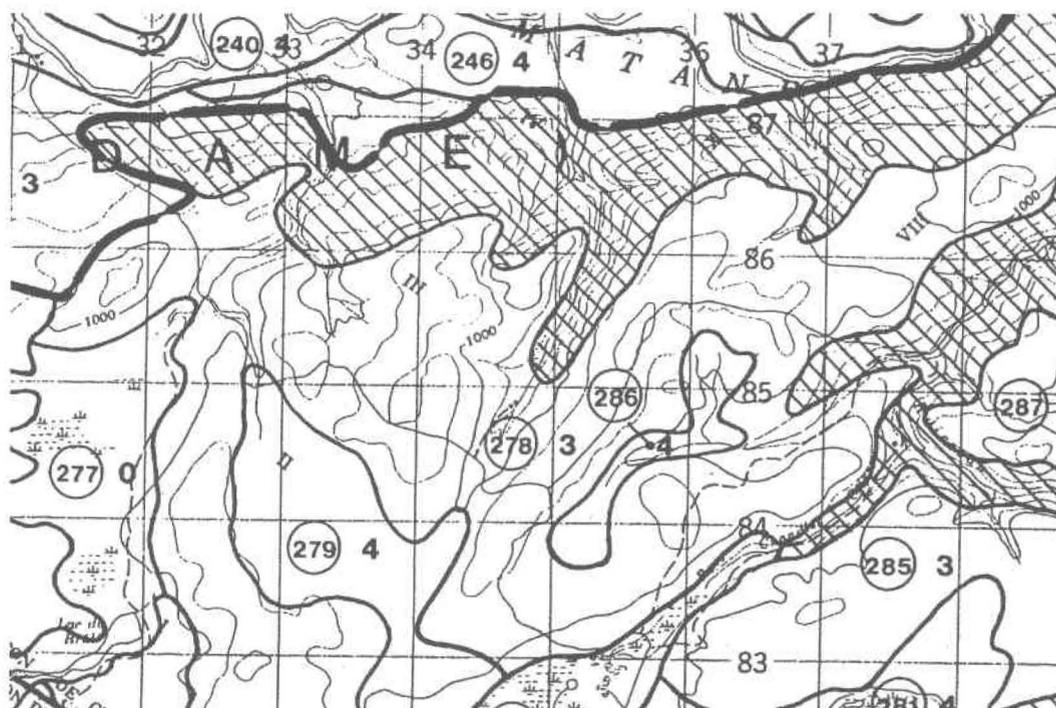
- Objectifs de l'interprétation: Evaluer le risque d'érosion du sol par l'eau après déboisement.
- Principes de bases de l'interprétation: " *L'évaluation du risque d'érosion du sol par l'eau après déboisement s'appuie principalement sur les caractéristiques du sol, de la topographie et du régime climatique*" (Veillette, 1985).
- Méthodologie suivie
 - Classification des dépôts de surface en fonction de leur texture et de leur pierrosité.
 - évaluation de la susceptibilité des types géomorphologiques à l'érosion en s'appuyant sur leur longueur de pente
 - prise en compte de la déclivité des pentes
 - intégration des données de précipitation
 - Construction de la clé d'interprétation du risque d'érosion par l'eau après déboisement.
 - représentation cartographique des résultats établie dans les mêmes contours cartographiques que les topo-systèmes (Cf. figure 16).

Cette démarche peut évidemment être réitérée quelle que soit la finalité de l'étude. Seuls les paramètres pris en compte varient selon les exigences de la problématique posée (Pour la traficabilité par exemple, les critères prépondérants seront ; la capacité portante du sol évaluée à partir du type géomorphologique et la topographie).

1.4.2.2. Etude sur la vulnérabilité des nappes.

Ce type d'études présente un intérêt particulier puisqu'elles se rapprochent de nos préoccupations hydrologiques. Cependant, la démarche suivie demeure identique à celle décrite précédemment lors de l'application de la cartographie écologique à la foresterie

(voir figure 17). La vulnérabilité des nappes à la pollution est évaluée et spatialisée par l'intermédiaire de facteurs écologiques actifs de texture des sols, de profondeur de la nappe et de topographie.



Légende

Niveaux d'aptitude

- 1 Elevé
- 2 Modéré
- 3 Faible
- 0 Nul

Facteurs limitatifs

- H Humidité excessive
- I Inondations périodiques
- O Matériel organique
- P Pierrosité trop faible
- R Relief accidenté
- T Texture trop fine

Figure 16: Extrait de la carte des niveaux d'aptitude à l'érosion par l'eau après déboisement.

(tirée de Veillette, 1985)

Comme l'écrit J.P. Ducruc (1991), dresser une carte écologique n'est pas une fin en soi. La carte écologique, qui fournit une vision synthétique du milieu, doit être exploitable dans les domaines de la planification, de la gestion des ressources et de la préservation de l'environnement. Pourtant, il existe une sorte de contradiction entre ce désir "d'ouverture" et de mise à profit des résultats obtenus et la nature même des informations fournies⁹, peu abordable sans un pré-traitement préalable. C'est pourquoi, la carte écologique peut être accompagnée pour une application externe par un ensemble de documents regroupant des clés et des cartes interprétatives ainsi que des guides de terrain. Ces documents doivent faciliter son exploitation.

Ce point est particulièrement important. Il met l'accent sur l'un des particularismes les plus marquants de ce document de synthèse, son très haut niveau d'abstraction. Ce niveau d'abstraction, nous y reviendrons ultérieurement est une source de richesse sémantique immense. Mais il est également fort contraignant. La complexité de la démarche, des travaux de photo-interprétation et de terrain à la construction finale de la carte et de ses documents annexes, est grande. Elle est avant tout l'oeuvre de spécialistes possédant une forte expérience de terrain et travaillant en dehors de toute préoccupation applicative. Le résultat en est une information extrêmement riche mais dont l'exploitation demande assistance et pour laquelle la numérisation, aux vues du haut degré de synthétisation des informations fournies, demeure difficile.

1.4.3. Pertinence de la cartographie écologique pour l'hydrologie

Visiblement, l'information fournie par la carte écologique présente un intérêt majeur pour la modélisation hydrologique. Cependant, il convient de se demander sous quelle forme ce type d'information se doit d'être utilisé et comment en tirer le meilleur parti?

L'un des intérêts de la carte écologique réside dans le fait qu'elle propose un découpage basé sur des caractéristiques physiques stables du milieu. Ce découpage est obtenu à la suite de l'analyse globale des paramètres géologiques, géomorphologiques et

⁹ D'après les commentaires de J.P. Ducruc (1991) : "la carte écologique est d'abord un document scientifique hermétique pour un non-spécialiste."

biophysiques du territoire. Il est donc impératif de conserver cette base de discrétisation sans envisager dans un premier temps du moins de la scinder en unités plus petites.

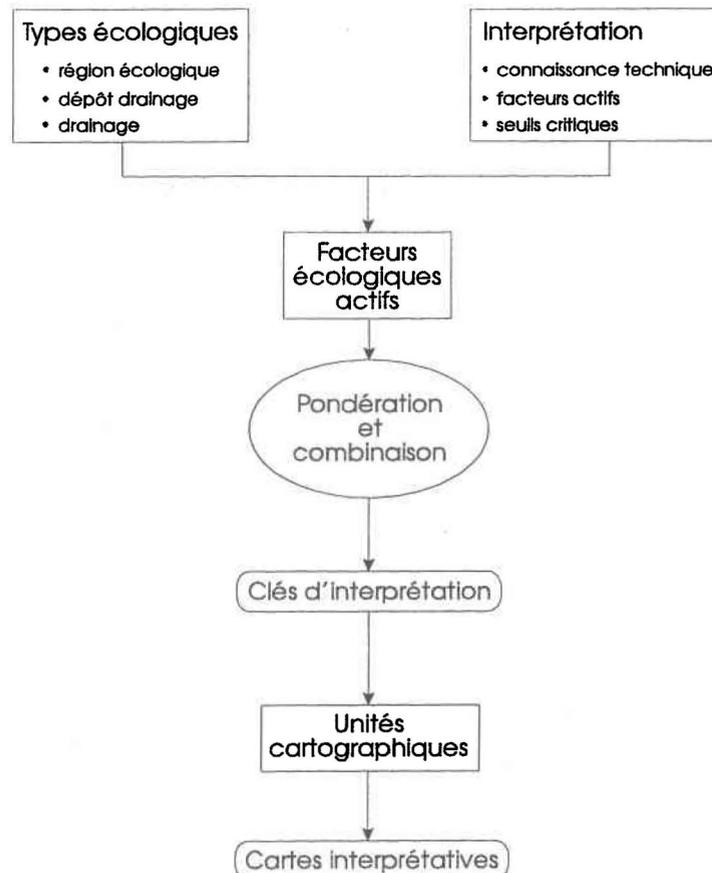


Figure 17: Principes d'interprétation de la carte écologique.
(adapté de Gérardin et Ducruc, 1990)

1.4.3.1. L'échelle d'analyse

Evidemment, à ce stade de la réflexion, il est important de poser le problème de l'échelle d'analyse. Pour la dimension de bassin-versant sur lequel nous envisageons travailler, l'échelle du 1/50 000 ième nous fournira un niveau de détail suffisant. A cette échelle en effet, les polygones cartographiques proposés par la cartographie écologique nous offrent une qualité d'information très pertinente. Les caractéristiques texturales, couplées aux

informations concernant le drainage et les pentes peuvent aboutir à des définitions du comportement hydrologique des sols relativement précises.

En fait, il faut faire une distinction entre le découpage cartographique, qui appliqué à la modélisation hydrologique est beaucoup trop fin pour être utilisé tel quel et la caractérisation des unités définies par la cartographie. A l'échelle du 1/50 000 ième, la cartographie écologique ne définit plus des unités de paysage mais des unités dans le paysage (généralement différenciables par leur pente (type et intensité)). La discrétisation repose avant tout sur des critères topographiques. Pour une application à la modélisation hydrologique, il faut passer à un autre niveau nécessitant le regroupement des toposystèmes tout en conservant l'information contenue dans chacun d'entre eux. Cette méthodologie implique donc une double analyse.

1.4.3.2. Les apports de la typologie écologique.

La carte écologique nous fournit une série d'informations exploitables à différents niveaux. Avant même une interprétation spatiale des unités définies, la typologie¹⁰ donne une véritable dimension écologique au document cartographique. Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, la classification des différentes unités s'appuie sur un certain nombre de paramètres fondamentaux regroupant;

- le climat.

Le climat joue un rôle prépondérant sur la répartition des êtres vivants et sur la morphologie des paysages. C'est pourquoi, la première étape de conception et de réalisation d'une carte écologique passe par la définition du cadre bioclimatique dans lequel la zone à l'étude s'inscrit. Dans la pratique, cette définition consiste à déterminer les changements significatifs dans la structure, la composition et la distribution de la couverture végétale, causés par des changements d'ordre climatique.

¹⁰ Selon le Petit Robert, science de l'élaboration des types, facilitant l'analyse d'une réalité complexe et la classification.

- Les dépôts de surface.

La classification écologique définit des catégories de dépôts de surface écologiquement équivalents en fonction des paramètres suivants:

- L'origine géomorphologique
- L'origine minéralogique
- L'épaisseur sur l'assise rocheuse
- La texture
- La pierrosité

- Les caractéristiques de drainage

Le drainage est un paramètre fondamental en classification écologique. Un sol bien ou mal drainé aura des caractéristiques écologiques extrêmement différenciées. Pour la carte écologique, les classes retenues sont celles de la classification canadienne des sols (Commission Canadienne de Pédologie, 1978). Au drainage est associé la notion de "seepage" ou drainage hypodermique. Le drainage hypodermique correspond à l'eau qui s'écoule latéralement le long des versants, dans la partie supérieure des sols. Le phénomène est d'autant plus marqué que les pentes sont longues et régulières et le dépôt ni trop filtrant, ni trop lourd. Généralement le drainage hypodermique est intermittent. Il est fréquent lors des périodes de fonte des neiges ou de précipitations importantes. Il demeure cependant très lié aux conditions initiales du sol. Son évaluation s'appuie sur la présence de mouchetures d'oxydo-réduction dans les sols analysés.

- La végétation.

Comme nous l'avons explicité en débutant ce chapitre, la végétation n'est pas considérée, dans le domaine de la cartographie écologique, comme un indicateur privilégié des conditions du milieu et comme le meilleur intégrateur écologique d'un site. La végétation n'est donc pas abordée ici comme le fondement du découpage mais plutôt comme l'un des éléments permettant d'interpréter les grands ensembles bio-climatiques. Au niveau local, elle met en valeur les conditions pédologiques telles que le type de dépôt, le drainage, l'altitude etc...

A partir de ces différentes informations, notamment pour celles qui touchent à la définition des types de dépôts, il est possible d'établir des liens avec un ensemble de paramètres de nature hydrologique. Le lien entre hydrologie et sols a maintes fois été souligné tant par des hydrologues (Beven et al, 1984; Llamas, 1985) que par des pédologues (Duchaufour, 1965).

L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltré ou encore s'évapore. Dans deux cas de figure, la structure et la texture du dépôt de surface conditionnent fortement ces processus. La capacité d'infiltration d'un sol et donc la réponse du bassin considéré, suite à une impulsion quelconque correspondant à un événement pluvieux, est conditionnée par un certain nombre de variables. Les recherches sur le sujet ont montré le rôle prépondérant de la structure et de la texture des sols (de Marsily, 1981). Le ruissellement dépend beaucoup de l'état de la surface à considérer (d'où la mise sur pied d'un coefficient de rugosité). Le taux d'humidité et la végétation semblent également prendre une place prépondérante (Jordan, 1992).

Ces liens étroits identifiés entre certaines caractéristiques d'un sol et ses capacités hydrauliques et hydrodynamiques ont motivé de nombreuses recherches tentant de les qualifier. Généralement ces études ont été menées en laboratoire, sous des conditions extrêmement maîtrisées à des échelle micro-locales. Dans de nombreux cas, elles poursuivaient des objectifs agronomiques, visant à la compréhension des échanges sol-végétation. Des recherches visant à définir des potentiels d'érodibilité des sols ont également permis de fouiller cette problématique (Baril, 1991). Cependant avec toutes les restrictions que ce type de démarche entraîne, notamment au niveau de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols, les liens identifiés entre sols et hydrologie ouvrent des perspectives intéressantes.

Dans une étude menée par Rawls et al (1981), un tableau de correspondance entre types de sols et principaux paramètres hydrologiques a été établi. Cette recherche s'appuie sur une compilation de résultats obtenus à partir de l'étude de 1323 sols divisés en 5350 horizons pédologiques. L'ensemble des points de mesure est réparti dans 32 Etats américains (cf. annexe 1). Cette dispersion géographique laisse supposer un éventail de conditions climatiques relativement large et une diversité des sols assez importante. Comme le soulignent les auteurs, les relations entre la teneur en eau des sols et leur conductivité sont nécessaires à la compréhension et à la quantification des processus de disponibilité en eau pour les plantes ainsi que pour la modélisation du mouvement de l'eau et des solutés à travers le sol. Dans cette optique, à partir de cet échantillonnage, un

certain nombre de relations entre les propriétés des sols et certaines de leurs caractéristiques hydrologiques ont été établies. Les correspondances portent sur les variables suivantes:

- La porosité totale qui est définie par le volume des vides sur le volume total ramené en pour-cent
- La porosité effective représentant la fraction des pores disponibles pour l'écoulement
- L'humidité résiduelle
- Le point de flétrissement. Il représente une valeur de teneur en eau du sol équivalente au taux d'humidité en deçà duquel les forces d'adsorption deviennent supérieures à celles que la plante peut générer. Le végétal ne peut donc plus puiser l'eau qui lui est nécessaire et ses tissus se flétrissent.
- La capacité au champ. La capacité au champ correspond à la capacité de rétention maximum mesurée in situ¹¹. De ce fait, la capacité au champ est assimilée à la teneur en eau d'un sol après que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement de l'eau dans le sol soit devenu pratiquement nul. Cette mesure doit s'effectuer généralement deux ou trois jours après une pluie ou une irrigation, pour des sols perméables de texture et de structure uniforme (Musy et Soutter, 1991).
- La conductivité hydraulique à saturation (K_s). K_s est une manifestation de l'effet de résistance à l'écoulement dû aux forces de frottement. Elle est donc conditionnée à la fois par les caractéristiques de la matrice solide sur les frottements¹² ainsi que par l'effet des spécificités du liquide sur l'intensité des forces de friction interne¹³. La conductivité hydraulique à saturation est un concept fondamental qui

¹¹ La capacité de rétention correspond sensiblement à la quantité maxima d'eau capillaire retenue par le sol, après ressuyage. C'est une valeur théorique difficilement mesurable. C'est pourquoi le concept de capacité au champ a été introduit, définissant une valeur approchée par excès de la capacité de rétention (Duchaufour, 1984)

¹² Ces caractéristiques sont exprimées à travers la notion de perméabilité intrinsèque

¹³ Appelées la viscosité dynamique (Musy et Soutter, 1991).

entre dans la formulation de la loi de Darcy. Cette loi permet d'identifier une relation exprimant le débit total Q transitant au travers d'une colonne comme égal au produit de la section S , du rapport de la différence de charge totale ΔH existant entre ses extrémités et sa longueur L et d'un coefficient de proportionnalité K_s :

$$Q = \frac{SK_s \cdot \Delta H}{L} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Le coefficient de proportionnalité K_s correspond à la conductivité hydraulique à saturation.

La conductivité hydraulique à saturation est donc étroitement conditionnée (du fait de la perméabilité intrinsèque) par les caractéristiques texturales et structurales du sol pour lequel elle est déterminée. Comme le souligne Musy et Soutter (1991), pour chaque type de sol, la loi de Darcy peut ainsi être représentée par une droite liant le flux au gradient hydraulique et dont la pente correspond à la conductivité hydraulique à saturation (cf. Figure 18).

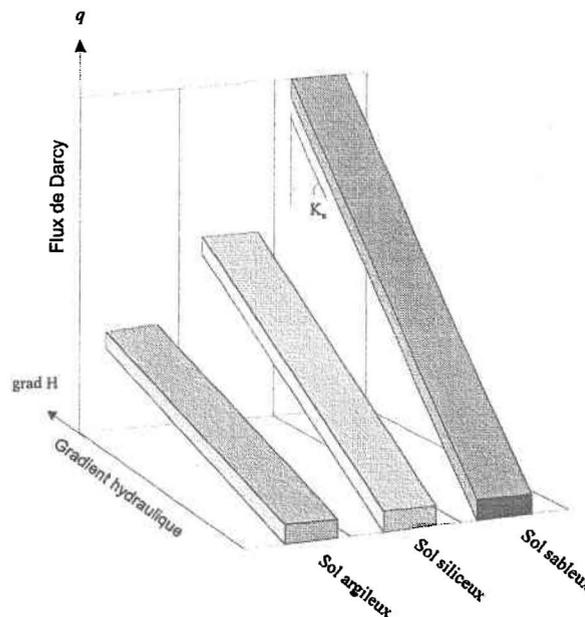


Figure 18: Relation entre le flux et la perte de charge selon la loi de Darcy (tiré de Musy et Soutter, 1991)

Le tableau suivant synthétise les différentes variables précédemment définies en fonction des types de sol (cf. tableau 2). Les chiffres présentés dans ce tableau représentent des valeurs moyennes. Pour obtenir les fourchettes dans lesquelles elles s'inscrivent, il est nécessaire de consulter l'annexe 2. L'intérêt de cette étude tient au fait que ces valeurs moyennes proviennent du traitement statistique d'un vaste échantillon de plus de 1323 sols sur 5350 horizons. Les résultats obtenus sont par ailleurs en bonne concordance avec les fourchettes de valeurs des différentes variables identifiées, fourchettes définies par de nombreux auteurs (Musy et Soutter, 1991; La Rochelle, 1983).

A partir de ces informations, il est possible de qualifier chacun des polygones proposés par la carte écologique, non plus en terme de types géomorphologiques et de dépôts mais plutôt à l'aide de variables hydrologiques. Cette "traduction" peut se faire en exploitant les courbes granulométriques qui caractérisent chaque type de sol. Les fourchettes granulométriques que nous avons retenues ici sont celles de la classification canadienne des sols présentées dans le tableau 3.

Tableau 2: Propriétés hydrologiques des sols par types de textures
(d'après Rawls et al, 1981)

Texture	Porosité totale	Teneur en eau	Porosité effective	Capacité au champ	Point de Flétrissement	Conduct. hydraul. à saturation (cm/heure)
Sable	0.437	0.20	0.417	0.091	0.033	21.0
Sable loameux	0.437	0.035	0.401	0.125	0.055	6.11
Loam sableux	0.453	0.041	0.412	0.207	0.095	2.59
Loam	0.463	0.027	0.434	0.270	0.117	0.68
Loam limoneux	0.501	0.015	0.486	0.330	0.133	1.32
Loam sablo-argileux	0.398	0.068	0.330	0.255	0.148	0.43
Loam argileux	0.464	0.075	0.390	0.318	0.197	0.23
Loam limo-argileux	0.471	0.040	0.432	0.366	0.208	0.15
argile sableuse	0.430	0.109	0.321	0.339	0.239	0.12
argile limoneuse	0.479	0.056	0.423	0.387	0.250	0.09
argile	0.475	0.090	0.385	0.396	0.272	0.06

Tableau 3: Classes texturales fixées par la classification canadienne des sols
 Pourcentage d'argile, de limons et de sables (CCP, 1978).

Texture	% Sables	% Argile	% Limons
Sables	>85	<15	% de limon est plus de 1.5 fois celui de l'argile
Sables loameux	70-90	<30	% de limon est 2 fois celui de l'argile
Loam sableux	43-52	<7	<50
Loam	<52	7-27	28-50
Loam limoneux	-	12-27	>50
		<12	50-80
Limon	-	<15	>80
Loam sablo-argileux	<45	20-35	>20
Loam argileux	20-45	27-40	-
Loam limono - argileux	<20	27-40	-
Argile sableuse	>45	>35	-
Argile limoneuse	>40	-	>40
Argile	<45	>40	<40
Argile lourde	-	>60	-

1.4.3.3. Les apports de la cartographie écologique.

La cartographie écologique telle qu'elle est abordée au Québec se traduit non seulement par des préoccupations typologiques mais aussi par une dimension cartographique fondamentale. Comme le soulignent Rougerie et Beroutchachvili (1991), les nouvelles tendances de l'écologie du paysage sont de plus en plus empreintes du souci d'une meilleure prise en compte des dispositions et des relations spatiales à la base même du concept d'éco-complexe¹⁴. Cette dimension devient d'autant plus importante lorsque les problématiques vers lesquelles s'oriente l'écologie du paysage s'apparentent à la gestion environnementale.

¹⁴ La notion d'éco-complexe est mise en avant par P. Blandin et M. Lamotte dans leur article intitulé: "Paysage et écologie", 1990.

Les travaux menés au Ministère de l'Environnement du Québec s'inscrivent dans ces grandes tendances¹⁵. L'intérêt porté aux différenciations spatiales d'ordre géologique et géomorphologique apparaît comme l'un des principes de base du découpage. La carte écologique propose donc une régionalisation de l'espace fondée sur l'origine géologique du socle rocheux, la genèse géomorphologique des matériaux meubles, le modelé, les pentes et l'exposition. "Le paysage est alors analysé en tant qu'ensemble organisé d'unités élémentaires à la fois écologiques et spatiales" (Philipps et Berdoulay, 1985). La notion de système est présente à deux niveaux;

- au sein de l'écotope, ou les divers attributs du paysage se relient les uns aux autres dans l'écosystème local, entretenant ainsi des relations principalement verticales dans l'espace et dans le temps
- entre les écotopes s'articulant les uns par rapport aux autres dans un système de relations spatiales (relations principalement horizontales dans l'espace et dans le temps).

Dans une optique hydrologique, ce système de relations spatiales présente un intérêt majeur. Il est intimement dépendant des facteurs érosifs à l'origine de sa constitution, notamment des facteurs hydriques. De plus les caractéristiques géomorphologiques, identifiées par de nombreux hydrologues comme l'un des paramètres clés permettant la compréhension des processus hydrologiques (Beven, 1984) conditionnent l'organisation du découpage. Les informations de nature cartographique permettent ainsi de saisir un ensemble de relations hydrologiques entre les différentes unités, notamment relativement au rôle de chacune d'entre elles par rapport au ruissellement de surface et hypodermique. La forme du relief et la disposition spatiale de chacune d'entre-elles constituent des indicateurs privilégiés des conditions d'écoulement à l'intérieur du bassin-versant et pourraient ainsi contribuer efficacement à une plus juste définition d'aires de contribution et de sous bassins en vue d'une modélisation ultérieure (cf. figure 19). Elles pourraient également constituer un guide à la définition d'un maillage à taille variable (quadtree) fonction de la diversité du milieu étudié. Nous verrons dans la partie applicative de cette

¹⁵ Les recherches menées par le CSIRO font figure de prémisses dans ce domaine. Le CSIRO, (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) est un organisme australien dont le but à l'origine fut d'étudier les complexes naturels de vastes étendues de terres mal connues, en vue de leur mise en valeur rationnelle. Ce type d'organisation, dont des "versions" à peu près similaires apparurent en URSS, est à la base d'une nouvelle forme de géographie appliquée et exploratoire et de nouveaux courants dans le domaine de l'étude des paysages. Le CSIRO fut l'un des précurseurs en matière d'études finalisées et structurées des paysages.

recherche par quels moyens l'exploitation de ces informations spatiales est envisagée et quelles variables "relationnelles" peuvent en être déduites.

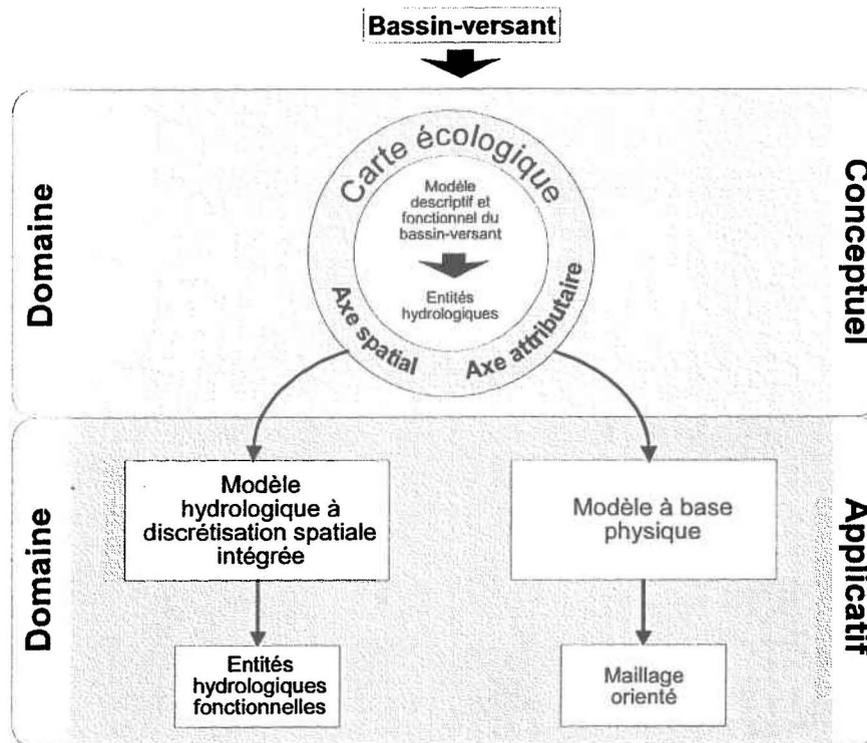


Figure 19: La cartographie écologique et ses apports pour une définition d'aires de contribution

DEUXIEME PARTIE: DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE ET APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE EATON

2.1. LES OBJECTIFS: PROPOSER UNE SPATIALISATION PERTINENTE POUR L'HYDROLOGIE, DANS L'OPTIQUE D'UNE GESTION INTÉGRÉE DES BASSINS VERSANTS

2.1.1. Gestion intégrée et développement durable

La gestion intégrée et le développement durable apparaissent aujourd'hui comme des priorités face aux pressions constantes du nécessaire développement socio-économique de nos sociétés modernes. Depuis 1988, date de la parution du rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED, 1988), ces notions ont motivé de nombreuses recherches et réflexions dans le domaine de l'environnement et du développement. Axées sur la prise en compte d'une perception globale du milieu, ce rapport a permis de définir le concept de développement durable¹⁶ et d'en fixer les éléments clés. Dans ce contexte, le territoire apparaît comme le support commun de l'ensemble des systèmes à l'origine de l'évolution de nos sociétés soit; les systèmes écologiques, économiques, politiques et agricoles (Costanza, 1991). A ces quatre systèmes j'ajouterais volontier la notion de socio-système, considéré ici comme l'un des paramètres clés conditionnant l'option de développement et d'exploitation des ressources de l'ensemble. Prétendre à une gestion intégrée et un développement durable, quel que

¹⁶ Selon la définition donnée par la CMED, le développement durable doit répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.

soit le domaine d'application (hydrologique ou autre) implique clairement une appréhension globale des problèmes et non une approche sectorielle orientée vers l'un ou l'autre de ces systèmes. Comme le souligne Prélaz Droux et Musy (1994), une action aussi localisée soit-elle dans l'espace et dans la thématique, a ou aura des répercussions au sein de l'ensemble et à tous les niveaux de chacune des "sphères" identifiées précédemment (économique, écologique...). Pour trouver des solutions réellement efficaces, il faut alors ne plus considérer individuellement chacun des systèmes mais plutôt leur ensemble et leurs interactions.

2.1.2. Hydrologie et aménagement intégré du milieu

Cette analyse est applicable quelle que soit la thématique dans laquelle est posé le problème, si l'objectif visé s'exprime en terme de cohérence et "d'harmonie" avec les autres sphères concernées. Cette approche peut donc être appliquée au domaine de l'hydrologie, replacée dans un contexte plus global de planification et d'aménagement du territoire et de façon plus restrictive à l'échelle du bassin versant. Dans ce cas, les réflexions doivent prendre en compte à la fois les aspects touchant à la compréhension du système hydrologique producteur de la ressource eau ainsi que ceux inhérents à la demande propre au contexte humain (Schultz, 1990). Elle ne s'applique en revanche pas dans un contexte plus ciblé d'hydrologie quantitative prévisionnelle, pour lequel l'objectif visé s'attache à la détermination précise de valeurs de débits ou du point de vue qualitatif à la prévision de teneurs en différents éléments polluants ou non.

La recherche d'une méthode de spatialisation adaptée à la résolution de problématiques d'aménagement et de gestion de bassins versants s'inscrit dans cette nouvelle tendance du développement durable. L'idée n'est elle pas de fournir une vision intégrée du bassin versant garantissant la prise en compte des caractéristiques globales conditionnant le fonctionnement du système hydrologique ? Le bassin versant s'impose de plus en plus comme l'unité de fonctionnement pertinente en regard des problématiques de gestion et d'aménagement. Il apparaît comme l'entité spatiale de base (cf. partie 1). Cependant, si l'ensemble des hydrologues semblent s'accorder sur ce point, les moyens de décrire cette entité et de l'exploiter par le biais de modèles restent encore bien flous.

Logiquement, l'appréhension de l'unicité et de la cohérence de l'entité bassin versant passe par la compréhension de son fonctionnement. Comme nous l'avons souligné, cette compréhension est axée sur des pratiques de recherche sectorielles, s'attachant à décrire et modéliser un aspect du cycle hydrologique (échanges zone saturée/non saturée par exemple) et non son ensemble. En outre, la majorité des résultats obtenus ne sont applicables qu'à un niveau local, le passage à une perception plus large restant encore mal connu (cf. partie 1). Les modèles hydrologiques discrétisés, comparativement aux modèles globaux de type « boîte noire », permettent sans doute une meilleure prise en compte des caractéristiques réelles du bassin versant. Ils présentent l'avantage d'être à bases physiques et sont donc censés fournir une meilleure compréhension des processus mais surtout de leur variabilité spatiale. Dans un contexte d'aménagement et de planification, seuls les modèles hydrologiques discrétisés permettent une évaluation valable et une modélisation réelle des impacts de tout changement à l'intérieur même du bassin (agriculture, urbanisation, déforestation) (Neumann et al, 1990, Beven, 1985). Pourtant, dans ce domaine particulier des modèles discrétisés, il n'existe pas d'approche "standard". En fait, comme le souligne Engel (1993), il existe de nombreuses méthodes destinées à représenter un bassin versant. En dehors des modèles globaux, généralement inadéquats dans un contexte d'aménagement et d'études d'impacts, la discrétisation des bassins-versants peut prendre la forme d'unités de réponses hydrologiques, de mailles, etc (Moore et al, 1991).

Quel que soit le type de discrétisation retenu, celui-ci implique nécessairement la prise en compte de la réalité physique du bassin versant. Cette réalité physique est complexe, à l'image du territoire lui même. Elle est le fruit d'interactions et de dépendances difficiles à traduire et à modéliser. Pourtant, dans une optique d'aménagement, de gestion intégrée et de planification, elle conditionne la pertinence du modèle et la validité des résultats. Comme nous l'avons vu (cf. partie 1), de nombreuses approches tentent de résoudre cette problématique et comme le souligne Chevalier (1994) "de maîtriser la complexité" du milieu producteur de la ressource eau. Cette expression issue du monde des Systèmes d'Information à Référence Spatiale¹⁷ est tout à fait applicable dans le contexte de l'hydrologie et de l'aménagement. La modélisation et plus spécifiquement la discrétisation sur laquelle elle s'appuie, qui finalement est un moyen d'appréhender et de traduire l'hétérogénéité du bassin versant, vise à cette même maîtrise de la complexité. Le

¹⁷ Le Dr. J.J. Chevalier travaille dans le domaine des SIRS au sein du laboratoire de SIRS du centre de géomatique de l'Université Laval à Québec.

problème n'est alors pas de décrire cette complexité dans le détail mais d'organiser et de synthétiser les informations de manière à pouvoir l'exploiter. A titre d'exemple, un modèle à discrétisation spatiale différentielle (à bases physiques) tel que le modèle SHE (Abott et al., 1986) simule chacun des processus hydrologiques présumés importants du mouvement de l'eau¹⁸. La distribution spatiale des paramètres du bassin, de la pluie ou de la réponse hydrologique se traduit dans le plan horizontal par une grille orthogonale et dans le plan vertical, à chaque maille par une colonne composée au plus de deux couches horizontales de sols (Jordan, 1992). Dans ce cas, les informations nécessaires sur le bassin versant seront acquises par couches et gérées en tant que telles. Le modèle SHE s'appuie alors sur des données sectorielles non organisées en dehors d'une structuration thématique par couches d'informations. Ce type de modélisation, exigeant en quelque sorte une base de données spatiales en amont, se prête très bien à l'exploitation de logiciel de Systèmes d'Information à Référence Spatiale. Dans ce contexte spécifique, le recours à un SIRS permet un certain nombre de traitement offrant ainsi la possibilité de compléter ou d'enrichir les couches d'informations nécessaires au modèle (par le traitement des données topographiques par exemple).

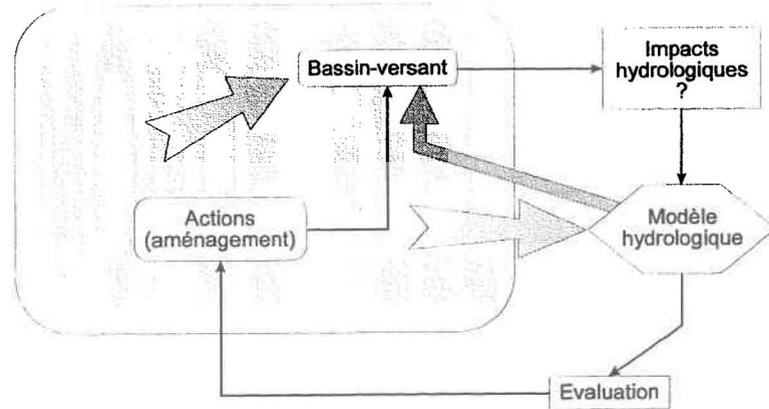
Compléter, là est vraiment le problème! En effet, les modèles discrétisés tel que SHE souffrent de leurs exigences. Ils ne sont efficaces que si les données qu'ils réclament sont disponibles. En pratique, malheureusement, c'est rarement le cas et il devient vite impossible de disposer, en dehors de zones expérimentales (pour lesquelles les coûts d'acquisition de données croissent alors de façon quasi exponentielle), de l'ensemble des données nécessaires au calcul des paramètres intervenant dans chacun des processus identifiés par le modèle. Ces réflexions émanent d'ailleurs directement des concepteurs du modèle SHE.

C'est pourquoi, à défaut de posséder des informations pertinentes sur l'ensemble du bassin et selon un niveau de discrétisation adapté, la mise en oeuvre d'une approche de régionalisation ouvre de nouvelles perspectives. Les arguments sont simples; plutôt que de posséder sur l'ensemble du bassin, à un niveau de discrétisation fin, un ensemble d'informations plus ou moins complet et dont les interactions sont encore mal maîtrisées, pourquoi ne pas tenter de concevoir un modèle de représentation décrivant les caractéristiques physiques et physiographiques du bassin, fondé sur la notion d'unités

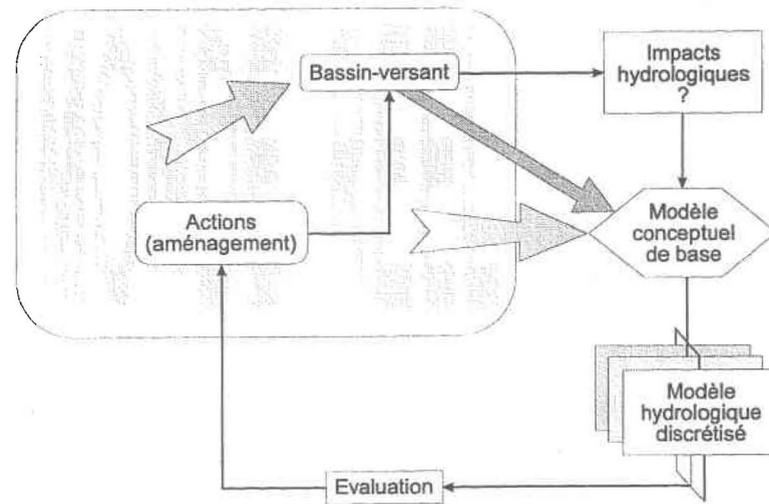
¹⁸ Ces processus sont respectivement: la fonte des neiges, l'interception, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'écoulement en rivière, l'écoulement en milieu saturé et non saturé)

fonctionnelles . Ce modèle, situé en amont du modèle hydrologique, fournirait une structure d'acquisition et d'organisation d'information tout en permettant une maîtrise "relative" des interactions entre l'ensemble des données et leur exploitation au sein du modèle hydrologique. Cette proposition, contribuerait à une remise en question de l'approche traditionnelle en matière d'hydrologie, consistant à documenter un bassin versant en fonction des exigences de modèles hydrologiques particuliers (cf. figure 20 a). Les informations nécessaires à la modélisation seraient extraites d'un modèle conceptuel de base, structure d'acquisition et d'organisation des données pertinentes pour l'aménagement et la gestion des bassins versants (cf. figure 20 b).

Pour être viable, cette approche intégrée doit se fonder sur des bases solides, capables de fournir une cohérence au modèle conceptuel de départ. La cartographie écologique, de par ses fondements théoriques semble être en mesure de fournir de telles bases (cf. partie 1), alimentant ainsi les aspects physiques nécessaires à la mise sur pied d'une approche pertinente dans le domaine de l'hydrologie prévisionnelle. C'est ce que nous allons tenter de démontrer au travers de cette application méthodologique, illustrant le potentiel d'un zonage conceptuellement pertinent dans une optique de spatialisation du bassin versant. Il faut toutefois rester conscient que la pertinence de l'approche préconisée ne pourra réellement se mesurer qu'à la capacité prévisionnelle du ou des modèles sur laquelle ils prendront appui.



a. Approche traditionnelle



b. Approche intégrée

Figure 20: Approches traditionnelle et "intégrée" dans le domaine de la gestion des bassins-versants.

2.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le terrain sur lequel nous avons choisi de tester la validité des concepts et de l'approche que nous proposons couvre l'ensemble du bassin versant de la rivière Eaton dans son cours supérieur. Ce choix a été conditionné par le fait que ce bassin versant a fait l'objet d'études poussées dans le cadre de la décennie hydrologique internationale, tant au niveau hydrologique que météorologique ou topographique (Tremblay, 1976; Ministère des Richesses Naturelles, 1967). Dans ce contexte un certain nombre d'informations pertinentes ont été acquises et de nombreux travaux (menés notamment à l'Institut National de la Recherche Scientifique - Eau) se sont attachés à décrire et analyser cette région spécifique (Charbonneau et al, 1978).

Les quelques éléments descriptifs qui vont suivre sont destinés avant tout à fixer les idées du lecteur et lui donner une vision succincte des conditions propres au milieu d'étude. En aucun cas ils ne prétendent à l'exhaustivité.

2.2.1. Localisation

Le bassin supérieur de la rivière Eaton, situé au Québec, dans les Cantons de l'Est au sud est de la ville de Sherbrooke, couvre une superficie de 200 km carrés environ. Son exutoire est localisé au niveau du village de Sawyerville légèrement en aval du point de confluence des deux tributaires principaux de ce bassin, la Clifton et la Eaton proprement dite (cf. figure 21). La tête des deux sous bassins prend appui sur la frontière avec les Etats-Unis, à la ligne de partage des eaux. En moyenne le bassin est situé à 45 degrés 15 minutes de latitude nord et 71 degrés 30 minutes de longitude ouest.

2.2.2. Topographie

Sans entrer dans des détails que nous étudierons par la suite, la partie supérieure du bassin versant de la Eaton se situe dans une zone vallonnée en contrefort des Appalaches. L'altitude s'élève assez régulièrement de l'exutoire du bassin (Sawyerville;

300 mètres) aux sommets, marquant la ligne de partage des eaux (aux alentours de 600 mètres au niveau de la frontière avec les Etats-Unis) (cf. figure 22).

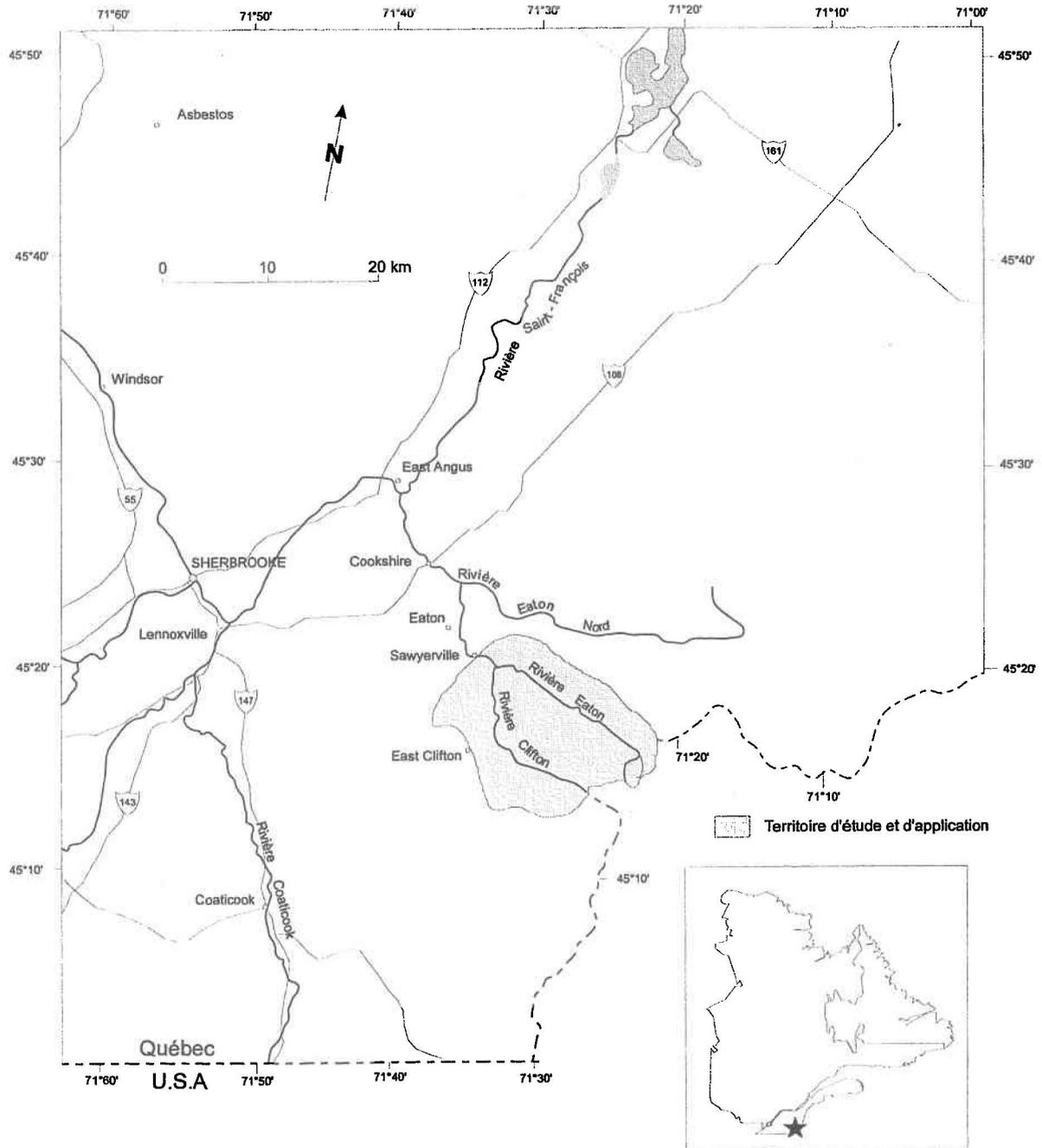


Figure 21: Localisation de la zone test.

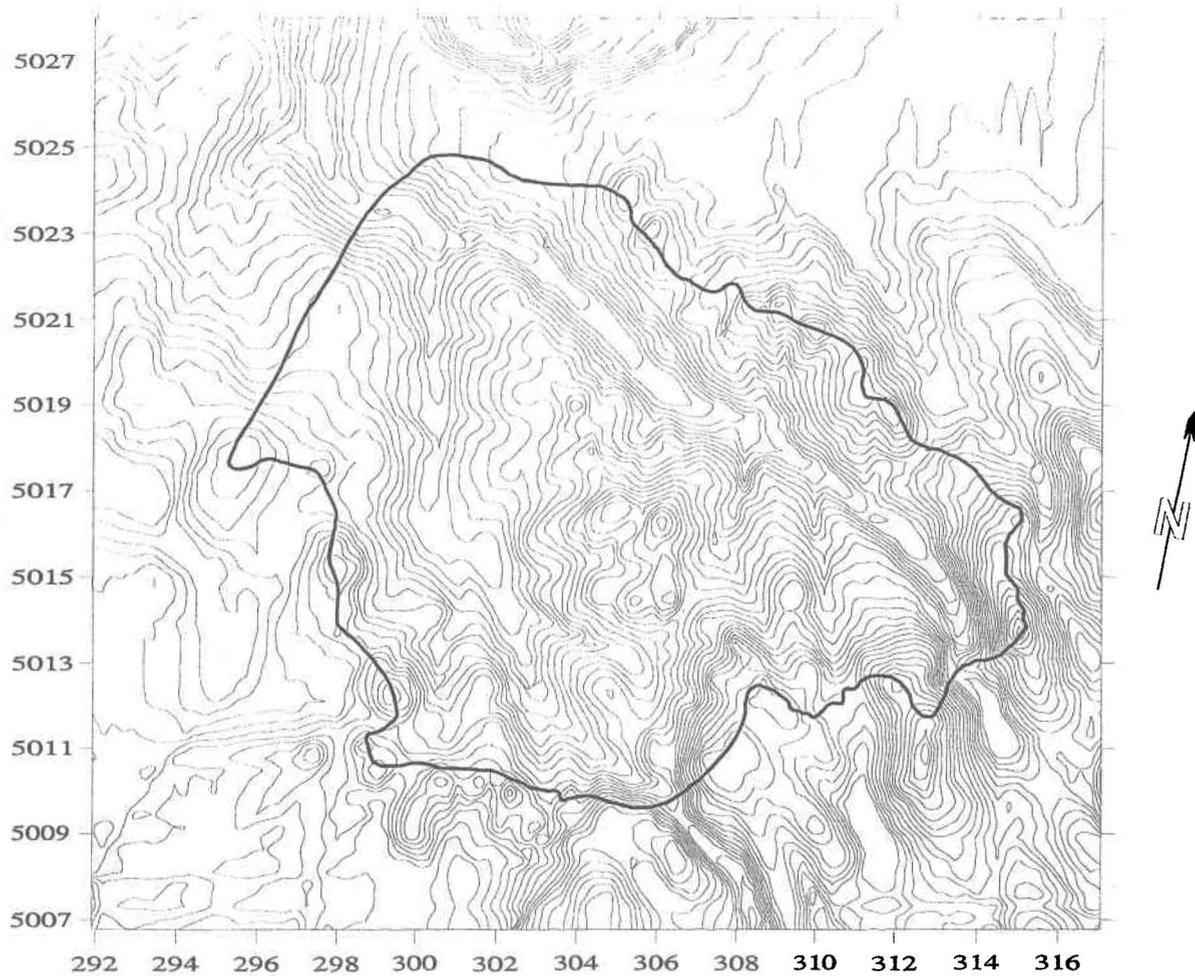


Figure 22: Modèle Numérique de Terrain visualisé en 2 dimensions

2.2.3. Géologie et dépôts de surface

Le socle rocheux du bassin supérieur de la rivière Eaton est formé de roches mises en place du Silurien supérieur au Dévonien moyen (Slivitzki et St Julien, 1987). La configuration actuelle de la région est cependant fortement marquée par l'influence des dernières glaciations. Dans ce secteur, comme le souligne (Ducruc et de Sède, 1991), trois périodes glaciaires entrecoupées d'épisodes interglaciaires glacio-lacustres caractérisent les dépôts présents. Pour des informations plus détaillées, il est conseillé de

se reporter au rapport de J. P. Ducruc (1991) mais surtout à la thèse de Doctorat d'État de P. Clément (1989) portant sur une étude comparative menée dans les Appalaches québécoises et en Suède centrale sur les processus d'érosion et l'évolution du relief sous climat tempéré à hiver froid. L'énorme travail de P. Clément, dont l'objectif final était de comprendre les processus d'érosion afin d'identifier des modèles d'évolution, constitue une mine d'informations d'une extrême richesse décrivant les caractéristiques géomorphologiques du bassin-versant et leur évolution.

2.2.4. L'occupation actuelle: éléments descriptifs

La zone d'étude est majoritairement marquée par l'agriculture et la forêt. La tête du bassin, au dessus d'une altitude approximative de 500 mètres est recouverte de forêts à dominante de feuillus (érable à sucre, bouleau jaune, tilleul d'Amérique, Frêne blanc...). Les résineux (épinette noire, sapin baumier, et cèdre) n'apparaissent guère que dans des sites mal drainés. Quelques exploitations d'érable à sucre sont présentes sur le bassin.

L'aval du bassin est quant à lui essentiellement agricole. Cette agriculture est axée sur l'élevage laitier. Une bonne partie des terres est donc destinée à la production de fourrages. Point important, sur lequel nous aurons l'occasion de revenir durant cette étude; l'importance du drainage agricole dans cette zone. Enfin, pour clore cette description succincte, quelques friches sont à mentionner.

2.2.5. Le climat

Le bassin versant supérieur de la Eaton peut être décrit du point de vue climatique grâce aux informations fournies par un certain nombre de stations météorologiques. Il existe en effet 11 stations météorologiques réparties sur l'ensemble du bassin ou légèrement en dehors de celui-ci. Il s'agit des stations de:

- Bury (code 702885)
- East-Angus (code 7022280)
- Eaton 2nd Branch (code 7022306)
- Island Brooks (code 7023312)

- Lawrence (code 7024263)
- Maple Leaf east (code 7024624)
- St-Isidore d'Auckland (code 7027372)
- St-Malo d'Auckland (code 7027520)
- Sawyerville Nord (code 7027803)
- Sherbrooke A (code 7028124)
- West Ditton (7028906)

Parmi cet ensemble, seules trois stations sont réellement situées à l'intérieur du bassin-versant (Sawyerville, St-Isidore d'Auckland et Eaton 2nd Branch).

La station de Lennoxville, au bord de la rivière Saint François non loin de Sherbrooke et dont les informations sont très complètes, offre une bonne image des caractéristiques climatiques de la région dans laquelle s'inscrit notre zone d'étude. Les valeurs moyennes de températures et de précipitations sont répertoriées dans le tableau 4.

Les valeurs mentionnées dans ce tableau ne caractérisent cependant pas exactement le climat du bassin supérieur de la Eaton. Celui-ci est d'une altitude moyenne plus élevée. Le climat de notre zone d'étude est ainsi plus rude et en moyenne plus humide que celui constaté à Lennoxville.

Tableau 4: Données climatiques enregistrées à la station de Lennoxville
(tiré de Villeneuve, 1967)

Mois	temp. moyenne (C)	temp. maxi. moy	temp min. moy.	précipit. totales (mm)	neige (cm)	insolation (heures)	humidité relative moy (%)	Évaporat. (U.L.)
Janv.	-10.7	-4.7	-16.7	85.6	59.9	78		
Fév.	-9.7	-3.5	-16	77.5	58.9	96		
Mars	-3.7	1.8	-9.2	77.2	45.5	135		
Avril	4.7	10.6	-1.3	78.7	14.5	155		
Mai	11.4	18.3	4.5	81.3	0.3	205	55	845
Juin	16.7	23.3	10.1	105.1	...	219	60	870
Juill.	19.3	25.9	12.7	107.7	...	245	61	919
Août	18.2	24.9	11.4	84.3	...	227	63	782
Sept.	13.7	19.9	7.4	90.2	0.3	159	61	597
Oct.	7.8	13.9	1.6	87.1	2.5	132		
Nov.	-1.1	5.6	-3.5	88.9	27.2	67		
Déc.	-7.6	-2.4	-12.8	86.9	52.3	58		
Moy.	5.2	11.2	0.9				60	
Totaux				1050	261.4	1554		4013

2.3. Les données

2.3.1. La carte écologique

Les informations fournies dans ce chapitre sont tirées principalement du rapport de Ducruc et de Sède (1991).

2.3.1.1. Le niveau de découpage de la carte

La donnée centrale de cette application est bien évidemment constituée par la carte écologique du bassin versant supérieur de la Eaton. Cette carte a été conçue et réalisée selon les principes de l'écologie du paysage énoncés dans la première partie de ce rapport, par la Division de la cartographie écologique du Ministère de l'Environnement du Québec. La carte elle-même et le rapport qui l'accompagne sont le fruit d'une succession d'étapes de photo-interprétation, travaux de terrain, analyses granulométriques, analyses des données ainsi que de travaux de cartographie et de dessin.

Le choix de l'échelle cartographique à laquelle a été dressé le document est une étape clé de l'ensemble de la démarche. Comme nous l'avons déjà souligné, la carte écologique, de par les principes qui la sous-tendent, présente la particularité de fournir un découpage adapté au niveau de perception requis par l'application envisagée. D'autres facteurs doivent également être pris en compte lors de ce choix, notamment des facteurs liés au coût d'acquisition des données, à la superficie à cartographier ainsi qu'à l'existence et à la disponibilité d'informations nécessaires à l'élaboration du document final (Ducruc et de Sède, 1991). Dans le cas précis de ce travail, l'objectif final étant une exploitation hydrologique, la spatialisation en zones écologiques devait être capable de fournir des éléments pertinents dans le contexte spécifique de la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant. Elle devait plus spécifiquement permettre d'établir un lien entre la zone écologique et le fonctionnement hydrologique du milieu, en définissant son statut par rapport aux écoulements de surface. Ce statut étant conditionné par des critères avant tout morphologiques et topographiques, la carte se devait de retranscrire ces différents éléments de façon explicite. Ainsi, au niveau de perception requis et selon les applications envisagées, l'échelle du 1/50000^{ième} s'est avérée être la plus pertinente.

S'appuyant avant tout sur des paramètres topographiques, les unités cartographiques définies expriment relativement fidèlement les caractéristiques géomorphologiques du milieu. En outre, à ce niveau d'échelle, chaque unité présente peu de variabilité interne et une récurrence acceptable sur l'ensemble du bassin versant.

2.3.1.2. L'axe cartographique

Les unités cartographiques sont définies en s'appuyant sur des discontinuités des éléments physiques permanents du milieu, perceptibles sur le terrain et par photo-interprétation en 3 dimensions. Evidemment, ces ruptures sont étroitement conditionnées par les caractéristiques topographiques et géomorphologiques du terrain, leur structure reflétant assez fidèlement les éléments de base que forment la géologie et la physiographie.

Dans le contexte de la Eaton supérieure, le découpage cartographique est basé sur les paramètres suivants:

- La nature géologique du socle rocheux
- La nature et l'origine du dépôt de surface
- La morphologie de l'unité cartographique (colline, versant...)
- La situation topographique de l'unité
- La déclivité de l'unité
- La longueur de versant arrière influençant l'unité
- La pente longitudinale de l'unité et sa forme (concave à convexe)
- La pente transversale de l'unité (forme)
- le type de pente de l'unité (simple ou complexe).

Il a permis de mettre en évidence 538 polygones distinctes sur l'ensemble du bassin. Ce découpage aboutit à une description assez détaillée de la zone d'étude (cf. figure 23). Selon les principes de la cartographie écologique, chaque polygone constitue une récurrence d'un modèle particulier. Sur le bassin, 119 modèles distincts ont été identifiés. La récurrence de chacun d'entre eux est extrêmement variable puisque certains se répètent plus de vingt fois alors que d'autres sont uniques (cf. Annexe 3). Chaque modèle se traduit par une combinaison particulière de types géomorphologiques décrits lors des travaux de classification. La récurrence définit alors la répétition de conditions identiques

sur plusieurs polygones cartographiques identifiés. Ce découpage fortement conditionné par la topographie et la morphologie du terrain va permettre de déduire un certain nombre d'informations pertinentes pour l'hydrologie, plus particulièrement au niveau de l'évaluation de la circulation des eaux de ruissellement à travers le bassin versant.

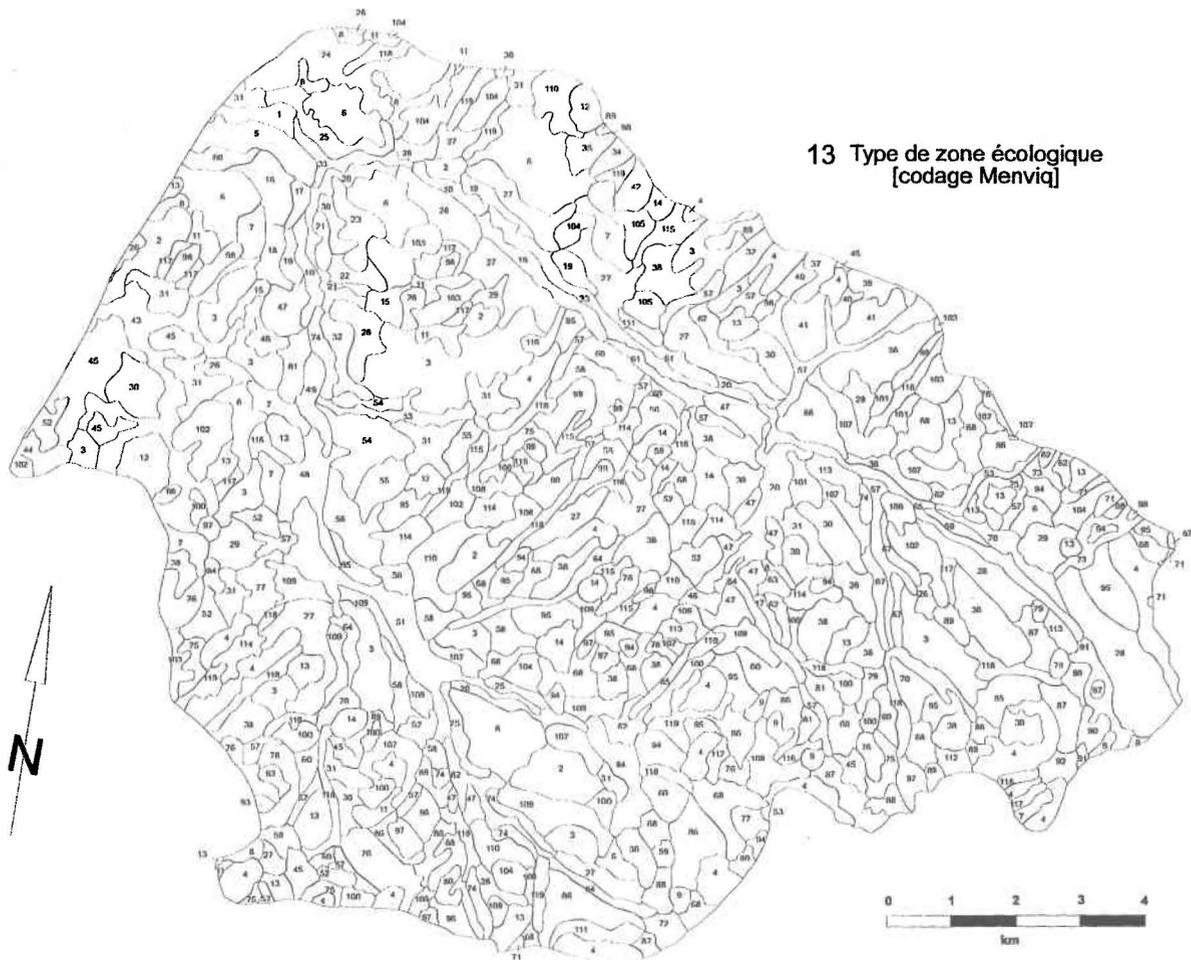


Figure 23: Carte écologique du bassin-versant de la Eaton supérieure.

2.3.1.3. La typologie des zones écologiques

La typologie écologique fournit des informations au niveau des types géomorphologiques. Leur définition tient compte:

- de l'assise géologique des différents dépôts
- des dépôts de surfaces qui seront qualifiés en fonction de leur épaisseur, leur texture, leur pierrosité et leurs particularités pédogénétiques.

Dans le contexte du bassin supérieur de la Eaton, les types géomorphologiques peuvent être issus de trois grands types de dépôts: des dépôts glaciaires, fluviaux et organiques. En fonction de ces différents paramètres, les caractéristiques topographiques et morphologiques générales varient. Une description détaillée de ces différents éléments peut être obtenue dans le rapport du ministère de l'environnement (Ducruc et de Sède, 1991). A ce niveau, un point mérite cependant d'être souligné. Le bassin supérieur de la rivière Eaton est en grande partie recouvert d'une couche d'épaisseur variable de till de Lennoxville (Ducruc et al, 1991). Cette couche de till, d'une texture essentiellement loameuse et de faible pierrosité est caractérisée par la présence, sur une grande partie du bassin, d'une couche indurée de type " fragipan " aux alentours de cinquante (50) cm de profondeur. A partir de ce constat, l'hypothèse de base d'une prééminence des écoulements de surface par rapport aux écoulements hypodermiques se trouve renforcée, la couche indurée jouant le rôle de niveau imperméable, favorisant ainsi la circulation de surface ou de sub-surface de l'eau à travers le bassin.

- des caractéristiques de drainage interne, vertical et oblique¹⁹. Ces caractéristiques se traduisent par un découpage en six (6) classes de drainage tel que préconisé par la Commission Canadienne de Pédologie (C.C.P., 1978) auxquelles est rattachée la notion de drainage oblique apparaissant sous la forme d'un astérisque accolée à l'identificateur de classes. Les sols sont donc classifiés de la manière suivante:
 - sol très sec (drainage excessif)
 - sol sec (bon drainage)
 - sol frais (drainage modéré)
 - sol très frais (drainage imparfait)

¹⁹ Le drainage oblique représente le drainage hypodermique.

- sol humide (mauvais drainage)
- sol saturé (très mauvais drainage)

Naturellement, les types géomorphologiques répondent à un arrangement spatial particulier. C'est cet arrangement que traduit le découpage en unités cartographiques. Comme le soulignent Ducruc et de Sède, (1991), c'est donc à ce niveau que se fait le lien entre la typologie et la cartographie lors de la photo-interprétation. Chaque dépôt de surface présente des caractéristiques morphologiques et topographiques particulières, facilement repérables dans le paysage. Ces "signatures", topographiques notamment peuvent, lorsqu'elles sont très marquées, éviter de recourir à l'échantillonnage de terrain. Cependant, dans la majorité des cas, lorsque l'expression topographique des dépôts de surface est trop faible, l'échantillonnage est nécessaire.

Synthèse:

L'ensemble des informations récoltées sur le bassin versant de la Eaton au cours des différentes campagnes de terrain nous permet de souligner un certain nombre de points:

- l'ensemble de la région est marqué par des phénomènes de glaciation/déglaciation. Durant certaines périodes, l'avancée des langues glaciaires est venue bloquer les écoulements, provoquant la naissance de lacs proglaciaires. C'est pour cette raison que d'importants dépôts glacio-lacustres apparaissent localement. Ce phénomène explique également la présence de tills ennoyés. Pour les mêmes raisons, les formations deltaïques sont très rares.
- les tills de fond sont marqués par la présence, à environ 50 cm de profondeur, d'un horizon très compact. Cet horizon semble jouer le rôle de couche imperméable et favorise ainsi les phénomènes d'écoulement hypodermique. Il peut également expliquer les fortes teneurs en eau (proche de la saturation) de nombreux sols régionaux.
- cette propension à la saturation explique sans doute l'intensité des travaux de drainage dans le bassin de la Eaton supérieure. Selon les paysans de la région, notamment ceux possédant des terres en sommet de versants, ce drainage intensif a entraîné depuis quelques années, un abaissement général du niveau des nappes, qui, dans de telles conditions ne peuvent se recharger

correctement. Conséquemment, les cours d'eau subissent de fortes sécheresses estivales et hivernales.

- dernier point important, l'influence quasi constante du substratum sur le modelé (cette remarque a d'ailleurs été faite par de nombreux auteurs ayant travaillé sur la région (Landry, 1974; Mc Donald, 1969; Mc Donald et Shilts, 1971))

2.3.2. La topographie

La carte écologique fournit des informations de nature topographique. Chaque polygone est en effet qualifié en fonction du type de pente et de sa déclivité. Une distinction est ainsi faite entre la notion de pente simple et la notion de pente multiple. Ces deux ensembles sont ensuite divisés en quatre classes distinctes:

- des pentes nulles (de 0 à 5 %)
- des pentes faibles (de 5 à 10 %)
- des pentes modérées (de 10 à 15 %)
- des pentes fortes (de 15 à 30 %)

Cette classification, appliquée à des pentes complexes, permet de qualifier des unités faiblement ondulées, fortement ondulées, faiblement vallonnées ou fortement vallonnées.

Dans le contexte d'une application hydrologique de la carte écologique, cette description topographique nous a semblé insuffisante. De plus elle présentait à notre avis quelques incohérences, notamment pour ce qui touche à la définition de la notion de complexité topographique. En effet, est-il correct d'assimiler une unité vallonnée à une topographie complexe ? Cette qualification n'est pas sans poser de problèmes au niveau hydrologique puisqu'il devient de toute évidence difficile, à partir de ce type d'information, de décrire l'écoulement des eaux de surface d'une unité à une autre.

La topographie présente, dans le cadre de ce travail, un intérêt fondamental. Comme le souligne Jordan (1992), lorsque la réponse hydrologique d'un bassin est dominée par les processus d'écoulement de surface ou de sub-surface, le cheminement de l'eau et sa vitesse sont fortement dépendants des facteurs topographiques. Or, dans le bassin versant de la Eaton, les conditions lithologiques peuvent laisser supposer un tel contexte.

Pour cette raison et en fonction de cette hypothèse de base, il était fondamental de disposer d'information topographiques précises. Celles fournies par la carte écologique étant dans cette optique insuffisantes, nous avons donc opté pour l'acquisition d'un Modèle Numérique d'Altitude, permettant de dériver un certain nombre d'informations pertinentes telles que les orientations, les pentes en valeurs absolues, ainsi que des notions touchant à la concavité/convexité des pentes (utiles pour l'évaluation des types de versants, à l'image des travaux de Tsukamoto et Ohta (1988)).

L'acquisition de ce type d'information s'est faite par une numérisation des quatre cartes topographiques au 1/50 000 ième recouvrant notre zone d'étude; soit les cartes 21E3, 21E4, 21E5, 21E6. Cette numérisation a été effectuée à l'aide d'un logiciel dédié à ce type de tâche, dans un environnement PC. Chacune des courbes de niveau a été saisie manuellement sur un périmètre englobant largement le bassin versant (en prévision de l'interpolation nécessitant l'acquisition de données aux marges de la limite du bassin), (cf. annexe 4). L'ensemble des altitudes est exprimée en mètre. Ce choix a nécessité le recalcul des altitudes mentionnées du côté américain, l'unité de mesure étant exprimée en pieds.

2.3.3. L'occupation actuelle

L'occupation du sol conditionne les processus touchant à la réponse hydrologique des bassins versants. Par occupation actuelle est entendue une information sur la nature des éléments recouvrant le substrat pédologique à savoir la couverture végétale ainsi que les différents éléments anthropiques recouvrant le terrain (zones construites etc...).

De nombreuses études ont tenté de déterminer le rôle joué par les différents types de couvert sur la génération des débits, notamment les débits de crues. Dans ses travaux de thèse, Jordan (1992) présente de façon synthétique les résultats des nombreuses expériences menées dans le domaine. Ces expériences sont de deux natures:

- la première vise à déterminer l'impact du couvert végétal sur les écoulements, à partir de l'observation directe de bassins qui, toutes choses égales par ailleurs, présentent des conditions différentes au niveau du type de couvert. La même approche peut être appliquée à un bassin unique avant et après déforestation (O'Loughlin, 1986).
- la seconde, beaucoup plus théorique, tente de comprendre par une étude micro-locale des processus et des différentes caractéristiques du couvert, l'influence de ce dernier

sur la génération de débits. Ce type d'approche présente de nouveau l'inconvénient d'un passage difficile du local au régional du fait des conditions extrêmement hétérogènes des bassins à ce dernier niveau.

De manière globale, l'influence de la végétation sur les écoulements de surface, demeure difficile à évaluer. Des études régionales tendent à prouver que lors des processus de formation de crues, il est délicat de mettre en évidence le rôle de la couverture du sol (Sakout et Guilbot, 1988). Il est cependant admis que le couvert végétal joue un rôle bénéfique sur les processus d'infiltration en évitant notamment le battage des sols dû à l'impact des gouttes, en améliorant la conductivité hydraulique et en augmentant le coefficient de rugosité ralentissant la vitesse moyenne de ruissellement des eaux de surface (Dunne et al, 1991).

Malgré ces réserves, le développement des modèles de prévision de débits, notamment les modèles discrétisés, a favorisé l'émergence d'un ensemble de recherches touchant à l'identification et la classification des différents types d'occupation du sol pertinents en hydrologie. Dans cette optique, l'apport des données satellitaires, fournissant une vue dynamique temporelle et spatiale du couvert (Benmouffok et al, 1985), a motivé de nombreuses études. Ces différents travaux ont abouti à un consensus permettant de définir un certain nombre de classes d'occupation du sol, pertinentes pour l'hydrologie dans une optique de gestion et de planification à l'échelle du bassin versant.

Dans le cadre de notre travail, douze (12) classes d'occupation ont été déterminées:

Classe	Contenu	Code
1	cultures (bien que la réponse hydrologique des zones cultivées soit loin d'être homogène, une seule classe de culture a été retenue ²⁰)	cu
2	friches herbacées	fh
3	friches arbustives	fa
4	forêts de résineux	fr
5	forêts de feuillus	ff
6	forêts mélangées à dominance de résineux	fm
7	coupes totales	ct
8	plantations	pl
9	prairies	pr
10	zones humides	zh
11	gravières et sablières	gr
12	zones urbanisées	zu

²⁰ Le maïs par exemple s'apparente aux sols nus huit mois par an alors que la luzerne recouvre le sol presque toute l'année

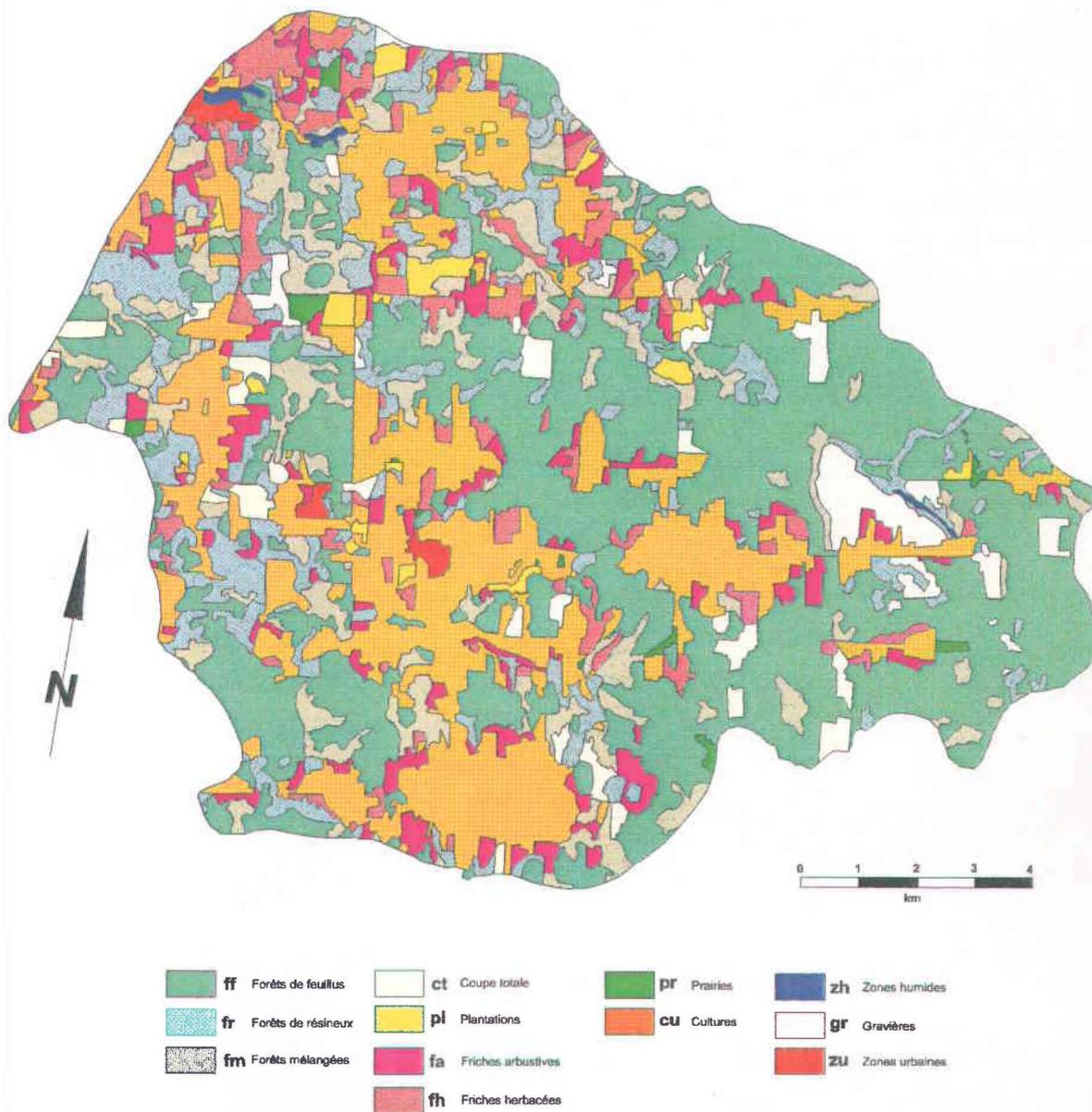


Figure 24: Occupation actuelle du bassin supérieur de la Eaton (données acquises en 1990).

Ces classes d'occupation ont été cartographiées à partir de photo-interprétation traditionnelle et vérifiées lors d'une campagne de contrôle sur le terrain en automne 1990. La répartition des divers types d'occupation est illustrée par la figure 24. Ce document est le résultat d'une numérisation de la carte originelle. Il regroupe 634 polygones. Dans l'ensemble, les zones cultivées se répartissent plutôt en aval du bassin et préférentiellement dans la vallée de la Clifton. Les forêts sont essentiellement composées de feuillus et marquées par la présence de vastes coupes totales, notamment au sud-est du bassin.

2.3.4. Le réseau hydrographique

Le bassin-versant supérieur de la Eaton, dont l'exutoire est situé à Sawyerville, comprend deux cours d'eau principaux, la rivière Eaton au nord est et la rivière Clifton au sud ouest. Chacun de ces cours d'eau reçoit de façon assez équilibrée un ensemble d'affluents en rive gauche et en rive droite. La figure 25 présente l'ensemble du réseau du bassin. Ce réseau a été numérisé sous la forme de 41 segments de rivières qui tout au long de nos différentes analyses formeront l'ossature du bassin et la clé de voute de l'organisation écologique (au sens de la cartographie écologique) de l'ensemble.

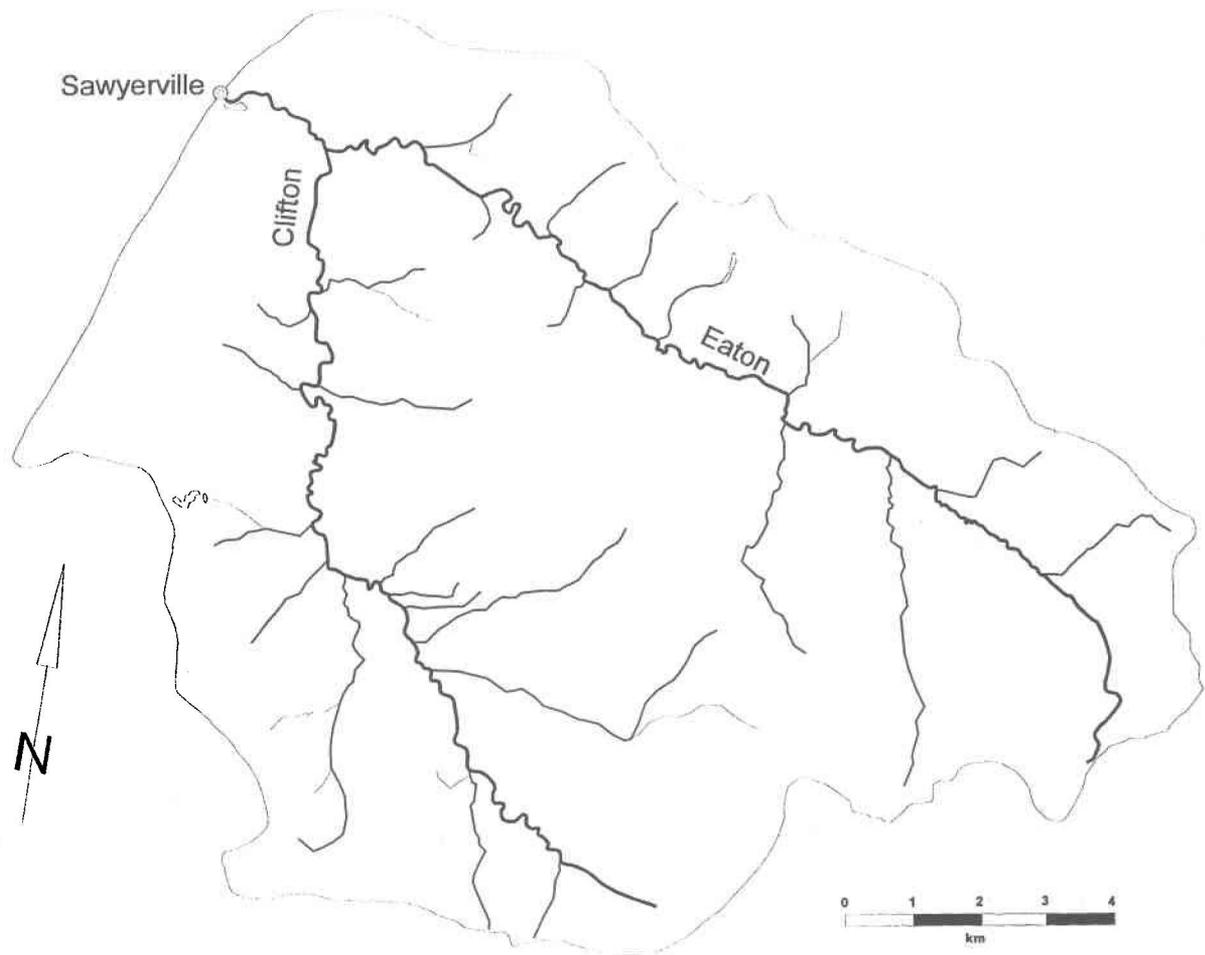


Figure 25: Réseau hydrographique du bassin supérieur de la Eaton

2.4. Concepts de base et méthodologie

2.4.1. Objectifs de la démarche

Les modèles hydrologiques discrétisés à bases physiques nécessitent et s'appuient sur un descriptif relativement précis des conditions du milieu propres au bassin versant. Cette prise en compte des caractéristiques physiques naturelles et anthropiques du bassin et notamment de leur variation spatio-temporelle permet théoriquement une bonne appréhension de son fonctionnement global et des réactions aux différentes sollicitations dont il peut faire l'objet (déboisement, développement de zones urbanisées, etc...). Cependant, comme le souligne la littérature propre au domaine, il n'existe pas de concept de base à partir duquel il serait possible de déterminer un découpage hydrologique significatif respectant les conditions réelles de variabilité et de diversité, en dehors de toute application ou modélisation aval.

L'objectif de la démarche que nous allons décrire est de définir, sur la base d'un découpage "générique" du bassin, intégrant l'ensemble des caractéristiques physiques stables du milieu, un zonage à partir duquel il deviendrait alors possible d'extraire un certain nombre de paramètres jugés pertinents pour la gestion des bassins versants.

2.4.2. Identification des différentes étapes

Comme nous l'avons explicité dans la première partie de ce travail, le cheminement qui va nous conduire de la carte écologique à un découpage hydrologiquement pertinent, se divise en trois étapes distinctes:

- l'analyse des informations fournies par la carte écologique
- l'extraction de données topographiques complémentaires à partir du modèle numérique d'altitude
- la constitution éventuelle d'un zonage structurant le bassin en entités ayant une signification hydrologique

Cette méthodologie pourrait aboutir, dans le cas où serait vérifiée notre hypothèse de départ, à une structuration du bassin organisée à partir du réseau hydrographique autour duquel s'articulerait un modèle d'organisation (pattern) de zones.

2.4.2.1. L'analyse des informations fournies par la carte écologique

La carte écologique s'accompagne d'une classification des dépôts de surface et des types géomorphologiques. Elle fournit des informations sur la nature des types géomorphologiques présents sur le bassin de la Eaton ainsi que sur leur répartition spatiale. Ces informations ne sont pas destinées, à la base, à une exploitation hydrologique directe. Cependant, comme le prouvent des études telles que celle de Rawls (1981) (cf. partie 1), il est possible d'en déduire un certain nombre de variables, pertinentes pour l'hydrologie.

L'objectif de l'ensemble de cette démarche nécessite une "adaptation" des informations de la carte à la thématique hydrologique. Cette adaptation est rendue nécessaire par l'inadéquation existant entre le contenu informationnel de la carte écologique et les besoins propres au domaine de l'hydrologie. Elle est possible grâce à un recodage des différentes variables décrivant les types géomorphologiques présents dans la zone d'étude.

La première étape de ce recodage consiste à déterminer la texture²¹ des différents types de dépôts. Cette opération est possible en exploitant les résultats des analyses granulométriques effectuées par le Ministère de l'environnement. À partir des résultats des différentes analyses, il est alors permis de déterminer une texture dominante par type de dépôt, tel que présenté dans le tableau 5.

Par le biais de ces analyses texturales, il devient alors possible comme nous l'avons démontré précédemment (cf. tableau 2), d'établir un lien direct entre les dépôts et certaines de leurs caractéristiques hydrologiques, notamment:

- la porosité totale
- la teneur en eau

²¹ La texture d'un sol peut être définie comme la propriété physique qui se rapporte essentiellement aux dimensions des grains formant la phase solide (La Rochelle, 1983).

- la porosité effective
- la capacité au champ
- le point de flétrissement
- la conductivité hydraulique à saturation

A chaque type géomorphologique correspond également une classe de drainage. Cette classification définit six (6) classes, d'un drainage très bon à très mauvais. Cette variable est fortement conditionnée par la situation topographique des types géomorphologiques. Les stations à drainage rapide se retrouvent généralement dans la partie supérieure des pentes convexes ou planes. Les stations à drainage modéré se situent en terrain plat. Les drainages imparfaits caractérisent les terrains plats à concaves. Enfin, les stations marquées par la présence d'un écoulement hypodermique important (seepage) sont généralement situées à mi-pente ou en bas des pentes modérément longues à longues, de faible déclivité (Ducruc, 1991). La figure 26 et le tableau 6 synthétisent ces différentes informations.

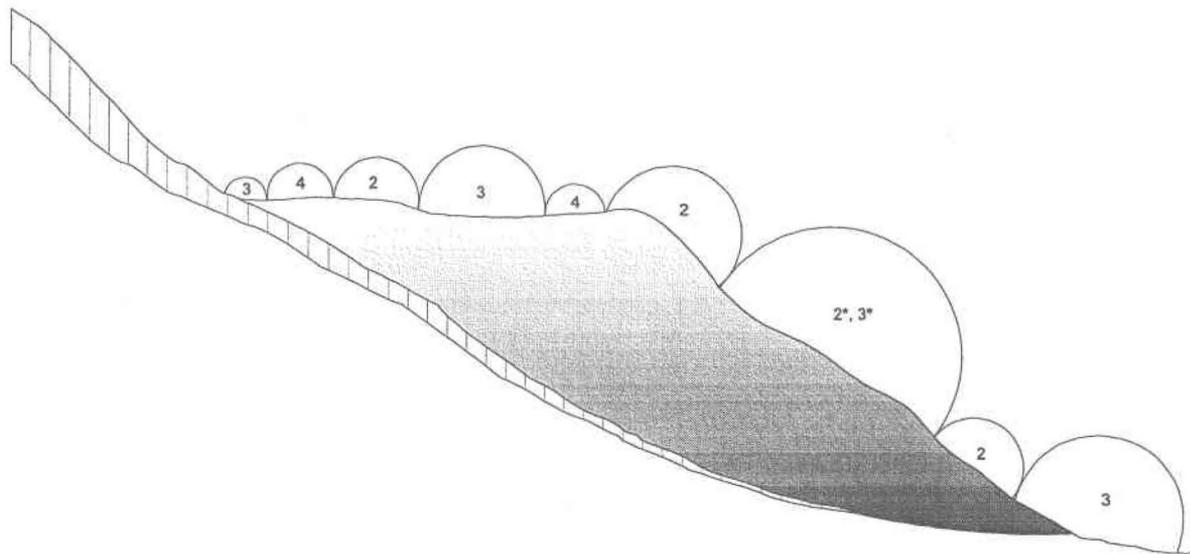


Figure 26: Synthèse des caractéristiques topographiques des types géomorphologiques issus des dépôts glacio-lacustres argilo-limoneux

(pour la compréhension de la figure 26, se référer au tableau 5 ci-dessous)

(d'après Ducruc et al, 1991)

Tableau 5: Exemple de caractéristiques topographiques de certaines classes de drainage.
(d'après Ducruc et de Sède, 1991)

Drainage	Topographie	Forme de pente	Pente arrière	Déclivité
2	variable	R>X	C>N	variable
3	0/6	R	R	5
3*	7>5	R>>C	L>M	5>10
4	0/6	R>>C	N>C	5

avec: =: égal, >: supérieur à. >>: très supérieur à (au moins deux fois plus grand).

Ainsi que: R: rectiligne, C: concave, X: convexe pour les formes de pente N: nulle, C: courte, M: moyenne, L: longue, pour la pente arrière.

Tableau 6: Texture et pierrosité des principaux dépôts de surface présents dans le bassin supérieur de la Eaton²²
(tiré de Ducruc et de Sède, 1991).

Dépôts	Code	Texture globale dominante	Pierrosité	Type de pierrosité
Till régional	1A, 1AR	Loam limoneux, Loam (LLI)	5 à 25%	G. C. B. (Graviers, Cailloux, Blocs)
Till local	1S, 1SS	LLI	< 5%	G.
Fluvio-glaciaire	2AG	Sable Graveleux (SGL)	50 à 75 %	G. C.
Fluvatile sub- actuel	3BL	L LI	< 5%	G.
Fluvatile sub-actuel	3BG	LLI	25 à 75 %	G. C.
Glacio-lacustre	4BF	Sables Fins (SF)	< 5 %	G.
Glacio-lacustre	4BL	LLI	< 5 %	G.

²² Seuls les dépôts "mixtes" sont répertoriés dans ce tableau. Les dépôts tels que les sables fins fluvio-glaciaires (2AG) n'ont pas nécessité, de par leur hétérogénéité, d'analyse spécifique.

2.4.2.2. L'extraction de données topographiques à partir du modèle numérique d'altitude.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les informations de nature topographique fournies par la carte écologique sont insuffisantes (et inadaptées de par leur nature qualitative) dans une optique hydrologique. C'est pourquoi, à partir d'une matrice d'altitudes calculée sur la base d'un ensemble de courbes de niveaux numérisées sous forme vectorielle (voir annexe 4), nous avons dérivé un ensemble de variables topographiques:

- les pentes
- les orientations
- la forme des versants (concavité/convexité).

a. Description de la matrice initiale.

La matrice des altitudes est une matrice rectangulaire de 798 par 984 pixels (cf. annexe 5). Cette taille permet d'obtenir un pixel équivalent de vingt (20) mètres par vingt (20) mètres ce qui correspond à une résolution d'une finesse acceptable pour notre problématique. Ce maillage correspond également à la résolution des images fournies par le satellite SPOT. Il nous serait ainsi possible, le cas échéant, d'exploiter les images classifiées d'occupation actuelle, faisant suite aux travaux de recherche sur la mise au point de méthode d'extraction d'information à partir d'images satellitaires, travaux menés à l'INRS-Eau dans le cadre du développement des logiciels de modélisation hydrologique CEQUEAU et HYDROTEL (Fortin et al, 1983). Ces images datent cependant de 1988. Pour cette raison, nous avons préféré acquérir une information plus récente, collectée à partir d'une campagne de terrain et d'une analyse de photographies aériennes, ces deux éléments étant la garantie d'une plus juste adéquation à la réalité terrain.

Avant de décrire les différentes variables dérivées de cette matrice, il serait bon de s'arrêter quelques instants sur la méthode d'interpolation²³ utilisée pour l'obtenir. Comme le mentionne Collet (1992), l'interpolation a pour objectif de produire un maillage régulier de points à partir d'une structure vectorielle représentant une série de mesures

²³ L'interpolation désigne l'action d'intercaler des valeurs ou des termes intermédiaires dans une série de valeurs ou de termes connus (Petit Robert, Dictionnaire de la langue française).

ponctuelles des valeurs du phénomène à représenter. Deux types de techniques peuvent être mises en oeuvre pour générer ce maillage:

- les procédures d'estimation globale
- les procédures d'estimation locale

Généralement, les procédures d'estimation globale des valeurs du maillage sont employées dans le cas de transformations géométriques de grilles ou d'images numériques déjà existantes. Les interpolateurs globaux définissent une fonction simple qui est appliquée à l'ensemble de la zone et entraîne des modifications des valeurs initiales sur la carte toute entière (Goodchild et al, 1994). Parmi ces procédures globales, nous pouvons citer la régression polynomiale à différents paramètres, largement utilisée lors de corrections d'images satellitaires (de Sède et al, 1987). Dans le cas qui nous préoccupe, une estimation locale est plus adaptée. Contrairement à la méthode globale, l'interpolateur local applique un algorithme de façon répétée à une petite portion de l'ensemble des points. La modification ne se répercute donc qu'à l'intérieur de la fenêtre d'analyse. Généralement, le principe suivi est simple. Il consiste à estimer la valeur de chacun des points du réseau maillé à l'aide de la valeur des points de mesure (ou points de contrôle) situés dans leur voisinage. Cette procédure exige la définition des trois paramètres suivants:

- La localisation des noeuds de la grille (ce sont les points à estimer)
- la notion de voisinage
- l'influence des points voisins (pondération).

En outre, comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, afin de garantir une estimation réaliste des noeuds de la grille, il est nécessaire de définir des points de contrôle à l'extérieur de la zone d'étude afin de ne pas induire d'erreurs aux limites, dues à une absence d'information. Dans le cas de notre application, la zone numérisée recouvre une superficie totale de 314 Km² alors que le bassin-versant de la Eaton supérieure occupe environ 200 Km² (cf. annexe 5).

A partir de ces concepts de base, différentes méthodes d'interpolations peuvent être utilisées. Elles diffèrent essentiellement les unes des autres par leur définition du voisinage et l'influence de chacun des voisins (cf. figure 27).

Pour le cas de notre application, l'interpolation des points de contrôle a été effectuée sur la base d'un fichier vecteur issu de la numérisation des courbes de niveaux. Ce fichier totalise 52410 points pour 618 courbes de niveau. La méthode d'interpolation retenue (méthode des moyennes pondérées) est basée sur la prise en compte des huit (8) voisins sans contrainte de distance, pondérée de manière classique en se basant sur l'inverse de la distance au carré du point au noeud. Ainsi, plus un point de contrôle se trouve proche du noeud à calculer (donc à une distance faible), plus son poids sera important. Ce facteur de pondération est très important et peut modifier de manière notable les résultats de l'interpolation. Cette sensibilité a d'ailleurs fait l'objet d'une étude comparative permettant de mesurer selon les cas l'influence de cette fonction distance sur les valeurs interpolées des noeuds (Collet, 1992). Dans notre cas cependant, en considérant le niveau de dissection du modelé, la densité des points numérisés garantit visiblement un résultat acceptable pour notre problématique (52410 points sur une surface totale de 314.1072 Km² soit une moyenne de 166 points par km²).

Une fois cette étape achevée, il ne reste qu'à définir une valeur moyenne par pixel. Cette estimation de la valeur moyenne de chaque pixel à partir de celle des noeuds se fait très simplement, par le calcul de la moyenne appliqué à ses quatre (4) sommets. Une méthode permet d'esquiver cette deuxième étape. Lors de l'interpolation, les noeuds ne sont pas définis en tant que sommets de pixels mais en tant que centres de ceux ci (cf. figure 28). Il devient alors possible d'affecter cette valeur à l'ensemble du pixel sans avoir recours au calcul d'une valeur moyenne à partir de la valeur des quatre (4) sommets. L'inconvénient de cette méthode est sa traduction brute des résultats de l'interpolation.

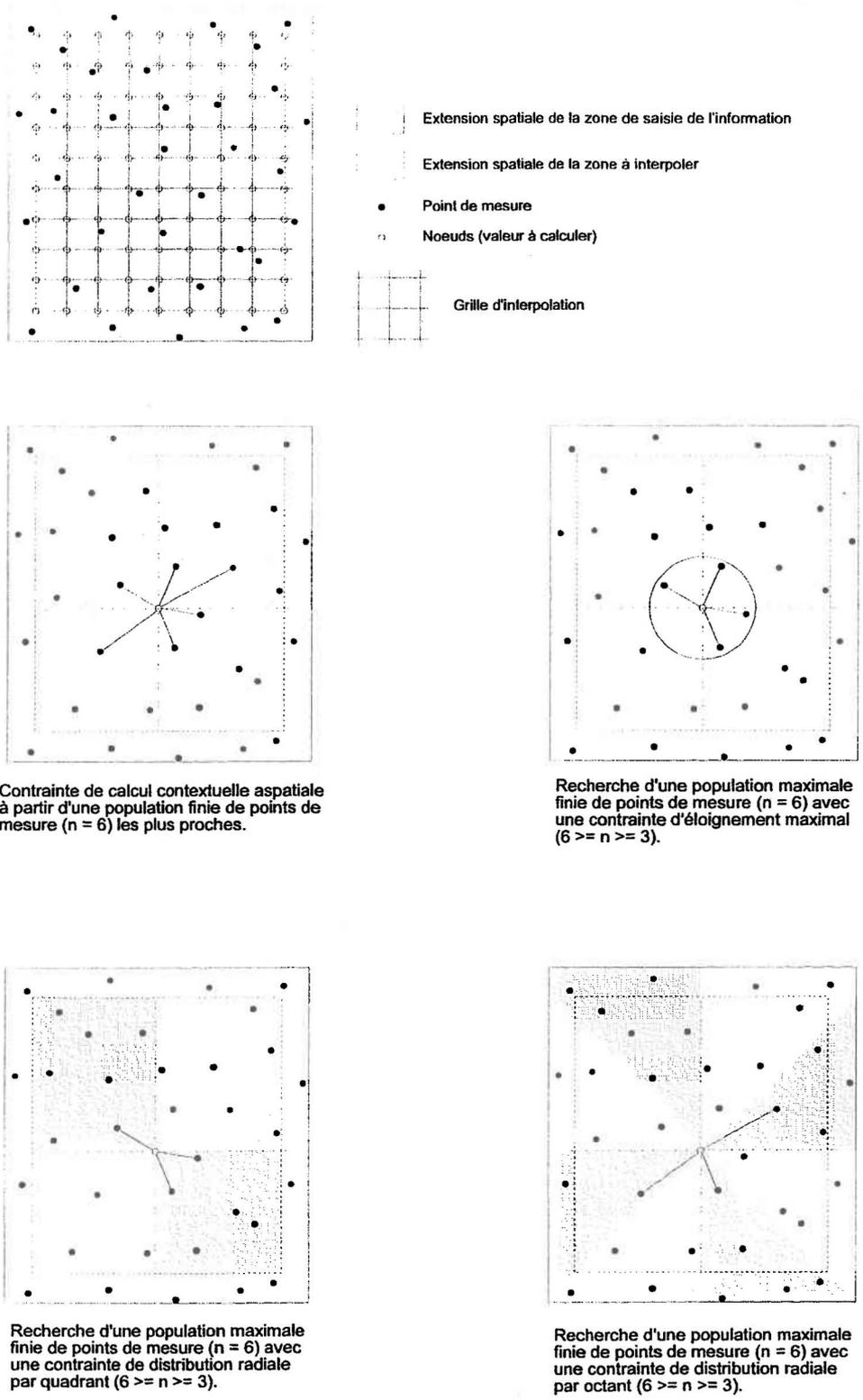


Figure 27: Différentes règles définissant le voisinage d'un noeud à estimer (d'après Collet, 1992)

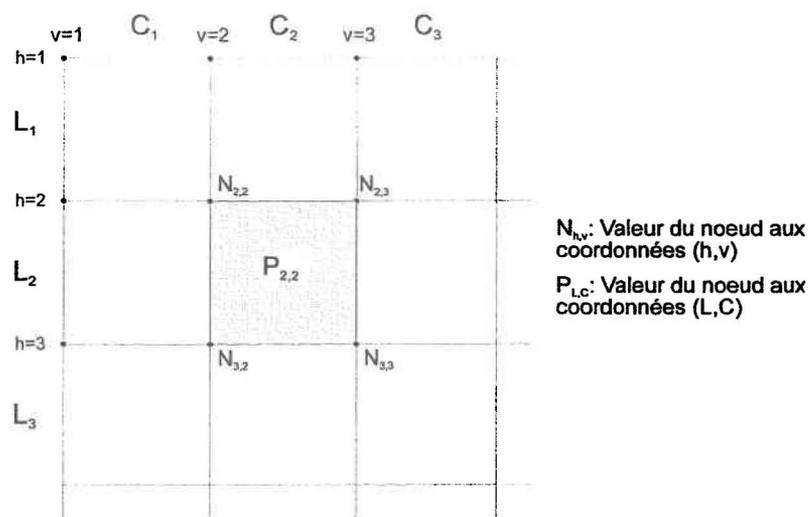


Figure 28: Méthodes de calcul d'indices thématiques par pixel
(d'après Collet, 1992)

b. Traitement de la matrice initiale.

La matrice des altitudes obtenue à la suite de l'interpolation est une matrice de 798 lignes par 984 colonnes. Les altitudes sont exprimées en mètres par pixel de 400 mètres carrés (20*20). Elles s'étendent dans une fourchette de 300 à 650 mètres.

A partir de cette matrice il est possible de dériver un certain nombre d'informations:

- Les pentes:

Le calcul des pentes est basé sur la détermination de la pente maximum de chaque pixel à l'aide des composantes en x et en y de ces pentes. Dans la procédure suivie, seuls les voisins supérieurs, inférieurs et latéraux du pixel sont considérés. Le résultat peut être exprimé en degré ou en pourcent

- Les orientations

L'orientation est définie en fonction de la direction de la pente maximum. Elle est exprimée en degré décimal, correspondant à un azimuth variant de 0 à 360 degrés en commençant par le nord.

Les cartes des pentes et des orientations sont fournies en annexes 8 et 9.

- Les formes de versants:

De nombreuses études ont montré le rôle prépondérant de la topographie sur les écoulements (cf. Partie 1). La carte écologique fournit un certain nombre d'informations descriptives sur les formes de versants. Ces informations demeurent toutefois rattachées à chaque polygone cartographique en conformité avec l'approche propre à l'écologie du paysage. Ainsi sont disponibles par polygone, des informations sur la concavité/convexité globale de la zone, sa position relativement à l'ensemble du versant (haut, milieu haut, milieu et bas de versant) ainsi que sur ses caractéristiques micro-topographiques (notion de pentes complexes).

Dans le contexte de cette recherche, tout comme pour la variable décrivant les pentes, il nous a semblé pertinent de recalculer, à partir d'un Modèle Numérique d'Altitude, l'ensemble de ces informations. L'obtention d'une valeur exacte nous permettait ensuite de classer les résultats à volonté et d'améliorer notre démarche globale par une prise en compte des informations de nature topographique plus nuancée que celle fournie par la carte écologique. Ainsi, pour obtenir des valeurs de concavité/convexité sur l'ensemble de la zone, nous avons eu recours au logiciel LEUROC²⁴.

LEUROC est un logiciel développé conjointement par l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne (IGL). Il a pour objectif de calculer et de cartographier, à partir d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA), divers paramètres géomorphologiques (Rapport UNIL, EPFL, 1991). Tel que mentionné dans ce document, LEUROC est programmé en langage C et exploite les ressources de X Window pour la communication écran et le logiciel UNIRAS pour la reproduction graphique. Les fonctions disponibles traitent de la plupart des paramètres morphologiques tels que pente, orientations, concavité et convexité selon divers algorithmes. Il contient également un module de calcul automatique des contours d'un bassin versant.

Dans le contexte de cette recherche, nous avons eu recours au logiciel LEUROC pour calculer les concavités/convexités des pentes du bassin versant supérieur de la Eaton. Le paramètre concavité/convexité est un estimateur de la courbure en chaque noeud du MNA. Il est exprimé par un nombre positif s'il y a convexité et négatif s'il y a concavité.

²⁴ Logiciel de l'Ecole polytechnique fédérale et de l'Université de Lausanne pour le Relief, l'Orientation et la Concavité

Le calcul de ce paramètre est basé sur l'analyse de la courbure selon quatre (4) profils se croisant au point de calcul. Par la suite, ces quatre index sont combinés afin d'obtenir une valeur moyenne en chaque point (cf. figure 29)

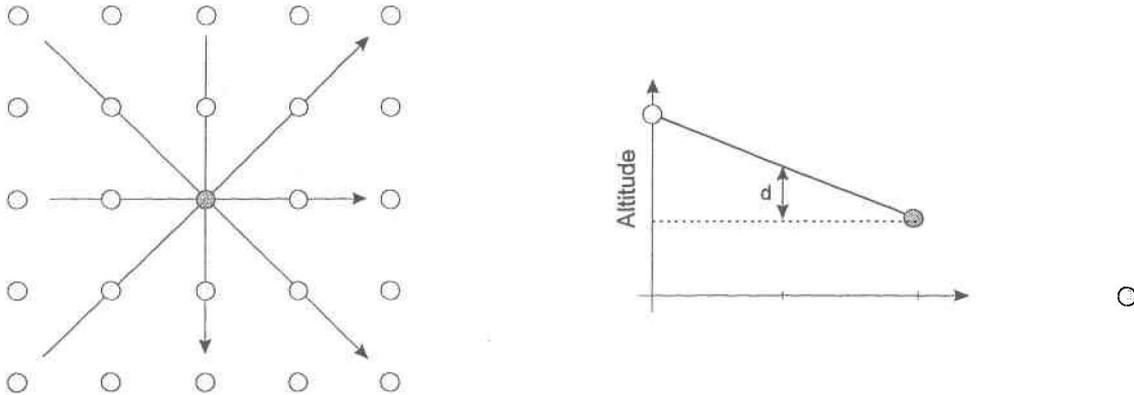


Figure 29: Modes de calcul des paramètres de concavité et de convexité
(d'après Rapport UNIL-EPFL 91)

Le calcul peut s'effectuer sur une fenêtre de taille variable ce qui présente l'avantage de pouvoir mettre en évidence une certaine structuration de l'information. La combinaison des altitudes moyennes peut s'effectuer soit par un calcul de la moyenne des altitudes moyennes de la fenêtre ou alors en retenant uniquement l'altitude moyenne maximale. La courbure est exprimée ensuite, en pourcentage et en fonction de la taille de la fenêtre selon l'équation suivante:

$$C = \left(\frac{\bar{d}}{\Delta F} \right) \cdot 100$$

C = Courbure

d = Distance du pixel central de la fenêtre à l'altitude moyenne

ΔF = Taille de la fenêtre

Calcul de la concavité en tenant compte des valeurs extrêmes:

$$d = V - \frac{V_1 \text{ extr} - V_2 \text{ extr}}{2} \cdot V \text{ par profil, avec:}$$

$V_x \text{ extr}$ = valeurs d'altitude extrêmes de la fenêtre

A partir de l'évaluation de d pour chaque profil, deux combinaisons permettent de calculer la concavité/convexité du relief:

Combinaison 1:

$$\frac{\sum \text{diff}}{n}$$

+ alors relief convexe
- alors relief concave
0 alors relief rectiligne

Combinaison 2:

tous les d sont positifs alors relief convexe
tous les d sont négatifs alors relief concave
sinon, relief rectigne

Les calculs de concavité/convexité ont été effectués à partir de la matrice des élévations obtenue après interpolation. Pour cette procédure, nous avons retenu un balayage de la matrice sur la base d'une fenêtre de calcul de [11x11] pixels. Ce choix a été retenu après divers essais avec un fenêtrage de [3x3], [5x5], [11x11], [19x19], la fenêtre de [11x11] donnant les meilleurs résultats²⁵ (cf. annexe 6). La combinaison des altitudes moyennes par direction s'est faite en retenant l'altitude moyenne maximale et non la moyenne des altitudes moyennes qui, après expérience, nous fournissait des résultats trop "lissés"

²⁵ Par meilleurs résultats, il est entendu ici une meilleure compatibilité entre la résolution du balayage de l'image par la fenêtre de calcul et les résultats obtenus et le niveau de détail fixé par le découpage cartographique. Les fenêtres de tailles inférieures généraient des images très hétérogènes sans de zonage très net. En revanche, la fenêtre de 19 par 19 pixels généraient une image extrêmement lissée des concavités-convexités du bassin-versant.

2.4.2.3. La caractérisation des unités écologiques en regard des écoulements de surface.

La cartographie écologique du relief et des dépôts de surface découpe le bassin versant en portions d'espace en s'appuyant sur l'organisation des types géomorphologiques. Cette organisation traduit donc fortement les caractéristiques géomorphologiques et topographiques du territoire. Le contenu informationnel de la carte écologique permet donc de saisir, à travers l'étude de ces caractéristiques, les relations existant entre les polygones dans une perspective hydrologique. Ces relations sont essentiellement définies en fonction du rôle de chaque polygone face au ruissellement de surface et au ruissellement hypodermique. Ainsi, par une analyse combinée des données topographiques (pentes, orientations, formes et intensités) et des données cartographiques (relations topologiques entre les différents polygones), il devient possible de définir un certain nombre de nouvelles variables que nous appellerons des variables de relation caractérisant les capacités diffusantes, réceptrices et transmettrices de chaque unité (cf. figure 30).

Remarque: A ce niveau, les variables de relation définies peuvent être représentées aisément par les différents types de versants déterminés par Tsukamoto et Ohta (1988), (cf. fig 4), chacune des variables étant dépendante de la forme des versants (zones réceptrices correspondant aux versants concaves par exemple).

La définition de la capacité des polygones cartographiques à transmettre les eaux de ruissellement de surface (ou le ruissellement hypodermique) nécessite l'intégration et la synthétisation d'un certain nombre d'informations. Le raisonnement humain permet relativement aisément de parvenir au résultat escompté, par un simple examen visuel de l'agencement des polygones comparativement à la topographie, lorsqu'il s'agit de définir ce type de variables sur un nombre restreint d'unités. En revanche, dans le cas de la Eaton supérieure, la procédure devient nettement plus "lourde" puisqu'elle concerne 538 polygones. C'est pourquoi nous avons imaginé de simplifier la tâche de l'interprète en lui fournissant une information intégrée à partir de laquelle il lui serait plus aisé de définir les sens d'écoulements des eaux de ruissellement et par là même les capacités diffusantes, réceptrices et transmettrices de chacune des polygones cartographiques.

La définition de cette capacité des polygones à laisser circuler les eaux s'appuie sur trois facteurs fondamentaux, tous dérivés du Modèle Numérique d'Altitude. Ces trois facteurs

sont respectivement la pente et sa déclivité, l'orientation ainsi que les concavités et convexités de chacun des polygones.

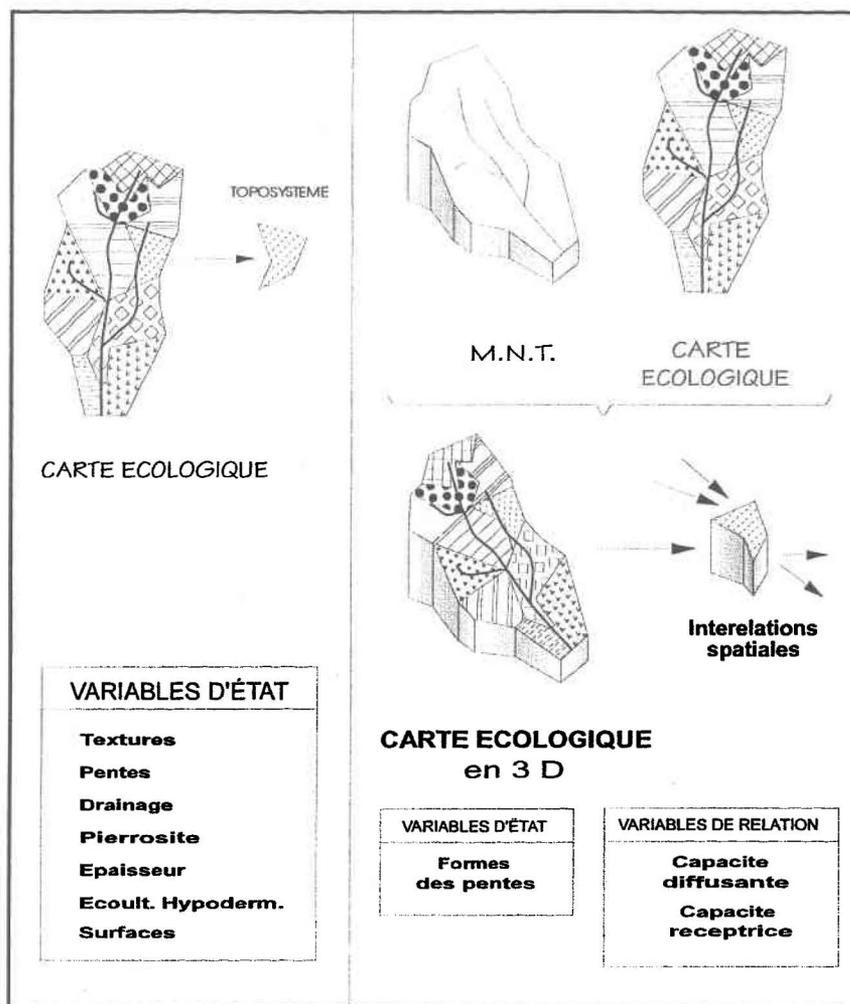


Figure 30: Définition hydrologique d'interrelations spatiales entre les polygones cartographiques
(d'après Ducruc et de Sède, 1991)

Le calcul des pentes et des orientations sont quelques-unes des fonctionnalités les plus répandues parmi l'ensemble des logiciels de Systèmes d'Information à Référence Spatiale

(SIRS)²⁶. Ces deux variables sont alors calculées, à partir d'algorithmes bien connus, sur la base du maillage du MNA, pixel par pixel sur l'ensemble de la zone d'étude. La définition de la concavité/convexité est en revanche une opération beaucoup moins répandue. Dans le cadre de cette recherche, les calculs de concavité/convexité ont été effectués à l'aide du logiciel LEUROC (Rapport UNIL-EPFL, 1991) que nous avons décrit précédemment. A partir de ces trois (3) variables de base, il fallait trouver le moyen:

- d'intégrer chacune de ces variables au niveau du polygone cartographique et non plus sur la base de pixels
- de les agréger toutes les trois ensembles afin de synthétiser au maximum les informations pertinentes et de "simplifier" les tâches ultérieures de reconnaissance du cheminement des eaux d'un polygone à l'autre.

L'intégration des variables de pente, d'orientation et de concavité/convexité (cf. annexe 6) se fait tout simplement à partir de l'ensemble des valeurs initiales de la matrice des altitudes, rapportées au niveau des polygones cartographiques. Une valeur moyenne de pente ou d'orientation est alors calculée par polygone²⁷, cette moyenne étant établie après avoir eu soin d'évacuer du calcul les valeurs extrêmes (cf. programme de calcul présenté en annexe 7).

- Par la suite, l'agrégation des trois variables a pour objectif de synthétiser les informations pour en faciliter l'interprétation. La méthode d'agrégation que nous avons retenue est la méthode des silhouettes. Elle s'apparente aux méthodes des signatures spectrales très fréquemment utilisées en télédétection (Bonn et Rochon, 1992). Le principe en est simple. Pour chaque polygone, les valeurs de pente, d'orientation et de concavité/convexité sont stockées dans un fichier²⁸ afin d'être interprétées ensembles. On obtient ainsi la "signature" de chaque polygone relativement à ces trois variables. Il devient alors possible de regrouper les polygones ayant des signatures similaires. Au terme de cette analyse, l'ensemble des 538 polygones cartographiques peut être décrit par 48 silhouettes distinctes synthétisant à la fois la pente, l'orientation et la forme de

²⁶ Dans le contexte de ce travail, c'est à partir du logiciel IDRISI que la majorité des traitements et analyses spatiales ont été effectués.

²⁷ Cette valeur moyenne est égale à la somme des valeurs de pente pour chaque pixel du polygone à traiter divisée par le nombre de pixel de ce même polygone.

²⁸ Evidemment, cette méthode nécessite une classification préalable des valeurs de chacune des variables dans un certain nombre de classes préétablies dont les limites dépendent de l'objectif poursuivi. Le détail de cette procédure est fourni en annexe ...

chaque unité. Ces 48 silhouettes résultent du croisement de trois types de formes (concave, convexe et rectiligne), huit classes d'orientation (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO) et enfin de deux classes de pentes (pentes très faibles à nulles et pentes marquées). Ce choix est conditionné par le fait qu'une multiplication des classes aurait abouti à une multiplication des silhouettes possibles, difficilement interprétables par la suite. C'est pourquoi nous avons retenu ces quelques classes marquées, tout en sachant, notamment pour la variable décrivant les pentes, que des informations plus détaillées seront intégrées lors des analyses ultérieures. Ainsi, la division en deux classes marquant la présence ou l'absence de pente ne risque pas d'être redondante avec la variable déclivité fournie par la carte écologique et définissant quatre classes distinctes. Le tableau fourni en annexe 8 décrit ces différentes silhouettes. A chaque silhouette est ensuite affecté un code numérique de 1 à 48. Ce code permet ensuite de documenter une nouvelle variable décrivant la silhouette de chaque polygone. L'ensemble des résultats pour les 538 polygones sont fournis en annexe 9. C'est à partir de cette information synthétique que va être menée l'analyse visant à définir la capacité des polygones à diffuser les eaux de ruissellement. Elle consiste dans un premier temps:

- à reproduire sur la carte du bassin-versant et par polygone cartographique, les caractéristiques de la silhouette.
- à définir, à partir de l'examen du document cartographique précédent, les interrelations existant entre les polygones connexes. Cet examen consiste essentiellement à identifier par une flèche, pour chaque polygone à l'étude, les polygones desquels il reçoit un écoulement et ceux vers lesquels il diffuse. Les résultats de cette analyse sont codés sur un document de travail dont un extrait est présenté dans la figure 31.

A partir de là, un travail fastidieux s'engage. Il consiste à répertorier pour chacun des 538 polygones, le nombre de polygones desquels ils reçoivent des écoulements et le nombre de polygones vers lesquels ils diffusent, en stockant le comptage dans un tableau (cf. tableau 7).

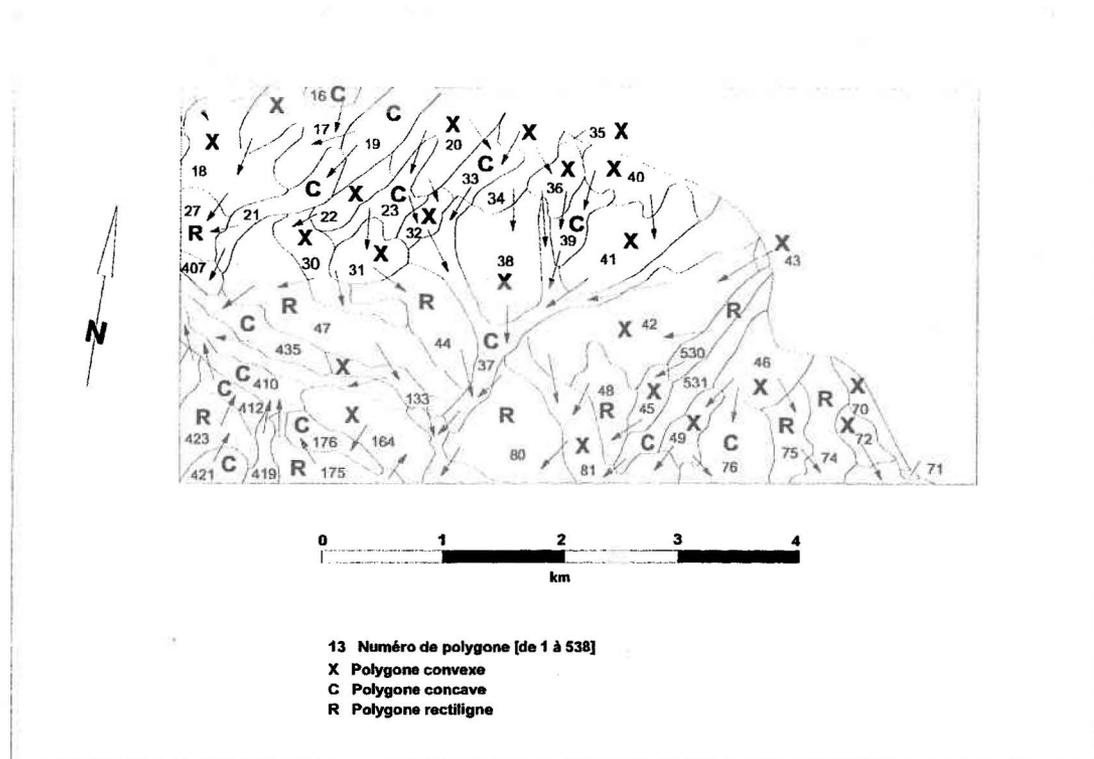


Figure 31: Document de travail définissant les interrelations entre polygones cartographiques du point de vue des écoulements.

Note: Chaque flèche symbolise le lien existant entre deux zones. Le sens et la direction de ces flèches sont conditionnés par la pente et l'orientation des zones.

Le code apparaissant dans la dernière colonne de ce tableau a été établi suite à la définition d'une classification hiérarchique des polygones selon leur position relative et leur fonction par rapport aux écoulements. Cette classification s'appuie sur trois catégories principales, divisées en sous-catégories selon leur importance en terme de diffusivité ou de réceptivité:

Tableau 7: Extrait du tableau récapitulatif répertoriant les capacités diffusantes, transmettrices et réceptrices des polygones cartographiques.

Identificateur (numéro du polygone)	Code concavité/convexité	Reçoit de	Diffuse vers	Nbre. de polygones déversants	Nbre de polygones vers lesquels il y a diffusion	Code
1	C	2	51, 6, 52	1	3	121
2	R	3	1, 6	1	2	120
3	X	-	2	0	1	110
4	C	-	7	0	1	110
5	X	-	7	0	1	110
6	R	1, 2, 7, 51	24, 59	4	2	222
7	C	4, 8	6	2	1	221
8	X	-	7	0	1	110
...
538	C	-	537	0	1	110

1. les polygones diffusants

- Diffusants simples, définis comme des polygones qui ne reçoivent jamais d'écoulement d'autres polygones
- Diffusants complexes, définies comme des polygones diffusant vers davantage de polygones qu'ils ne reçoivent

2. les polygones récepteurs

- Récepteurs simples, définis comme des polygones qui ne diffusent jamais vers d'autres, sauf en rivière
- Récepteurs complexes, définis comme des polygones qui reçoivent d'un nombre plus grand de polygones que ceux vers lesquels ils diffusent

3. les transmetteurs, qui se contentent de transmettre des écoulements sans diffuser ni concentrer l'eau.

A partir de cette classification de base, une valeur est affectée aux polygones selon "l'intensité" de la diffusion ou de la réception. Cette valeur est ensuite intégrée au niveau de chaque unité de référence en conservant la classe de silhouette dominante parmi les occurrences d'un même modèle. En théorie, chaque occurrence d'un même modèle devrait, selon le postulat d'homogénéité, être caractérisée par le même type de silhouette. Cependant, ce présupposé est loin de se vérifier. Ce constat met ainsi l'accent sur les problématiques liées au traitement numérique des informations comparativement aux données synthétiques de nature plus subjectives. Le codage final est présenté en annexe 10.

A partir de ce codage, cette nouvelle variable peut être cartographiée telle que l'illustre la figure 32. La visualisation de la répartition spatiale de cette variable permet de vérifier la validité de la démarche en repérant éventuellement les "aberrations" suite à des erreurs de codage ou d'interprétation visuelle. Dans le cas présent, nous n'avons remarqué aucune erreur notable, ce qui n'exclut pas cependant certaines incohérences dues à des fautes d'inattention. En revanche, nous avons remarqué certaines incohérences localisées au niveau de zones extrêmement complexes, généralement très étendues et pour lesquelles l'affectation d'une pente, d'une orientation ou d'une concavité/convexité moyennes n'ont que peu de signification. Pour ces zones, généralement situées dans des fonds de vallées, nous nous sommes détachés d'une interprétation fondée sur la procédure automatisée que nous venons de décrire pour nous tourner vers une interprétation visuelle directe de la carte topographique.

L'objectif de cette démarche n'est cependant pas la cartographie. La nouvelle variable générée va permettre d'alimenter la procédure d'analyses statistiques en y introduisant une notion topologique jusqu'à présent non exprimée par les différentes variables d'état entrant dans la description de chaque polygone (texture, pierrosité, pentes...).

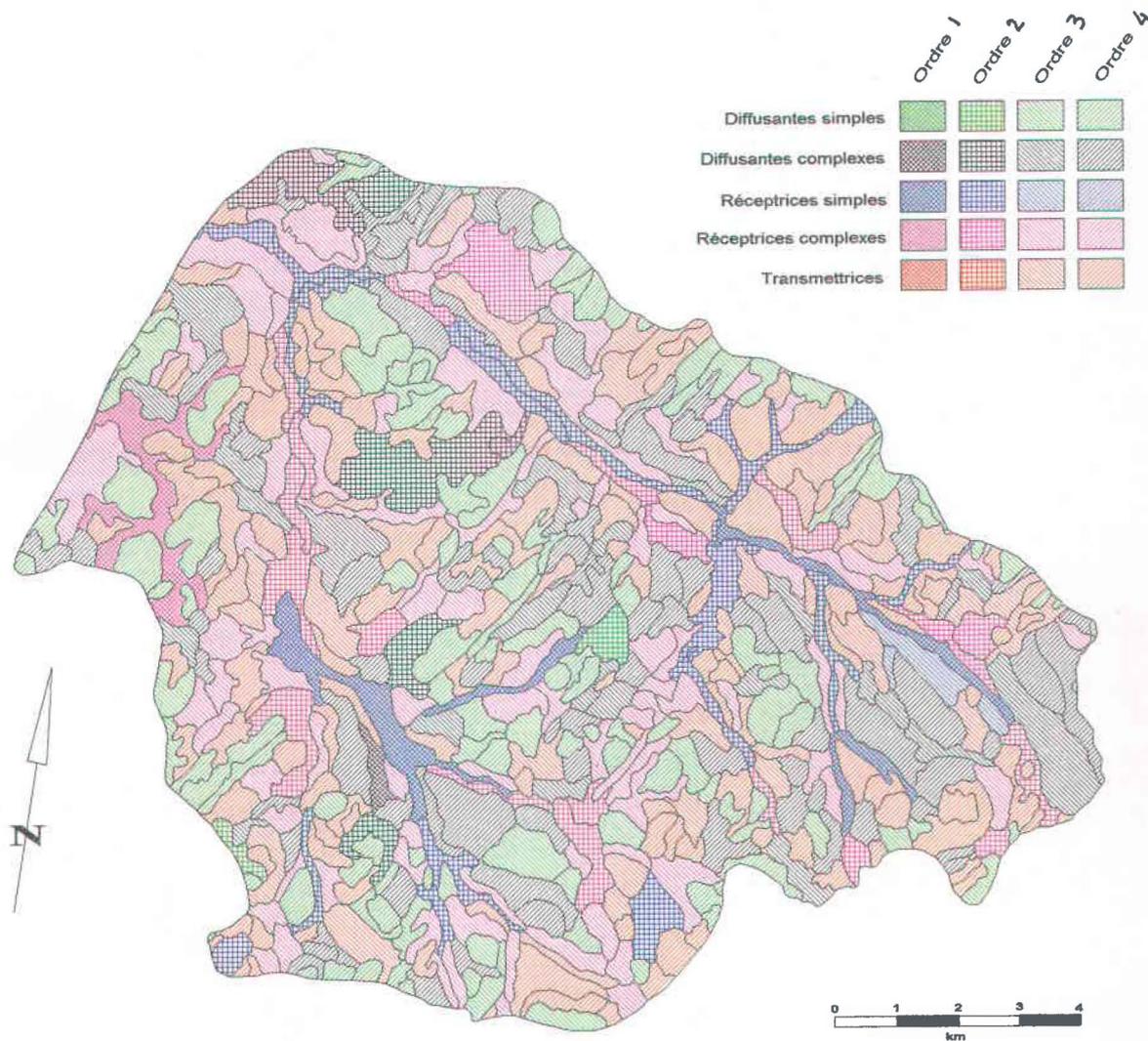


Figure 32: Capacité diffusante, réceptrice et transmettrice des polygones de la carte écologique.

2.4.2.4. Traitements et analyses statistiques en vue de la constitution de zones significativement pertinentes pour l'aménagement intégré des bassins versants.

2.4.2.4.1. Remarques préliminaires:

La carte écologique fournit un découpage du territoire basé sur l'identification d'unités définies dans un premier temps en fonction des caractéristiques stables du milieu (combinaison dépôt-drainage-pente). Dans un contexte d'application hydrologique et pour se fixer une hypothèse de départ, ce découpage peut être pris comme une base pertinente pour la description des bassins-versants. Cependant, les nuances de la spatialisation obtenue (538 polygones cartographiques constituant 119 unités ou modèles écologiques) ne sont pas justifiées dans un tel contexte, d'une part parce que la finesse des applications avales ne permet pas leur exploitation et d'autre part car ces informations ne sont pas spatialisées ce qui les rend difficilement exploitables²⁹. Il est donc nécessaire de "simplifier" ou plutôt de synthétiser les informations de base fournies par la carte et dans certains cas, de leur substituer des données exprimées sous une forme plus adaptée que celle du document source.

Le recours aux méthodes de statistiques multivariées vise précisément à synthétiser cette information initiale en regroupant l'ensemble des 119 modèles en un nombre plus restreint en fonction de leurs affinités.

2.4.2.4.2. Choix des méthodes statistiques.

Chaque unité identifiée sur la carte écologique peut être caractérisée par un certain nombre de variables décrivant sa nature (variables d'état) et son rôle vis-à-vis des écoulements et relativement aux autres unités (variables de relation) (cf. tableau 8.).

²⁹ A titre d'exemple, la carte écologique définit une unité numéro 25 décrite par des caractéristiques dominantes marquées par des dépôts glacio-lacustres argilo-limoneux de drainage 2-3 sur une pente de 5 à 10 % fortement ondulée (4BL/23/b). L'unité 19 possède exactement les mêmes caractéristiques générales (4BL/23/b). La différenciation ne se fonde que sur les caractéristiques des types géomorphologiques secondaires présents dans cette zone notamment sur le Type Géomorphologique 2 (TG2) recouvrant 20 % de la surface totale de l'unité et marqué pour l'unité 19 par une pente plus forte. Cette nuance n'est pas exploitable au niveau de perception auquel nous travaillons.

Tableau 8: Totalité des variables de base prises en compte lors des analyses statistiques

VARIABLES D'ÉTAT	VARIABLES DE RELATION
Type de dépôt	Capacité à diffuser les eaux de ruissellement
Classes de drainage	Capacité à concentrer les eaux de ruissellement
Classes de déclivité	Rôle de transmetteurs des polygones
Type de pente (uniforme ou complexe)	
Position de l'unité par rapport à l'ensemble du versant	
Formes longitudinales et transversales des unités	
Drainage hypodermique (présence/absence)	

Les variables d'état sont directement tirées de la carte écologique. Les variables de relation ont été réévaluées, tel que décrit précédemment, à partir de données numériques topographiques, dans l'optique d'affiner et d'adapter la description du bassin en vue d'une application hydrologique. Chacun des 119 modèles (ou unités) identifiés par les photos-interprètes est décrit par cet ensemble de variables.

L'objectif de cette démarche statistique étant de synthétiser les informations fournies par les différents modèles en regroupant ceux-ci en un certain nombre de classes significatives pour l'hydrologie, un choix méthodologique s'avérait nécessaire. Il existe de nombreuses méthodes statistiques permettant, à partir d'un jeu d'individus (les individus étant dans notre cas les 119 unités cartographiques) et de variables, de créer des regroupements. Toutes les méthodes ne s'appliquent cependant pas aux mêmes types de données. La structure des données que nous fournit la carte écologique impose un certain nombre de contraintes et limite l'éventail des choix possibles. Les variables décrivant chacune des unités peuvent être de type continu (altitude) ou discrètes (classes de textures ou de drainage). En outre, cette description fait appel à de nombreuses variables qualitatives dont le recodage s'avère nécessaire.

Les objectifs fixés (synthétisation des informations en vue du regroupement des unités écologiques en classes de zones significatives) et la présence de cet ensemble hétérogène de variables qualitatives et quantitatives a orienté notre choix vers le recours à une séquence de méthodes statistiques regroupant:

- une méthode d'analyse factorielle pour la partie "synthétisation de l'information"
- une méthode de classification permettant de constituer des groupes en vue de l'application à la gestion intégrée des bassins versants.

L'analyse factorielle comme la classification ont pour objectif commun de définir des groupes de variables présentant des caractéristiques communes. Alors pourquoi exploiter ces deux méthodes conjointement ? De nombreux auteurs soulignent les difficultés d'interprétation liées à l'analyse factorielle. Jambu, (1976) mentionne notamment la difficile tâche d'interprétation des résultats d'une analyse factorielle dans la mesure où cette méthode ne s'appuie pas sur la détermination ou la constitution effective de classes mais plutôt sur une interprétation d'une représentation spatiale des données sous la forme d'un nuage de points. D'un autre côté, les praticiens de la classification automatique se heurtent à des interprétations délicates des représentations arborescentes des données traitées par classification. Malgré ces quelques réserves, ces deux familles de méthodes permettent une synthétisation de l'information et la constitution d'ensembles de variables fortement corrélées. Le couplage d'une méthode d'analyse factorielle et d'une classification présente alors l'intérêt de combiner deux méthodes aux fondements différents dans le but d'améliorer la finesse de l'interprétation des résultats et de mieux cerner les implications des analyses et de leur interprétation. Ce dernier point est fondamental car , il est bon de le rappeler, ce type de méthodes conduit toujours à une interprétation et non à un résultat objectif.

- **Les méthodes d'analyse factorielle.**

L'analyse factorielle regroupe un ensemble de méthodes ou de procédés ayant pour objectif de détecter des familles de variables corrélées. Elle s'appuie sur une hypothèse de base selon laquelle, dans une matrice de variables corrélées, il existe un certain nombre de facteurs communs. Ce sont ces facteurs communs qui sont exprimés par l'analyse factorielle. Pour y parvenir, l'analyse factorielle recherche les sources communes de variance à travers les propriétés des variables du test (Cole et King, 1968).

Plus concrètement, l'analyse factorielle ramène l'expression des variables à travers un espace géométrique de n dimensions (une dimension par variable) dans un espace plus petit³⁰, le tout avec une perte d'information minimale. Il existe différents types d'analyses factorielles. Parmi eux nous pouvons citer:

- L'analyse en Composantes principales (ACP).

L'ACP est l'une des méthodes les plus "simples". C'est une méthode descriptive exploratoire. Elle n'impose pas d'hypothèse préalable mais elle demeure très exigeante. L'ACP ne peut effectivement traiter que des données quantitatives relativement homogènes. L'expression de ces données en valeurs relatives, ayant pour effet de supprimer l'effet de taille, est préférable au traitement direct des valeurs absolues. Dans le cas de données en valeur absolue, il est conseillé de procéder à une standardisation préalable de chacune des variables³¹.

- L'analyse factorielle des correspondances (AFC)³².

L'AFC part de l'hypothèse que chaque vecteur de la matrice possède une double information, à savoir; une information commune à tous les indicateurs et pouvant être ramenée à quelques facteurs explicatifs; une information spécifique exprimée par les résidus. L'AFC tente donc de chiffrer le commun et le particulier en exprimant le commun à travers un certain nombre de facteurs. Contrairement à l'ACP, l'AFC peut traiter un vaste ensemble de variables hétérogènes.

Comme le souligne Benzécri (1982), considéré comme le père de cette méthode, l'analyse des correspondances ne se borne pas à extraire des facteurs de tout tableau de nombres positifs. Elle fixe un certain nombre de règles pour la préparation des données, aide à critiquer la validité des résultats par le biais du calcul des contributions et se marie très bien aux méthodes de classification automatique. Il est d'ailleurs conseillé de se reporter aux ouvrages de ce dernier pour les détails de cette méthode.

Remarque: L'AFC ne tient pas compte des auto-corrélations spatiales ou temporelles, c'est-à-dire de la probabilité qu'ont un lieu ou un temps d'influer sur un lieu ou un temps

³⁰ C'est ce que l'on appelle la factorisation (Beguïn, 1979)

³¹ Dans ce cas, on parle d'ACP normée.

³² L'AFC puise ses origines dans l'analyse en facteurs communs.

voisin. Cette remarque est particulièrement importante dans le contexte qui nous préoccupe et pour lequel il s'agit justement de travailler sur des unités spatiales. De plus, l'analyse des correspondances peut traiter des tableaux de contingence³³.

A la lumière de cette description succincte des différentes méthodes disponibles, il est possible de définir la plus appropriée en fonction des caractéristiques des données à traitées. De toute évidence, l'ACP n'est pas adaptée au cas qui nous préoccupe. L'hétérogénéité des données, leur caractère qualitatif ne permet pas le recours à cette méthode. L'AFC, permettant l'analyse de vastes tableaux de données, est plus pertinente dans le contexte de cette recherche. C'est pourquoi nous avons retenu l'Analyse Factorielle des Correspondances pour la première étape de synthétisation des informations.

Principales étapes de l'Analyse Factorielle des Correspondances.

La mise en oeuvre d'une AFC sur un ensemble de données nécessite de suivre un certain nombre d'étapes, de la constitution du tableau de données à l'interprétation finale:

- Le choix des unités à traiter.

Dans notre cas, les unités (ou individus) à traiter sont représentés par les 119 modèles définis par la carte écologique. Chaque modèle est donc assimilé à un individu.

- Le choix des variables.

Cette étape est particulièrement délicate. En effet, les variables entrant dans une procédure d'AFC doivent être, dans la mesure du possible, indépendantes. Généralement, en AFC, on assume que ces variables sont distribuées selon une loi normale. L'ensemble des variables retenues dans le cadre de ce travail et la justification de leur choix seront discutés lors de la présentation des résultats.

- La constitution de la matrice (tableau des données à traiter).

³³ "La contingence signifie la dépendance, de sorte qu'un tableau de contingence est tout simplement un tableau qui montre comment une caractéristique dépend d'une autre" (Wonnacott et al, 1991).

La nature des données que nous avons à traiter nécessite leur recodage sous forme binaire. Comment exprimer autrement des variables telles que la présence de drainage hypodermique ou les classes de drainage ? Le recodage des variables consiste à associer à chacune d'entre elles autant de colonnes que le nombre de modalités qu'elle présente. A titre d'exemple, le recodage de la variable drainage définie par les six classes de la commission canadienne de pédologie aboutit à la création de six colonnes dans le tableau de données.

Remarque: l'AFC ne supporte pas les valeurs manquantes.

- A partir du tableau initial de données, les traitements en vue de la détermination des facteurs peuvent commencer.
- Calcul de la moyenne et de l'écart type.
- Etablissement de la matrice de corrélation.
- Evaluation des facteurs à partir de la matrice de corrélation. Les facteurs sont basés sur la longueur des axes nécessaires à la définition du nuage de points dans toutes ses dimensions (Cole et King, 1968). Le premier facteur est déterminé par le degré de corrélation des variables. Le second facteur est orthogonal au premier. Les facteurs représentent donc l'influence de toutes les variables sur la variabilité globale des données. L'analyse montre également comment chaque variable est liée aux axes factoriels à chaque étape de la rotation. Pour mieux comprendre, nous pouvons mentionner le fait que des variables proches de l'axe ont un fort pouvoir explicatif et qu'elles sont fortement corrélées. L'identification de ces variables explicatives peut se faire en analysant les poids factoriels. Généralement, comme le soulignent Cole et King (1968), les variables faiblement corrélées à l'axe 1 sont fortement corrélées à l'axe deux.

L'analyse factorielle met donc en évidence à la fois la manière dont les variables combinées rendent compte de la variabilité des données ainsi que la réponse de chaque individu en regard des quelques facteurs interprétables. A partir de ces éléments, il devient donc possible d'établir des différences entre les individus et par là même de constituer des groupements.

A terme, l'analyse factorielle des correspondances va nous permettre d'identifier un certain nombre de facteurs (nous pourrions parler ici de néo-variables) expliquant la répartition des différentes variables et leur degré de corrélation. Ce sont ces facteurs plutôt que les variables originelles, qui vont ensuite être intégrés à la procédure de classification retenue. Ainsi, le recours à l'AFC va permettre de synthétiser les informations fournies en ramenant l'analyse d'une matrice de 119 individus par une quarantaine de variables à une taille plus raisonnable et plus facilement exploitable de 119 individus par quelques facteurs³⁴.

• **Les méthodes de classification.**

Comme le souligne Jambu (1976), l'AFC fournit une information synthétique permettant théoriquement d'établir des regroupements des différentes variables considérées. Toutefois, c'est une méthode difficile d'interprétation. Le recours en aval de l'AFC à une technique de classification peut fournir un apport intéressant pour la détermination de classes d'individus.

Il existe plusieurs méthodes de classification. Toutes s'appuient cependant sur deux étapes fondamentales;

- une définition de la mesure de la similarité entre individus
- une méthode d'agrégation des individus en groupes sur la base de l'indicateur de similarité retenu

La similarité entre individus peut s'exprimer par différents coefficients. Le coefficient d'association permet de mesurer la similarité entre individus dans le cas d'un codage binaire. Les coefficients de corrélation quant à eux, expriment la similarité entre des profils d'individus. Cette approche exige que l'on soit en présence d'unités de mesure identiques, du même ordre de grandeur. Une troisième méthode permet d'exprimer la

³⁴ En théorie, le nombre possible de facteurs pouvant être extraits par le programme d'AFC utilisé est au plus égal à $\text{Min}(N1-1, N2-1)$, ce qui représente pour nous au delà de 30 facteurs. Cependant, il est difficile d'interpréter au delà de quatre ou cinq facteurs. De plus, seuls les premiers facteurs expliquent fortement l'inertie totale du nuage de points. C'est pourquoi, nous nous limiterons à simplifier le tableau de données initiales aux quelques premiers facteurs (leur nombre sera fixé par leur pourcentage explicatif cumulé) définis par l'AFC.

similarité en s'appuyant sur la distance existant entre des individus (distance Euclidienne, de Mahalanobis³⁵).

A partir de ces différentes méthodes, il est possible de construire une matrice de similarité entre les individus à classer. La classification exploite cette matrice et tente de générer des groupes en s'appuyant:

- sur des méthodes exploratoires telles que la définition de noyaux (sous ensembles au sein desquels la similarité est plus grande) ou des analyses de densité (la densité désignant ici le nombre de points contenus dans un hyper volume dans l'espace des variables).
- sur des méthodes hiérarchiques convenant généralement à toute partition impliquant une idée d'emboîtement. Parmi l'éventail des méthodes disponibles, nous pouvons citer celles faisant appel à des procédures divisées (monothétiques ou polythétiques³⁶) et celles faisant appel à des procédures agrégatives. Dans ce dernier cas, l'agrégation peut se faire en exploitant la similarité entre les individus (plus proche voisin, moyenne...) ou en essayant d'optimiser un critère (maximisation de la variation intergroupes), (Beguin, 1979).

Dans le contexte de cette recherche, n'ayant pas de connaissance à priori quant à la nature et au nombre de classes à produire, nous ne nous intéresserons pas aux méthodes de classifications supervisées, fondées sur la définition d'un modèle préalable, validé puis appliqué à l'ensemble des données à classer (Collet, 1992). Ce type de méthodes est particulièrement utilisé en traitement d'images.

Description succincte de la méthode de classification retenue.

Afin de constituer des groupements de zones sur la base des 119 modèles définis par la carte écologique, nous avons retenu une méthode de classification par agrégation, la classification ascendante hiérarchique (CAH). Le principe de la CAH s'appuie sur les quatre étapes suivantes (Essadaoui, 1992):

³⁵ La distance de Mahalanobis (ou D2) permet de situer plusieurs populations dans un espace à n dimensions (n étant le nombre de variables) et de déterminer dans quelle mesure elles peuvent être distinguées les unes des autres (Lefebvre, 1976)..

³⁶ S'appuyant sur un ou plusieurs caractères

- le calcul des distances entre les éléments de I (ensemble des individus)
- l'agrégation des deux éléments présentant les plus petites distances
- le recalcul des distances entre le nouvel élément créé et les autres éléments
- l'agrégation entre les éléments les plus proches

L'algorithme se répète jusqu'à ce que l'ensemble des éléments soient agrégés pour aboutir à la reconstitution de l'ensemble I. L'évaluation de la distance minimum est basée sur le calcul du moment centré d'ordre deux³⁷ d'une partition qui à chaque pas minimise la variance intra-classe de la partition construite.

Le choix de cette séquence statistique (AFC, CAH) a déjà été éprouvé dans le cadre d'une étude portant sur la mise en oeuvre d'une méthodologie d'analyse des données de la carte écologique (Essadaoui, 1992). Dans le contexte spécifique de ce travail, il s'agissait d'évaluer l'apport des statistiques multivariées à la classification automatique de l'ensemble des polygones définis par la carte écologique (Essadaoui et Lachance, 1993). Comme nous l'avons décrit précédemment, à partir de la définition d'un certain nombre de modèles cartographiques, le photo- interprète construit l'ensemble de la carte par un processus manuel d'agrégation conduisant à la définition de l'ensemble des unités cartographiques écologiques. L'objectif de la recherche d'Essadaoui consistait alors à tenter d'automatiser cette procédure manuelle exigeante, tant par l'attention qu'elle exige que par les qualités de synthèse et de mémorisation qu'elle requiert. En fonction de cet objectif, la procédure d'exploitation séquentielle d'une méthode d'analyse factorielle et d'une méthode de classification a ainsi pu être testée et validée par les spécialistes à l'origine de la carte écologique, puisque les regroupements en unités écologiques obtenus sont apparus comme satisfaisants (Essadaoui, 1992).

Dans le cas de notre recherche, l'objectif est différent. Contrairement aux travaux cités précédemment, il ne s'agit pas d'automatiser une procédure déjà existante mais de "synthétiser" et d'adapter les informations fournies par la carte écologique au domaine de l'hydrologie. Cette exploitation hydrologique de la carte doit s'appuyer sur les modèles (ou unités), qui constituent de ce fait la donnée de base de l'étude. Contrairement à ce que

³⁷ Le moment centré d'ordre un est la moyenne, le moment centré d'ordre deux, l'écart type

préconise Essadaoui dans les conclusions de son travail (Essadaoui et Lachance, 1993), nous pensons qu'il faut conserver et traiter, dans une optique hydrologique, les informations fournies par la carte au niveau du modèle et non à celui du polygone. Les informations fournies par les modèles présentent, comme nous l'avons vu une richesse difficilement exploitable pour l'hydrologie "régionale". Qu'en serait-il alors de l'ensemble des 538 polygones? De plus, l'agrégation des différents polygones en modèles (ou unités) génériques prend en compte implicitement les interrelations existant entre chaque polygone et la position relative de ces derniers dans l'ensemble structuré du bassin. Ce type d'information n'intervient pas dans une classification automatique puisqu'aucune variable ne décrit réellement cette dimension topologique. Or, ce type d'information serait complètement escamoté en ne considérant que les polygones de base. La définition des unités écologiques s'appuie sur une procédure de photo-interprétation. Comme le souligne Essadaoui, la part de subjectivité liée à l'interprétation est importante. Une automatisation des processus d'agrégation conduisant à la généralisation des modèles (ou unités) identifiées est une bonne chose. Elle facilite grandement le travail d'interprétation et réduit la part de subjectivité. A terme cependant, cette "fameuse" subjectivité demeure. Sous la forme de l'interprétation des résultats des analyses statistiques bien sûr, mais également à la source même de l'information c'est-à-dire dès la définition des polygones et de leur répartition spatiale.

Le type de données avec lesquelles nous travaillons sera toujours empreint d'une subjectivité plus ou moins grande. Il est bon de se poser la question de savoir s'il faut réellement tenter de l'évacuer. Nous reviendrons ultérieurement sur ce problème. Mais d'ores et déjà il est permis de se prononcer. Pourquoi vouloir à tout pris objectiviser une démarche et une méthodologie marquée tout entière par la richesse d'interprétation de l'expert? Cette interprétation, jusqu'à preuve du contraire, est le fruit d'un apprentissage et d'une démarche cognitive de longue haleine. Il y a peu de chance qu'une automatisation parvienne à transmettre autant de richesses !!! Et l'on ne peut que s'en réjouir.

2.4.3. Options méthodologiques et justifications.

2.4.3.1. Prise en compte des informations au niveau des unités de référence

La carte écologique propose un découpage du bassin versant en 538 polygones cartographiques. Cependant, ces 538 polygones ne sont décrits que par un ensemble de 119 unités (ou modèles) de référence. Ces unités représentent la clé de voute de la carte et traduisent l'effort fait par les cartographes écologues dans le but de fournir une information synthétique, significative aux différents utilisateurs.

Cette caractéristique fondamentale de la carte nous impose, dans la mesure où la majorité des informations intégrées à cette démarche proviennent de ce document, de baser l'ensemble des analyses sur les unités de référence et non sur les polygones cartographiques. En effet, les informations décrivant les polygones cartographiques (combinaison dépôt, drainage et pente) ne sont accessibles qu'à partir des unités de référence dont ils ne représentent qu'une occurrence. L'objectif de l'ensemble de notre démarche étant de synthétiser l'ensemble des informations fournies par la carte et enrichies par quelques variables de nature topographique, dans une optique hydrologique, nous avons donc, en première analyse, retenue l'option de traiter les modèles et de rapporter à leur niveau les quelques variables complémentaires obtenues sur la base du modèle numérique de terrain. Statistiquement en effet, il aurait été aberrant de dupliquer ces informations pour chaque unité de référence.

Cette option aurait contribué à introduire des redondances énormes, incompatibles avec les principes et les objectifs des méthodes statistiques que nous avons utilisées et dont l'objectif est de mettre en évidence des comportements significativement différents du point de vue hydrologique et à partir desquels des regroupements pourraient être effectués. Cette approche permet ainsi d'exploiter le contenu informationnel des unités de référence afin d'en faire une synthèse mais reste cadrée spatialement par le découpage cartographique en 538 polygones. Elle est présentée par la figure 33.

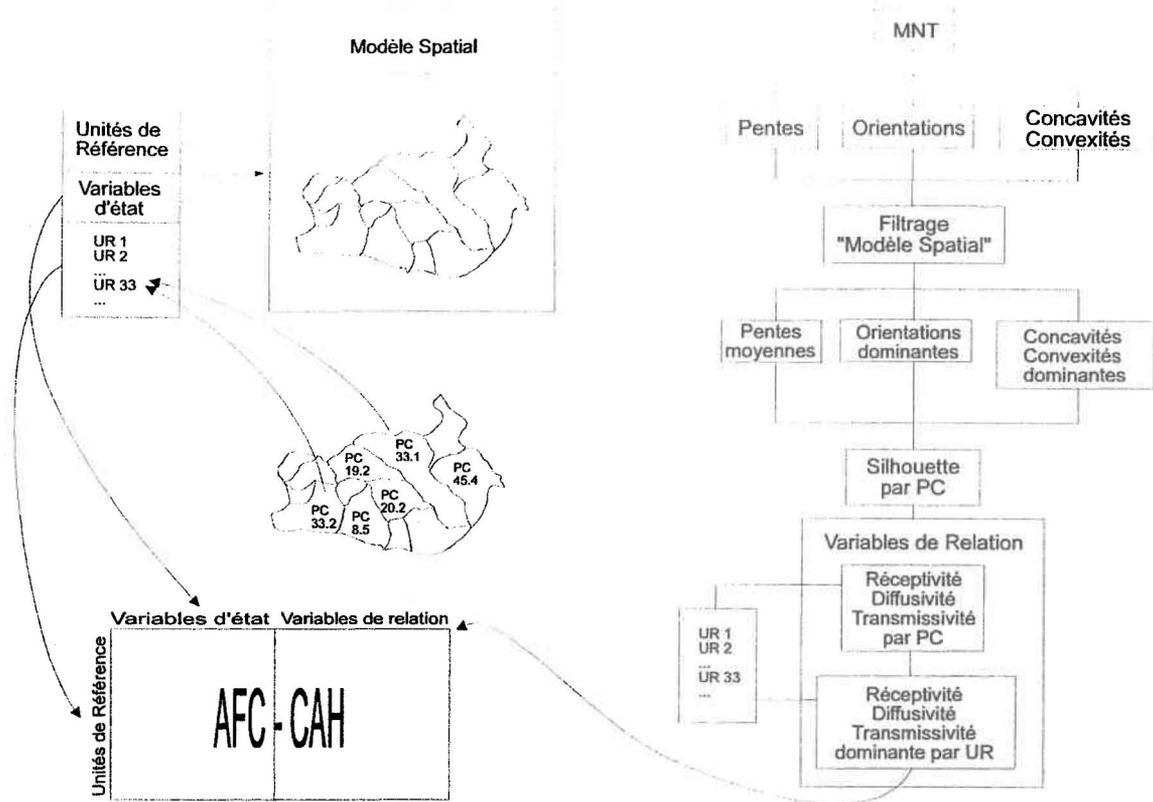


Figure 33 : Démarche basée sur la prise en compte des unités de référence.

2.4.3.2. Prise en compte des informations au niveau du polygone cartographique

Suite à un premier ensemble de traitements et considérant l'importance donnée aux variables de nature topographique et topologique extraites du modèle numérique de terrain et acquises au niveau des polygones cartographiques, il était intéressant d'évaluer la pertinence d'une approche traitant non plus des informations données par les 119 unités (ou modèles) de référence mais par les 538 polygones cartographiques.

En effet, la démarche que nous avons retenue en première option est fondée sur un postulat d'homogénéité des zones écologiques, non seulement pour chacun des polygones cartographiques mais également entre les polygones occurents d'un même modèle. Ce postulat constitue la base, l'essence de la carte écologique. Dans un contexte où cette carte demeure l'unique document d'analyse et d'interprétation disponible, une réflexion sur la base des modèles se justifie et s'impose. Dans notre

contexte de recherche, le cas est bien différent. L'exploitation de données externes issues du Modèle Numérique de Terrain et acquises sur la base des polygones, implique, pour revenir au niveau des modèles de référence, par la nécessité d'une intégration des informations, un lissage extrême des variables topographiques.

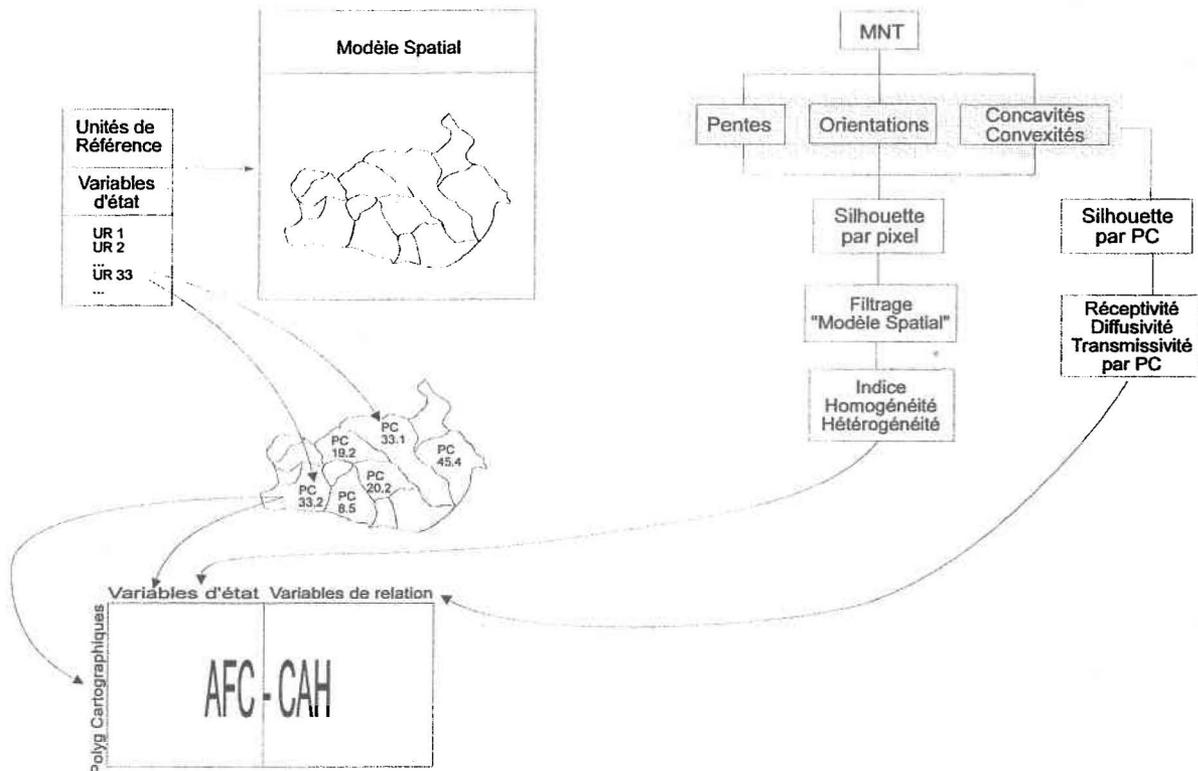


Figure 34: Démarche basée sur la prise en compte des polygones cartographiques

On peut alors légitimement se demander s'il vaut mieux ramener les différentes variables au niveau du modèle ou bien conserver les informations au niveau du polygone cartographique, sachant que cette dernière option implique une duplication des variables purement écologiques exigeant ainsi de faire quelques concessions quant à l'exploitation cohérente de la carte écologique et des principes qui la sous-tendent.

Dans l'optique d'évaluer le potentiel de cette deuxième option, nous avons donc mis en oeuvre la démarche suivante, présentée par la figure 34. Cette option nous a amené à reconsidérer non seulement la manière de prendre en compte l'hétérogénéité inter-

polygones mais également l'hétérogénéité intra-polygone. En effet, le choix de travailler au niveau du polygone cartographique permet non seulement d'exploiter l'ensemble des variables de nature topographique calculées sur la base de la matrice des élévations mais il permet également d'enrichir l'analyse en y intégrant la notion d'homogénéité / hétérogénéité de chaque polygone. Cette notion est fondamentale et vient compléter significativement les différentes variables descriptives déjà acquises. L'introduction d'un indice d'homogénéité permet en effet de mesurer le degré de complexité du relief propre à chaque zone écologique et enrichi considérablement l'analyse.

- Evaluation d'un indice d'homogénéité/hétérogénéité par polygone cartographique:

L'objectif étant de tester l'apport d'une variable qualifiant l'homogénéité des polygones cartographiques, nous avons retenu une région témoin, située le long de la rivière Eaton (cf. figure 35). Cette région, composée de 81 polygones cartographiques présente une diversité de modèles significative tout en conservant une taille raisonnable. Cette réduction du nombre d'individus va nous permettre de diminuer considérablement les temps de calcul.

L'homogénéité des 81 polygones de cette zone test va alors être évaluée sur la base des informations topographiques fournies par pixel et dérivées du Modèle Numérique de Terrain. Ainsi, pour chacun des pixels composant un polygone, sera calculée une silhouette, à l'image de la procédure présentée précédemment pour l'évaluation des capacités diffusantes et réceptrices des zones écologiques. Chaque silhouette intégrera ainsi une information qualifiant les pentes, les orientations et le modèle (concavité/convexité) mais cette fois-ci non plus au niveau du polygone, ce qui comme nous l'avons mentionné implique un lissage, mais au niveau du pixel. Chaque polygone cartographique sera alors décrit par l'ensemble des pixels qui le composent, chacun de ces pixels étant affecté d'une silhouette spécifique.

A partir de cette information il devient alors possible d'évaluer l'homogénéité des polygones cartographiques. En effet, un polygone composé d'une grande diversité de pixels aux silhouettes différentes pourra être qualifié d'hétérogène comparé à un polygone marqué par une majorité de pixels à la silhouette similaire.

Bassin-versant de la Rivière Eaton
Localisation de la zone test (81 polygones)

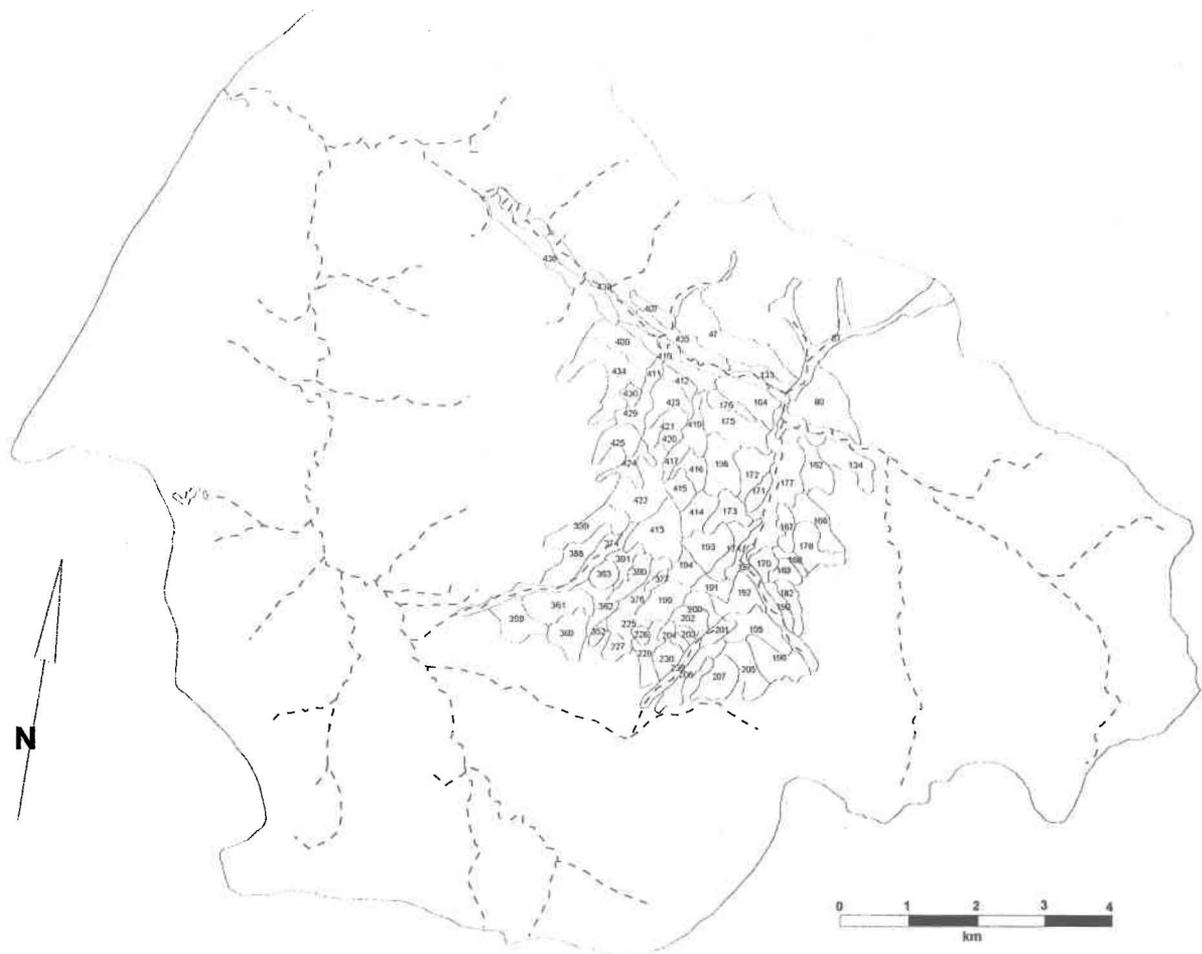


Figure 35: localisation de la zone test de 81 polygones cartographiques

Ce constat paraît cohérent. Encore faut-il être capable de quantifier le degré d'homogénéité de chaque polygone. C'est pourquoi nous avons mis en place un double indice. Ce double indice prend en compte à la fois la diversité entre les pixels d'une même zone et entre les silhouettes présentes au sein de cette dernière.

Ainsi, le premier indice I_{hh} est obtenu par le rapport entre le nombre de pixels de la classe modale des silhouettes (identifiant la silhouette la plus représentée) et le nombre total de pixels du polygone.

Le second indice I_{hs} donne une information de nature différente et qualifie l'hétérogénéité du polygone en regard de l'ensemble des silhouettes possibles (conditionnées par le

nombre de classes prises en compte lors de la procédure de construction des silhouettes). Il est obtenu par le rapport entre le nombre de silhouettes présentes dans le polygone et le nombre de silhouettes possibles.

A partir de ces deux indices combinés, il devient possible de qualifier chaque polygone cartographique. Cette combinaison s'effectue en positionnant chaque polygone dans un espace à deux dimensions dans lequel sont reportées en abscisse les valeurs des I_{hh} et en ordonnée les valeurs des I_{hs} . L'ensemble des 81 polygones de la zone test se répartissent alors dans cet espace en fonction de leur degré d'homogénéité (cf. Figure 36).

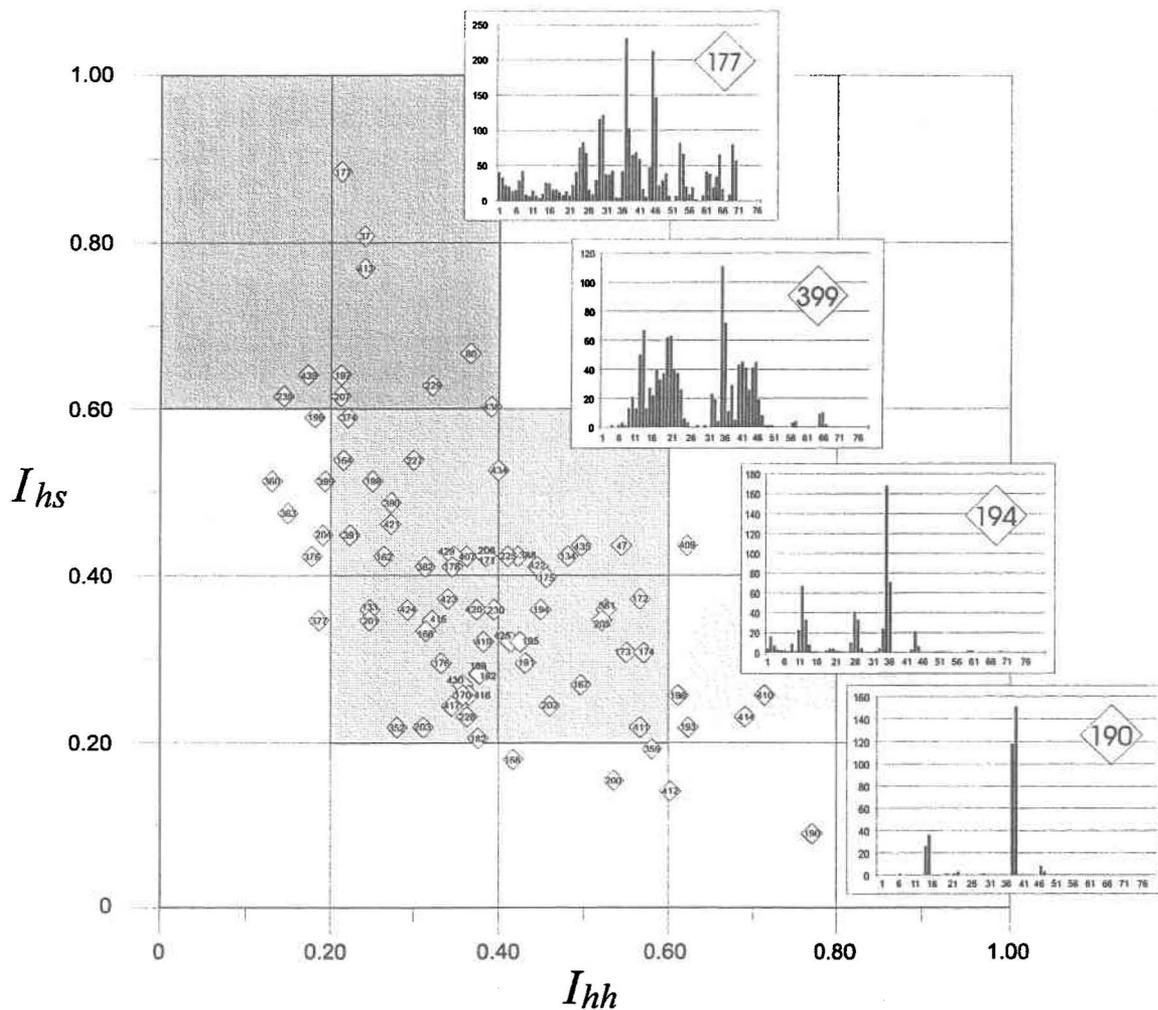


Figure 36: Scattérogramme permettant de définir les classes d'homogénéité caractérisant la zone test.

L'examen du graphique ci-dessus amène plusieurs commentaires. Le premier est le constat de l'hétérogénéité caractérisée de la population des 81 polygones cartographiques. Le second tient à la répartition dans l'espace des différents individus. Une étude plus détaillée permet aisément d'identifier des types de polygones bien marqués selon leur positionnement dans l'espace des indices I_{hh} et I_{hs} . Les diagrammes en batons annexés au scattérogramme illustrent cette aspect. En effet, la combinaison des deux indices permet d'identifier différents types d'homogénéité/hétérogénéité. Quatre types différents peuvent être identifiés:

- des polygones très hétérogènes pour lesquels il n'existe pas réellement de classe modale (donc de silhouette largement dominante, (I_{hh} faible)) et qui regroupent quasiment la totalité des silhouettes possibles (I_{hs} fort). C'est le cas du polygone 177 décrit par le diagramme du même nom.

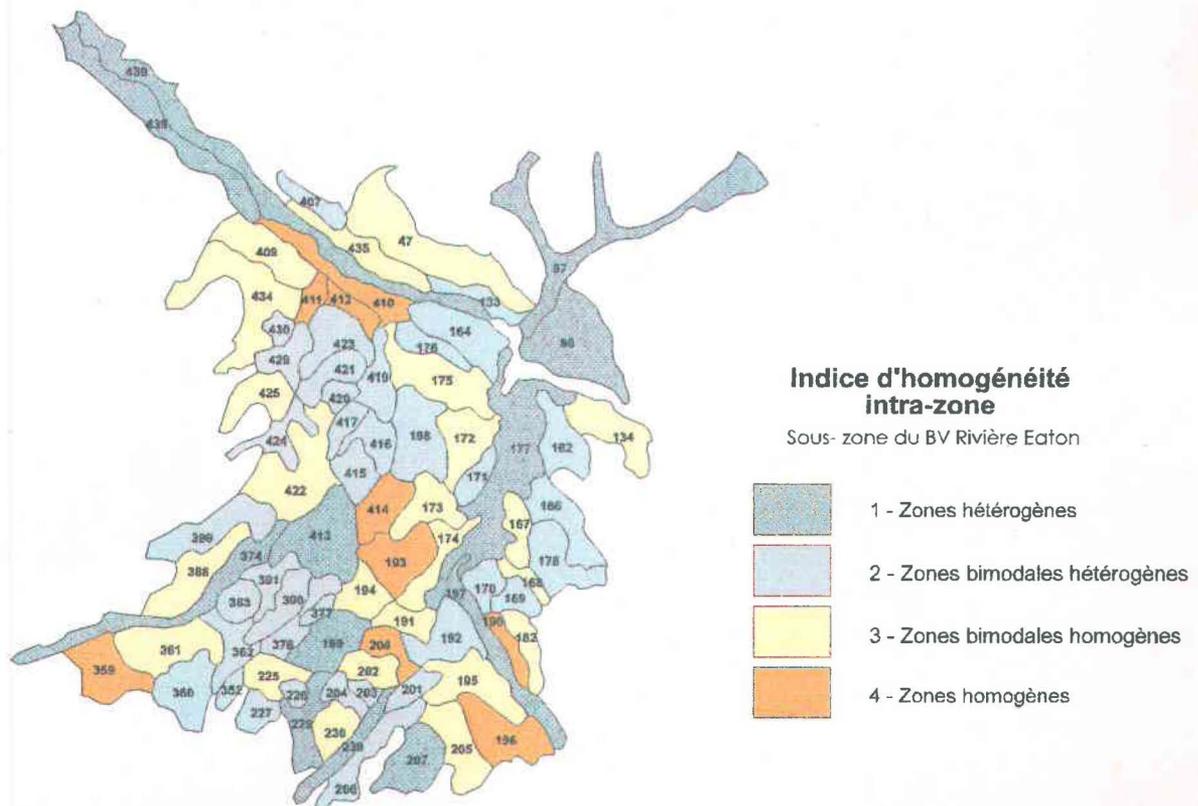


Figure 37: Indices d'homogénéité intra-zone

-
- des polygones très homogènes caractérisés par la présence d'une forte classe modale (I_{hh} fort) et par une très faible diversité de silhouettes (I_{hs} faible). C'est le cas du polygone 190.
 - entre ces extrêmes, deux types intermédiaires peuvent être identifiés, caractérisés par des distributions bi-modales plus ou moins hétérogènes (polygones 399 et 194).

La figure 37 illustre la répartition spatiale de ces différents types de polygones.

Cet indice peut alors être intégré en tant que nouvelle variable aux différentes analyses statistiques complétant de manière pertinente la qualification de chaque polygone cartographique.

2.5. Les outils

Pour aboutir à la définition de l'ensemble des variables d'état et de relation présentées brièvement dans le paragraphe précédent, il a été nécessaire d'avoir recours à différents outils de saisie, de traitement et d'analyse de données, notamment des Systèmes d'Information Géographique. Sans entrer dans les détails, voici une description succincte des principaux logiciels utilisés lors de ce travail. Pour de plus amples informations sur ce sujet, il est nécessaire de se reporter à l'annexe 14.

2.5.1. Les outils de saisie, de stockage et de traitement des informations.

Les données de base de cette étude proviennent essentiellement de deux sources distinctes, une source externe d'information et une acquisition directe pour les besoins de cette étude.

La carte écologique et les informations de nature typologique qui l'accompagnent ont été acquises par le Ministère de l'Environnement du Québec. En dehors des documents sur papier, tels que les divers rapports cités et les documents cartographiques, différents fichiers décrivant les 119 unités cartographiques (modèles) ainsi qu'un ensemble de données répertoriant les résultats des sondages et prélèvements effectués sur le terrain nous ont été fournis par le Ministère, ces informations étant stockées par un logiciel de gestion de base de données (en l'occurrence DBASE IV). L'ensemble de ces données a été transféré sur un tableur (LOTUS 123) afin d'être traité³⁸. Nous n'avons pas eu recours à un logiciel de Système de Gestion de Base de Données pour gérer l'ensemble des informations entrant dans le processus d'étude. Ce fait s'explique aisément, notamment suite à l'emploi du Système d'Information Géographique que nous avons exploité pour l'ensemble des analyses spatiales, et qui ne nécessite pas de base de données structurée au sein de laquelle il pourrait aller puiser des informations.

³⁸ Les traitements effectués sur tableur ont consisté essentiellement en manipulations simples du type calcul de moyenne, évaluation de coefficients de corrélation entre différentes variables, programmation de macros afin de recoder les variables en vue des analyses statistiques multivariées, réalisation de graphiques afin de déterminer des limites de classes etc..

Les données acquises spécifiquement pour l'étude l'ont été à l'aide d'un logiciel dédié à la numérisation de données spatiales (ATLAS Draw). A ce sujet, il est bon de rappeler quelques points fondamentaux. Comme le soulignent Goodchild et al (1994) "la phase de saisie des données constitue un véritable goulot d'étranglement pour les applications impliquant la technologie des Systèmes d'Information Géographique". Le coût d'acquisition des données représente généralement 80 % et plus de l'ensemble des coûts engendrés par un projet. Dans le cadre de cette recherche, nous n'avons pas échappé à ce constat. La numérisation des différentes couches d'informations entrant dans le processus d'analyse (la carte écologique, le réseau hydrographique, le modèle numérique d'altitude, etc...) a représenté de nombreuses heures de travail. Ces documents ont été numérisés en mode points³⁹. Nous reviendrons ultérieurement sur les problèmes d'erreurs et de précision des informations que pose ce type d'acquisition et plus généralement sur les problèmes de précision des informations que nous avons utilisées.

2.5.2. Les outils d'analyse et de représentation des données.

2.5.2.1. Les Systèmes d'Information Géographique.

La notion de Système d'Information Géographiques (SIG) peut être définie comme : "un ensemble de procédures pour stocker et manipuler des données référencées géographiquement" (Aronoff, 1989). Le domaine des SIG est un domaine aujourd'hui en pleine évolution. Les premiers types de SIG, apparus dans les années soixante⁴⁰, étaient limités au niveau de leur capacité de stockage et de traitement de l'information. Aujourd'hui, avec les progrès du domaine informatique (notamment l'extension des capacités de mémoire, les vitesses accrues de calcul...) et les progrès dans le domaine des télécommunications, les SIG deviennent des outils puissants, de plus en plus adaptés aux besoins et aux tâches de gestion et de planification du territoire.

³⁹ la numérisation en mode point consiste à identifier un à un tous les points de manière explicite. Ces points sont alors sélectionnés de façon subjective par l'opérateur.

⁴⁰ Le Canada a d'ailleurs été précurseur dans ce domaine avec la mise sur pied du Canadian Geographic Information System (CGIS) dans le courant des années soixantes (Terence, 1987).

Dans le contexte de cette étude, nous avons utilisé le logiciel de SIG IDRISI, version 4.0. IDRISI est un logiciel développé à l'Université de Clark aux Etats Unis par l'équipe du professeur R. Eastman (Collet et Willemin, 1993). Les fonctions disponibles sont programmées en langage Turbo-Pascal. Il fonctionne sur des PC compatibles de tout type pour autant qu'ils soient munis de cartes graphiques VGA, SVGA, 8514A. IDRISI gère toujours deux types de fichiers, nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble:

- un fichier "image" ne contenant que les valeurs de la variable exprimée
- un fichier en-tête de documentation, contenant des informations du type du nombre de lignes et de colonnes de la matrice, de la taille du pixel, du format du fichier et des données, etc...

Le logiciel IDRISI est un logiciel qui privilégie le mode image (que nous pourrions appeler un SIG matriciel). Les opérations effectuées sur une couche ou entre couches d'informations sont toujours réalisées dans un format matriciel. Il intègre à la fois des outils de traitement d'image et des fonctionnalités d'analyse propres aux SIG. Il existe un lien possible entre IDRISI et un logiciel de gestion de base de données (SGBD) (DBASE IV notamment). Ce lien est matérialisé par une procédure permettant d'importer des fichiers DBASE vers IDRISI ou d'exporter les résultats des analyses vers la base de données. Nous n'avons pas exploité ce lien direct entre le logiciel et un SGBD en raison du faible nombre de fichiers à gérer. Cette possibilité n'en demeure pas moins intéressante, ouvrant de nouvelles voies à la mise sur pied d'un outil adapté aux exigences de problématiques complexes. Dernier point notable, la nouveauté du géoréférencage des images. Cette fonctionnalité, disponible seulement pour la version 4 ouvre de nouvelles perspectives dans les domaines d'exploitation et d'application futures du logiciel.

2.5.2.2. Les outils de cartographie

La production des documents et figures diverses qui illustrent l'ensemble de ce travail est le fruit de l'exploitation de divers logiciels de cartographie. Parmi eux, le principal outil est sans conteste le logiciel Map Viewer, version 1.1. La conception des différentes cartes s'appuie sur l'exportation des fichiers images d'IDRISI reformatés en conséquence. D'autres outils de DAO ont également été utilisés dans le cadre de cette recherche, pour

l'habillage final de certains documents cartographiques ou pour la conception de certaines figures.⁴¹

2.5.3. Les outils de statistiques multivariées

Nous avons décrit dans le chapitre précédent, les méthodes de statistiques multivariées retenues dans le cadre de cette étude. Nous avons également explicité les raisons de ces choix, raisons dûes essentiellement à la nature des données à traiter et aux objectifs poursuivis.

Les programmes que nous avons utilisés pour mener à bien ces analyses ont été développés par l'Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse des Données dont le siège est situé à Paris (ADDAD, 1987). Les programmes, écrits en FORTRAN, nous ont été fournis par le professeur Marius Lachance de l'INRS-Eau. Ils ont été installés sur une station SUN SPARC STATION 10. Les différents paramètres nécessaires aux traitements des tableaux de données d'entrées puis au traitement du tableau de facteurs sont décrits dans des fichiers dédiés dont le détail est donné en tête des documents présentant les résultats, reproduits en annexe 11. Seuls les résultats de la dernière tentative portant sur 26 variables sont annexés, pour des raisons de volume du document. Cependant, les éléments d'interprétation concernant les tentatives précédentes seront explicités lors de la phase d'analyse et de commentaires des résultats.

⁴¹ Parmi ces logiciels nous pouvons citer COREL DRAW

2.6. Interprétation et commentaires des résultats.

Le recours aux statistiques multivariées avait pour objectif, dans le contexte de cette recherche, de synthétiser une information d'apparence complexe afin de l'adapter aux problématiques de spatialisation des bassins-versants (cf. figure 38). Comme dans toute procédure de ce type, le degré de subjectivité des interprétations des résultats fournis demeure l'un des points marquants de l'ensemble de la démarche. Le constat n'est pas nouveau. Dans une étude sur l'application des statistiques multivariées à la planification du territoire (Omi et al, 1979), les auteurs, tirent des conclusions identiques. Après avoir exploité une séquence d'analyses statistiques du même type (réduction du problème par l'analyse factorielle puis regroupement basé sur les résultats d'une méthode de classification s'appuyant sur les poids factoriels de chacune des unités à classer), leur principale conclusion insiste tout autant sur le degré de subjectivité présent à chaque étape de la procédure que sur celui des résultats eux-mêmes. D'où la nécessité, selon les auteurs, de considérer ce type de méthodes comme un guide sans qu'elles ne se substituent à l'examen rationnel de la problématique et des informations à disposition.

Cette remarque semble tout à fait pertinente et adaptée au cas précis de notre étude. Au fil de la procédure, du choix des variables initiales à la constitution des groupes, il nous a fallu trancher, selon notre expérience. Les résultats obtenus n'en demeurent pas moins pertinents et enrichissants pour une compréhension accrue du milieu.

2.6.1. Quelques remarques sur la qualité des données sources.

La base de notre démarche s'appuie sur la carte écologique. Cette carte nous fournit des informations de deux natures; un découpage et une caractérisation de ce découpage (classification écologique). Jusqu'à présent rien de particulier. Pourtant, la carte écologique présente une particularité qui la distingue d'autres documents cartographiques de synthèse. Le découpage est effectué à priori et non à postériori. Cette procédure va considérablement modifier la manière de travailler avec les données que nous fournit ce document.

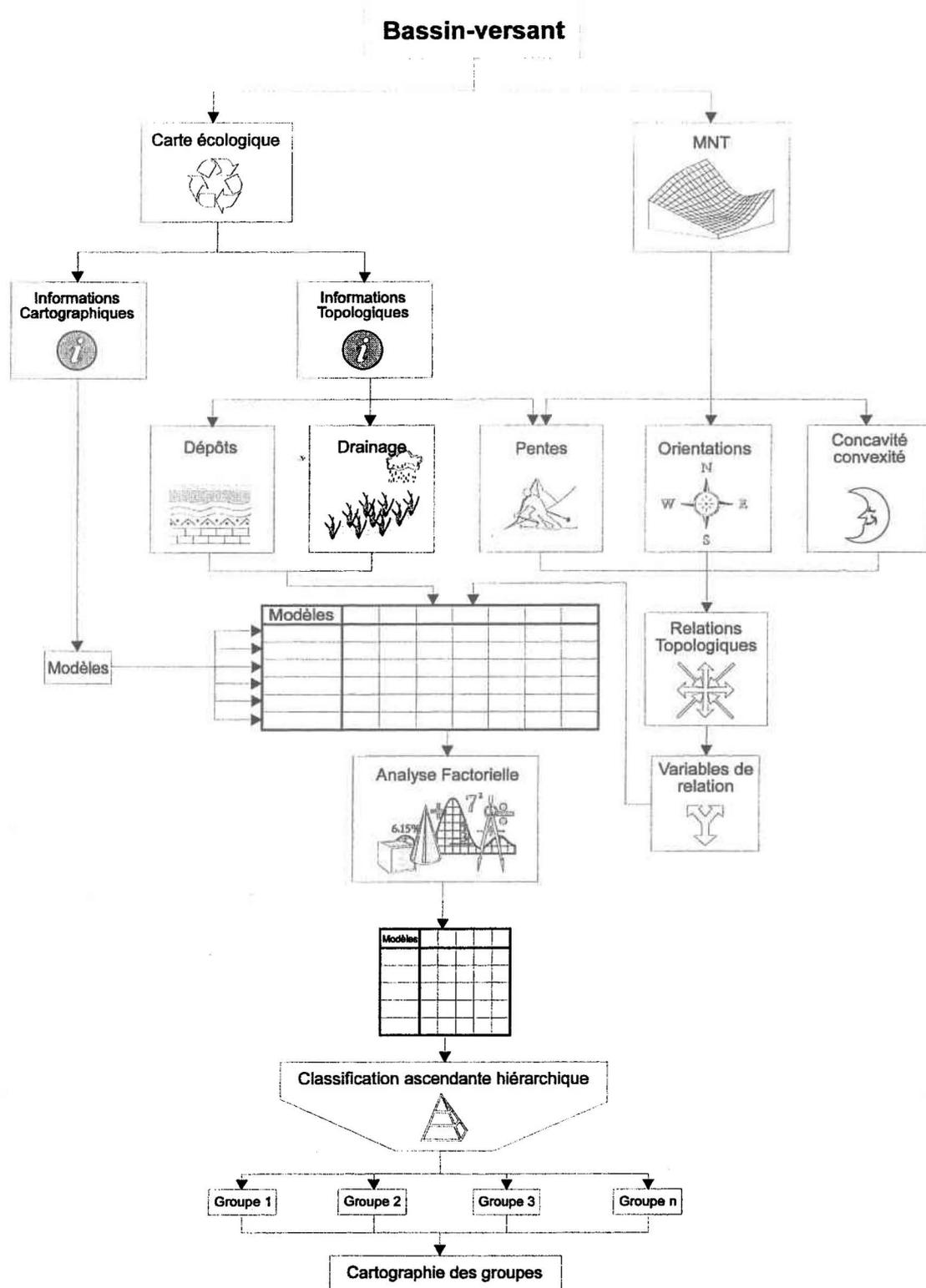


Figure 38: Procédure d'analyse et de traitement des informations en vue de la constitution de groupes d'unités cartographiques similaires (pour l'approche par unité de référence (modèle) ou par polygone)

Le découpage à priori du territoire s'appuie sur une certaine perception du paysage. Les polygones cartographiques identifiés le sont parce que leurs limites se matérialisent par des discontinuités marquées dans le paysage. Ce sont donc bien au départ des unités de paysage. Ce n'est qu'après cette phase de spatialisation que les polygones vont être documentés selon les différentes variables que représentent le type de dépôts, les caractéristiques de drainage et les caractéristiques de pente. Les limites de chaque unité sont donc bien des limites perceptives plus que des limites physiques, bien que les discontinuités remarquées s'appuient généralement sur des discontinuités de relief, de forme, de pente. Dans ces conditions, il est quasiment impossible qu'il y ait une cohérence totale entre ces limites et les limites physiques de répartition de tel ou tel type de dépôt, telle ou telle caractéristique de drainage ou de pente. C'est d'ailleurs pour cette raison que chaque polygone défini sur la carte est décrit par un type géomorphologique dominant mais complété par le pourcentage de chacun des types géomorphologiques présents effectivement au sein de ce même polygone. De ce fait, les attributs qui décrivent chaque polygone n'ont une signification que s'ils sont exploités ensemble. La démarche propre à la cartographie écologique vise avant tout à définir un contenant, le polygone cartographique, dont on décrit ensuite le contenu. Les informations décrivant le contenu doivent être considérées alors comme un tout et perdent de leur substance si elles sont étudiées séparément et reprises thème par thème.

Il est bien évident, dans ce contexte particulier, que la précision des données et notamment la précision des limites, peut être remise en question sectoriellement. Les limites des polygones seraient évidemment bien différentes si elles avaient été tracées en fonction d'une seule variable, tel que cela se pratique lors de la constitution de documents cartographiques thématiques. La maîtrise de ce type d'incertitude pourrait alors être appréhendée avec des méthodes classiques.

Dans une étude sur la structure des informations spatiales, Sinton (1978) distingue trois dimensions fondamentales à l'information géographique; l'espace, le temps et la thématique. Comme le suggère Chrisman (1991), la notion d'erreur et d'incertitude doit être appréhendée à travers ces trois dimensions, chacune d'entre elles étant plus ou moins contraignante selon les applications. Lors de la constitution d'une carte écologique, la dimension spatiale est prééminente sur la thématique. La qualité des informations peut donc se mesurer relativement à la précision du découpage. Cependant, cette indication est délicate à obtenir étant donnée la méthodologie suivie par le photo-interprète à l'origine de la spatialisation. Sans remettre en cause la valeur du

découpage obtenu, il faut bien reconnaître le caractère subjectif des limites tracées⁴². Pour ce qui est de la valeur des attributs descriptifs de chaque unité, leur précision ne peut être évaluée et jugée de la même manière que s'il s'agissait d'une information obtenue sectoriellement. Leur limite de validité ne se mesure que globalement à l'intérieur du contenant tracé à priori. Cette particularité de la carte écologique doit toujours être présente à l'esprit lors des analyses et c'est sans doute à ce niveau que des concepts tel que celui de méta-données⁴³ prennent tout leur sens, en informant les usagers sur la précision des informations qu'ils manipulent et le contexte dans lequel ses informations ont été générées.

Sur ce chapitre de la précision, nous avons effectué quelques tests. Disposant d'une source d'information tirée du Modèle Numérique d'Altitude (MNA), nous avons comparé les valeurs moyennes de pentes établies sur la base du MNA et les valeurs de pente moyenne données par la carte écologique. Sans aucune surprise nous avons constaté des divergences entre les résultats obtenus, divergences tantôt positives (ce qui correspond à une surévaluation des valeurs obtenues par calcul sur le MNA) ou tantôt négatives (correspondant à une sous évaluation). Ce résultat sur lequel nous ne nous attarderons pas, n'est pas surprenant et confirme tout à fait les commentaires exprimés précédemment.

2.6.2. Le choix des variables .

Dans l'ensemble de notre démarche, la carte écologique est considérée comme une information de base, sur laquelle viennent se greffer un certain nombre de données externes, essentiellement de nature topographique. L'objectif final étant de trouver une méthode de spatialisation adaptée aux problématiques de gestion intégrée des bassins-versants, la dimension cartographique des données écologiques demeure le point de départ de l'ensemble des analyses. Le découpage fourni par la carte doit donc être conservé.

⁴² Dans ce domaine, il est d'ailleurs bien difficile de trouver un type d'information totalement objectif, à l'exception de mesures brutes sur le terrain. Il faut cependant mentionner que la conception d'une carte écologique se plie à un certain nombre de règles dont le but final est de minimiser au maximum cette subjectivité.

⁴³ Le concept de méta-données désigne le développement de méthodes pour décrire et documenter les données, les connaissances et les incertitudes de documents numériques. L'objectif de ces développements est de fournir aux usagers de l'information sur l'information afin d'en apprécier la juste valeur et d'en avoir un usage adapté (Vidale et al, 1993).

A partir de cette mise au point, le choix des variables peut être envisagé, en gardant à l'esprit que l'on recherche une méthode de spatialisation à travers la cartographie écologique et non pas un ensemble de variables pertinentes en hydrologie. Il n'en demeure pas moins cependant que les variables retenues afin d'entrer dans la procédure d'analyse doivent avoir une signification hydrologique pertinente (dans un contexte de spatialisation des bassins-versants).

La carte écologique décrit le milieu à l'aide d'une combinaison d'informations sur les caractéristiques de dépôts, de drainage et de pentes. Comme nous l'avons mentionné précédemment, il est possible de déduire de ces différentes informations une série de variables pertinentes en regard de la problématique traitée. Ainsi, à partir des données définissant les types géomorphologiques il est possible de déduire:

- des variables de texture
- des variables de drainage
- des variables topographiques.

La répartition spatiale de ces différentes variables est illustrée par les figures 39 à 43 présentées dans les pages suivantes. Pour la carte des types de dépôts, une légende est fournie en annexe 12. L'annexe 13 présente les tableaux récapitulatifs des valeurs de chacune des variables cartographiées (pente, drainage, dépôts, orientation, concavité/convexité et capacités diffusantes et réceptrices) pour les 538 polygones définis sur le bassin.

Les variables de texture peuvent être directement générées par la mise en correspondance des types de dépôts avec leurs textures dominantes, tirées des analyses effectuées sur les échantillons prélevés sur le terrain. Le drainage quant à lui est tiré directement des informations fournies par la carte écologique, en fonction de la présence plus ou moins marquée de mouchetures dues à l'oxydo-réduction. Les variables topographiques quant à elles proviennent, de deux sources distinctes.

- a. La carte écologique, qui nous fournit des informations de type qualitatif décrivant les pentes et leur homogénéité ou leur hétérogénéité.

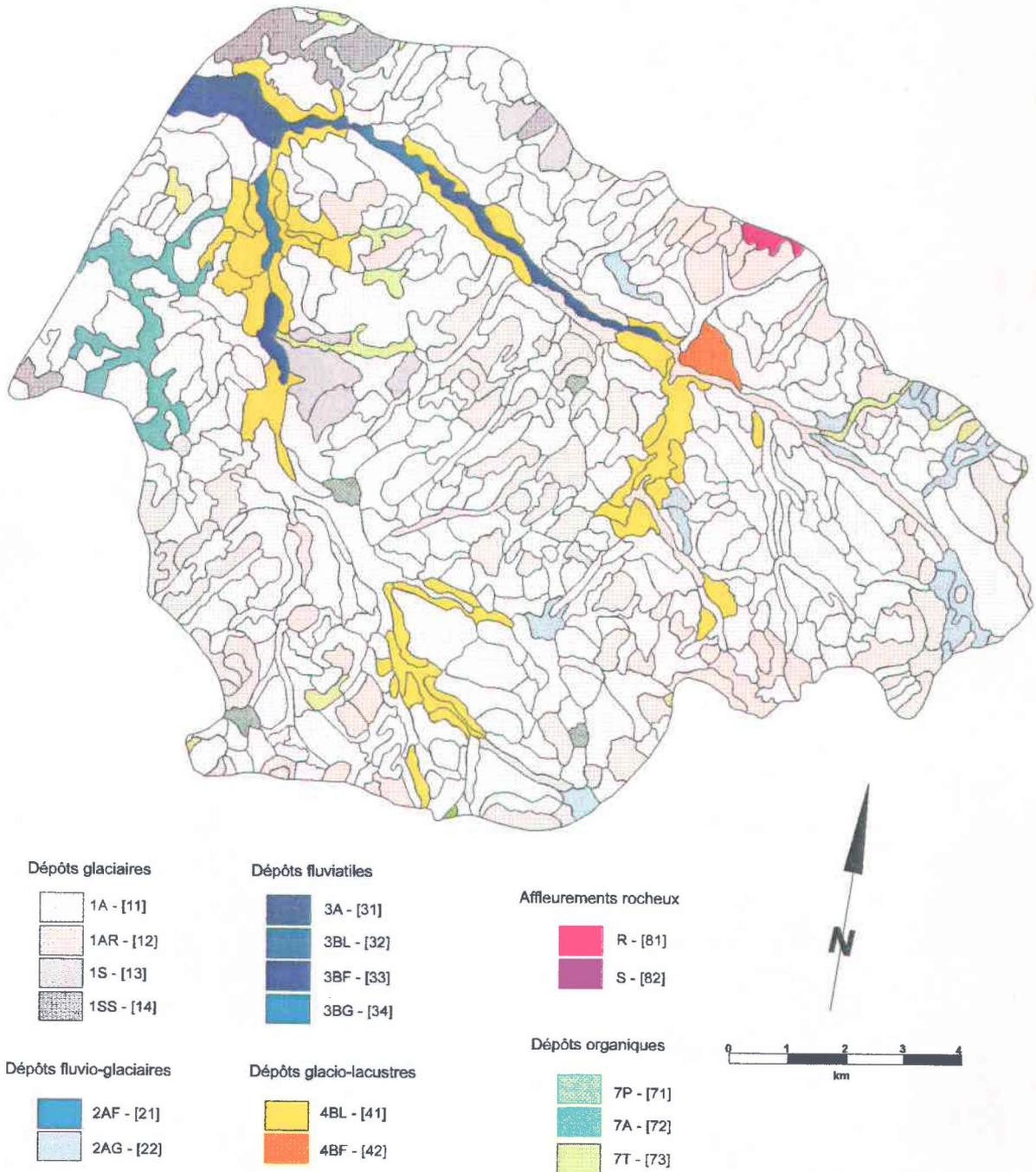


Figure 39: Types de dépôts présents sur le Bassin-versant de la Eaton

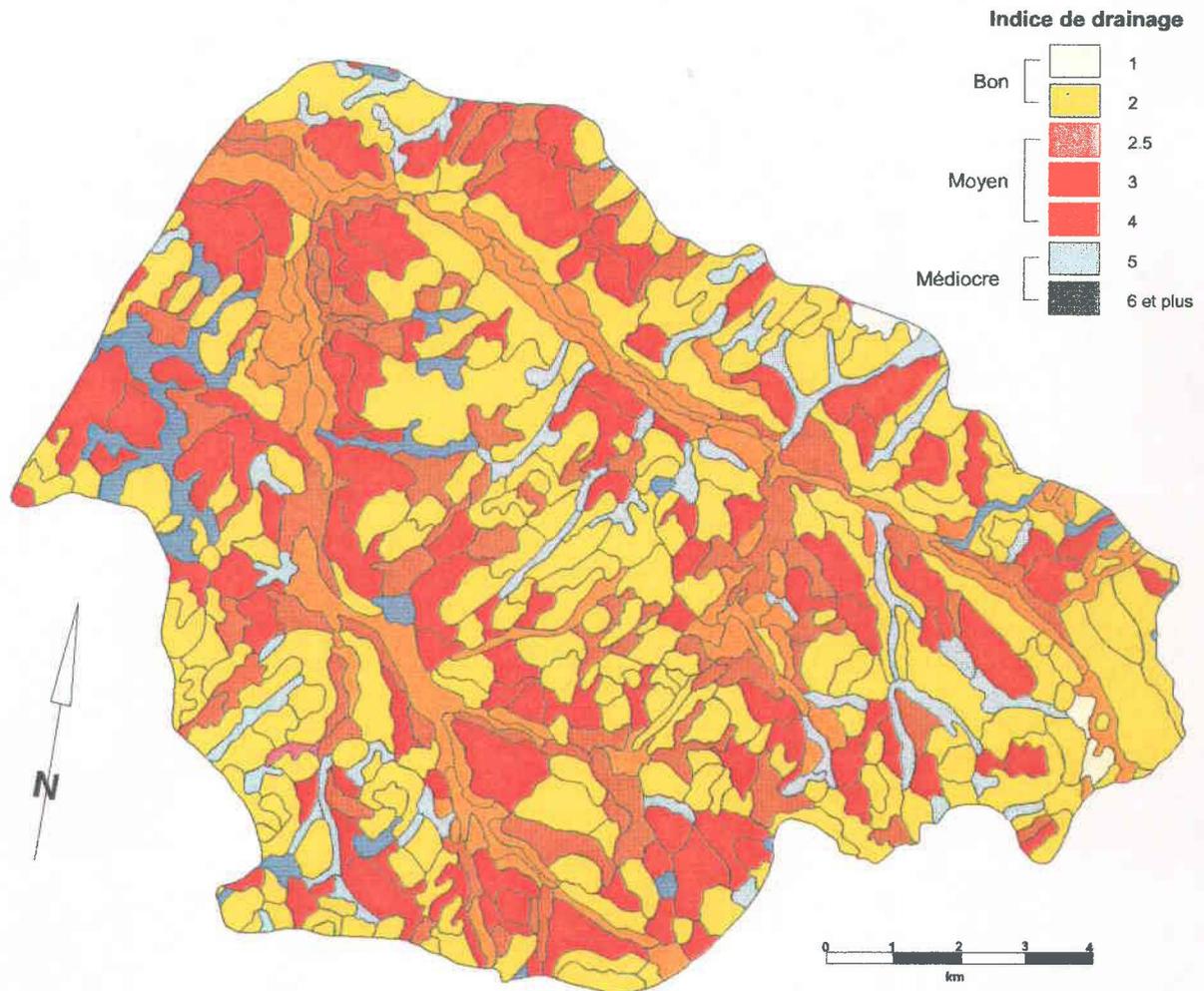


Figure 40: Caractéristiques de drainage

b. Le Modèle Numérique d'Altitude, à partir duquel nous avons généré une variable de pente (figure 41), des variables morphologiques de concavité/convexité (figure 42), une variable orientation (figure 43), ainsi, ultérieurement qu'une variable qualifiant l'homogénéité de chaque polygone pour la zone test de 81 zones (figure 37).

Cet ensemble de descripteurs, affectés à chaque polygone, fournissent une assez bonne représentation des conditions moyennes propres à chaque unité et permettent d'appréhender la structure du bassin. Les représentations cartographiques des différentes variables précitées nous livrent d'ailleurs quelques indices sur l'organisation structurelle du bassin supérieur de la Eaton, nous permettant d'isoler notamment une région particulière, située à l'ouest de la rivière Clifton, au niveau de l'avancée de la limite du bassin et caractérisée par une topographie très peu marquée et un mauvais drainage (figures 39 et 40). Autre point marquant, la présence, au niveau du réseau hydrographique secondaire, de fonds de vallées humides, généralement situés en altitude.

A partir de ces variables, il est possible d'appréhender la nature des polygones cartographiques mais non leurs interrelations, au niveau des écoulements de surface notamment. C'est pourquoi, sur la base d'informations dérivées du MNA, nous avons généré une variable permettant d'exprimer les interrelations entre les polygones du point de vue du ruissellement de surface (cf. chapitre 2.4.2.3.) et figure 32.

Suite à ces différents traitements, une cinquantaine de variables caractéristiques de chaque modèle (ou unité) et généralisables à chacun des polygones cartographiques, peuvent être répertoriées. Elle sont décrites dans le tableau 9:

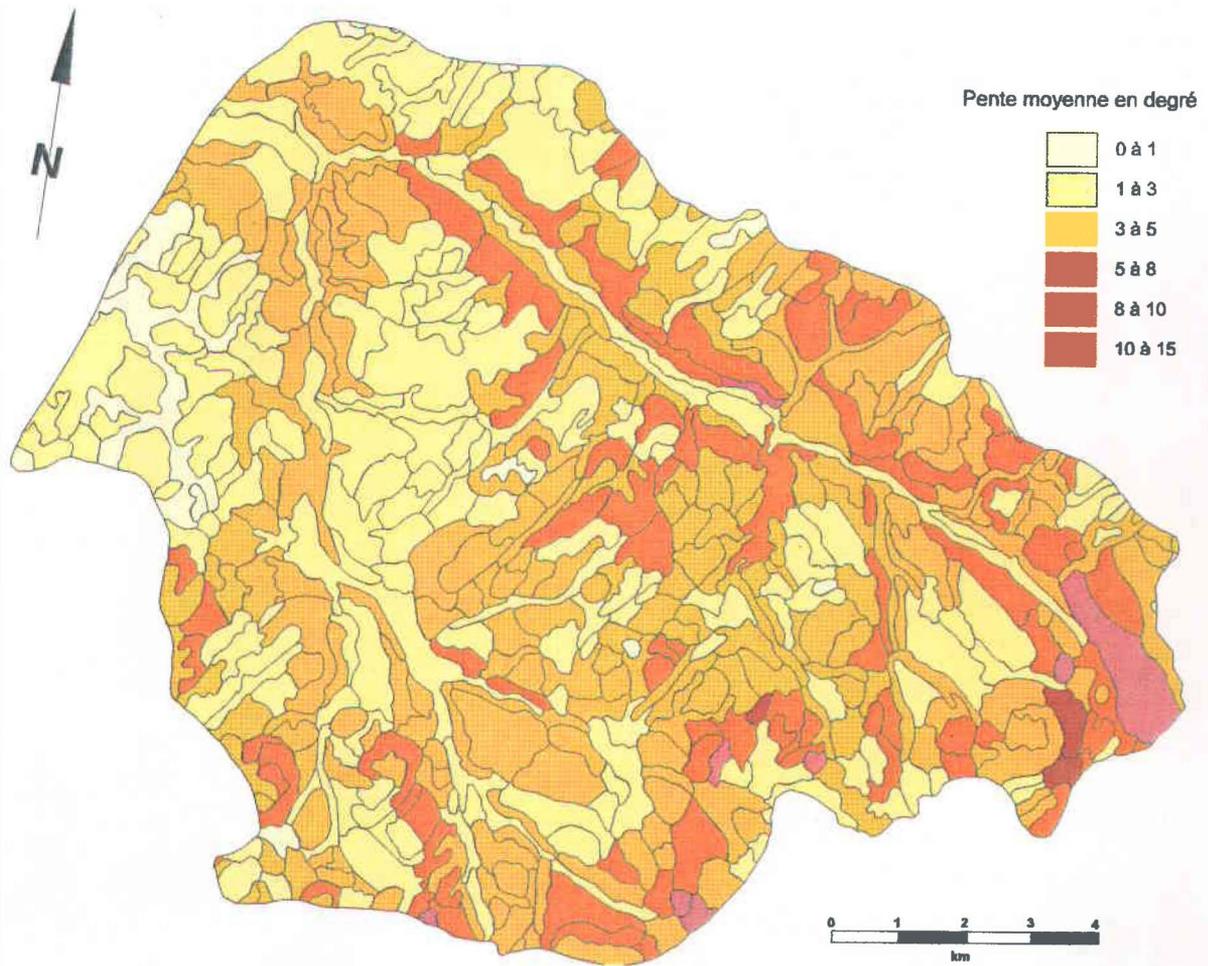


Figure 41: Pente moyenne des polygones cartographiques

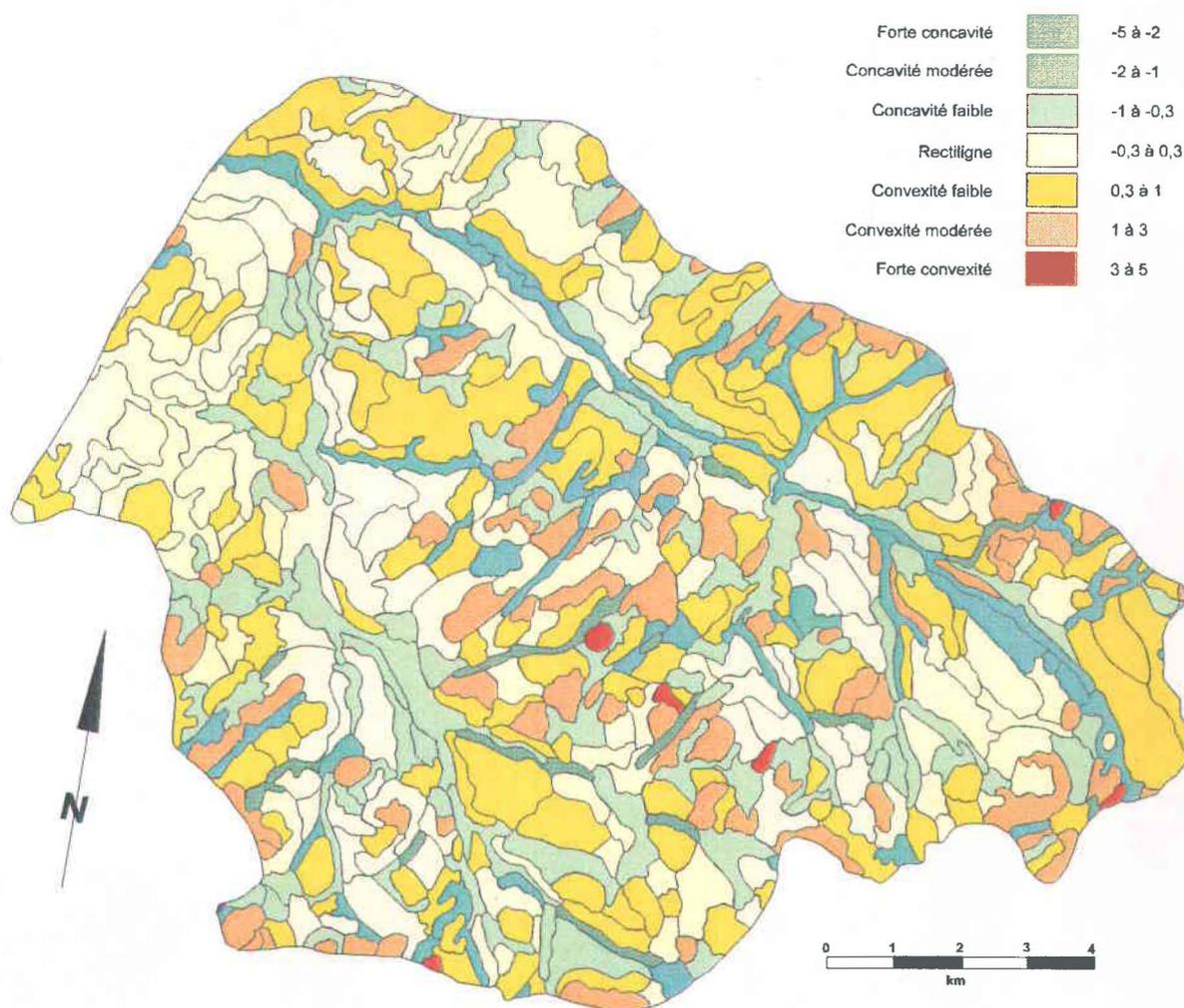


Figure 42: Concavité/convexité prédominante par polygone cartographique
(document établi à partir des données du MNA)

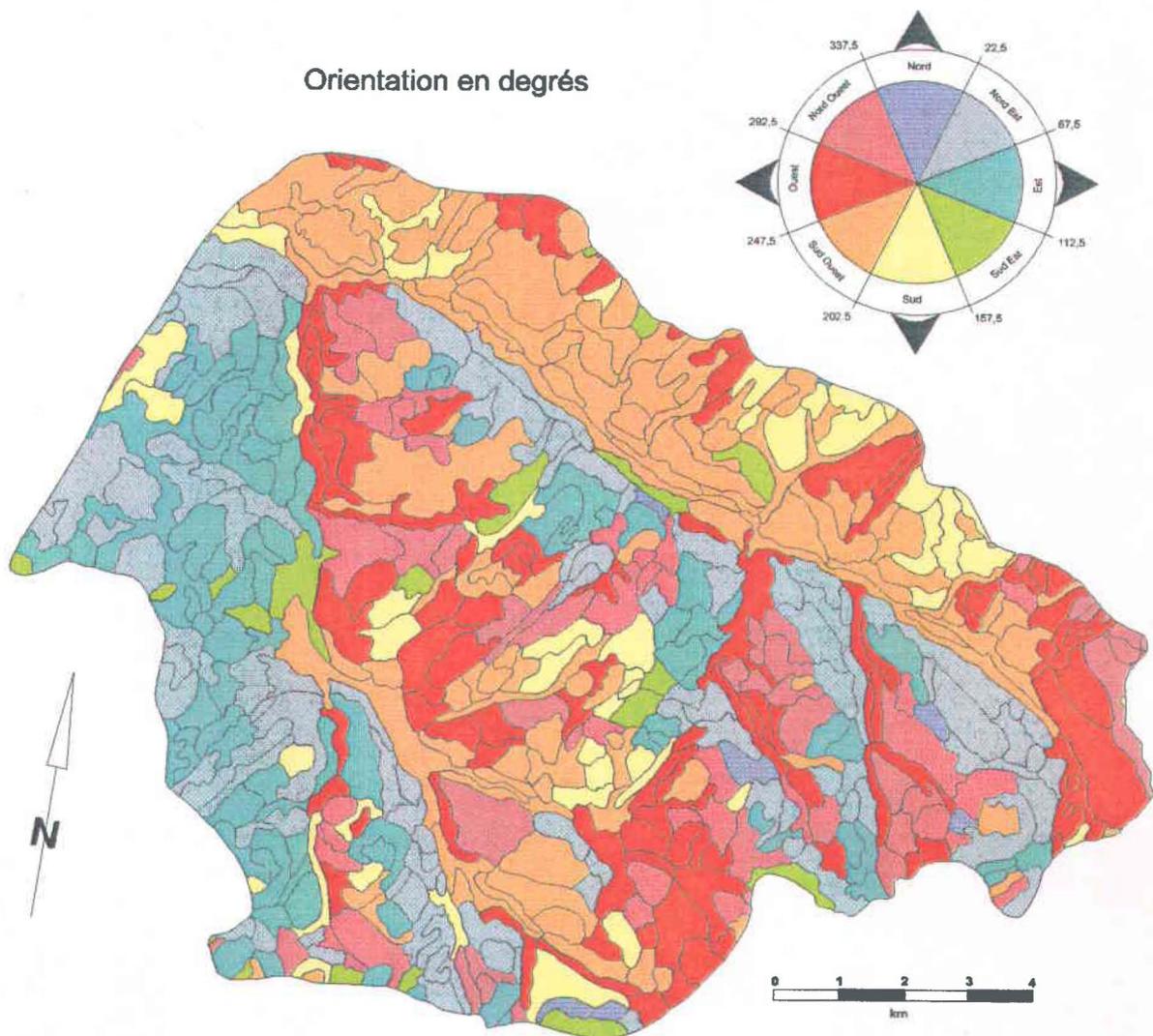


Figure 43: Orientation prédominante des polygones cartographiques
(document établi à partir des données du MNA)

Tableau 9: Répertoire de l'ensemble des variables descriptives des 119 modèles du bassin de la Eaton supérieure.

Nom générique	code	description	source
Variables d'état	varet	descripteurs propres à chaque modèle	
till régional indifférencié épais	dp11	Dépôts de surface	carte écologique
till régional indifférencié mince	dp12	dépôts de surface	carte écologique
till local épais	dp13	dépôts de surface	---
till local mince	dp14	dépôts de surface	---
dépôts fluvio-glaciaires fin	dp21	dépôts de surface	---
dépôts fluvio glaciaires grossiers	dp22	dépôts de surface	---
alluvions actuelles	dp31	dépôts de surface	---
alluvions subactuelles limons et sables très fin	dp32	dépôts de surface	---
alluvions subactuelles sables fin	dp33	dépôts de surface	---
alluvions subactuelles , sables et graviers	dp34	dépôts de surface	---
dépôts glacio-lacustres: argile et limons	dp41	dépôts de surface	---
dépôts glacio-lacustres: sables fins	dp42	dépôts de surface	---
tourbe épaisse	dp71	dépôts de surface organiques	---
tourbe mince sur argile	dp72	dépôts de surface organiques	---
tourbe mince sur till	dp73	dépôts de surface organiques	---
grès et placages de grès	dp81	affleurements	---
Schistes et placages	dp82	affleurements	---
texture Loamo-limoneuse	loli	classe de texture en accord avec la classification canadienne des sols	---
texture sableuse	sabl	classe de texture en accord avec la classification canadienne des sols	---
texture sablo-graveleuse	sagl	classe de texture en accord avec la classification canadienne des sols	---
texture de sable fin	safi	classe de texture en accord avec la classification canadienne des sols	---
dépôts organiques	dorg	Absence de texture	---
affleurements rocheux	aroc	Absence de texture	---
pierrosité, classe 1	pie1	pierrosité inférieure à 5 %	
pierrosité, classe 2	pie2	pierrosité de 5 à 25 %	
pierrosité, classe 3	pie3	pierrosité de 25 à 75 %	
drainage excessif	dra1	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
drainage bon	dra2	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
drainage modéré	dra3	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
drainage imparfait	dra4	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
drainage mauvais	dra5	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
drainage très mauvais	dra6	évalué d'après le taux de mouchetures du sol	---
seepage	seep	présence d'écoulement hypodermique	---
pente nulle	dec1	pentés de 0 à 5 %	---
pente faible	dec2	pentés de 5 à 10 %	---
pente modéré	dec3	pentés de 10 à 15 %	---
pente forte	dec4	pentés supérieures à 15 %	---
topographie uniforme	entu	pas de micro-topographie	---
topographie complexe	entc	micro-topographie	---
haut de versant	posverH	position de l'unité sur l'ensemble du versant	---
intermédiaire	posverV	position de l'unité sur l'ensemble du versant	---
intermédiaire haut	posverVH	position de l'unité sur l'ensemble du versant	---
bas de versant	posverB	position de l'unité sur l'ensemble du versant	---
pente amont à l'unité longue	pentL	longueur de la pente en amont de l'unité	---

penne amont à l'unité moyenne	pentM	longueur de la penne en amont de l'unité	---
penne amont à l'unité courte	pentC	longueur de la penne en amont de l'unité	---
forme longitudinale de l'unité convexe	formlong X	Convexité/concavité longitudinale évaluée par photo-interprétation	---
forme longitudinale de l'unité rectiligne	formlong R	Convexité/concavité longitudinale évaluée par photo-interprétation	---
forme longitudinale de l'unité concave	formlong C	Convexité/concavité longitudinale évaluée par photo-interprétation	---
forme transversale de l'unité convexe	formtranX	Convexité/concavité transversale évaluée par photo-interprétation	---
forme transversale de l'unité rectiligne	formtranR	Convexité/concavité transversale évaluée par photo-interprétation	---
forme transversale de l'unité concave	formtranC	Convexité/concavité transversale évaluée par photo-interprétation	---
Indice d'homogénéité	Ind1-Ind4	Indice d'homogénéité par polygone cartographique (hétérogène, hétérogène bi-modale, homogène bimodale, homogène)	MNA
variables de relations	VAREL	Descripteurs des relations topologiques entre zones	
orientation moyenne de l'unité	8 classes	Orientation calculée par pixel puis ramenée au niveau de l'unité	MNA
concavité/convexité moyenne de l'unité	3 classes conc, rect. conv	Concavité/convexité calculée par pixels et généralisée au niveau de l'unité	MNA
silhouette	48 classes	48 possibilités de silhouette obtenues à partir de la combinaison des pentes, orientations et concavité/convexité	MNA
diffusivité/réceptivité	20 classes (cXXX) 3 classes (cave, cvex, rect)	résultats du codage des unités en fonctions de leurs interrelations vis à vis des écoulements	MNA

A partir des types de dépôts, 6 classes de textures ont été retenues afin d'entrer dans la procédure d'analyse:

- les textures loamo-limoneuses (LOLI)
- les textures sablo-graveleuses (SAGL)
- les textures sableuses (SABL)
- les textures de sables fins (SAFI)
- l'absence de texture due à la présence de dépôts organiques (DORG)
- l'absence de texture due à la présence d'affleurements rocheux (AROC)

2.6.3. Interprétation des différentes analyses

Bien évidemment, la totalité des variables listées précédemment n'est pas pertinente dans l'optique de la mise en oeuvre d'une procédure de statistiques multivariées. Bon nombre d'entre-elles sont redondantes, risquant à terme de diluer une information précieuse et de limiter les possibilités d'interprétation. Plusieurs tentatives sont alors nécessaires afin de déterminer la combinaison de variables la plus pertinente en fonction des objectifs poursuivis.

2.6.3.1. Tentative 1, menée avec l'ensemble des variables fournies par la carte écologique.

Dans un premier temps, à titre indicatif, plutôt qu'avec l'espoir d'obtenir des résultats pertinents, nous avons effectué une première analyse sur l'ensemble des variables fournies exclusivement par la carte écologique, en incluant directement le type de dépôt, sans exploiter cependant les informations dérivées du modèle numérique d'altitude. Sans entrer dans les détails des résultats obtenus au niveau des vecteurs propres, quelques remarques peuvent être faites après examen de cette première tentative:

Tout d'abord, du fait des variables retenues, aucune relation de nature topologique n'est prise en compte. Les regroupements obtenus s'appuient uniquement sur des caractéristiques intrinsèques à chaque unité prise individuellement. De plus, la prise en compte de l'ensemble des variables fournies par la carte, sans aucune réflexion préalable sur la pertinence des variables considérées, dévoile rapidement ses limites. Les résultats de l'analyse factorielle montre un très faible pourcentage de l'inertie du nuage expliqué dès les premiers facteurs⁴⁴. Un bon point cependant. Dès ce premier essai, il est possible d'identifier un ensemble de variables dont les poids factoriels très faibles illustrent le rôle négligeable. Pour la suite de notre recherche, ces variables doivent être éliminées puisqu'elles n'apportent rien mais qu'elles « diluent » plutôt les informations pertinentes. Ces quelques variables à l'utilité restreinte sont:

⁴⁴ Le pourcentage cumulé expliquant l'inertie du nuage est encore inférieur à 30 % au cinquième facteur (plus exactement 29.31 %). Ce résultat médiocre est quasiment inexploitable. Il est difficile en effet, à partir de tels chiffres, de comprendre la répartition des différentes variables et de définir des néo-variables explicatives.

- Les formes longitudinales et transversales des unités (formlong__ et formtrans__)
- Les variables identifiant les pentes uniformes ou complexes (entu, entc).

2.6.3.2. Tentative 2; introduction des variables de relation et suppression des variables dont le poids factoriel est très faible.

Une deuxième tentative, exploitant cette fois-ci les variables générées par l'analyse du modèle numérique d'altitude permet d'intégrer une nouvelle dimension « topologique » à notre démarche. Ces différentes variables sont présentées dans le tableau 10. Elles regroupent essentiellement des informations touchant au drainage, à la texture, aux pentes et à la propension des différentes zones à laisser circuler les eaux de ruissellement.

Tableau 10: Liste des 35 variables prises en compte dans l'analyse intermédiaire (la signification de ces variables est fournie par le tableau 9)

dra1	dra2	dra3	dra4	dra5	dra6	seep	loli	sagl	safi	sabl	dorg	aroc	dec1
dec2	dec3	dec4	c030	c031	c110	c111	c120	c121	c122	c212	c213	c221	c222
c223	pie1	pie2	pie3	cave	cvex	rect							

Bien évidemment quelques redondances subsistent au niveau du choix des variables prises en compte. Les caractéristiques de drainage sont bien sûr liées aux variables topographiques et de texture. Chacun de ces éléments reste cependant relativement indépendant des autres, dans la mesure où ne sont exclues de ce type d'analyse que les redondances directes. Autre redondance dont nous sommes conscients, la prise en compte d'une variable de déclivité, extraite de la carte écologique, à laquelle vient s'ajouter indirectement la notion de pente, calculée cette fois-ci à partir du Modèle Numérique d'Altitude pour être ensuite intégrée dans la procédure d'évaluation des capacités diffusantes et réceptrices des polygones cartographiques. Cette remarque est également valable pour les variables « cave », « cvex » et « rect », définissant des

concavités/convexités par polygone et possédant une dépendance certaine avec les 11 variables décrivant la capacité des polygones à transmettre les écoulements.

L'examen des résultats de cette analyse, menée avec les 35 variables précitées, nous amène aux commentaires suivants:

Une réflexion sur la pertinence des variables à prendre en compte est visiblement bénéfique. Cette remarque s'appuie sur le constat de l'amélioration du pourcentage cumulé expliquant l'inertie du nuage, pour le cinquième facteur. Ce chiffre est de 40 % environ. Il y a donc une augmentation comparativement au dernier résultat présenté. Cependant, ce chiffre n'est encore pas des plus pertinents⁴⁵.

Il est intéressant cependant de tenter cette fois-ci d'interpréter plus en détail les résultats de cette analyse

L'interprétation doit s'appuyer sur les éléments les plus contributifs aux différents axes retenus. Ces axes (ou facteurs) sont au nombre de cinq. Pourquoi ce chiffre ? En examinant l'histogramme des valeurs propres de la matrice, on peut remarquer une décroissance par palier (cf. annexe 11) relativement marquée jusqu'au sixième facteur. Les six premiers facteurs regroupent 44 % de l'inertie du nuage. Tel que mentionné précédemment, cette valeur demeure faible. Nous avons cependant choisi de conserver les cinq premiers facteurs, bon compromis entre un choix plus large, qui aurait contribué à rendre l'analyse complexe et un choix plus restreint, difficile à justifier vu le faible pourcentage explicatif des quelques premiers facteurs. L'examen des variables les plus contributives nous permet de dégager les éléments suivants (cf. annexe 11, tableau « contribution des variables »). Les variables les plus représentées dans l'espace des facteurs extraits sont dra6, dorg, aroc et pie3, représentant respectivement les très mauvais drainages, les dépôts organiques, les affleurements rocheux et les fortes pierrosités. Au niveau de chaque facteur, une opposition nette se dessine entre le facteur 1, influencé visiblement par des variables caractérisant des polygones de très mauvais drainage, généralement composées de dépôts organiques et le facteur 2, caractéristique de polygones de très bon drainage, situées en position de sommet. Le facteur 3 semble plus caractéristique de polygones intermédiaires, de drainage moyen à bon, marquées par une forte pierrosité (sables et graviers). Le facteur 4 est plus difficilement interprétable.

⁴⁵ C'est d'ailleurs ce qui explique la présence d'une troisième itération, avec un nombre de variables encore restreint. Il ne faut cependant pas restreindre l'interprétation à ces seuls chiffres mais considérer également les informations potentielles données par l'examen des vecteurs propres..

Les variables ayant une forte contribution par rapport à ce facteur caractérisent les polygones à mauvais drainage, pierrosité forte, convexes, marqués par des affleurements rocheux ou des dépôts de sables et graviers. L'axe 5 semble proche de polygones à mauvais drainage, faible pierrosité, pente relativement forte (10 à 15 %) et classées en tant que diffusants complexes. C'est seulement pour cet axe 5 qu'apparaît une variable fortement contributive, la déclivité. Dans les autres cas, le drainage semble la variable clé de l'analyse. Logiquement, ces constatations se vérifient au niveau des nuages de points.

A partir de cette première synthétisation des informations, il est donc possible de caractériser chacune des unités écologiques non pas en fonction des 35 variables descriptives originelles mais d'après les 5 facteurs identifiés précédemment, chacune d'entre elles se positionnant par rapport aux axes en fonction de leurs caractéristiques. C'est à partir de cette information synthétique que les regroupements vont pouvoir être établis à l'aide du programme de classification ascendante hiérarchique (cf annexe 11). L'arbre hiérarchique présenté en annexe, nous a permis de définir 7 groupes distincts. Le nombre de groupes est évidemment arbitraire. Il dépend en fait du niveau auquel il est décidé de « couper » l'arbre. Dans le contexte de ce travail, 7 groupes nous ont semblé appropriés pour différentes raisons, notamment, l'équilibrage des différents groupes ainsi que la lisibilité et l'interprétation des résultats.

La figure 44 présente la répartition spatiale des différents groupes⁴⁶. Chacun des groupes constitués peut être interprété de la manière suivante:

- le groupe 1 réunit un ensemble d'unités très mal drainées, généralement tourbeuses.
- le groupe 2, composé d'une seule unité, caractérise les affleurements rocheux.
- le groupe 3 est essentiellement marqué par des unités à la texture sablo-graveleuse.
- le groupe 4 réunit un vaste ensemble d'unités que nous pourrions qualifier d'unités représentatives du bassin-versant de la Eaton, généralement marquées par des placages de tills, des pentes faibles à moyennes et de bons drainages.

⁴⁶ Il est à noter que toutes les cartes présentant les résultats de classifications hiérarchiques sont conçues sur le même schéma. Les couleurs affectées à chaque groupe demeurent identiques d'un document à l'autre, ce qui permet de les comparer plus aisément.

- le groupe 5 réunit des unités caractérisées par un mauvais drainage sur till, dans des milieux faiblement pentus.
- le groupe 6 est marqué par des zones de fortes pentes.
- le groupe 7 enfin réunit des zones réceptrices essentiellement, au drainage plutôt modéré.

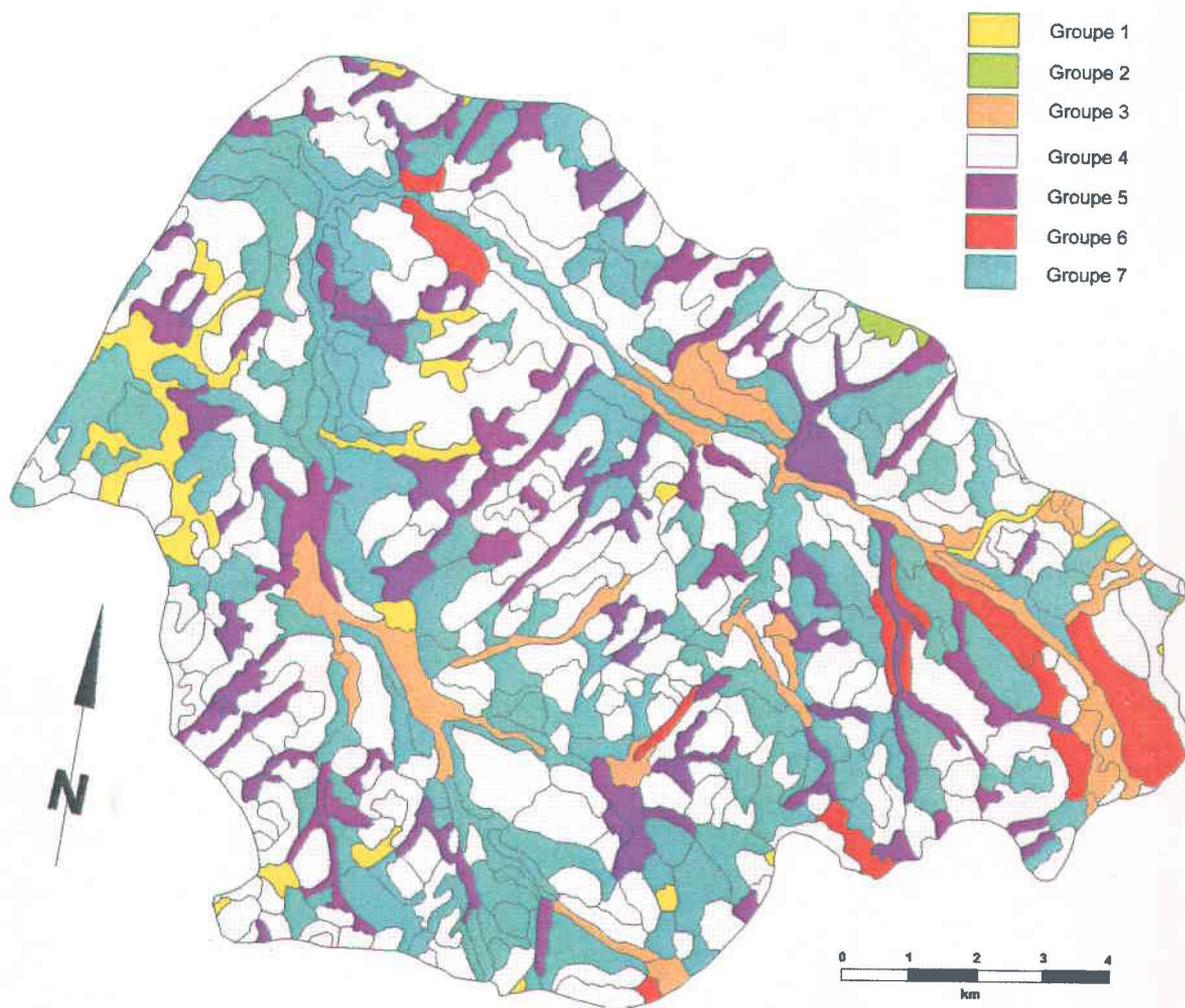


Figure 44: Résultats de la classification établie à partir de 35 variables

2.6.3.3. Tentative 3, réalisée sur la base de 26 variables jugées pertinentes.

Comme nous venons de le constater, les résultats de l'analyse effectuée sur la base de 35 variables ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques significativement différentes, statistiquement du moins. Il était cependant nécessaire de réitérer notre démarche en réduisant encore le nombre de variables, avec l'objectif d'obtenir de meilleurs résultats, permettant d'identifier des néo-variables significatives constituant une base pertinente de regroupement et de classification des polygones cartographiques. Dans cette optique, nous avons identifié un ensemble de 26 variables représentant une combinaison descriptive de caractéristiques de drainage, de texture, de pentes, de pierrosité et de forme, sans oublier la notion d'interrelations spatiales entre chaque unité de référence, évaluée sur la base de la capacité diffusante ou réceptrice dominante pour l'ensemble des occurrences d'un même modèle (cf. tableau 11).

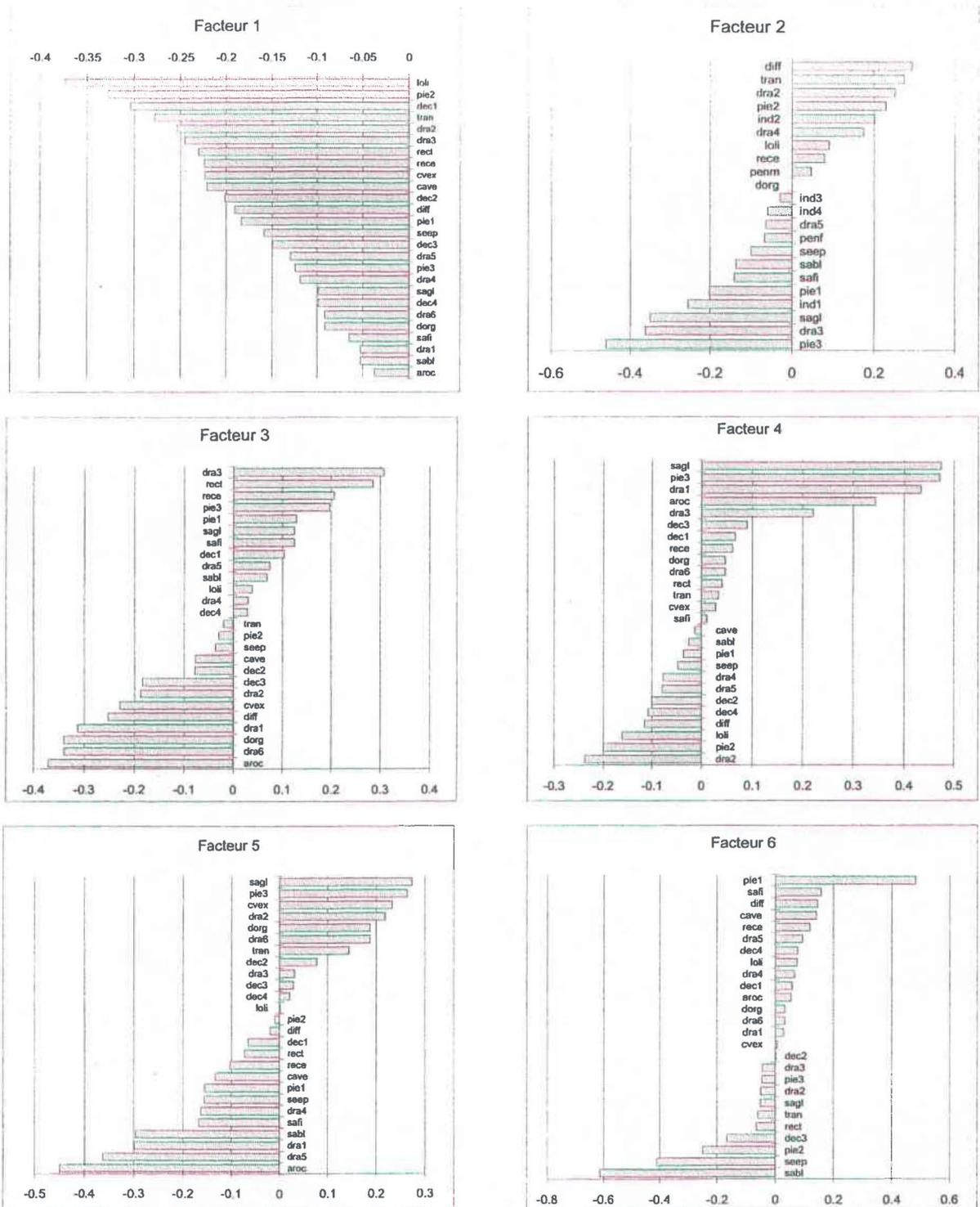
Tableau 11: liste des 26 variables prises en compte dans l'analyse finale

dra1	dra2	dra3	dra4	dra5	dra6	seep	loli	sagl	safi	sabl	dorg	aroc	dec1
dec2	dec3	dec4	tran	diff	rece	pie1	pie2	pie3	cave	cvex	rect		

Comparativement au tableau 10, les variables décrivant les capacités diffusantes, réceptrices et transmettrices des zones ont été simplifiées. L'ensemble des 12 modalités possibles⁴⁷ a été ramené à 3 seulement (zone diffusante, réceptrice ou transmettrice). Cette simplification nous a été suggérée suite à l'examen des premiers résultats. En effet, le poids des 12 variables n'est jamais apparu comme prépondérant pour les analyses. C'est pourquoi nous avons voulu tenter de simplifier cette information peut-être trop détaillée.

La figure suivante, offrant une représentation graphique des vecteurs propres pour les cinq facteurs, permet une interprétation plus aisée des résultats.

⁴⁷ Les 12 classes retenues pour la réceptivité/diffusivité des zones s'appuient sur une approche hiérarchique permettant de définir des zones fortement diffusantes/réceptrices par rapport à des zones faiblement diffusantes/réceptrices (cf. annexe XII).



Figures 45: Représentation graphique des vecteurs propres normés unitaires pour les six facteurs (AFC avec 26 variables).

Visiblement, la réduction du nombre de variables a permis d'augmenter la « qualité de l'analyse factorielle des correspondances ». En effet, à l'étude de l'histogramme des valeurs propres de la matrice, on peut remarquer que le pourcentage cumulé d'explication de l'inertie du nuage est pour le cinquième facteur de plus de 51 %, ce qui représente une augmentation par rapport à la dernière analyse (cf. annexe 11). Il semble de toute manière difficile d'espérer de meilleurs pourcentages. Les travaux de M. Essadaoui, (1992) nous confirment cette particularité qui matérialise peut-être tout simplement le fait que la carte écologique constitue un excellent document de synthèse !!!

En examinant les variables ayant les plus fortes contributions pour chacun des facteurs quelques remarques s'imposent:

- L'ensemble des variables prises en compte ont une saturation négative sur ce premier facteur. Ce fait n'est pas nouveau et était déjà présent lors des analyses précédentes. Cette saturation négative pourrait, comme cela m'a été suggéré, résulter d'un effet de la multi-colinéarité des variables. En dehors de ce constat, ce facteur semble plutôt associé à une texture loamo-limoneuse de terrain plat et de pierrosité moyenne.
- Le facteur 2 est bipolaire et oppose nettement les reliefs concaves marqués par des dépôts organiques mal drainés et les reliefs convexes, bien drainés, pentus et caractérisés par la présence d'affleurements rocheux. Ce facteur peut donc être assimilé assez clairement à l'effet de forme.
- Le facteur 3 est plus difficilement interprétable et n'est pas marqué par des oppositions de variables très nettes. Il oppose ainsi les zones à drainage modéré aux unités mal ou trop drainées. Il associe également les dépôts organiques aux affleurements rocheux et les oppose aux reliefs de type rectiligne. La signification de ce facteur pourrait peut-être se rapprocher de la notion d'homogénéité du modelé puisqu'il semble opposer des variables caractéristiques de zones tourmentées à des variables qualifiant des unités plus homogènes. La constitution de la carte des notes en facteur établie par polygone cartographique pour le facteur 3 (cf. figure 46) a pour objectif de tenter d'éclaircir ces différents éléments en examinant la répartition spatiale de ces notes sur l'ensemble du bassin-versant. Cette carte a été obtenue après avoir classifié l'ensemble des notes obtenues sur chaque polygone en six classes distinctes définies à partir d'un histogramme de fréquence. Son analyse met en avant l'opposition assez marquée entre des zones aux caractéristiques extrêmement hétérogènes du point de vue du modelé, de forme très allongée, généralement situées

en fond de vallée (zones cartographiées en rouge) et des polygones au modelé et aux caractéristiques de dépôts plus homogènes (cartographiées en bleu). Ces quelques éléments tendraient donc bien à confirmer le lien identifié précédemment entre ce facteur 3 et la notion d'homogénéité des polygones cartographiques.

- Les variables les plus contributives au facteur 4 sont respectivement la variable « aroc » (affleurement rocheux), « sagl » (textures sablo-graveleuse) et « dra1 » (drainage excessif). Son interprétation est donc relativement claire et semble guidée par la notion de drainage.
- le facteur 5 enfin est plus difficilement interprétable, opposant des zones convexes de bon drainage à un ensemble de zones aux caractéristiques diverses.

Dernière remarque au sujet de cette interprétation. Les variables dra6 (drainage très mauvais) et dorg (dépôts organiques) ont exactement les mêmes saturations sur les six facteurs. L'information qu'elles apportent est ici clairement redondante et il sera nécessaire dans la poursuite des analyses, d'éliminer une de ces deux variables

Examinons à présent les résultats de la classification hiérarchique en s'appuyant sur la répartition spatiale des 7 groupes retenus⁴⁸ (cf. figure 47)

Les zones de fond de vallées et certaines unités particulières (tourbeuses principalement) se distinguent facilement. Une grande majorité d'unités se trouvent cependant regroupée sous deux groupes principaux, le groupe 3 et le groupe 6. Cinq groupes sont finalement relativement aisés à interpréter:

- le groupe 1 réunissant les unités tourbeuses
- le groupe 2, identique pour la précédente analyse et marqué par une unités caractérisée par des affleurements rocheux
- le groupe 4 réunissant des unités sablo-graveleuses de fonds de vallées
- le groupe 5, marqué par la présence d'unités dont les dépôts ont une texture très fine (loam limoneux)

⁴⁸ Le choix de 7 groupes a déjà été explicité lors des commentaires touchant à l'analyse précédente.

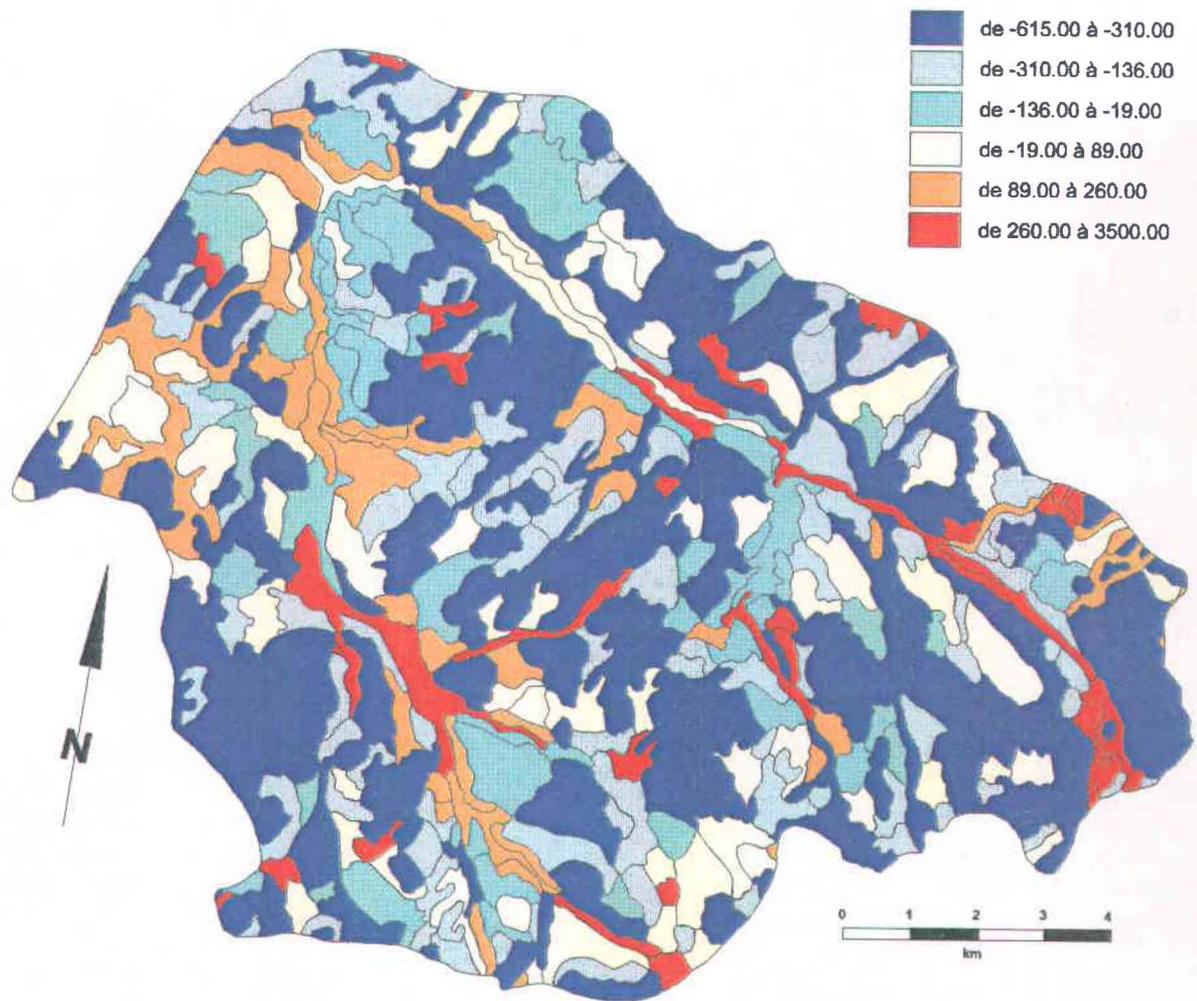


Figure 46: Cartographie des notes en facteur établie pour le facteur 3

- le groupe 7 réunissant des unités de fonds de vallées, par essence réceptrices, et pour lesquelles les travaux de terrain ont permis de mettre en évidence la présence d'un drainage hypodermique.

Les groupes 3 et 6 sont en revanche beaucoup plus difficiles à interpréter, du moins en apparence. En comparant leur répartition spatiale avec l'ensemble des cartes thématiques que nous avons produites, des similarités peuvent être remarquées avec la carte des différents types de drainage (cf. figure 40). Le groupe 3 réunirait plutôt des unités caractérisées par un bon drainage alors que les unités présentes dans le groupe 6 seraient un peu moins bien drainées.

Dans l'ensemble, il semble possible d'interpréter les différents groupes de façon relativement claire, soit en s'appuyant sur des caractéristiques de dépôts ou de drainage. La méthodologie proposée permet ainsi de définir une typologie des unités présentes sur le bassin-versant marquée essentiellement, de manière directe ou non, par le potentiel de chaque zone en matière de drainage.

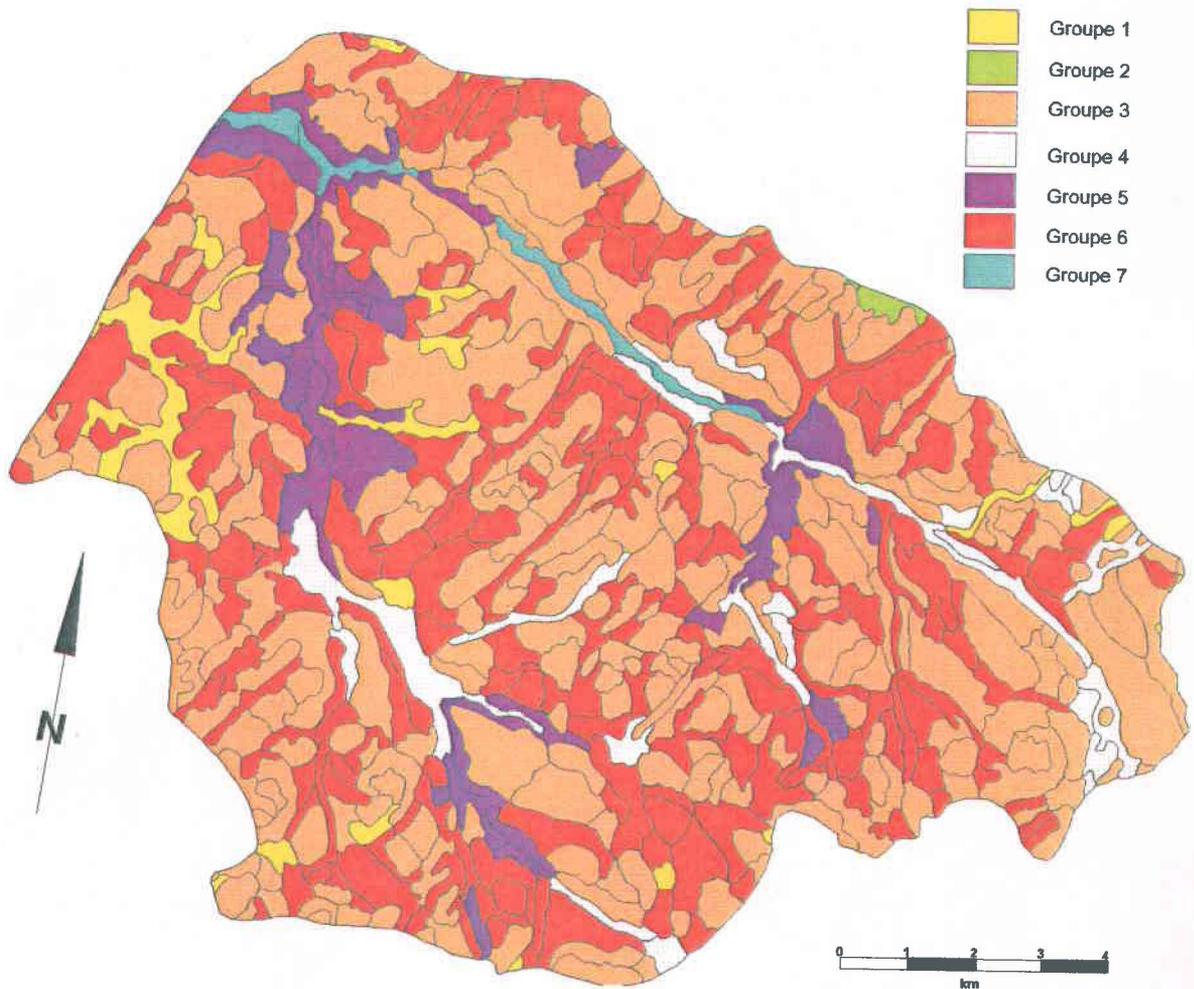


Figure 47: Résultats de la classification établie à partir de 26 variables

2.6.3.4. Prise en compte des informations au niveau du polygone cartographique.

La démarche que nous avons menée jusqu'à présent s'est appuyée sur l'analyse des informations qualifiant les 119 unités de référence. Cette approche a d'ailleurs impliqué, pour les variables acquises à partir du traitement du Modèle Numérique de Terrain, un lissage de la variabilité identifiée entre chaque polygone de manière à le faire entrer dans le moule de l'unité de référence.

Cette contrainte, imposée par le concept de la carte écologique, exclut d'emblée la prise en compte du degré de complexité du modelé. C'est pourquoi nous nous sommes demandés s'il ne serait pas tout aussi pertinent de travailler au niveau du polygone cartographique afin de garantir la prise en compte de l'hétérogénéité du milieu, en étant conscient de l'entorse faite au concept même de la carte et de la nécessité de dupliquer les informations issues de la carte pour les diverses occurrences d'un même modèle.

Dans cette optique, nous avons mené le même type d'analyses sur une zone test représentative, regroupant 81 polygones cartographiques (cf. 2.4.3.2.) en enrichissant l'ensemble des informations d'une variable qualitative du degré d'homogénéité des polygones. Les 22 variables retenues pour cette tentative sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12: liste des 22 variables prises en compte dans l'analyse des 81 polygones de la zone test.

dra2	dra3	dra4	dra5	seep	loli	sagl	safi	sabl	dorg	pie1	pie2	pie3	ind1
ind2	ind3	ind4	penf	penm	diff	tran	rece						

La figure 48 reproduit les graphiques des vecteurs propres normés pour les cinq premiers facteurs, dans le but d'une lecture et d'une interprétation plus aisée (pour davantage de détails, consulter l'annexe 11 présentant les résultats du programme ANCORR).

Premier constat: une analyse menée à partir des polygones n'améliore pas significativement le pourcentage cumulé d'explication de l'inertie du nuage qui stagne autour de 50 % (54.997% à partir du sixième facteur).

L'examen des vecteurs propres normés nous amène aux réflexions suivantes:

- Toutes les variables ont une saturation négative sur le premier facteur, d'ûe sans doute là aussi à un effet de multi-colinéarité.
- Le facteur 2 semble opposer des zones caractérisées par un bon drainage, diffusantes ou transmettrices à des zones de drainage modéré. Ces quelques indices nous amènent à l'interprétation d'un effet possible de situation relativement à la morphologie globale du bassin-versant, opposant les zones diffusantes et transmettrices, situées dans les parties amont, aux zones plus généralement mal drainées et fortement hétérogènes situées dans les talwegs.
- Le facteur 3 semble très lié aux polygones marqués par la présence de dépôts organiques sur des pentes faibles à nulles. S'opposent à cet ensemble de polygones, des zones très hétérogènes, marquées par un mauvais drainage. Il semblerait que ce facteur permette de différencier les zones mal drainées du type tourbières, particulièrement présentes dans la partie nord-ouest du bassin, aux zones de fond de vallée, également plutôt mal drainées mais par nature extrêmement différentes des premières.
- Le facteur 4 met en opposition les zones réceptrices, marquées par des dépôts de sable fin et une faible pierrosité, aux zones sablo-graveleuses diffusantes, marquées par une forte pierrosité. L'interprétation de ce facteur pourrait s'appuyer sur cet aspect topologique introduit par le concept de diffusivité/réceptivité et traduire un effet de position relativement aux écoulements.
- Le facteur 5 enfin est encore une fois difficilement interprétable.

Sur la base de ces cinq facteurs, tout comme dans la démarche précédente, nous avons effectué une classification ascendante hiérarchique, dans le but de regrouper les 81 polygones en fonction de leur ressemblance, non plus évaluée à partir des variables de bases de l'analyse mais des néo-variables que constituent les facteurs. La figure 49 présente les résultats de cette classification dans l'espace de la zone test.

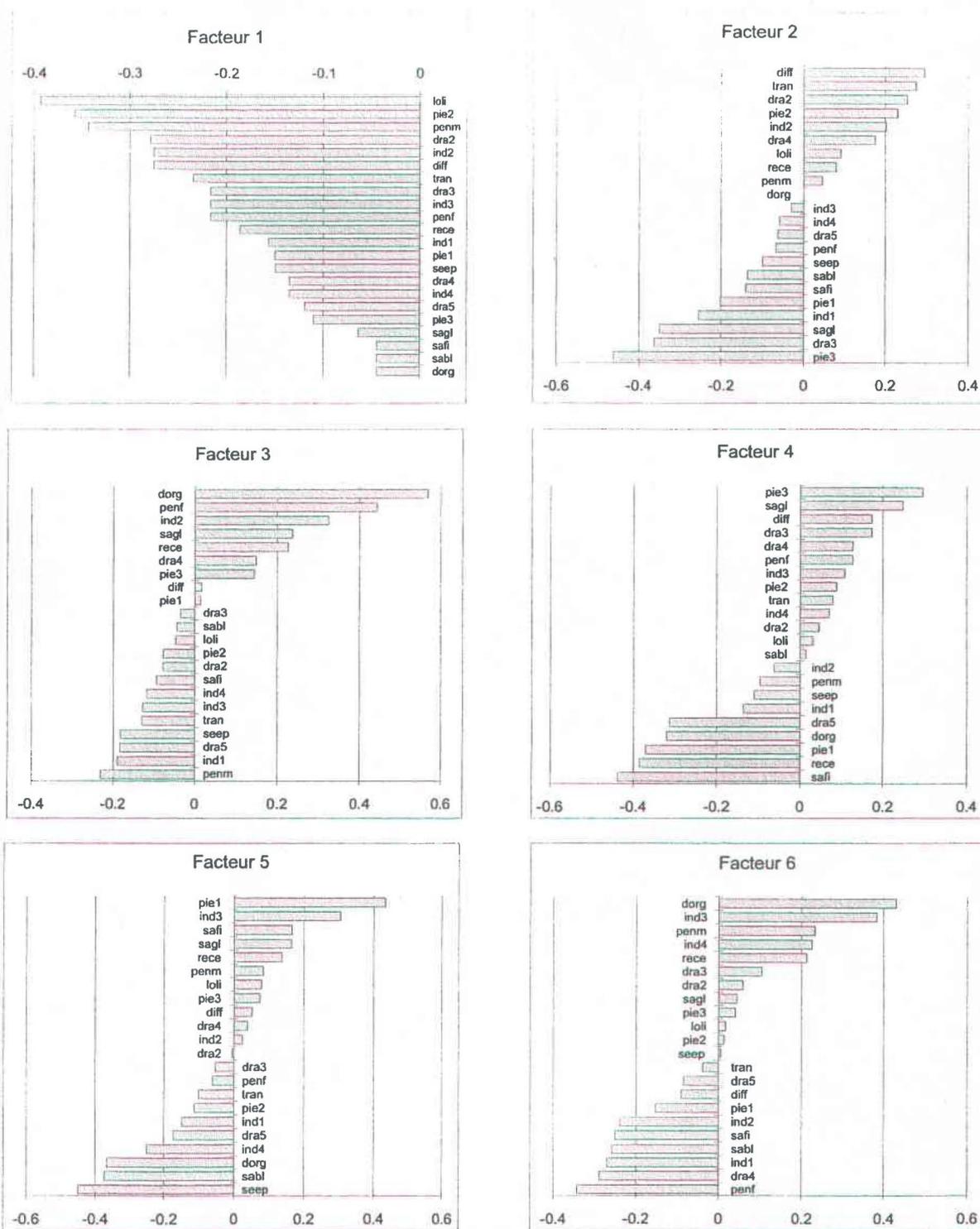


Figure 48: Représentation graphique des vecteurs propres normés unitaires pour les six facteurs (AFC avec 22 variables, sur la base de 81 polygones).

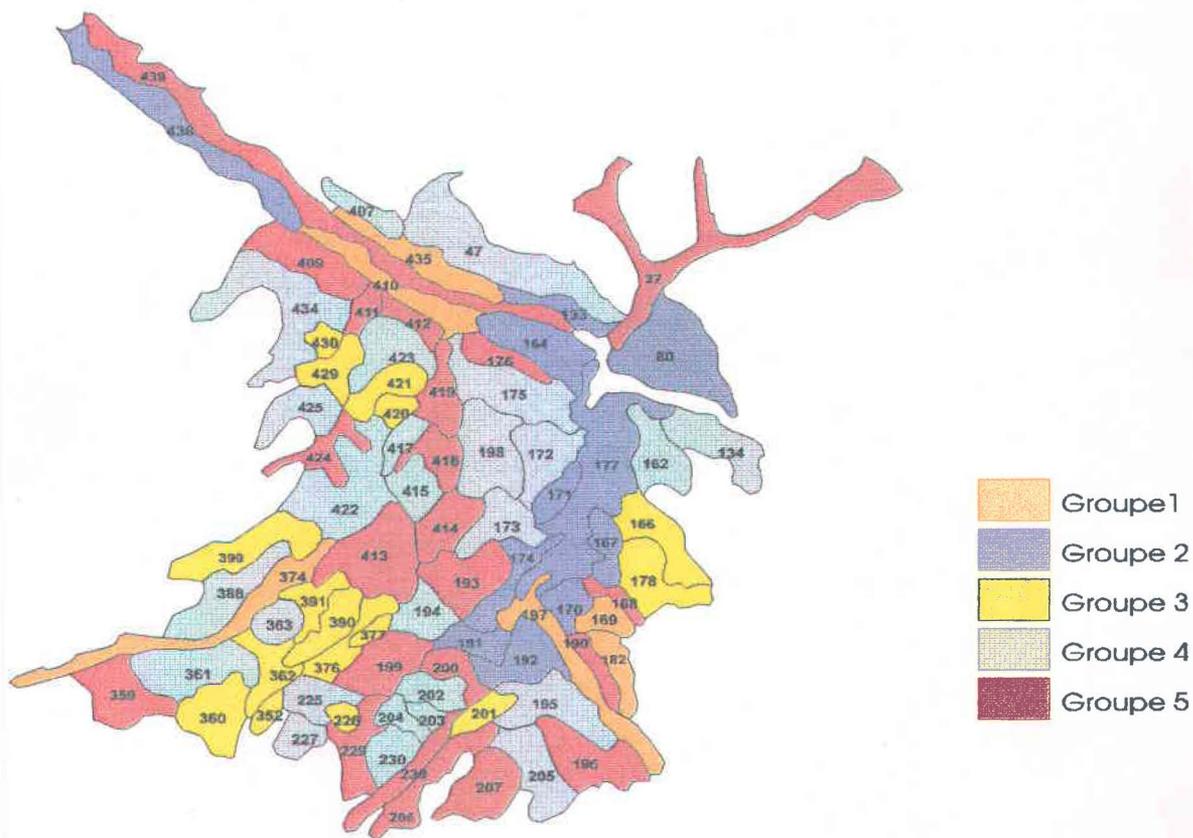


Figure 49: Carte des groupements effectués sur la base d'une analyse des polygones cartographiques pour une zone test de 81 zones

L'interprétation de ces différents groupes demeure délicate. Toutefois, l'examen de cette carte permet une fois encore d'identifier des ensembles structurés de zones de talwegs marquées par la présence de dépôts glacio-lacustres (groupes 1 et 2) nettement différenciées des zones de versants et de sommets dont la dissemblance s'appuie cette fois-ci davantage sur des caractéristiques de drainage et de modelé (groupes 3, 4 et 5)

2.6.3.5. Commentaires

L'objectif de ces analyses ne se limitait pas à cartographier des regroupements statistiques de différentes zones écologiques. Il avait pour principal but de mettre en évidence, le cas échéant, une organisation du bassin en sous ensembles de zones, distribuées spatialement sous la forme de « pattern », cette organisation pouvant servir de guide lors de la nécessaire définition d'aires de contribution ou de sous bassins versants, généralement requis par bon nombre de modèles hydrologiques discrétisés.

La procédure statistique que nous avons suivie, procédure qui comme nous l'avons déjà mentionné avait été éprouvée lors d'une étude statistique sur la définition automatique des récurrences des différents modèles définis par la cartographie écologique, permet de mettre en évidence des « familles » de zones possédant des caractéristiques communes.

Les groupements établis, dans tous les cas de figure, semblent très influencés par les caractéristiques de drainage avant tout. Les textures (qui sont bien évidemment liées avec la variable précédente) jouent également un rôle prépondérant. Les variables décrivant la topographie du bassin jouent apparemment un rôle secondaire. Parmi celles-ci, les capacités diffusantes, réceptrices ou transmettrices des zones semblent avoir peu de poids dans les analyses, du moins lorsque celles-ci sont menées sur la base des 119 modèles ou unités de référence. En revanche, leur rôle semble se renforcer nettement après l'introduction de la notion d'homogénéité/hétérogénéité, et surtout après avoir choisi l'option de travailler au niveau du polygone cartographique. Le fait de vouloir ramener la diversité naturelle à une information synthétique fournie par des unités de référence semble masquer une part fondamentale du contenu informationnel de la carte en gommant toute notion d'hétérogénéité.

En superposant les résultats des procédures de groupements à partir des 26 variables, à la carte des sous-bassins déterminée de manière classique, manuellement (cf. figures 50 et 51), il est difficile de repérer une organisation, une structuration très nette des zones à l'intérieur de chaque sous-bassin prédéfini. Selon la zone (amont ou aval du bassin de la Eaton supérieure), on constate la présence de certains groupes distincts caractérisant chacun des sous-bassins. Il est cependant délicat, à l'exception de quelques zones très particulières, de distinguer une organisation réelle à partir de laquelle il aurait été possible de définir un modèle d'organisation, nouvelle base de discrétisation. Cependant, l'information livrée par la procédure de traitements et d'analyse que nous avons fait subir aux données, permet de synthétiser considérablement la description des sous-bassins, en

réduisant la typologie des polygones qui les décrivent à quelques groupes bien identifiés. Il devient également, par ce biais, plus aisé de comparer les sous-bassins entre-eux, sur la base de ces informations statistiquement cohérentes mais à valider dans la pratique.

Autre investigation possible, mesurer le degré de concordance entre les groupements établis et le découpage en grandes unités géomorphologiques, effectué (selon les mêmes principes que la carte écologique que nous avons utilisée) par les spécialistes du Ministère de l'Environnement et constituant un niveau d'analyse plus global que celui auquel nous avons travaillé. Les vastes zones définies représentent des grands ensembles de reliefs (collines, plateaux). En superposant leurs limites aux groupements statistiques, nous voyons plus clairement se dessiner les différentes régions caractéristiques du bassin-versant de la Eaton supérieure (cf figures 52 et 53). Ce constat est toutefois des plus logiques puisque le découpage le plus fin (utilisé pour cette recherche) est intégré pour produire les unités de niveau supérieur.

Après examen de ces différents documents cartographiques, il est difficile de distinguer une réelle organisation des groupements statistiques en « pattern » significatifs. Il n'en demeure pas moins que l'ensemble des démarches de statistiques et d'analyses spatiales que nous avons menées aboutissent à la constitution d'un nombre réduits d'unités, visiblement fortement influencées par les caractéristiques de drainage et les types de dépôts qui les décrivent. D'une information difficilement « gérable », regroupant plus de 50 variables sur 119 modèles, la procédure suivie nous a permis de réduire les données à 7 groupes dans lesquels se retrouvent l'ensemble des unités présentes sur le bassin.

Bien sur, nous n'avons pas exploité l'ensemble des possibilités d'analyse qui étaient à notre disposition. Sans compter les différents tests envisageables au niveau du choix des variables entrant dans l'analyse, nous aurions pu par exemple, tester les résultats à partir de la prise en compte des 7 premiers facteurs. Nous aurions également pu choisir de sectionner l'arbre de la classification hiérarchique à un autre niveau, afin d'obtenir un nombre de groupes plus restreint ou plus important. Nous aurions enfin pu imaginer, étant donné les contraintes que nous imposaient la nature des données, mettre en place une solution d'analyse de données mixte, permettant d'exploiter d'autres méthodes statistiques pour les variables quantitatives tout en conservant l'AFC pour le traitement des variables écologiques.

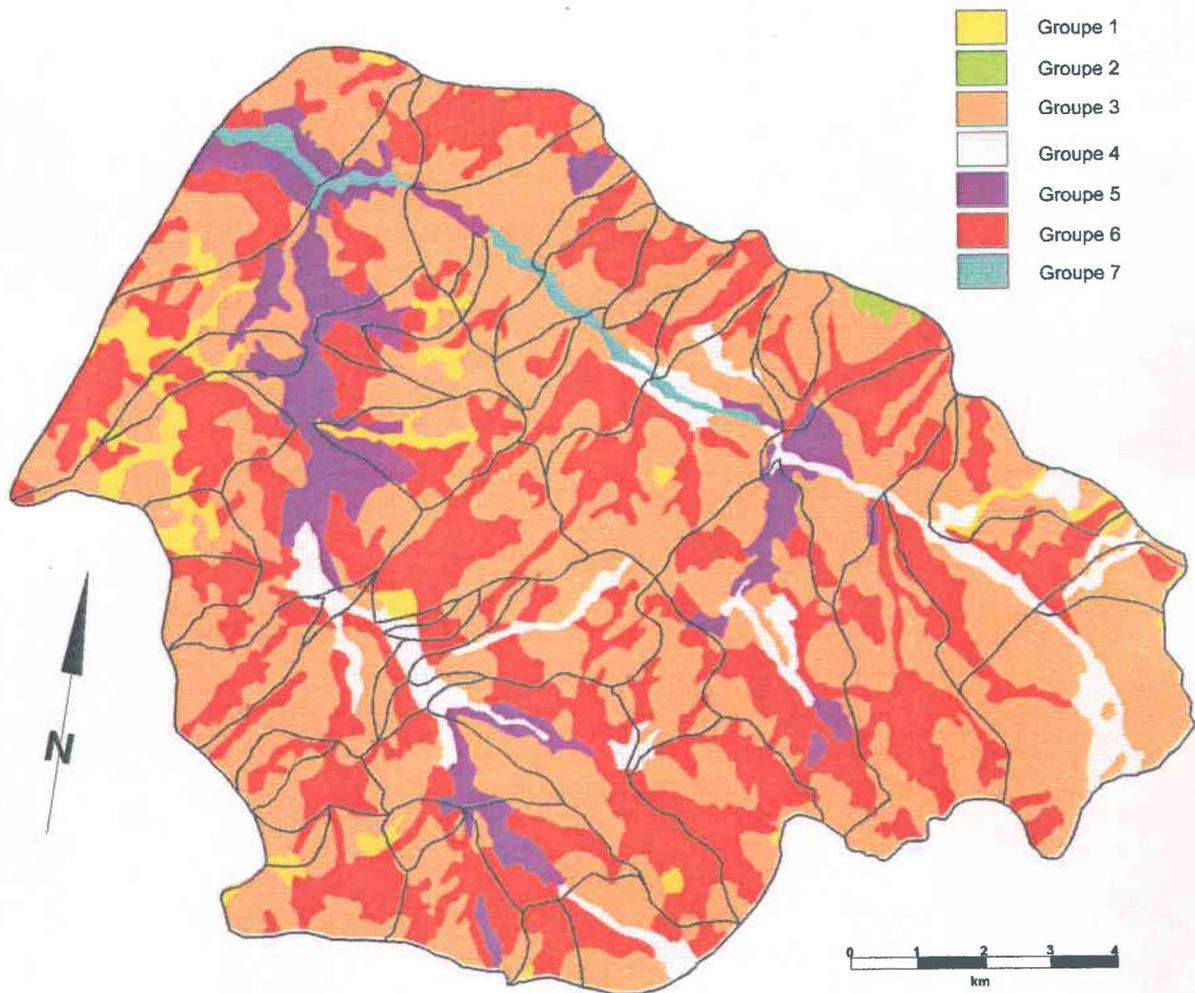


Figure 50: Superposition des groupes établis sur la base de 26 variables, aux limites de sous bassins

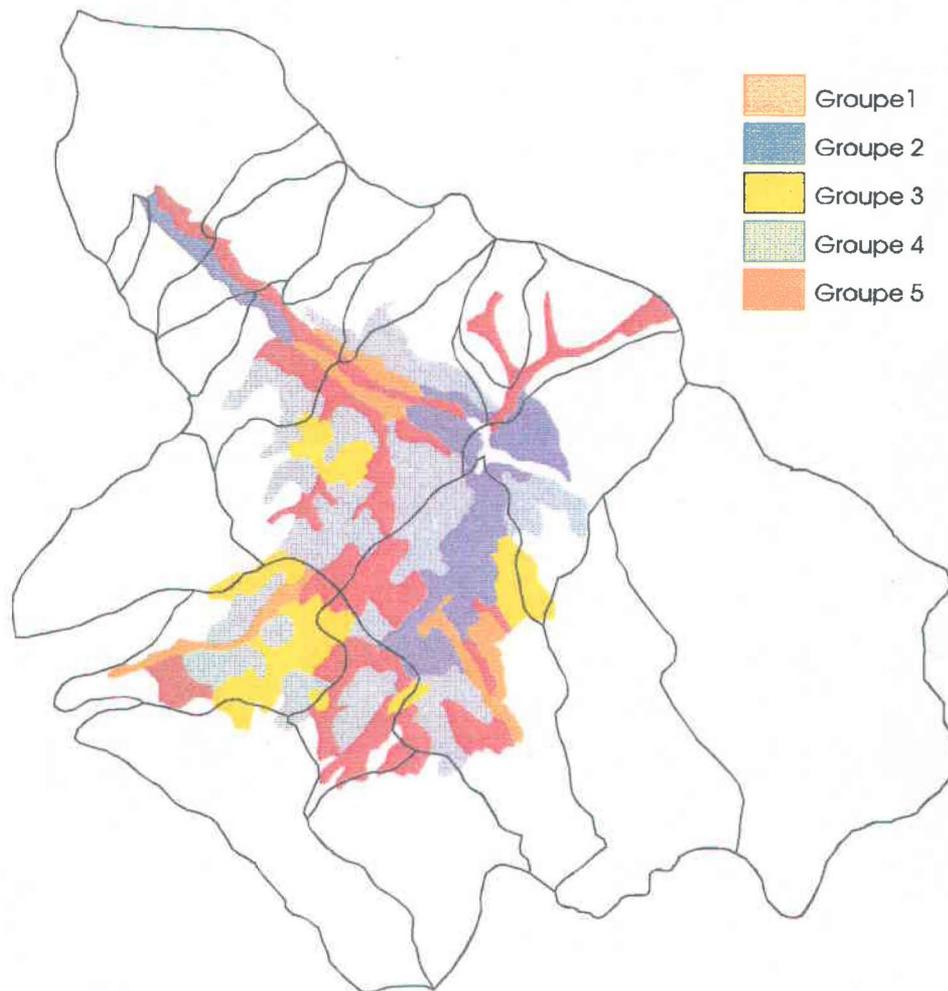


Figure 51: Superposition des groupes établis sur la base de 22 variables, aux limites de sous-bassins
(zone test de 81 polygones, analyses portant sur la totalité des polygones)

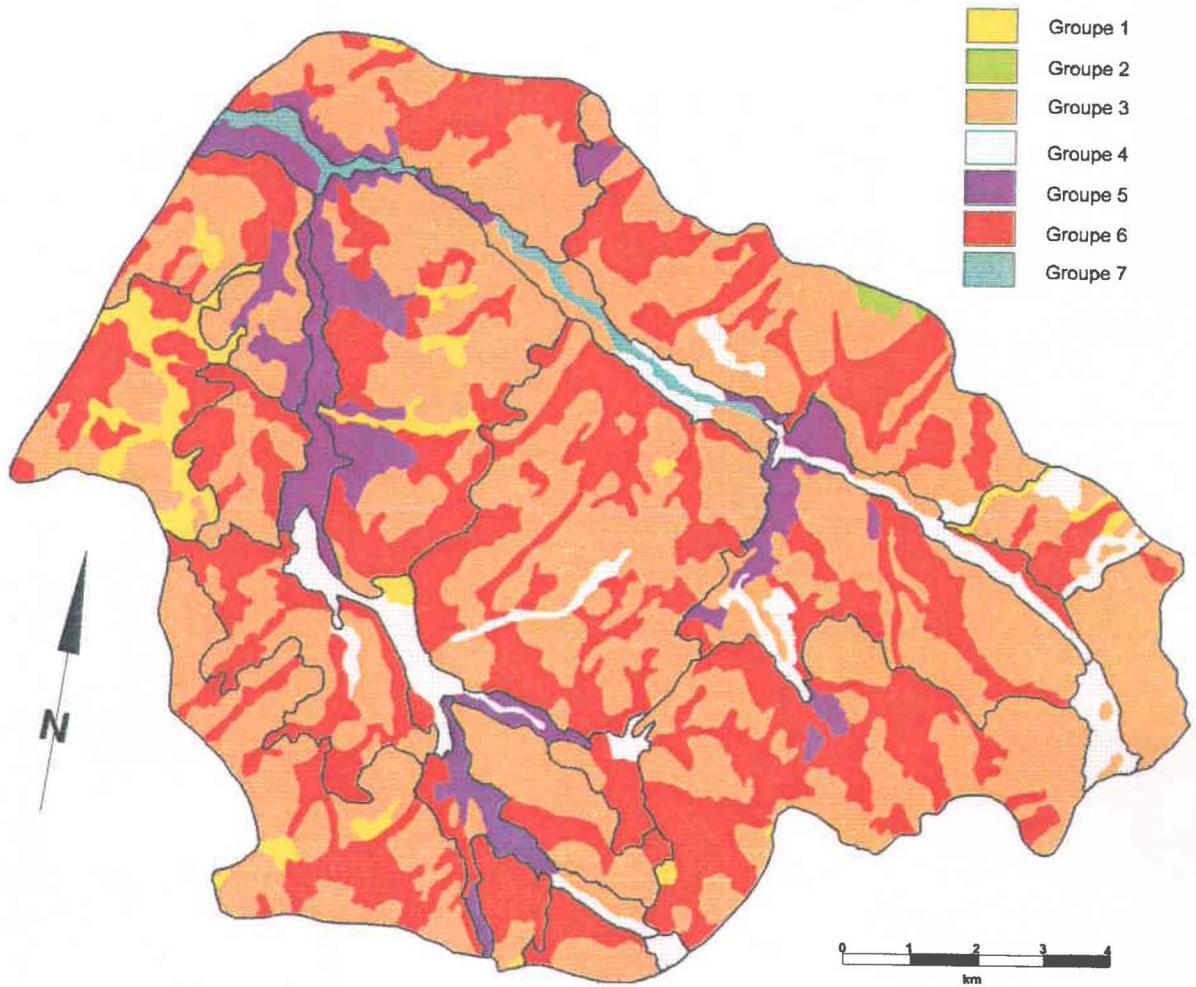


Figure 52: Superposition des groupes établis sur la base de 26 variables, aux grandes unités géomorphologiques

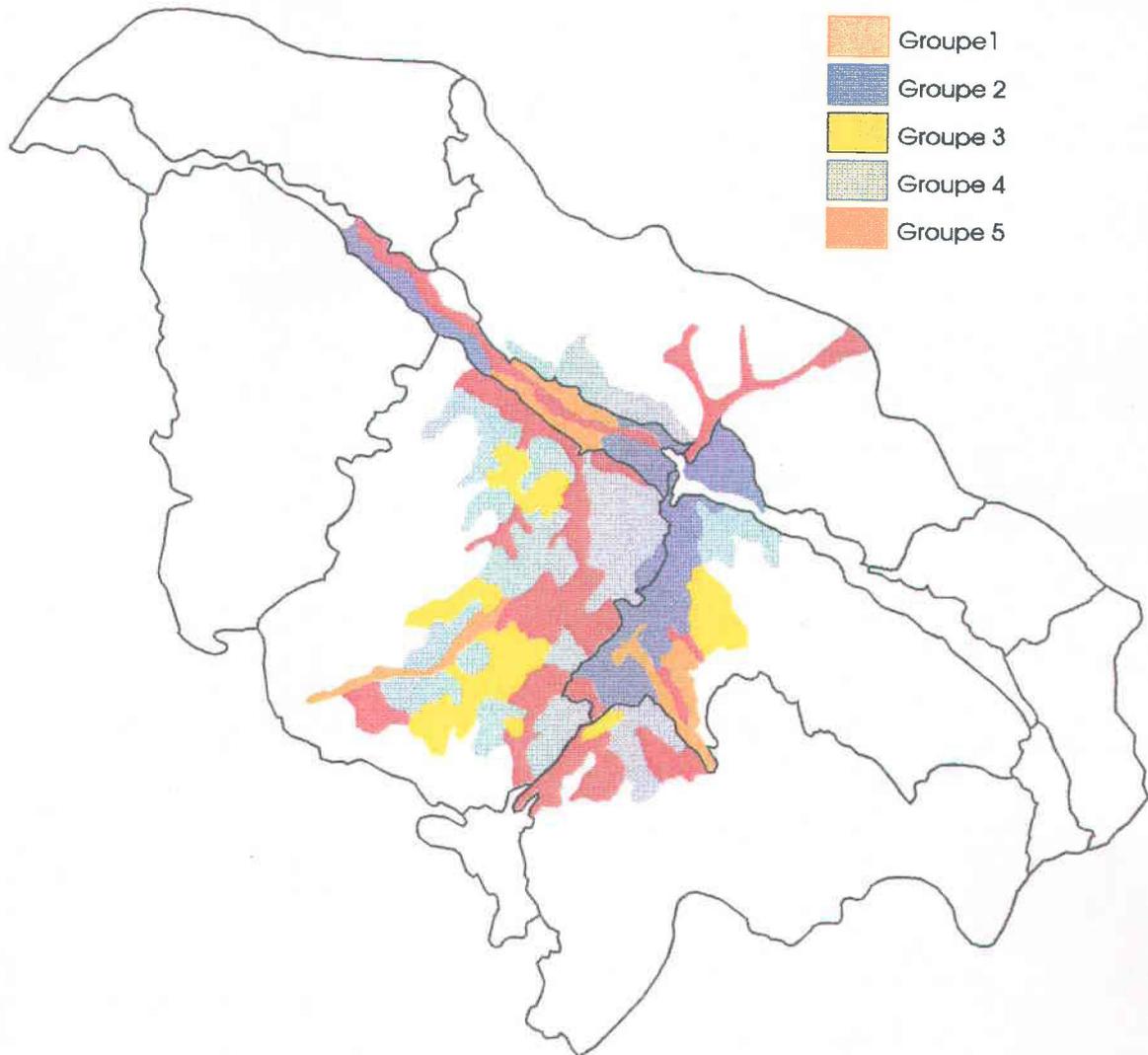


Figure 53: superposition des groupes établis sur la base des 22 variables, aux grandes unités géomorphologiques (zone test de 81 polygones, analyse portant sur la totalité des polygones)

Les choix qui ont été faits tout au long de ce travail se sont toujours appuyés sur des préoccupations liées aux problèmes de discrétisation des bassins-versants, en vue d'une modélisation hydrologique ultérieure. Leur subjectivité est indéniable, tout comme la subjectivité du découpage que nous avons pris comme base « incontournable » de cette étude. Avec une garantie cependant, celle de conserver au minimum (dans le cas du découpage) l'expertise et une certaine perception holistique du milieu que possèdent les concepteurs de cette information extrêmement riche que compose la carte écologique.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette recherche avait pour objectif d'évaluer la pertinence des informations fournies par la carte écologique en matière de spatialisation des bassins-versants. Plus concrètement, il s'agissait de mettre en oeuvre une approche et un ensemble de méthodes d'intégration des informations livrées par la carte, dans une démarche d'analyse et de traitements de données spatiales, visant à définir à terme un découpage pertinent des bassins-versants en unités de réponse hydrologique sinon "homogènes" mais du moins "compréhensibles" et cohérentes.

Cette démarche s'est articulée autour de quelques présupposés fondamentaux:

- La nécessité de recourir à un certain nombre d'informations complémentaires, notamment des informations de nature topographique,
- La nécessité de s'appuyer sur le modèle spatial de découpage proposé par la carte écologique et fournissant une grille de lecture du milieu globale et intégratrice,
- La nécessité de synthétiser les informations typologiques fournies par la carte par le recours à un certain nombre de procédures d'analyses statistiques multivariées.

La première exigence que nous avons identifiée était incontournable. En effet, la carte écologique est un document à vocations multiples. Les informations qu'elle fournit ne sont pas spécialement acquises dans une optique hydrologique. Cette "universalité" des applications avales est d'ailleurs l'un des fondements sur lesquels s'appuient les cartographes écologues. Cette caractéristique, plaçant la carte écologique au niveau du concept et proposant une grille de lecture du milieu, explique l'inadéquation constatée entre les données fournies et les exigences liées à la modélisation hydrologique. C'est pourquoi, il est à notre avis peu probable de pouvoir exploiter les informations brutes fournies par la carte sans aucun recours à des données externes. Et encore, il faudrait nuancer cette affirmation en fonction du niveau de perception auquel est abordée l'étude du système hydrologique considéré. Au niveau régional, les informations typologiques et le découpage cartographiques permettent une bonne appréhension des conditions du

bassin en en donnant une vision synoptique relativement riche. Leur caractère synthétique, leur nature intégratrice, leur adaptation aux différents niveaux de perceptions en font une information de qualité.

Cette remarque nous amène à considérer la deuxième exigence en nuanciant notre propos. S'il est vrai que des données complémentaires sont nécessaires à l'exploitation de la carte dans une optique hydrologique, le modèle spatial qu'elle fournit doit être conservé. En effet, c'est par le découpage, fait rappelons le, à priori et par photo-interprétation, que se fait l'intégration des différentes variables caractérisant le modelé, c'est à dire la combinaison des dépôts, du drainage et des pentes. Cette intégration spatiale, adaptée au niveau de perception auquel le bassin versant doit être appréhendé en regard des spécificités de l'application, est fondamentale. Elle constitue un indicateur précieux de la diversité du milieu sur lequel peuvent s'appuyer les analyses ultérieures (notamment, dans le cas de discrétisation par maillage arbitraire, le choix de la taille des mailles, qu'il s'agisse d'un maillage homogène ou de type quadtree).

Enfin, l'exigence d'une synthétisation des informations typologiques décrivant les unités de référence est étroitement liée au domaine d'application qui nous préoccupe. Comme nous l'avons montré dans le cadre de cette recherche, la diversité et la finesse de la qualification des types géomorphologiques, contribuant, pour le bassin-versant supérieur de la rivière Eaton à la définition de 119 unités de référence, s'est avérée inexploitable par la plupart des modèles hydrologiques discrétisés les plus communément utilisés. De plus, cette information, rattachée au niveau du modèle mais non spatialisable (aucune indication n'étant donnée sur la position exacte des types géomorphologiques secondaires au sein des polygones cartographiques) n'amène donc pas d'informations complémentaires susceptibles d'enrichir la démarche. Le recours à des méthodes d'analyse statistique multivariée s'imposait donc, ainsi que le choix incontournable de l'Analyse Factorielle des Correspondances, seule méthode adaptée aux contraintes que nous posaient les données.

Au terme de ce travail, nous pouvons affirmer qu'aucun de ces constats n'ont réellement été remis en question. En revanche, les résultats obtenus après une première série d'analyses basées sur les modèles de référence puis en considérant les tentatives faites sur la base des polygones cartographiques, nous amènent à ces quelques remarques. La qualification de l'ensemble des polygones identifiés par un nombre restreint de modèles posent un certain nombre de problèmes d'ordre conceptuel et méthodologique:

- Cette approche se fonde sur un postulat d'homogénéité inter-polygones difficilement exploitable dans un contexte hydrologique. L'étude menée sur la mesure d'un indice d'homogénéité a prouvé la diversité typologique de cette variable au sein de l'ensemble des polygones identifiés (tout comme au niveau du polygone lui-même).

- le fait de ramener les informations au niveau du modèle de référence impose dans la suite des traitements une démarche d'intégration "forcée", interdisant en théorie et pour rester en cohérence avec le concept proposé, toute exploitation des informations acquises par ailleurs au niveau du polygone cartographique. En outre, elle interdit également toute accession à des informations primaires (totalement absente de la carte écologique), propres à chaque polygone cartographique et force ainsi l'homogénéisation du milieu.

Du point de vue hydrologique mais surtout dans un contexte de traitement et d'analyse numérique de données, ces restrictions sont lourdes de conséquence, ne permettant pas d'appréhender à sa juste mesure le degré de complexité des caractéristiques morpho-pédologiques des zones écologiques définies, ces caractéristiques étant pourtant l'un des facteurs clés conditionnant le comportement des bassins-versants.

Ces quelques réflexions ne doivent cependant pas masquer l'intérêt de la carte écologique pour l'hydrologie. La discrétisation des bassins-versants, nécessaire à la description et à la compréhension de leur fonctionnement et indispensable dans une optique d'étude d'impacts de projets d'aménagements, demeure encore actuellement un problème de taille pour lequel les voies de solution restent à trouver. De nombreux hydrologues soulignent aujourd'hui la difficulté d'établir un lien entre la théorie physique et l'application hydrologique (Jordant, 1992) et insistent sur la difficulté de mettre en place des modèles physiques cohérents en hydrologie et de définir des approches descriptives performantes. Face à ces problèmes et aux besoins de plus en plus marqués de mettre en place des politiques de gestion et de planification raisonnées des milieux, la mise en oeuvre d'approches holistiques appréhendant la complexité et la dynamique des systèmes naturels économiques ou sociaux s'impose. La carte écologique, document intégrateur par excellence, ouvre, dans cette optique, de nouvelles voies de solution en proposant une grille de lecture interdisciplinaire et intégrée.

Pour conclure, un commentaire s'impose. La carte écologique, synthétise une information extrêmement riche. A l'exception de l'expertise des cartographes écologues, ce document pourrait être assimilé, hâtivement, à certains « produits » sortis en droite

ligne de projets exploitant la technologie des Systèmes d'Information à Référence Spatiale, fruits de l'intégration et de la synthétisation d'un nombre important de données sectorielles. Pourtant cette analogie ne peut être faite. La carte implique l'expertise des cartographes, expertise qui se traduit à travers le découpage et qui, jusqu'à nouvel ordre, ne peut être reproduit automatiquement. Cette caractéristique fondamentale fait de la carte un document particulier dont l'exploitation doit se plier à certaines règles et dont la moelle épinière, ce fameux découpage, ne peut pas être remis en cause. A partir de là, les informations caractérisant le contenu de chaque unité ne doivent aucunement être dissociées, sous peine de perdre la cohérence et la pertinence du tout. Sous ces conditions, la carte écologique devient alors une véritable base de données, dont chaque unité est une entité en tant que telle, caractérisée par un ensemble d'attributs la décrivant.

La carte écologique et son exploitation pour une discrétisation plus pertinente des bassins-versants, au delà des problèmes directement liés au domaine thématique de notre recherche, nous interpelle ainsi plus largement sur la problématique du numérique face aux données cartographiques de synthèse. Elle nous amène à réfléchir sur la nécessaire intégration de ce type de données synthétiques dans une démarche numérique et à porter un regard critique sur l'exploitation généralement faite de ces informations. Sans apporter de réelles solutions, ce travail pense avoir ouvert quelques pistes et réflexions pertinentes, en mesure de favoriser une plus juste exploitation d'informations complexes mais nécessaires dès lors que l'on s'attache à la compréhension globale des systèmes naturels et anthropiques.

REFERENCES

ABDENEGO, B.S.P. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Thèse No 806, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1989, 220 pages plus les annexes.

ABOTT, M.B., BATHURST J.C., CUNGE J.A., "An Introduction to the European Hydrological System, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-based, Distributed Modelling System. 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System." J. Hydrol. 87, 1986, pp 45-77.

ADDAD. Logiciel d'analyse des données, 1987. Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse des Données, 22 rue Charcot, 75013, PARIS.

AMBROISE, B. "Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré; Processus et modèles". Séminaire du conseil scientifique du Département Sciences du Sol de l'INRA, Dijon, 26-27 mars 1991, 33 pages.

ARONOFF, S. Geographic Information Systems: a Management Perspective. WDL Publications, Ottawa, Canada, 1989, 294 pages.

BAILEY, R. G. "The factor of scale in ecosystem mapping". In: Environmental Management, Vol 9, No 4, 1985, pp 271-276.

BAILEY, R. G. "Problems with using overlay mapping for planning and their implications for G.I.S.". In: Environmental Management, Vol 12, No 1, 1988, pp 11-17.

BARIL, P. Erodibilité des sols et érodabilité des terres: application au plateau vaudois. Thèse No 940 (1991) Département de Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, suisse, 1991, 218 pages et annexes.

BAUDRY, J. "Approches écologiques du paysage". In: Actes de la Table Ronde, PIREN-CNRS. La quadrature du paysage, Toulouse, 1988

BEGUIN, H. Méthodes d'analyse géographique quantitative, Litec, Paris, 1979, 252 pages.

BENMOUFFOK, D., FORTIN, J.P., POTVIN, L. "Estimation des données physiographiques et d'occupation des sols pour la modélisation hydrologique". Série Téledétection et Gestion des Ressources, l'aspect opérationnel. Vol V, Association Québécoise de Téledétection, 1985, pp 475-501.

BENZECRI, J-P. "Pratique de l'analyse des données". Editions Dunod, Paris, 1982.

BENZECRI, J-P. "Histoire et préhistoire de l'analyse des données: analyse des correspondances, exposé élémentaire". Editions Dunod, Paris, 1984.

BEVEN, K. J., WARREN, R., ZAOU, J. "SHE: toward a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology". In: Hydrological forecasting. IAHS Publications 129, 1980, pp 133-137.

BEVEN K.J. ET O'CONNELL P.E. "On the Role of Physically Based Distributed Modelling in Hydrology". Rep. No 81, Institut of Hydrology, Wallingford, 1982.

BEVEN, K.J.; KIRBY, M.J., SCHOFIELD, N., TAGG, A.F. "Testing a Physically-based Flood Forecasting Model (TOPMODEL) for Three U.K. Catchments". Journal of Hydrology, 69 1984, pp. 119-143.

BEVEN, K. J. "Distributed Models". In: Hydrologic Forecasting. Edited by M. G. Anderson and T. P. Burt, 1985, 405-435.

BEVEN, K. J., ERIC, F. WOOD, M. SIVAPALAN. "On hydrological Heterogeneity - Catchment Morphology and Catchment Response". In: Journal of Hydrology, 100, 1988, 353-375.

BEVEN, K. J. "Changing Ideas in Hydrology, The case of Physically Based Models". J. Hydrol., 105, 1989, pp 157-172.

BLANDIN P., LAMOTTE M. Article "Paysage -Ecologie". In Encycloepédia Universalis, 1990.

BONN, F. et ROCHON, G. Précis de télédétection: Volume 1, Principes et Méthodes. Universités francophones, UREF, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 1992, 485 pages.

BRUNET, Y. Modèles d'étude des bilans énergétiques et hydriques à partir des mesures spatiales dans l'infra-rouge thermique. INRA BIOCLIMATOLOGIE, Thiverval-Grignon. Rapport, 1989, 43 pages.

CHARBONNEAU, R., FORTIN, J.P., MORIN, G., POTVIN, L., SOCHANSKA, W. Simulation des débits de la rivière Eaton. INRS-Eau, rapport scientifique no 87, 1978, 83 pages.

CHARBONNEAU, R., FORTIN, J. P., MORIN, G. "The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management" In: Hydrological Sciences Bulletin, XXII, 1 3/1977, 1977, pp193-202.

CHEVALIER, J.J. "De l'information à l'action, vers des systèmes d'aide à la décision à référence spatiale". European Conference on Geographical Information Systems, Paris, 1994, pp 9-21.

CHRISMAN, N. R. "The error component in spatial data". In: Geographical Information Systems, 2 vol, Edited by D.J. Maguire, M. F. goodchild, D.W. Rhind. Longman Scientific & Technical, 1991.

CLEMENT, P. "Processus d'érosion et évolution du relief: exemples sous climats tempérés à hivers froids (Appalaches du Québec méridional: Comparaison avec la Suède centrale)". Thèse de Doctorat d'Etat présentée devant l'Université de Lyon 2, 1989.

CMED (Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement). Notre avenir à tous. Editions du Fleuve, Montréal, Ca, 1988.

COLE J.P. et KING C.A.M. Quantitative geography. Techniques and Theories in geography. Wiley, London, 1968, 692 pages.

COLLET C. Systèmes d'Information Géographique en mode image. Collection Gérer l'Environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1992, 186 pages.

COLLET C. et WILLEMIN G. Manuel résumé du logiciel IDRISI version 4.0. IGUF/EPFL, janvier 1993, 22 pages.

COMMISSION CANADIENNE de PEDOLOGIE. Le système canadien de classification des sols. Gouvernement du Canada, Ministère de l'Agriculture, Direction de la Recherche, Publication 1646, 1978. 170 pages.

COSTANZA R. "The ecological economic of sustainability, investing in natural capital". In: environmentally sustainable economic development: building on Brundtland, UNESCO, 1991.

DUCHAUFOUR Ph. Précis de pédologie. Masson éditeur, 1984

DUCRUC J-P. (?) . "La cartographie écologique". Cours de pédologie forestière, Direction du patrimoine écologique, Ministère de l'Environnement, Québec, 37 pages.

DUCRUC J-P. et de SEDE M-H. "Contribution de la cartographie écologique à la modélisation hydrologique spatiale du bassin supérieur de la rivière Eaton. Partie I: la carte écologique". Série Planification écologique. Ministère de l'environnement, Direction de la Conservation et du Patrimoine Ecologique, INRS-Eau, 1991, 62 pages.

DUNNE, T.; ZHANG W. et AUBRY B. "Effects os rainfall, vegetation and micro topography on infiltration and runoff". Water Resour. Res., 27, 9, 1991, pp 2271-2285.

ENGEL B. A. "Methodologies for development of hydrologic response units based on terrain, land cover, and soils data". In Second International Conference/Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling, 26-30 sept.1993, Breckenridge, Colorado - USA, 14 pages.

ESSADAQUI M. Méthodologie d'analyse des données de la carte écologique avec ou sans variables externes. INRS-Eau, Rapport de mini projet, 1992, 40 pages + annexes.

ESSADAQUI M, LACHANCE M. Corrélation d'une carte écologique avec une procédure basée sur les méthodes multidimensionnelles d'analyse des données: application à la réserve faunique de Mastigouche. INRS-Eau, Rapport Scientifique No 377, Juin 1993, 78 pages.

FORTIN, J.P., MORIN G., SOCHANSKA W. et POTVIN L. "Utilisation de la télédétection pour améliorer la précision des crues de fontes de neige simulées par le modèle CEQUEAU". In Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmision. Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983. IAHS Publ. no 145, pp613-623.

FORTIN, J.P., VILLENEUVE J.P., BOCQUILLON C. C. " HYDROTEL, PHYSITEL et IMATEL: an integrated application of remote sensing and GIS to hydrological modeling, on microcomputer". International Symposium on Remote Sensing and Water Resources; 1990, Enschede, The Netherlands, pp 793-803.

GOODCHILD M.F., KEMP K.K., THERIAULT M., ROCHE Y. Systèmes d'Information Géographique, Notes de Cours Volumes 1 et 2. LATIG, Département de Géographie, Université Laval, Québec, 1994, 710 pages.

HROMADKA T. V., McCUEN R. H., YEN C.C. "Effect of Watershed Subdivision on Prediction Accuracy of Hydrologic Models." In: Hydrosoft, 1988, vol 1, No 1, 10 pages.

HORTON, R.E. "Drainage Basins Characteristics ", Trans AGU, 13, 1932: 350-361.

JAMBU M. "Sur l'interprétation mutuelle d'une classification hiérarchique et d'une analyse des correspondances ". In: Revue de Statistiques Appliquées, 1976, vol. XXIV, No 2, pp 45-73.

JONCH-CLAUSEN, T. "Système Hydrologique Européen: a short description". SHE, Report 1, Danish Hydraulics Institute, Horsholm, Denmark, 1979.

JORDAN J-P. Identification et modélisation des processus de génération des crues, application au bassin versant de la Haute Mentue. Thèse No 1014. Département de Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1992, 318 pages.

JURDANT M., BELAIR J.L., DUCRUC J.P. "L'inventaire du Capital-Nature. Méthode de classification et de cartographie écologique du territoire". Direction Générale des Terres, Québec, 1977.

KIRBY M. J., CALLEN J., WEYMAN J., WOOD J. "Measurement and modelling of dynamic contribution areas in very small catchments". School Geogr., Univ. Leeds, Leeds, Work paper No. 167, 1976.

LANDRY, B. Etude morpho-sédimentologique du bassin de la rivière Eaton supérieure, Université de Sherbrooke, Département de géographie, thèse de maîtrise, 1974, 118 pages.

LA ROCHELLE P. Éléments de mécanique des sols, tome 1: Physique et Hydraulique des sols. Notes de cours GCI-10195, Faculté de Sciences et Génie, Génie Civil, Université Laval, Québec, 1983.

LAURINI R. et MILLERET-RAFFORT F. Les bases de données en Géomatique. Traité des Nouvelles Technologies, Série Géomatique, Edition Hermes, 1993, 340 pages.

LEFEBVRE J. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles, Masson éditeur, 1976, 219 pages.

LLAMAS J. Hydrologie Générale: Principes et applications. Gaetan Morin Editeur, Québec. 1985, 487 pages.

LOAGUE K. M. et FREEZE R. A. "A comparaison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments". Water Resources Research. 2, 21, 1985, pp 229-248.

MARSILY (de) G. Hydrogéologie Quantitative. Collection Sciences de la Terre. Masson éditeur, 1981, 194 pages.

MCDONALD, B. C. Surficial geology of La Patrie - Sherbrooke area, Quebec, including Eaton river watershed. Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Commission géologique du Canada, Papier 67-52, 1969, 21 pages.

MCDONALD, B. B. et SHILTS, W. W. Quaternary stratigraphy and events in southeastern Quebec". Bulletin de la Société Américaine de Géologie, vol. 82, 1971, pp 683-698.

MINISTERE DES RICHESSES NATURELLES DU QUEBEC; 1967. Rivière Eaton: Décennie hydrologique internationale. bassin représentatif. données météorologiques 1965. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, service météorologique, 89 pages.

MOORE. I, TURNER A. K., WILSON J.P., JENSON S.K. AND BAND L.E. "GIS and land surface and subsurface process modelling". In: First International Conference/workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling Proceedings. NCGIA, Santa Barbara, CA, 1991.

MORRIS E. M. "Forecasting floods flows in grassy and forested basins using a deterministic distributed mathematical model". In: Hydrological Forecasting, IAHS Publication 129. 1980, pp247-255.

MOUSSA R. Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique: Application au bassin du Gardon d'Anduze. Thèse de Doctorat, Académie de Montpellier, Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 1991, 314 pages.

MUSY A. ET SOUTTER M.. Physique du sol. Collection gérer l'environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1991, 335 pages.

NAVEH Z., LIEBERMAN A.S. Landscape ecology: Theory and application. Springer Series on Environmental Management. Robert S. DeSanto Ed., 1984, 356 pages

NEUMANN P., FETT W, SCHULTZ G.A., 1990. "A geographic information system as data base for distributed hydrological models". Proceedings of International Symposium Remote Sensing and Water Resources, A geographic Information System as Database for Distributed Hydrological Models, Ruhr University Bochium, 1990. 12 pages.

O'CONNELL, P. E. " A Historical Perspective î. In Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems", ed. Bowles, D.S. et P.E. O'Connell, Vol. NATO ASI Series. 1991, 667 pages

ODUM E.P. Fundamentals of ecology, Third edition. W.B. Saunders Company, 1971, 574 pages

O'LOUGHLIN, E. "Prediction of surface saturation zones in natural catchment by topographic analysis". Water Resource Research, 1986. 5, 22, pp.794-804.

OMI P. N., WENSEL L. C. ET MURPHY J. L. "An Application of Multivariate Statistics to Land-Use Planning: Classifying Land Units into Homogeneous Zones". In: Forest Science, Vol25, No 3, 1979, pp 399-414.

OZENDA P. La cartographie écologique et ses applications. Collection Ecologie appliquée et Sciences de l'Environnement, Masson, 1986, 156 pages.

PHILIPPS, M., BERDOULAY V. Le paysage comme système intégré d'unités spatiales et écologiques. Paysage et système: de l'organisation écologique à l'organisation visuelle, Editions de l'Université d'Ottawa, 1985, pp 21-22.

PRELAZ-DROUX, R., MUSY A. "A systémic approach of a land information system for sustainable land use planning". Communication au congrès CIGR 1994, Milan, Italie.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O. "The prediction of hillslope flows path for distributed hydrological modelling using digital terrain model". In: Hydrological processes, Vol 5, 59-79, 1991.

RAPPORT UNIL-EPFL 91. Analyse des paramètres géomorphologiques calculés à partir de modèles numériques d'altitude. LEUROC 1.1; Logiciel de l'Ecole polytechnique fédérale et de l'Université de Lausanne pour le Relif, l'Oriente et la Concavité. HYDRAM-EPFL, IGL-UNIL, 1991, 8 pages plus annexes.

RAWLS, W. J., BRAKENSICK D. L. ET SAXTON K. E. "Soil Water Characteristics", American Society of Agricultural Engineers, Papier no 81-2510, 1981, 5 pages + annexes.

RICHTER, K. G. ET SCHULTZ G. A. " Modelling the influence of landuse change on flood flows". In Water for the Future: hydrology in perspective. Rome, IAHS, no 164, 1987, pp 381-391.

ROUGERIE G. ET BEROUTCHACHVILI N. Géosystèmes et paysages, bilans et méthodes. Collection U géographie, Armand Colin éditeur, 1991, 302 pages.

SAKOUT, S. ET GUILBOT A. "Essais d'estimation des débits de pointe de crue à partir des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants en région méditerranéenne". Hydrol. Contient., 1988, 1, 3, pp 57-65.

SCHULTZ G.A. "Catchment Hydrology and Modelling - Water Management". Proceedings of International Symposium Remote Sensing and Water Resources, A geographic Information System as Database for Distributed Hydrological Models, Ruhr University Bochum, 1990. 13 pages

SEDE (DE) MARIE-H, GRIMAUD M., VILLENEUVE J. P. ET FORTIN J. P. "Conception d'un logiciel de corrections géométriques et de projections des images satellites sur micro-ordinateur; problèmes et atouts". Compte rendu du sixième congrès de l'Association Québécoise de Télédétection. Télédétection et gestion des ressources, ed. Monique Bernier, Ferdinand Bonn et paul Gagnon, volume VI, 1987, pp 253-264.

SHANNON, C.E. "A Mathematical Theory of Communication". In Bell System Techn. Journal, Juill. et Oct. 1948.

SINTON D. "The inherent structure of information as a constraint to analysis; map thematic data as a case study". In: Dutton G (ed). Harvard papers on Geographic Information Systems, Vol 6. Addison-wesley, Reading MA, 1978.

SLIVITZIKI A., ST-JULIEN P. "Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce", Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources, Direction Générale de l'exploitation géologique et minérale, 1987, 40 pages et une carte.

STRAHLER A.N. "Quantitative analysis of watershed geomorphology". Trans Am. Geophys. Union, 38, 1957: pp 913-920.

TERENCE R.S. "Requirements and Principles for Implementation and Construction of a Large Scale Geographical Information System". International Journal of Geographic Information Systems. Vol 1, no 1, 1987, pp 13-31.

THERIAULT M. "Les Systèmes d'Information Géographique, entre le Mythe et l'Utopie". Actes des Journées d'Etudes SIG et Gestion des Sols: Potentialités et Limites d'Application. 6-7 juillet 1992, EPFL, Lausanne.

TREMBLAY, R. Décennie hydrologique internationale: Bassin représentatif Rivière Eaton: traits caractéristiques du régime d'écoulement, 1966-1973. Ministère des Richesses Naturelles, Service de l'hydrométrie, 1976.

TRICART J. "Paysage et écologie". In: Revue de géomorphologie dynamique, 1979, 28 (3), pp 82-95.

TRICART J. "Schéma sur les mécanismes de causalité en Géomorphologie". In: Précis de Géomorphologie, Paris, Sedes, 1968, 322 pages.

TROLL C. "Die geographische Landschaft und ihre Erforschung". In studium generale 3, 4/5, Springer Verlag, Berlin, 1950, pp. 163-181.

TSUKAMOTO Y. ET OHTA T. "Runoff process on a steep forested slope". Journal of Hydrology no 102, 1988, pp 165-178.

VEILLETTE D., GERARDIN V. "Cadre écologique de référence de l'unité de gestion des Chic-Chocs (partie occidentale): quelques interprétations pour l'aménagement forestier". Contributions de la division des inventaires écologiques, rapport No 18, octobre 1985, 33 pages + annexes.

VIDALE, L, CLARAMUNT, C., DE SEDE, M.H. PRELAZ-DROUX, R. "Environmental analysis and GIS: Importance of Méta-information". AM/FM GIS, European Conference IX. Spatial Management in a Europe Without Border, October 13-15, 1993 - Strasbourg, France. Proceeding, 1993, pp 283-286.

VILLENEUVE, G.O. Sommaire climatique du Québec (volume 1), Ministère des Richesses Naturelles, Québec, 1967, 168 pages.

VILLENEUVE J.P., D. ISABEL. "Le modèle hydrologique MDOR et sa calibration automatique". Communication présentée au 52^{ème} Congrès de l'ACFAS, Université Laval, 9-11 mai 1984, 39 pages.

VILLENEUVE J.P., FORTIN J.P. "Evolution de la modélisation à l'INRS-Eau". Présentation donnée dans le cadre du Séminaire Eaux-Environnement no 3, Direction de la recherche et des affaires économiques et internationales, Ministère de l'Environnement, Paris, juillet 1993, pp 225-247.

VOLTZ M., BORNAND M.. "Analyse de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sol". Contribution à la recherche de méthodes quantitatives simples de cartographie des paramètres hydrodynamiques. Laboratoire de Sciences du Sol. ENSA-INRA, Montpellier, pp 102, 131.

WESSMAN C.A. "Spatial scales and global change; Bridging the gap from plots to GCM grid cells". Annu. Rev. Ecol. Syst. 1992, 23; 175-200.

WONNACOTT T.H. ET WONNACOTT R. J. Statistiques; Economie, gestion, sciences, médecine. Edition Economica, 4^{ème} édition, 1991, 919 pages.

WOOD E.F., SIVAPALAN M., BEVEN K. "Similarity and scale in catchment storm response", in Revue de géophysique, 28(1), 1990, pp 1-18.

WOOD E.F., SIVAPALAN M., BEVEN K., BAND L. "Effect of Spatial Variability and Scale with Implications to Hydrologic Modeling". Journal of Hydrology, 102, 1988, pp 29-47.

ZHANG W., MONTGOMERY D. R. "Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations". In: Water Resources Research, Vol 30, No 4, 1994, pp 1019-1028.

ZONNENVELD J.I.S. "Some Basic Notions in Geographical Synthesis". Geo Journal, 7, 2, 1983, pp 121-129, Wiesbaden.

ANNEXES

- Annexe 1** Répartition géographique des différents points de prélèvements aux Etats-Unis
- Annexe 2** Propriétés hydrologiques des sols
- Annexe 3** Description des 119 modèles présents sur le bassin-versant supérieur de la rivière Eaton
- Annexe 4** Modèle Numérique d'Altitude du bassin-versant de la rivière Eaton
- Annexe 5** Caractéristiques de l'image du bassin-versant
- Annexe 6** Résultats du programme Leuroc: évaluation des formes de pentes
- Annexe 7** Description du programme EPURMOYZ: calcul de paramètres par polygone cartographique
- Annexe 8** Description du programme SILHOUET: calcul des signatures paramétriques par polygone cartographique et tableau descriptif des différentes possibilités de silhouettes
- Annexe 9** Signatures paramétriques des 538 polygones cartographiques
- Annexe 10** Codage des 538 polygones cartographiques en fonction de leur capacité diffusante et réceptrice
- Annexe 11** Listage des résultats des analyses effectuées sur:
35 variables - 119 unités de référence
26 variables - 119 unités de référence
22 variables - 81 polygones cartographiques
- Annexe 12** Légende de la carte des types de dépôts
- Annexe 13** Valeurs prises par les différentes variables entrant dans l'analyse pour chaque polygone cartographique:
Type de dépôts
Indice de qualité de drainage
Pente moyenne
Orientation prédominante moyenne
Concavité - convexité prédominantes moyennes
Capacité diffusante, réceptrice et transmettrice
- Annexe 14** Les différents logiciels utilisés dans le cadre de la présente recherche

ANNEXE 1

Répartition géographique des différents points de prélèvement d'échantillon de
sol aux Etats-Unis
(d'après Rawls et al., 1981)



LEGEND
(13) Number of soils sampled

ANNEXE 2

Propriétés hydrologiques des sols
(d'après Rawls et al., 1981)

Texture class	Sample size	Total porosity (ϕ) cm ³ / cm ³	Residual saturation (θ_r) cm ³ / cm ³	Effective porosity (ϕ_e) cm ³ / cm ³	Bubbling pressure (ϕ_b)		Pore size distribution (λ)		Water retained at - 0.33 bar tension cm ³ / cm ³	Water retained at - 15 bar tension cm ³ / cm ³	Saturated Hydraulic Conductivity (K _s) cm / hr
					Arithmetic	Geometric ²	Arithmetic	Geometric ²			
Sand	762	0.437 ¹ (.374-.500)	0.020 (.001-.039)	0.417 (.352-.480)	15.98 (.24-31.72)	7.26 (1.36-1.090)	0.694 (.298-1.090)	0.592 (.334-1.051)	0.091 (.018-.164)	0.033 (.007-.059)	21.00
Loamy sand	338	0.437 (.368-.506)	0.035 (.003-.067)	0.401 (.329-.473)	20.58 (-4.04-45.20)	8.69 (1.80-41.85)	0.553 (.234-.872)	0.474 (.271-.827)	0.125 (.060-.190)	0.055 (.019-.091)	6.11
Sandy loam	666	0.453 (.351-.555)	0.041 (-.024-.106)	0.412 (.283-.541)	30.20 (-3.61-64.01)	14.66 (3.45-62.24)	0.378 (.140-.616)	0.322 (.186-.558)	0.207 (.126-.288)	0.95 (.031-.159)	2.59
Loam	383	0.463 (.375-.551)	0.027 (-.020-.074)	0.434 (.334-.534)	40.12 (-20.07-100.3)	11.15 (1.63-76.40)	0.252 (.086-.418)	0.220 (.137-.355)	0.270 (.195-.345)	0.117 (.069-.165)	0.68
Silt loam	1206	0.501 (.420-.582)	0.015 (-.028-.058)	0.486 (.394-.578)	50.87 (-7.68-109.4)	20.76 (3.58-120.4)	0.234 (.105-.363)	0.211 (.136-.326)	0.330 (.258-.402)	0.133 (.078-.188)	1.32
Sandy clay loam	498	0.398 (.332-.464)	0.068 (-.001-.137)	0.330 (.235-.425)	59.41 (-4.62-123.4)	28.08 (5.57-141.5)	0.319 (.079-.559)	0.250 (.125-.502)	0.255 (.186-.324)	0.148 (.085-.211)	0.43
Clay loam	366	0.464 (.409-.519)	0.075 (-.024-.174)	0.390 (.279-.501)	56.43 (-11.44-124.3)	25.89 (5.80-115.7)	0.242 (.070-.414)	0.194 (.100-.377)	0.318 (.250-.386)	0.197 (.115-.279)	0.23
Silty clay loam	689	0.471 (.418-.524)	0.040 (-.038-.118)	0.432 (.347-.517)	70.33 (-3.26-143.9)	32.56 (6.68-158.7)	0.177 (.039-.315)	0.151 (.090-.253)	0.366 (.304-.428)	0.208 (.138-.278)	0.15
Sandy clay	45	0.430 (.370-.490)	0.109 (.013-.205)	0.321 (.207-.435)	79.48 (-20.15-179.1)	29.17 (4.96-171.6)	0.223 (.048-.348)	0.168 (.078-.364)	0.339 (.245-.433)	0.239 (.162-.316)	0.12
Silty clay	127	0.479 (.425-.533)	0.056 (-.024-.136)	0.423 (.334-.512)	76.54 (-6.47-159.6)	34.19 (7.04-166.2)	0.150 (.040-.260)	0.127 (.074-.219)	0.387 (.332-.442)	0.250 (.193-.307)	0.09
Clay	291	0.475 (.427-.523)	0.090 (-.015-.195)	0.385 (.269-.501)	85.60 (-4.92-176.1)	37.30 (7.43-187.2)	0.165 (.037-.293)	0.131 (.068-.253)	0.396 (.326-.466)	0.272 (.208-.336)	0.06

¹ la première ligne figure la valeur moyenne
la seconde ligne figure les valeurs distantes de un écart-type de part et d'autre de la moyenne
² Antilog du log moyen.

ANNEXE 3

Equivalence entre le codage de base de
la carte écologique (codage Menviq) et
le codage de travail (538 polygones cartographiques)

Description des 119 modèles présents
sur le Bassin-versant de la Rivière Eaton supérieure
(tiré de la carte écologique)

**Bassin-versant de la rivière Eaton - Polygones cartographiques
Correspondance codage arbitraire / codage MenViq**

1	31	101	75	201	119	301	52	401	118	501	16
2	110	102	13	202	113	302	60	402	99	502	7
3	12	103	57	203	107	303	45	403	108	503	17
4	89	104	6	204	76	304	118	404	115	504	18
5	98	105	29	205	95	305	30	405	100	505	33
6	5	106	69	206	100	306	11	406	57	506	19
7	35	107	70	207	4	307	13	407	111	507	15
8	34	108	9	208	9	308	31	408	95	508	10
9	119	109	109	209	86	309	100	409	60	509	20
10	42	110	102	210	76	310	13	410	61	510	47
11	14	111	117	211	87	311	57	411	57	511	46
12	105	112	28	212	9	312	75	412	60	512	31
13	4	113	79	213	57	313	59	413	36	513	102
14	115	114	30	214	81	314	27	414	110	514	13
15	7	115	87	215	95	315	6	415	52	515	117
16	89	116	113	216	112	316	13	416	68	516	48
17	3	117	79	217	116	317	11	417	14	517	54
18	38	118	90	218	86	318	4	418	99	518	55
19	32	119	67	219	9	319	93	419	116	519	56
20	4	120	89	220	109	320	57	420	59	520	6
21	57	121	26	221	4	321	60	421	14	521	116
22	3	122	74	222	53	322	76	422	27	522	13
23	57	123	118	223	4	323	83	423	96	523	7
24	27	124	90	224	119	324	57	424	116	524	49
25	104	125	9	225	95	325	78	425	58	525	74
26	27	126	91	226	94	326	45	426	57	526	81
27	105	127	3	227	97	327	100	427	115	527	3
28	19	128	118	228	38	328	14	428	99	528	26
29	19	129	67	229	68	329	89	429	114	529	10
30	62	130	70	230	38	330	4	430	99	530	99
31	13	131	95	231	109	331	107	431	75	531	118
32	98	132	57	232	84	332	100	432	99	532	118
33	40	133	20	233	36	333	109	433	115	533	4
34	37	134	113	234	94	334	52	434	58	534	92
35	45	135	107	235	118	335	70	435	61	535	4
36	4	136	67	236	60	336	119	436	116	536	28
37	57	137	38	237	68	337	38	437	27	537	4
38	41	138	68	238	77	338	3	438	19	538	71
39	40	139	112	239	85	339	13	439	33		
40	39	140	89	240	62	340	118	440	29		
41	41	141	86	241	68	341	109	441	4		
42	56	142	95	242	86	342	64	442	31		
43	103	143	87	243	59	343	58	443	2		
44	30	144	117	244	107	344	3	444	117		
45	101	145	7	245	2	345	109	445	11		
46	103	146	4	246	31	346	118	446	26		
47	27	147	30	247	100	347	27	447	53		
48	29	148	4	248	109	348	4	448	54		
49	101	149	89	249	3	349	119	449	15		
50	30	150	94	250	6	350	25	450	26		
51	119	151	97	251	94	351	20	451	32		
52	104	152	91	252	89	352	97	452	3		
53	119	153	97	253	4	353	68	453	103		
54	104	154	88	254	9	354	104	454	11		
55	11	155	60	255	68	355	68	455	98		
56	8	156	100	256	27	356	107	456	117		
57	28	157	76	257	68	357	3	457	103		
58	27	158	75	258	74	358	58	458	6		
59	2	159	29	259	72	359	58	459	28		
60	104	160	60	260	87	360	14	460	23		
61	118	161	45	261	4	361	95	461	30		
62	11	162	101	262	111	362	109	462	21		
63	26	163	65	263	64	363	14	463	22		
64	8	164	47	264	74	364	50	464	21		
65	31	165	30	265	119	365	110	465	1		
66	8	166	31	266	86	366	95	466	5		
67	6	167	47	267	68	367	109	467	60		
68	25	168	8	268	71	368	114	468	6		
69	24	169	63	269	94	369	77	469	13		
70	78	170	47	270	109	370	57	470	8		
71	107	171	47	271	13	371	51	471	2		
72	107	172	30	272	109	372	95	472	26		
73	96	173	114	273	104	373	2	473	43		
74	68	174	47	274	110	374	64	474	52		
75	13	175	38	275	26	375	68	475	44		
76	68	176	57	276	74	376	115	476	102		
77	107	177	20	277	6	377	96	477	3		
78	62	178	30	278	47	378	4	478	45		
79	38	179	26	279	25	379	114	479	12		
80	66	180	94	280	82	380	95	480	98		
81	107	181	114	281	47	381	95	481	7		
82	113	182	62	282	119	382	12	482	38		
83	53	183	109	283	58	383	31	483	76		
84	62	184	38	284	74	384	103	484	45		
85	62	185	13	285	89	385	75	485	30		
86	13	186	38	286	96	386	31	486	94		
87	71	187	118	287	57	387	52	487	29		
88	73	188	100	288	97	388	38	488	97		
89	104	189	81	289	68	389	68	489	100		
90	94	190	17	290	80	390	76	490	52		
91	95	191	46	291	96	391	115	491	3		
92	71	192	47	292	80	392	55	492	7		
93	97	193	52	293	97	393	118	493	31		
94	68	194	110	294	109	394	119	494	117		
95	95	195	109	295	26	395	102	495	11		
96	71	196	60	296	86	396	114	496	98		
97	98	197	64	297	57	397	108	497	117		
98	98	198	14	298	100	398	94	498	98		
99	13	199	4	299	4	399	4	499	45		
100	73	200	109	300	75	400	27	500	3		

Unité cartographique			Types géomorphologiques					% de types géomorphologiques				
Numéro	Nom	Fréquence	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	P1	P2	P3	P4	P5
001	3AS/45*/A	1	3AS/45*	71/6*				80	20			
002	1A/2/b	4	1A/2	1AR/2	1A/3			60	30	10		
003	1A/2/a	11	1A/2	1A/3	1AR/2	1A/4		40	30	20	10	
004	1AR/2/a	21	1AR/2	1A/2	1A/3	R/1		50	20	20	10	
005	3BF/23/a	1	3BF/23	3BF/45	3BG/23			50	30	20		
006	1A/3/a	11	1A/3	1A/2	1A/3*			50	30	20		
007	1A/3*/A	7	1A/3*	1A/3	1A/4*			60	30	10		
008	1A/5/a	6	1A/5	1A/5*	1A/4			50	30	20		
009	1AR/2/C	6	1AR/2	1AR/3				90	10			
010	3BL/23/A	2	3BL/23	3BG/23	3BL/45	3AS/45*		50	20	20	10	
011	7TB/6/A	7	7TB/6	1A/5				70	30			
012	1A/2/B	3	1A/2	1A/3	1AR/2	1A/3*		50	20	20	10	
013	1A/2/B	14	1A/2	1A/3	1AR/2			60	20	20		
014	1AR/2/B	7	1AR/2	1A/2	1A/3			50	30	20		
015	4BL/45/A	1	4BL/45	4BL/45*				80	20			
016	1A/3/a	1	1A/3	1A/3*	1A/3			80	10	10		
017	1A/2/B	2	1A/2	1A/3				80	20			
018	4BL/23/a	1	4BL/23	4BL/45	4BL/45*			50	30	20		
019	4BL/23/b	4	4BL/23	4BL/45*	4BL/45			70	20	10		
020	4BL/23/d	4	4BL/23	4BL/45*	4BF/23			80	10	10		
021	4BL/45/A	2	4BL/45	4BL/23				70	30			
022	4BL/45/a	1	4BL/45	4BL/23	4BL/45*			50	40	10		
023	1A/3*/a	1	1A/3*	1A/3	1A/2	4BL/45		40	30	20	10	
024	1SS/2/a	1	1SS/2	1SS/3	1SS/4	S/1	1S/2	50	20	10	10	10
025	4BL/23/b	3	4BL/23	4BL/23*	4BL/45*			80	10	10		
026	1A/3/A	9	1A/3	1A/4				80	20			
027	1A/2/b	10	1A/2	1A/3*	1A/2*	1AR/2		50	20	20	10	
028	1A/2/d	4	1A/2	1A/2*	1A/2*	1A/5*		50	20	20	10	
029	1A/3/b	5	1A/3	1A/3*	1A/5*			60	20	20		
030	1A/3/A	10	1A/3	1A/2	1A/4			60	30	10		
031	1A/4/A	10	1A/4	1A/5	1A/5*			70	20	10		
032	1A/3*/B	2	1A/3*	1A/3	1A/2			50	30	20		
033	3AS/23*/A	2	3AS/23*	3AS/45*				80	20			
034	1AR/2/C	1	1AR/2	R/1	1A/2	1A/3		50	20	20	10	
035	1S/4/a	1	1S/4	1S/3	1S/5			70	20	10		
036	1AR/2/C	2	1AR/2	1AR/3	1A/2	1A/3		60	20	10	10	
037	1AR/2/c	1	1AR/2	1AR/3	R/1	1A/5*		50	20	20	10	
038	1A/2/C	11	1A/2	1A/3	1A/3*	1A/2*		70	10	10	10	
039	R/1/b	1	R/1	1AR/2	1AR/3			70	20	10		
040	1AR/2/b	2	1AR/2	1A/5*	1AR/3			50	30	20		
041	1AR/2/c	2	1AR/2	1AR/3	1A/3*	1A/2		50	30	10	10	
042	1A/2/b	1	1A/2	1A/3				70	30			
043	7AB/6*/A	1	7AB/6*	1A/5	1A/5*			50	30	20		
044	1SS/2/b	1	1SS/2	1SS/3	1S/5*	1S/3		50	30	10	10	
045	1A/3/a	7	1A/3	1A/2	1A/2	1A/5*		50	20	20	10	
046	4BL/23/a	2	4BL/23	4BL/45	4BL/45*			60	30	10		
047	4BL/23/A	9	4BL/23	4BL/45				60	40			
048	4BL/45/a	1	4BL/45	4BL/45*	4BL/23			70	20	10		
049	3BF/23/a	1	3BF/23	3AS/23*	3AS/45*			50	30	20		
050	7P/6/A	1	7P/6	1A/5*				80	20			
051	3BG/23/A	1	3BG/23	3BG/45	3BL/23	3AS/23*		40	30	20	10	
052	1A/2/b	7	1A/2	1A/3	1A/3*			80	10	10		
053	7TB/6*/a	3	7TB/6*	1A/5*	7P/6*			60	30	10		
054	1S/3/A	2	1S/3	1S/4	1S/3*			70	20	10		
055	1S/2/a	2	1S/2	1S/3	1S/4*	1S/5		50	30	10	10	
056	1A/3/a	2	1A/3	1A/2	1A/4*	1A/5		50	30	10	10	
057	1A/5*/B	17	1A/5*	1A/4*	1A/3*			60	20	20		
058	1A/3/B	6	1A/3	1A/2	1A/2*	1A/3*		70	10	10	10	
059	7PB/6/A	3	7PB/6	1A/5				90	10			
060	1A/3*/B	9	1A/3*	1A/3	1A/4	1A/5*		60	20	10	10	
061	3BG/23/a	2	3BG/23	3BG/45	4BL/23			60	20	20		
062	2AG/23/a	5	2AG/23	2AG/1	2AF/23			60	20	20		
063	2AG/23/a	1	2AG/23	1A/2	2AG/1			60	20	20		
064	3BG/23/b	4	3BG/23	3BG/45	3AS/45*			60	30	10		
065	3BG/23/a	1	3BG/23	3AS/23*	3AS/45*			50	40	10		
066	4BF/45/b	1	4BF/45	4BF/23	4BL/45	4BF/45*		50	30	10	10	
067	1A/2/d	3	1A/2	1A/3	1A/5*			70	20	10		
068	1A/3*/b	16	1A/3*	1A/3	1A/5*			50	30	20		
069	2AG/23/c	1	2AG/23	2AF/23	2AG/1			60	20	20		
070	1A/4/a	3	1A/4	1A/3*	1A/3	1A/5*		50	20	20	10	
071	7TB/6*/A	3	7TB/6*	1A/5	7TB/6			70	20	10		

072	2AG/23/A	1	2AG/23	1A/4	2AG/1			70	20	10		
073	2AG/23/a	2	2AG/23	2AG/45*	7T/6*			70	20	10		
074	4BL/23/A	6	4BL/23	4BL/45				90	10			
075	1AR/2/C	6	1AR/2	1AR/3	1AR/2*			70	20	10		
076	1AR/2/b	8	1AR/2	1AR/3	1A/2	1A/3		50	20	20	10	
077	1AR/3/a	1	1AR/3	1AR/2	1AR/4	1A/5*		50	30	10	10	
078	1AR/2/C	1	1AR/2	1AR/3	1A/3	1A/2	1A/3*	40	20	20	10	10
079	1AR/2/c	2	1AR/2	1AR/3	1A/3			70	20	10		
080	1A/2/c	2	1A/2	1AR/2	1A/3			60	20	20		
081	4BL/23/a	3	4BL/23	1A/3	4BF/23			60	30	10		
082	4BL/23/c	1	4BL/23	3BG/45	4BF/23	3AS/45*		50	20	20	10	
083	4BL/45/A	1	4BL/45	4BL/45*	4BL/23			60	20	20		
084	1A/4*/A	1	1A/4*	1A/5*	1A/4	4BL/5*		50	20	20	10	
085	1A/2/D	1	1A/2	7P/6*	2AG/23			80	10	10		
086	1A/3*/C	5	1A/3*	1A/3	1A/2*	1A/4*		50	30	10	10	
087	1A/2/c	4	1A/2	1A/3*	1A/3	1A/5*	1AR/2	40	20	20	10	10
088	1A/4*/a	1	1A/4*	1A/5*	7T/6*			70	20	10		
089	1A/5/a	8	1A/5	1A/4	7TB/6			50	30	20		
090	2AG/1/b	2	2AG/1	2AG/23	1A/2			60	30	10		
091	2AG/23/a	2	2AG/23	2AG/1	3AS/45*			70	20	10		
092	1AR/2*/d	1	1AR/2*	1AR/2	1AR/3*			50	30	20		
093	1AR/2/b	3	1AR/2	1A/5*	1AR/3			60	20	20		
094	1A/2/A	9	1A/2	1A/3				80	20			
095	1A/2/B	13	1A/2	1A/3	1A/3*			60	30	10		
096	1AR/2/c	4	1AR/2	1AR/3	1A/3*			60	20	20		
097	1AR/2/B	8	1AR/2	1A/2	1A/3			70	20	10		
098	1A/2/A	8	1A/2	1A/3				90	10			
099	1AR/2/a	6	1AR/2	1A/2	1A/3			60	30	10		
100	1A/2/a	11	1A/2	1A/3	1AR/2			70	20	10		
101	1A/2/A	3	1A/2	1A/3				70	30			
102	1A/3/a	4	1A/3	1A/2	1A/4			60	30	10		
103	1AR/2/b	4	1AR/2	1A/2	1A/3	R/1		40	30	20	10	
104	1A/3/a	8	1A/3	1A/2	1A/3*			60	20	20		
105	1A/3/a	2	1A/3	1A/2	1A/3*			60	30	10		
106	4BL/23/b	1	4BL/23	4BL/45	2AG/23			80	10	10		
107	1A/2/B	9	1A/2	1A/3	1A/3*			70	20	10		
108	1A/2/a	2	1A/2	1A/3	2AG/23			80	10	10		
109	1A/4/A	15	1A/4	1A/3	1A/3*			50	30	20		
110	1A/3/A	5	1A/3	1A/4	1A/3*	1A/2		70	10	10	10	
111	1A/2/C	2	1A/2	1A/2*	1A/3			80	10	10		
112	1A/2*/B	2	1A/2*	1A/2	1A/3*			50	40	10		
113	1A/2/a	4	1A/2	1A/3*	1A/4			50	30	20		
114	1A/4/a	6	1A/4	1A/4*	1A/3			50	30	20		
115	1A/4/a	6	1A/4	1A/2	1A/5			50	40	10		
116	1A/5*/b	5	1A/5*	1A/3	1A/2			50	30	20		
117	1A/4/A	7	1A/4	1A/5	1A/5*			80	10	10		
118	1A/5/A	12	1A/5	1A/5*	7PB/6*			70	20	10		
119	1A/4/b	10	1A/4	1A/5	1A/5*			80	10	10		

Clés de lecture

- **Dépôts de surface**

1	Dépôts glaciaires	
	1A	Till régional indifférencié épais (>0,5 m)
	1AR	Till régional indifférencié mince (entre 0,3 et 0,5 m) sur roc
	1S	Till local épais dérivé de schistes (>0,5 m)
	1SS	Till local mince dérivé de schistes (entre 0,3 et 0,5 m) sur schistes
2	Dépôts fluvio-glaciaires	
	2A	De contact glaciaire
	2AF	Sable fin
	2AG	Sable grossier, pierrosité > à 20%
3	Dépôts fluviatiles	
	3A	Alluvions actuelles
	3AS	Sable, pierrosité < à 20%
	3B	Alluvions subactuelles
	3BL	Limon et sable très fin
	3BF	Sable fin, pierrosité < à 20%
	3BG	Sable et gravier, pierrosité > à 20%
4	Dépôts glacio-lacustres	
	4BL	Argile et limon
	4BF	Sable fin, pierrosité < à 20%
7	Dépôts organiques	
	7P	Tourbe épaisse (> à 1 m)
	7A	Tourbe mince (entre 0,4 et 1 m) sur argile et limon
	7T	Tourbe mince (entre 0,4 et 1 m) sur till ou sable
8	Affleurements rocheux	
	R	Grès et placages de till
	S	Schistes et placages de till ou d'altérites

- **Drainage**

Classes de la commission canadienne de pédologie, 1978

1	excessif (sol très sec)
2	bon (sol sec)
3	modéré (sol frais)
4	imparfait (sol très frais)
5	mauvais (sol humide)
6	très mauvais (sol saturé)
*	l'astérisque souligne la présence de drainage oblique (seepage)

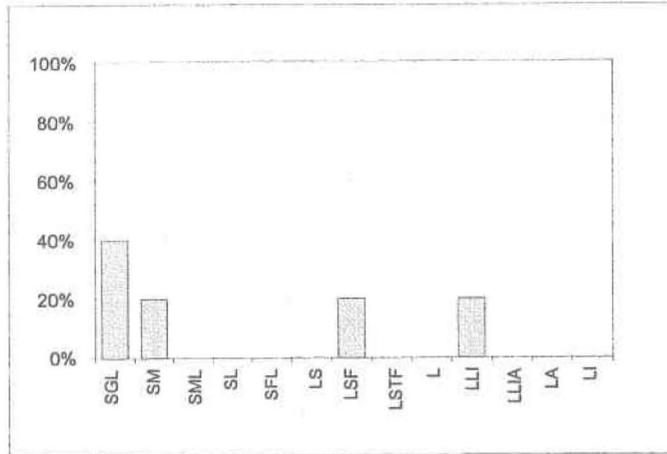
- **Pentes**

Classes de pente adaptées de Baril et Rochefort, 1979

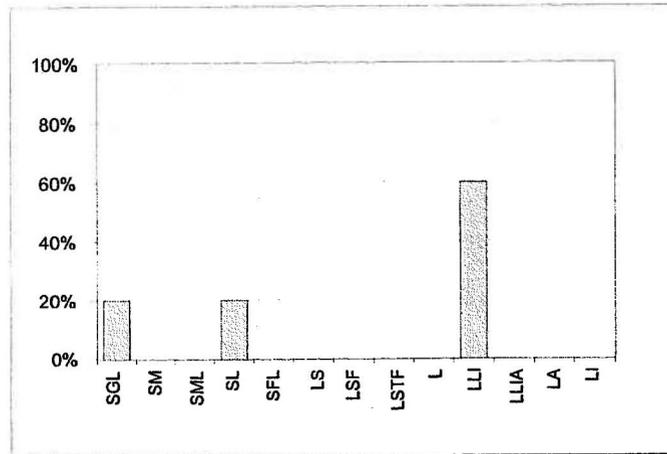
Pente simple (surface régulière)		Pentes multiples (surface irrégulière)		Déclivité (%)
A	Pente nulle	a	Unité faiblement ondulée	De 0 à 5
B	Pente faible	b	Unité fortement ondulée	De 5 à 10
C	Pente modérée	c	Unité faiblement vallonnée	De 10 à 15
D	Pente forte	d	Unité fortement vallonnée	De 15 à 30

Granulométrie des différents dépôts
du Bassin-versant de la Rivière Eaton

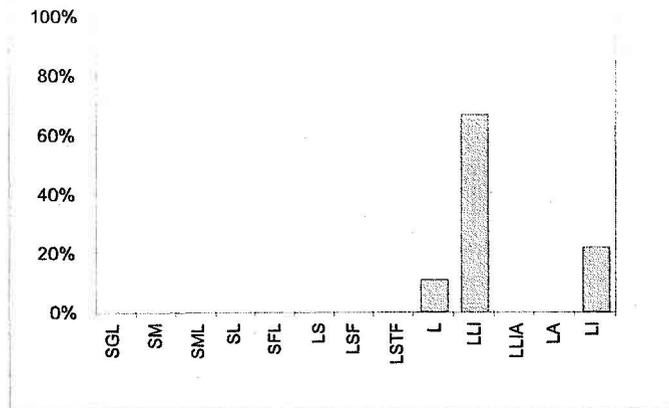
Texture AG	Fréquence: 5
SGL	40%
SM	20%
SML	0%
SL	0%
SFL	0%
LS	0%
LSF	20%
LSTF	0%
L	0%
LLI	20%
LLIA	0%
LA	0%
LI	0%



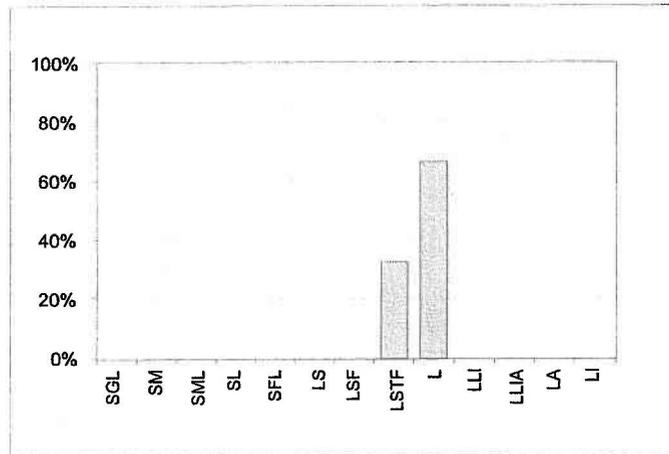
Texture 3BG	Fréquence: 5
SGL	20%
SM	0%
SML	0%
SL	20%
SFL	0%
LS	0%
LSF	0%
LSTF	0%
L	0%
LLI	60%
LLIA	0%
LA	0%
LI	0%



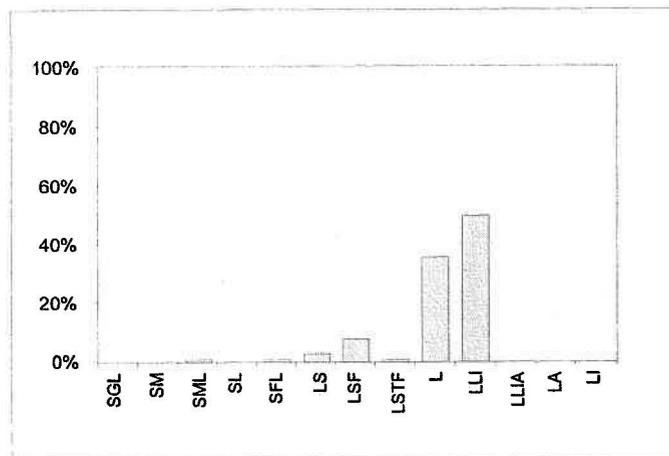
Texture 3BL	Fréquence: 9
SGL	0%
SM	0%
SML	0%
SL	0%
SFL	0%
LS	0%
LSF	0%
LSTF	0%
L	11%
LLI	67%
LLIA	0%
LA	0%
LI	22%



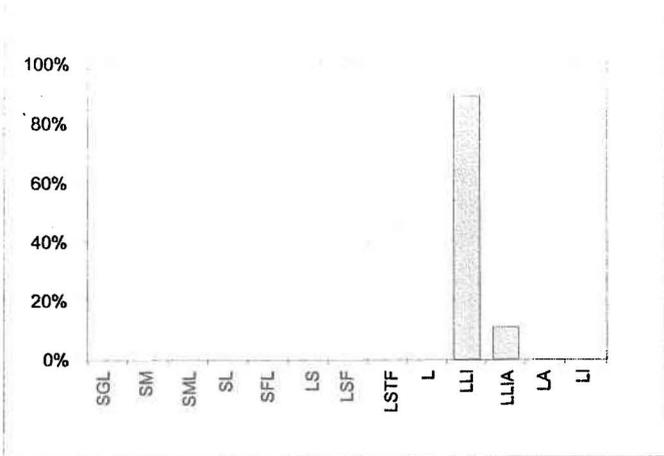
Texture 4BF	Fréquence: 3
SGL	0%
SM	0%
SML	0%
SL	0%
SFL	0%
LS	0%
LSF	0%
LSTF	33%
L	67%
LLI	0%
LLIA	0%
LA	0%
LI	0%



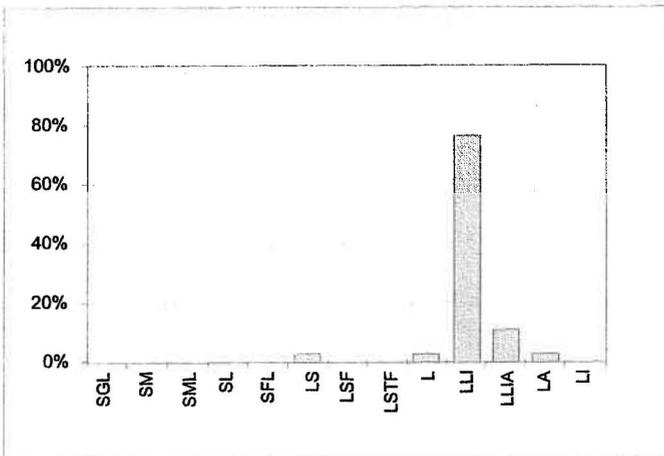
Texture 1A - 1AR	Fréquence: 80
SGL	0%
SM	0%
SML	1%
SL	0%
SFL	1%
LS	3%
LSF	8%
LSTF	1%
L	36%
LLI	50%
LLIA	0%
LA	0%
LI	0%



Texture 1S	Fréquence: 9
SGL	0%
SM	0%
SML	0%
SL	0%
SFL	0%
LS	0%
LSF	0%
LSTF	0%
L	0%
LLI	89%
LLIA	11%
LA	0%
LI	0%



Texture 1BL	Fréquence: 31
SGL	0%
SM	0%
SML	0%
SL	0%
SFL	0%
LS	3%
LSF	0%
LSTF	0%
L	3%
LLI	79%
LLIA	12%
LA	3%
LI	0%



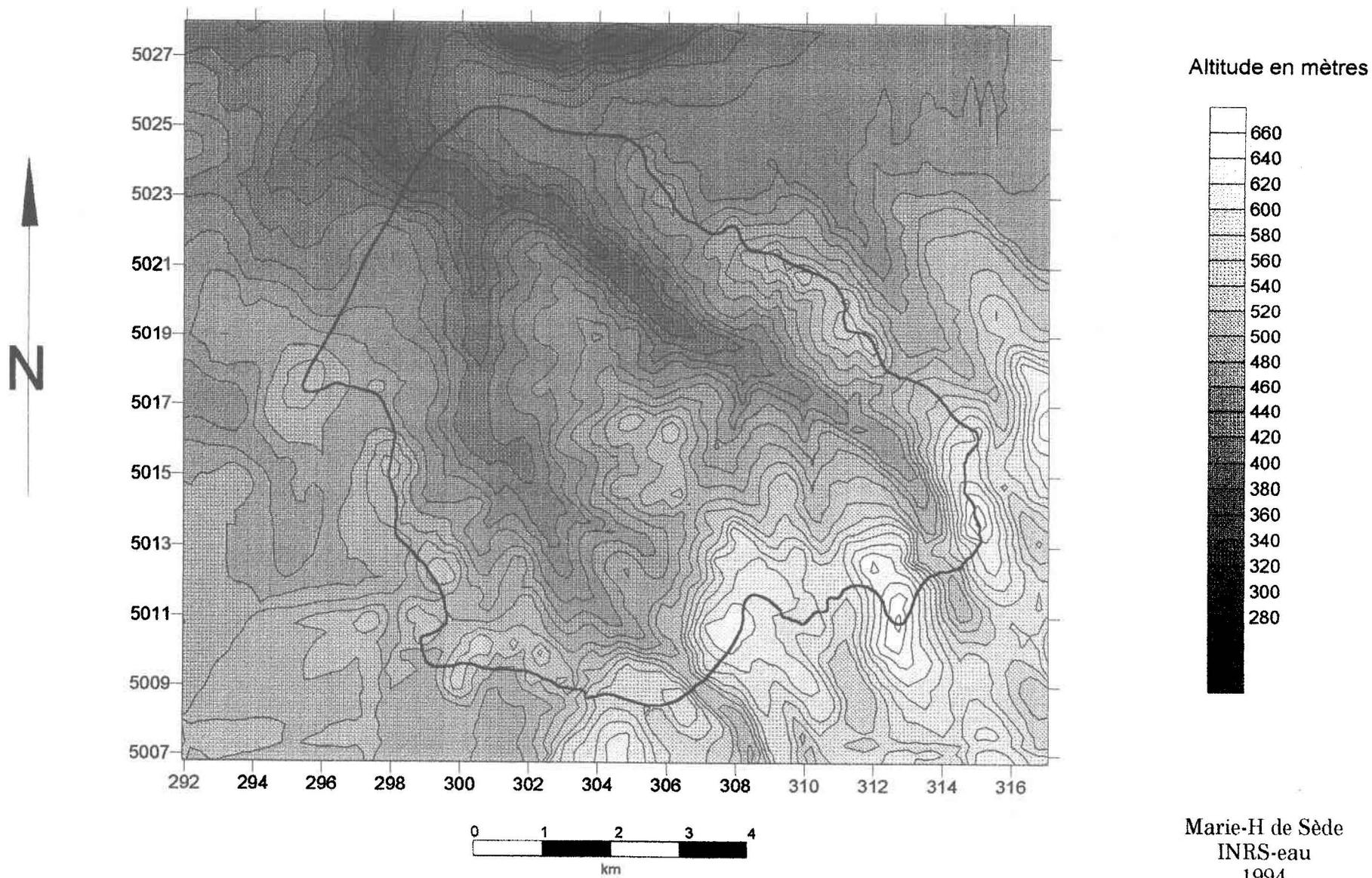
Autres:

2 AF	Fréquence: 1	Texture SF
3 AG	Fréquence: 1	Texture SF
3 AS	Fréquence: 2	Texture SF et STF
3 BF	Fréquence: 3	Texture SFL et SF

ANNEXE 4

Courbes de niveaux numérisées
Modèle Numérique d'Altitude (MNA)
du bassin-versant de la rivière Eaton à Sawyerville

MNA bassin-versant de la rivière Eaton



Marie-H de Sède
INRS-eau
1994

ANNEXE 5

Caractéristiques de l'image du bassin-versant

Coordonnées extrêmes de la zone:

Système de référence géodésique nord-américain, 1927

Projection transverse de Mercator

Quadrillage Universel Transverse de Mercator de Mille mètres

Min. x 295,4005127

Max. x 315,0851135

Min. y 5009,2319336

Max. y 5025,1889648

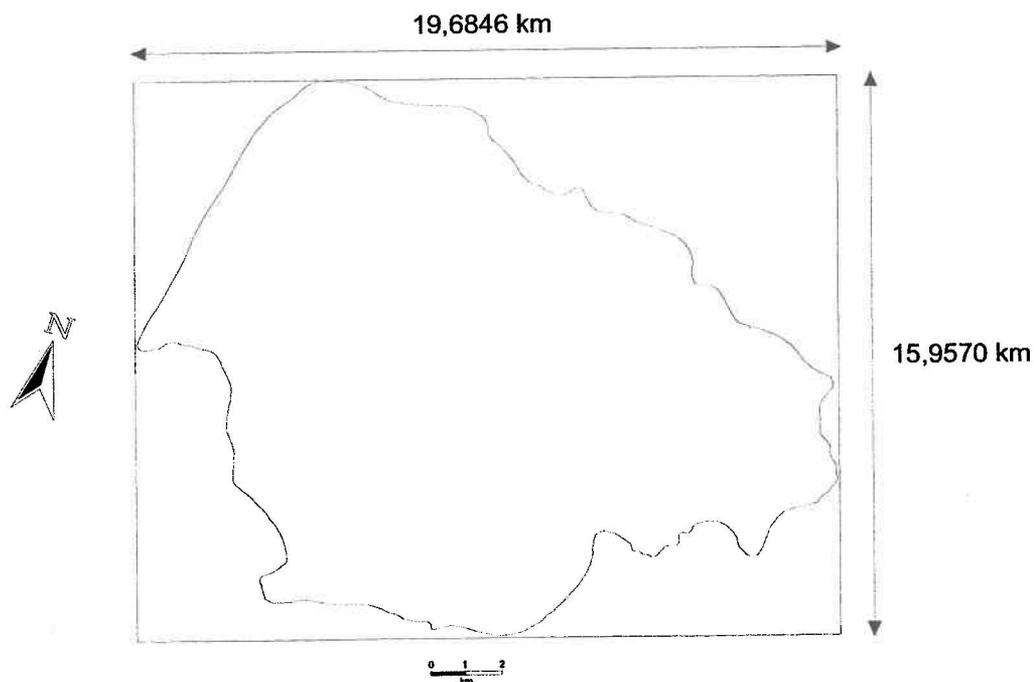
Dimensions standards des images:

984 colonnes • 798 lignes soient 785232 pixels

Résolution spatiale = 20 mètres

Superficie de l'image = 314,10 km²

Superficie du bassin-versant = 191,98 km²

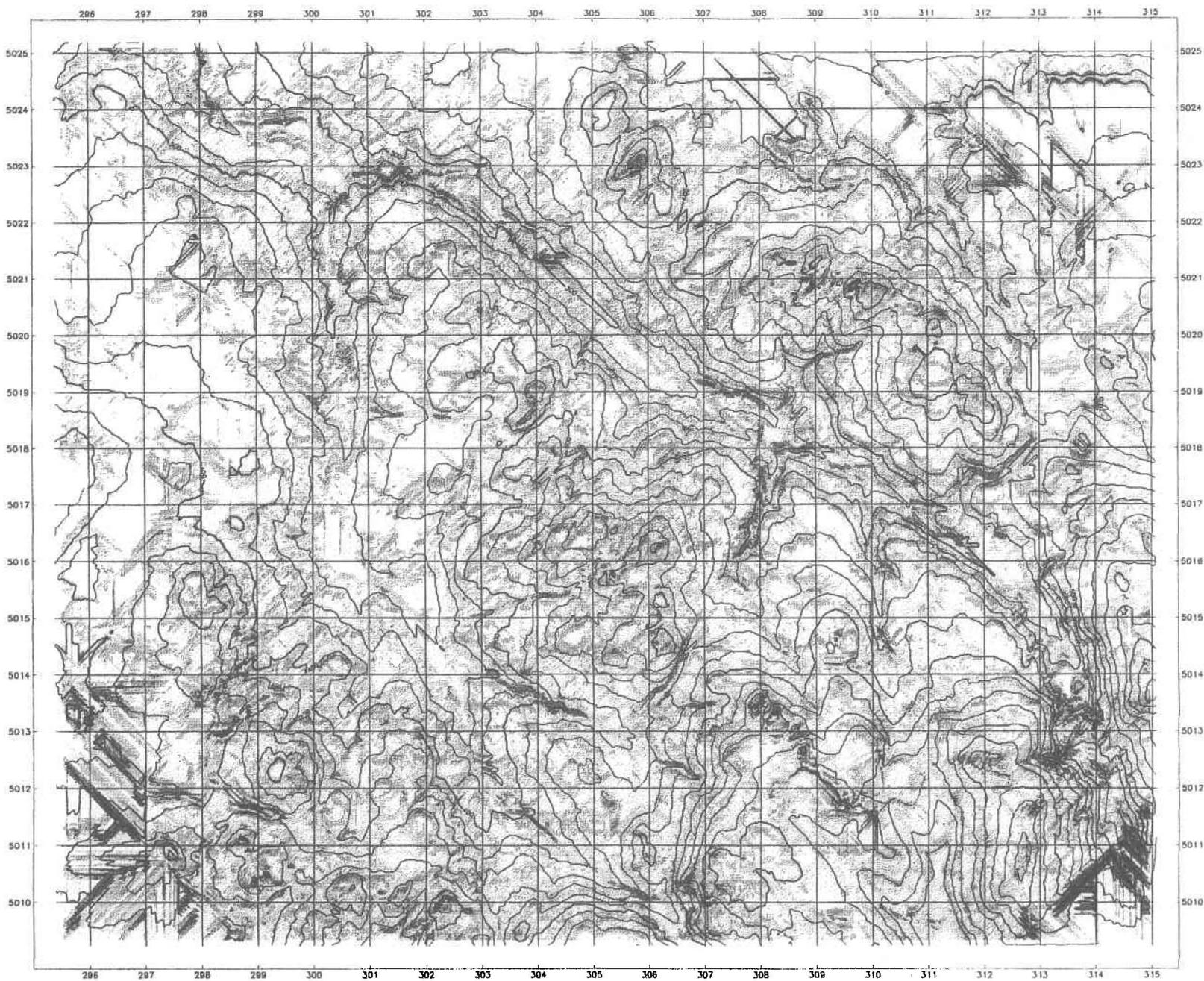


ANNEXE 6

Résultats du programme Leuroc:
évaluation des formes de pentes

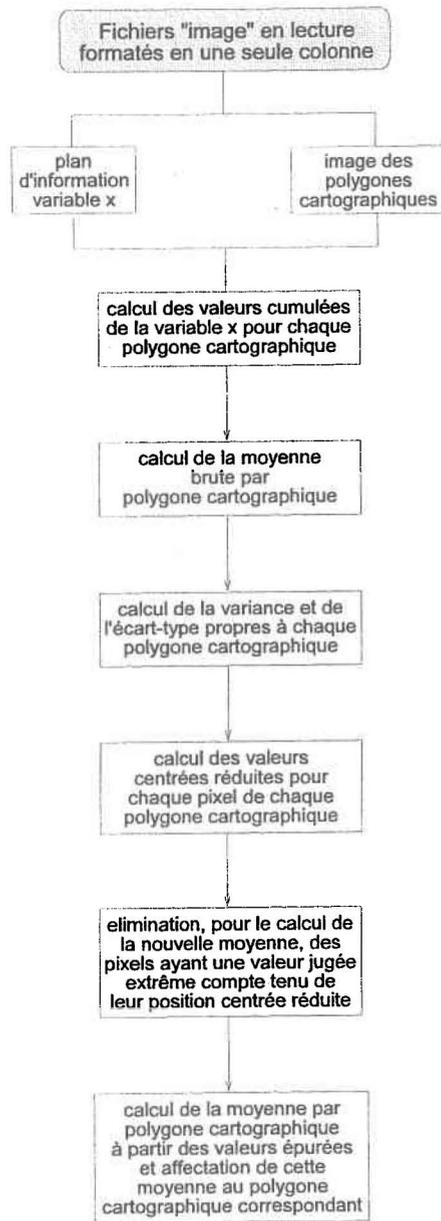
1:50'000

EATON : Convexité/Concavité 11x11



ANNEXE 7

Algorithme et programme EPURMOYZ:
calcul de paramètres moyens par polygone cartographique



EPURMOYZ.FOR

Calcul de valeurs moyennes par zones écologiques
après processus d'épuration des valeurs extrêmes

Patrick Marceau et Marie-H de Sède - 1994 - INRS-eau

Version 1.0 - 13/08/94

c

Déclaration des variables

c

```
character*80 paramoyz
character*80 fch1 , fch2 , fch3 , fch4 , fch5 , fch6 , fch7
real veczon (600,4) , vecsigma (600,5) , vecmoyz (600,4)
real var , diff2 , vcr
integer nbz , ntl , numz , nl , nc
```

c

Description des variables

c

```
numz = identificateur des zones
ntl = nbre. total de lignes des fichiers image traités
nbz = nbre. de zones traitées
var = variable traitée
diff2 = écart à la moyenne élevé au carré
vcr = valeur centrée réduite
ft_05 = paramoyz.dat
```

c

```
write (*,*) '
```

Calcul de valeurs moyennes
par zones écologiques après
processus d'épuration des
valeurs extrêmes

© Tricotel-GuerreMolle

c

```
write (*,*)
```

c

```
write (6,*) 'Nom du fichier de paramètres : '
read (6,'(a80)') paramoyz
open (unit=5,file=paramoyz,status='unknown')
write (6,*) ' '
```

c

```
read (5,'(a80)') fch1
read (5,'(a80)') fch2
read (5,'(a80)') fch3
read (5,'(a80)') fch4
read (5,'(a80)') fch5
read (5,'(a80)') fch6
read (5,'(a80)') fch7
read (5,*) nbz , nl , nc
```

c

```
open (unit=10, file= fch1, status='unknown')
open (unit=11, file= fch2, status='unknown')
open (unit=12, file= fch3, status='unknown')
open (unit=13, file= fch4, status='unknown')
open (unit=14, file= fch5, status='unknown')
open (unit=15, file= fch6, status='unknown')
open (unit=16, file= fch7, status='unknown')
```

c

```
write (6,*)
```

c

```
icompt = 0
ntl = nl * nc
```

c

```
do 20 i = 1 , nbz
do 22 j = 1 , 4
veczon (i,j) = 0
vecmoyz (i,j) = 0
```

22

```
continue
```

20

```
continue
```

c

```
do 23 i = 1 , nbz
do 24 j = 1 , 5
vecsigma (i,j) = 0
```

24

```
continue
```

```

23  continue
c
do 25 j = 1 , nbz
  veczon (j,1) = j
  vecsigma (j,1) = j
  vecmoyz (j,1) = j
25  continue
c

```

Calcul de la moyenne brute par zone écologique

```

c
do 30 i = 1 , ntl
  read (10,*) numz
  read (11,*) var
  z = float (i)
  zz = (z/ntl)*100
  write (6,223) numz , i , zz , '%'
  if (numz.eq.0) then
    goto 30
  else
    if (numz.ne.0) then
      do 35 j = 1 , nbz
        if (numz.eq.veczon(j,1)) then
          veczon (j,2) = veczon (j,2) + var
          veczon (j,3) = veczon (j,3) + 1
        endif
35      continue
        write (12,122) numz , var
        icompt = icompt + 1
      endif
    endif
30  continue
c
do 38 j = 1 , nbz
  veczon (j,4) = veczon (j,2) / veczon (j,3)
38  continue
c Ecriture des moyennes
do 40 i = 1 , nbz
  write (13,222) (veczon (i,j) , j = 1 , 4)
40  continue
c
write (6,*) ' Etape 1 terminée ...'
write (6,*) ''
c
do 41 ki = 10 , 13
  rewind (ki)
41  continue
c

```

Calcul de la variance par zone écologique

```

c
do 50 i = 1 , icompt
  read (12,122) numz , var
  t = float (i)
  tt = (t/icompt)*100
  write (6,223) numz , i , tt , '%'
  do 55 j = 1 , nbz
    if (numz.eq.veczon(j,1)) then
      diff2 = (var - veczon (j,4))**2
      vecsigma (j,2) = vecsigma (j,2) + diff2
      vecsigma (j,3) = vecsigma (j,3) + 1
      vecsigma (j,4) = veczon (j,4)
    endif
55  continue
50  continue
c

```

Calcul de l'écart-type par zone écologique

```

c
do 60 i = 1 , nbz
  sd = (vecsigma (i,2) / vecsigma (i,3))
  vecsigma (i,5) = sqrt (sd)
60  continue
  write (6,*)
c
write (6,*) ' Etape 2 terminée ...'
write (6,*) ''
c
do 61 k = 10 , 13
  rewind (k)
61  continue

```

c

Calcul des valeurs centrées réduites

c

```

do 70 i = 1 , icompt
  read (12,122) numz , var
  q = float (i)
  qq = (q/icompt)*100
  write (6,223) numz , i , qq , '%'
  do 75 j = 1 , nbz
    if (numz.eq.vecsigma(j,1)) then
      vcr = ((var - vecsigma (j,4)) / vecsigma (j,5))
      write (14,123) numz , var , vcr
    endif
  75 continue
70 continue

```

c

```

write (6,*) ' Etape 3 terminée ...'
write (6,*) ''

```

c

```

do 71 j=10 , 14
  rewind (j)
71 continue

```

c

Epuration des valeurs initiales à partir de leur position " centrée réduite " (essai avec [-1;+1] écart-type)

c

```

icomptn = 0

```

c

```

do 80 i = 1 , icompt
  read (14,123) numz , var , vcr
  if (vcr.ge.-1.and.vcr.le.1) then
    write (15,122) numz , var
    icomptn = icomptn + 1
  else
    endif
80 continue

```

c

```

rewind (15)

```

c

Calcul de la moyenne sur les valeurs épurées

c

```

do 90 i = 1 , icomptn
  read (15,122) numz , var
  s = float (i)
  ss = (s/icomptn)*100
  write (6,223) numz , i , ss , '%'
  do 95 j = 1 , nbz
    if (numz.eq.vecmoyz (j,1)) then
      vecmoyz (j,2) = vecmoyz (j,2) + var
      vecmoyz (j,3) = vecmoyz (j,3) + 1
    endif
  95 continue
90 continue

```

c

```

do 96 j = 1 , nbz
  vecmoyz (j,4) = vecmoyz (j,2) / vecmoyz (j,3)
  continue
96 continue

```

c

```

do 98 i = 1 , nbz
  write (16,222) (vecmoyz (i,j) , j = 1 , 4)
98 continue

```

c

```

write (6,*) ' Etape 4 terminée ...'
write (6,*) ''

```

c

```

121 format (5f8.3)
122 format (i5,3x,f6.2)
123 format (i5,3x,f6.2,3x,f6.3)
222 format (f5.0,4x,f12.3,4x,f8.0,4x,f6.2)
223 format ('+',4x,i4,3x,i8,3x,f6.2,1x,a1)

```

c

```

do 100 i = 10 , 16
  close (i)
100 continue

```

c

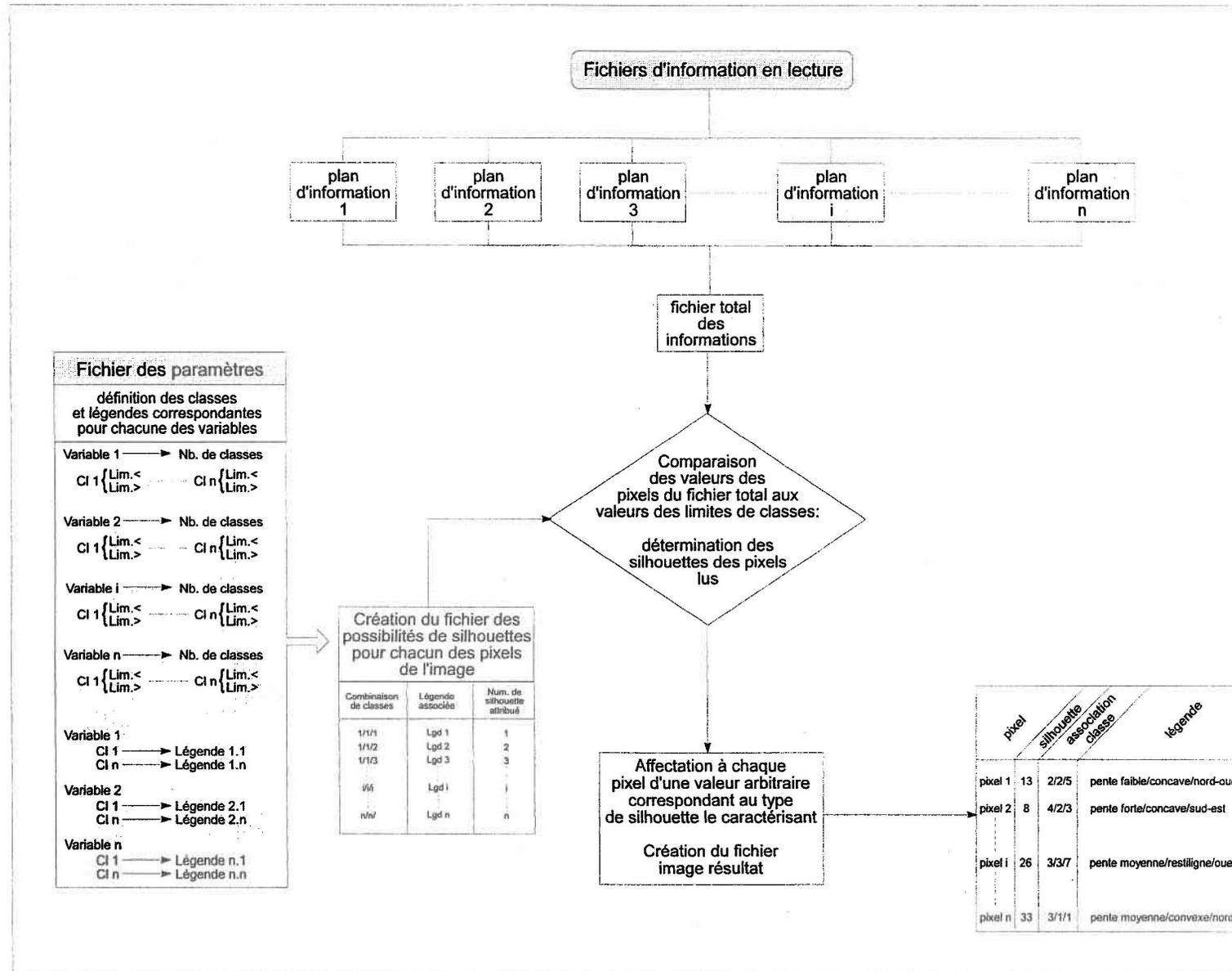
```

write (6,*) 'Fin'
stop 'Fin normale des traitements'
end

```

ANNEXE 8

Algorithme et programme SILHOUET:
tableau descriptif des différentes possibilités de silhouettes



Fichier des paramètres

définition des classes
et légendes correspondantes
pour chacune des variables

Variable 1 → Nb. de classes
Cl 1 {Lim.< Cl n {Lim.<
 {Lim.> {Lim.>

Variable 2 → Nb. de classes
Cl 1 {Lim.< Cl n {Lim.<
 {Lim.> {Lim.>

Variable i → Nb. de classes
Cl 1 {Lim.< Cl n {Lim.<
 {Lim.> {Lim.>

Variable n → Nb. de classes
Cl 1 {Lim.< Cl n {Lim.<
 {Lim.> {Lim.>

Variable 1 → Légende 1.1
Cl 1 → Légende 1.n
Cl n → Légende 1.n

Variable 2 → Légende 2.1
Cl 1 → Légende 2.n
Cl n → Légende 2.n

Variable n → Légende n.1
Cl 1 → Légende n.n
Cl n → Légende n.n

**Création du fichier des
possibilités de silhouettes
pour chacun des pixels
de l'image**

Combinaison de classes	Légende associée	Num. de silhouette attribué
1/1/1	Lgd 1	1
1/1/2	Lgd 2	2
1/1/3	Lgd 3	3
i/i/i	Lgd i	i
n/n/n	Lgd n	n

Ouverture des fichiers image traités

```
c
do 10 i = 1 , nbpi
open (unit=i+9, file= plinfo (i), status='unknown')
10 continue
c
open (unit=20, file= plinfot, status='unknown')
open (unit=21, file= posil, status='unknown')
open (unit=22, file= silpix, status='unknown')
open (unit=23, file= result, status='unknown')
c
write (6,*)
c
```

Début des traitements

```
c
nbtpos = 1
do 12 i = 1 , nbpi
nbtpos = nbtpos * nbcp (i)
12 continue
c
write (6,*) 'Nbre. total de classes de l''image résultat =',nbtpos
write (6,*)
c
```

Regroupement des fichiers image

```
c
ii = 0
nbtpix = nl * nc
c
write (6,*) 'Etape 1'
write (6,*) '-----'
write (6,*)
write (6,121) 'Regroupement des fichier en cours .....'
write (6,*)
c
do 20 i = 1 , nbtpix
ii = ii + 1
do 22 j = 1 , nbpi
read (9+j,*) valpix (j)
22 continue
write (20,119) (valpix (k) , k = 1 , nbpi)
z = float (ii)
write (6,120) ' _ % effectué : ', (z/nbtpix)*100, ' _ '
20 continue
c
write (6,121) 'Regroupement terminé.'
write (6,*)
c
119 format (3f7.1)
120 format ('+',a30,f6.2,a2)
121 format ('+',a50)
c
rewind (20)
c
```

Création du fichier des possibilités de silhouettes

```
c
write (6,*) 'Etape 2'
write (6,*) '-----'
write (6,*)
write (6,121) 'Création du fichier des possibilités .....'
write (6,*)
c
ik = 0
c
do 26 i = 1 , nbcp (1)
do 28 j = 1 , nbcp (2)
do 30 k = 1 , nbcp (3)
ik = ik + 1
write (21,100) i,j,k,ik,lgd(1,i),lgd(2,j),lgd(3,k)
30 continue
28 continue
26 continue
c
write (6,121) 'Création du fichier des possibilités terminée'
write (6,*)
c
100 format (3i2,i4,2x,3a11)
rewind (21)
c
```

Comparaison des valeurs des pixels du fichier original aux valeurs des fichiers des limites de classes
Détermination des silhouettes des pixels lus

```
c
write (6,*) 'Etape 3'
write (6,*) '-----'
write (6,*)
write (6,121) 'Détermination des silhouettes des pixels traités'
write (6,*)

c
    iii = 0
c
do 32 i = 1 , nbtpix
    iii = iii + 1
    read (20,119) (valpix (j) , j = 1 , nbpi)
do 34 jj = 1 , nbpi
do 36 k = 1 , nbcpj (jj)
    if (valpix (jj) .ge. lincpji (jj,k) .and. valpix (jj) .lt. lsupcpi (jj,k)) then
        nvalpix (jj) = k
    else
c
        goto 36
    endif
36 continue
34 continue
    write (22,133) (nvalpix (kk) , kk = 1 , nbpi)
    z1 = float (iii)
    write (6,120) '_ % effectué : ', (z1/nbtpix)*100, '_ '
32 continue
c
    write (6,121) 'Identification des silhouettes terminée'
    write (6,*)

c
133 format (3f5.1)
c
    rewind (22)
    rewind (21)
    rewind (20)

c
```

Comparaison des silhouettes des pixels lus aux types et affectation à chaque pixel de la valeur arbitraire correspondante

```
c
write (6,*) 'Etape 4'
write (6,*) '-----'
write (6,*)
write (6,121) 'Création de l"image résultat -----'
write (6,*)

c
    iki = 0
c
do 38 i = 1 , nbtpix
    iki = iki + 1
    read (22,133) (nvalpix (j) , j = 1 , nbpi)
do 40 k = 1 , nbtpos
    read (21,100) iv1 , iv2 , iv3 , varb , lgd1 , lgd2 , lgd3
    if (nvalpix (1) .eq. iv1 .and. nvalpix (2) .eq. iv2 .and. nvalpix (3) .eq. iv3) then
        write (23,101) varb
    else
c
        endif
40 continue
    rewind (21)
    z2 = float (iki)
    write (6,120) '_ % effectué : ', (z2/nbtpix)*100, '_ '
38 continue
c
    write (6,121) 'Fichier résultat créé'
    write (6,*)

101 format (i3)
c
do 50 i = 1 , nbpi
    close (i+9)
50 continue
c
do 51 k = 20 , 23
    close (k)
51 continue
c
write (*,*) 'Execution terminée'
write (*,*) 'Fin normale des traitements'
stop
end
```

Classe d'appartenance Variable 1	Classe d'appartenance Variable 2	Classe d'appartenance Variable 3	No. de la silhouette	Forme de la pente	Orientation	Pente
1	1	1	1	Concave	Nord	Pente très faible à nulle
1	1	2	2	Concave	Nord	Pente marquée
1	2	1	3	Concave	Nord-Est	Pente très faible à nulle
1	2	2	4	Concave	Nord-Est	Pente marquée
1	3	1	5	Concave	Est	Pente très faible à nulle
1	3	2	6	Concave	Est	Pente marquée
1	4	1	7	Concave	Sud-Est	Pente très faible à nulle
1	4	2	8	Concave	Sud-Est	Pente marquée
1	5	1	9	Concave	Sud	Pente très faible à nulle
1	5	2	10	Concave	Sud	Pente marquée
1	6	1	11	Concave	Sud-Ouest	Pente très faible à nulle
1	6	2	12	Concave	Sud-Ouest	Pente marquée
1	7	1	13	Concave	Ouest	Pente très faible à nulle
1	7	2	14	Concave	Ouest	Pente marquée
1	8	1	15	Concave	Nord-Ouest	Pente très faible à nulle
1	8	2	16	Concave	Nord-Ouest	Pente marquée
2	1	1	17	Rectiligne	Nord	Pente très faible à nulle
2	1	2	18	Rectiligne	Nord	Pente marquée
2	2	1	19	Rectiligne	Nord-Est	Pente très faible à nulle
2	2	2	20	Rectiligne	Nord-Est	Pente marquée
2	3	1	21	Rectiligne	Est	Pente très faible à nulle
2	3	2	22	Rectiligne	Est	Pente marquée
2	4	1	23	Rectiligne	Sud-Est	Pente très faible à nulle
2	4	2	24	Rectiligne	Sud-Est	Pente marquée
2	5	1	25	Rectiligne	Sud	Pente très faible à nulle
2	5	2	26	Rectiligne	Sud	Pente marquée
2	6	1	27	Rectiligne	Sud-Ouest	Pente très faible à nulle
2	6	2	28	Rectiligne	Sud-Ouest	Pente marquée
2	7	1	29	Rectiligne	Ouest	Pente très faible à nulle
2	7	2	30	Rectiligne	Ouest	Pente marquée
2	8	1	31	Rectiligne	Nord-Ouest	Pente très faible à nulle
2	8	2	32	Rectiligne	Nord-Ouest	Pente marquée
3	1	1	33	Convexe	Nord	Pente très faible à nulle
3	1	2	34	Convexe	Nord	Pente marquée
3	2	1	35	Convexe	Nord-Est	Pente très faible à nulle
3	2	2	36	Convexe	Nord-Est	Pente marquée
3	3	1	37	Convexe	Est	Pente très faible à nulle
3	3	2	38	Convexe	Est	Pente marquée
3	4	1	39	Convexe	Sud-Est	Pente très faible à nulle
3	4	2	40	Convexe	Sud-Est	Pente marquée
3	5	1	41	Convexe	Sud	Pente très faible à nulle
3	5	2	42	Convexe	Sud	Pente marquée
3	6	1	43	Convexe	Sud-Ouest	Pente très faible à nulle
3	6	2	44	Convexe	Sud-Ouest	Pente marquée
3	7	1	45	Convexe	Ouest	Pente très faible à nulle
3	7	2	46	Convexe	Ouest	Pente marquée
3	8	1	47	Convexe	Nord-Ouest	Pente très faible à nulle
3	8	2	48	Convexe	Nord-Ouest	Pente marquée

ANNEXE 9

Signatures paramétriques des 538 polygones cartographiques

Signature paramétrique par polygone cartographique

1	11	101	44	201	14	301	18	401	14	501	20
2	30	102	43	202	4	302	34	402	44	502	20
3	44	103	28	203	36	303	32	403	28	503	36
4	8	104	44	204	38	304	8	404	30	504	4
5	46	105	28	205	32	305	30	405	43	505	10
6	28	106	44	206	46	306	27	406	4	506	4
7	12	107	12	207	44	307	38	407	42	507	20
8	46	108	44	208	42	308	30	408	36	508	8
9	10	109	2	209	14	309	41	409	2	509	14
10	43	110	38	210	44	310	37	410	5	510	38
11	40	111	34	211	36	311	44	411	2	511	6
12	26	112	2	212	36	312	40	412	2	512	19
13	46	113	4	213	14	313	5	413	40	513	21
14	12	114	18	214	34	314	4	414	20	514	37
15	28	115	20	215	48	315	2	415	34	515	5
16	43	116	4	216	46	316	6	416	16	516	24
17	44	117	36	217	6	317	14	417	48	517	30
18	44	118	4	218	2	318	38	418	34	518	27
19	14	119	44	219	38	319	40	419	32	519	27
20	42	120	31	220	30	320	4	420	13	520	20
21	12	121	32	221	40	321	20	421	42	521	4
22	44	122	36	222	16	322	36	422	32	522	36
23	10	123	18	223	44	323	20	423	20	523	4
24	44	124	46	224	14	324	2	424	12	524	5
25	44	125	42	225	46	325	22	425	18	525	28
26	28	126	12	226	41	326	14	426	4	526	38
27	28	127	32	227	42	327	30	427	11	527	37
28	12	128	14	228	24	328	46	428	46	528	4
29	12	129	46	229	26	329	8	429	16	529	9
30	44	130	30	230	40	330	36	430	38	530	28
31	43	131	16	231	26	331	20	431	14	531	12
32	40	132	14	232	14	332	20	432	36	532	6
33	12	133	42	233	40	333	4	433	6	533	36
34	42	134	18	234	46	334	36	434	36	534	36
35	36	135	20	235	12	335	14	435	10	535	38
36	42	136	4	236	46	336	4	436	2	536	44
37	10	137	48	237	14	337	36	437	18	537	46
38	42	138	30	238	32	338	36	438	20	538	9
39	12	139	46	239	8	339	40	439	9		
40	42	140	32	240	28	340	4	440	2		
41	42	141	16	241	30	341	20	441	40		
42	46	142	32	242	30	342	11	442	12		
43	46	143	4	243	46	343	4	443	36		
44	24	144	12	244	18	344	22	444	27		
45	44	145	48	245	44	345	4	445	13		
46	42	146	34	246	18	346	4	446	30		
47	26	147	26	247	20	347	20	447	11		
48	28	148	36	248	12	348	36	448	44		
49	42	149	30	249	44	349	4	449	14		
50	27	150	46	250	44	350	42	450	46		
51	10	151	47	251	44	351	12	451	28		
52	41	152	12	252	30	352	46	452	44		
53	9	153	30	253	44	353	10	453	44		
54	25	154	5	254	44	354	42	454	14		
55	9	155	4	255	12	355	44	455	36		
56	25	156	2	256	44	356	44	456	6		
57	42	157	36	257	28	357	46	457	44		
58	26	158	20	258	28	358	12	458	48		
59	25	159	4	259	12	359	30	459	18		
60	31	160	32	260	18	360	42	460	30		
61	27	161	29	261	38	361	48	461	46		
62	29	162	36	262	34	362	14	462	30		
63	27	163	9	263	12	363	44	463	28		
64	13	164	42	264	12	364	11	464	44		
65	42	165	18	265	14	365	30	465	9		
66	26	166	32	266	8	366	42	466	20		
67	26	167	46	267	48	367	20	467	2		
68	42	168	14	268	4	368	6	468	18		
69	41	169	46	269	42	369	36	469	36		
70	40	170	46	270	20	370	3	470	2		
71	6	171	38	271	38	371	11	471	41		
72	42	172	36	272	32	372	42	472	30		
73	40	173	6	273	36	373	44	473	19		
74	26	174	38	274	20	374	12	474	18		
75	24	175	18	275	16	375	26	475	37		
76	10	176	14	276	32	376	10	476	21		
77	42	177	12	277	46	377	10	477	19		
78	42	178	32	278	36	378	38	478	19		
79	10	179	18	279	44	379	25	479	36		
80	28	180	43	280	12	380	42	480	21		
81	44	181	14	281	43	381	42	481	4		
82	28	182	30	282	8	382	40	482	4		
83	10	183	46	283	4	383	29	483	36		
84	46	184	46	284	36	384	38	484	17		
85	46	185	38	285	20	385	6	485	19		
86	43	186	38	286	20	386	20	486	36		
87	12	187	10	287	4	387	22	487	4		
88	14	188	20	288	36	388	40	488	38		
89	44	189	30	289	4	389	26	489	5		
90	46	190	30	290	36	390	42	490	38		
91	46	191	4	291	36	391	14	491	22		
92	13	192	18	292	36	392	46	492	22		
93	46	193	38	293	36	393	10	493	25		
94	14	194	6	294	8	394	11	494	19		
95	46	195	18	295	32	395	44	495	20		
96	29	196	18	296	12	396	14	496	35		
97	45	197	14	297	16	397	30	497	38		
98	48	198	36	298	38	398	42	498	37		
99	44	199	38	299	44	399	40	499	19		
100	14	200	20	300	10	400	32	500	21		

ANNEXE 10

Codage des 538 polygones cartographiques
compte tenu de leur capacité diffusante ou réceptrice

**CAPACITE DIFFUSANTE, RECEPTRICE ET TRANSMETTRICE
DES ZONES ECOLOGIQUES**

1.1	Diffusantes simples Sommets qui ne reçoivent jamais d'écoulement d'autres zones.	
1.1.3	Diffusantes simples de premier ordre <i>(diffusent vers 10 zones ou plus)</i>	[113]
1.1.2	Diffusantes simples de deuxième ordre <i>(diffusent vers 4 à 10 zones)</i>	[112]
1.1.1	Diffusantes simples de troisième ordre <i>(diffusent vers 2 ou 3 zones)</i>	[111]
1.1.0	Diffusantes simples de quatrième ordre <i>(diffusent vers 1 zone)</i>	[110]
1.2	Diffusantes complexes Versants généralement convexes qui reçoivent un écoulement de moins de zones que vers lesquelles ils ne diffusent.	
1.2.3	Diffusantes complexes de premier ordre <i>(diffusent vers 10 zones ou plus)</i>	[123]
1.2.2	Diffusantes complexes de deuxième ordre <i>(diffusent vers 4 à 10 zones)</i>	[122]
1.2.1	Diffusantes complexes de troisième ordre <i>(diffusent vers 3 zones)</i>	[121]
1.2.0	Diffusantes complexes de quatrième ordre <i>(diffusent vers 2 zones)</i>	[120]
2.1	Réceptrices simples Talweg qui ne diffusent jamais vers d'autres zones excepté vers une rivière.	
2.1.3	Réceptrices simples de premier ordre <i>(qui reçoivent de 10 zones et plus)</i>	[213]
2.1.2	Réceptrices simples de deuxième ordre <i>(qui reçoivent de 4 à 10 zones)</i>	[212]
2.1.1	Réceptrices simples de troisième ordre <i>(qui reçoivent de 3 zones)</i>	[211]
2.1.0	Réceptrices simples de quatrième ordre <i>(qui reçoivent de 2 zones)</i>	[210]
2.2	Réceptrices complexes Zones généralement concaves qui reçoivent un écoulement de plus de zones que vers lesquelles elles ne diffusent	
2.2.3	Réceptrices complexes de premier ordre <i>(qui reçoivent de 2 zones)</i>	[223]
2.2.2	Réceptrices complexes de deuxième ordre <i>(qui reçoivent de 4 à 10 zones)</i>	[222]
2.2.1	Réceptrices complexes de troisième ordre <i>(qui reçoivent de 3 zones)</i>	[221]
2.2.0	Réceptrices complexes de quatrième ordre <i>(qui reçoivent de 2 zones)</i>	[220]
3	Transmettrices Zones qui reçoivent d'autant de zones que vers lesquelles elles diffusent	
3.3	Transmettrices de premier ordre <i>(de 10 zones et plus vers 10 zones et plus)</i>	[33]
3.2	Transmettrices de deuxième ordre <i>(de 4 à 10 zones vers 4 à 10 zones)</i>	[32]
3.1	Transmettrices de troisième ordre <i>(de 2 à 3 zones vers 2 à 3 zones)</i>	[31]
3.0	Transmettrices de quatrième ordre <i>(de 1 zone vers 1 zone)</i>	[30]

ANNEXE 11

Listage des résultats des analyses effectuées sur:

35 variables et 119 unités de référence

26 variables et 119 unités de référence

22 variables et 81 polygones cartographiques

OCARTE 1 - TITRE DE L'ANALYSE
Bassin-versant Eaton - ANCOOR

OCARTE 2 - PARAMETRES GENERAUX : NI, NJ, NF, NZ, MZ, LECLJ, STFI, STFJ
119 35 5 0 1 3 3

OCARTE 3 - OPTIONS : IOUT, IVP, IP, JF, IGR
1 1 1 1 1

OCARTE 5 - DEMANDE DE GRANILHOUES :
12330431001330431002330431001533043100243304310000000000000000000

OCARTE 6 - NOMS DES VARIABLES :
dral dr4z dr4d dr4f dr4g dr4h dr4i dr4j dr4k dr4l dr4m dr4n dr4o dr4p dr4q dr4r dr4s dr4t dr4u dr4v dr4w dr4x dr4y dr4z
c111 c120 c121 c122 c123 c221 c222 c223 pie1 pie2 pie3 cave cvev rect

OCARTE 7 - FORMAT DES DONNEES
(8X.M.35F7.0)

1 LES POIDS DES LIGNES ET DES COLONNES SONT MULTIPLES PAR 10 ** 0
LES VALEURS DU TABLEAU SONT MULTIPLES PAR 10 ** 3

NOM(J) :	c10	c11	c120	c121	c122	c212	c213	c221	c222	c223	pie1	pie2	pie3	cave	cvev	rect	
PJ(J) :	14	3	7	1	1	5	2	21	7	1	24	77	11	35	39	38	715
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1 TABLEAU DES VALEURS PROPRES ET DES VECTEURS PROPRES

NUMERO	VAL PROPRE 1	VAL PROPRE 2	VAL PROPRE 3	VAL PROPRE 4	VAL PROPRE 5	VAL PROPRE 6
1	1.00000	0.51666	0.44988	0.40436	0.29694	0.26731
OBJET 1	-0.05289	0.22208	-0.44218	0.16997	-0.14213	0.03241
OBJET 2	-0.25284	0.15986	0.01484	-0.10987	0.23287	-0.05166
OBJET 3	-0.24223	-0.01236	0.12349	0.34476	-0.01229	-0.12673
OBJET 4	-0.11826	-0.07825	0.03703	-0.03046	-0.15934	0.04969
OBJET 5	-0.12955	-0.08629	0.09837	-0.02502	-0.33575	0.33122
OBJET 6	-0.09161	-0.45428	-0.30770	-0.10295	0.18413	-0.07837
OBJET 7	-0.15867	-0.20486	-0.06050	-0.03507	-0.15782	-0.16386

OBJET 9!	-0.09895	0.03202	-0.07887	0.41429	0.30827	0.14015
OBJET 10!	-0.06478	-0.02879	0.06035	-0.08398	-0.19239	0.05496
OBJET 11!	-0.05289	-0.05864	0.02883	0.02572	-0.25905	-0.09321
OBJET 12!	-0.09161	-0.45428	-0.30770	-0.10295	-0.16419	-0.07837
OBJET 13!	-0.03740	0.23860	-0.48440	0.08423	-0.31189	-0.05977
OBJET 14!	-0.30382	-0.18898	0.03624	0.13476	-0.08133	0.07042
OBJET 15!	-0.20139	0.11168	0.00764	-0.14441	0.11555	0.13936
OBJET 16!	-0.14959	0.18381	-0.19435	-0.03559	0.05307	-0.10221
OBJET 17!	-0.09895	0.05956	0.09430	-0.08287	-0.02388	-0.35003
OBJET 18!	-0.25087	-0.02146	-0.05665	0.00305	0.13241	0.17502
OBJET 19!	-0.11826	0.03700	0.07472	0.01444	-0.01177	-0.21288
OBJET 20!	-0.13993	0.09620	0.05472	-0.21485	0.13274	0.14805
OBJET 21!	-0.06478	0.23327	-0.38464	-0.00863	-0.19009	-0.06764
OBJET 22!	-0.09895	-0.08387	-0.03371	-0.10177	0.02305	0.08742
OBJET 23!	-0.03740	0.03440	0.05110	-0.05449	0.00236	-0.34880
OBJET 24!	-0.03740	0.02614	0.01082	-0.03967	0.03846	0.15296
OBJET 25!	-0.08362	0.02327	0.07726	-0.04695	-0.10259	0.20290
OBJET 26!	-0.05289	-0.00519	0.04559	0.23548	0.11033	-0.09523
OBJET 27!	-0.17138	0.00454	0.07683	0.06528	-0.08912	-0.16210
OBJET 28!	-0.09895	-0.05755	0.05972	0.17837	-0.13637	0.02975
OBJET 29!	-0.03740	-0.23393	-0.16263	-0.05580	0.07998	-0.11286
OBJET 30!	-0.18321	-0.00139	0.10843	0.01927	-0.18937	0.34326
OBJET 31!	-0.32817	0.08726	0.07440	-0.17876	-0.01584	-0.18220
OBJET 32!	-0.12403	0.02369	-0.03000	0.49296	0.31354	0.06616
OBJET 33!	-0.22125	-0.28860	-0.09057	-0.02275	-0.14398	0.15425
OBJET 34!	-0.23355	0.25055	-0.13657	-0.12638	0.28607	0.13470
OBJET 35!	-0.23054	0.00894	0.17906	0.19014	-0.12478	-0.30596

1 LES VALEURS PROPRES VAL(1) = 1.00000

NUM	ITER	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	!	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE
2	0	0.51666	10.514	10.514	!	.....
3	1	0.44988	9.155	19.669	!	.....
4	1	0.40436	8.229	27.897	!	.....
5	0	0.29694	6.043	33.940	!	.....
6	1	0.26731	5.440	39.380	!	.....
7	2	0.25518	5.193	44.573	!	.....
8	1	0.22338	4.546	49.119	!	.....
9	1	0.21869	4.450	53.569	!	.....
10	2	0.20322	4.136	57.704	!	.....
11	1	0.18901	3.846	61.551	!	.....
12	1	0.17998	3.663	65.213	!	.....
13	2	0.17451	3.551	68.765	!	.....
14	3	0.16957	3.451	72.215	!	.....
15	3	0.16451	3.348	75.563	!	.....
16	2	0.14616	2.974	78.537	!	.....
17	2	0.14445	2.940	81.477	!	.....
18	1	0.12928	2.631	84.108	!	.....
19	2	0.12543	2.553	86.660	!	.....
20	2	0.10712	2.180	88.840	!	.....
21	2	0.10353	2.107	90.947	!	.....
22	2	0.09354	1.903	92.851	!	.....
23	4	0.08815	1.794	94.645	!	.....
24	3	0.07381	1.502	96.146	!	.....
25	1	0.05203	1.059	97.205	!	.....
26	2	0.03982	0.810	98.016	!	.....
27	2	0.03602	0.733	98.749	!	.....
28	4	0.03253	0.662	99.411	!	.....
29	2	0.01394	0.284	99.694	!	.....
30	2	0.00751	0.153	99.847	!	.....
31	2	0.00482	0.098	99.945	!	.....
32	2	0.00172	0.035	99.980	!	.....
33	3	0.00097	0.020	100.000	!	.....
34	4	0.00000	0.000	100.000	!	.....
35	0	0.00000	0.000	100.000	!	.....

!	11	QLT	POID	INR!	1#F	COR	CTR!	2#F	COR	CTR!	3#F	COR	CTR!	4#F	COR	CTR!	5#F	COR	CTR!
1!	1!	203	7	26!	-684	26	6!	192	2	1!	-6	0	0!	-1776	174	74!	-114	1	0!
2!	2!	225	8	10!	468	37	4!	324	18	2!	-813	111	14!	188	6	1!	568	54	10!
3!	3!	66	7	7!	-36	0	0!	74	1	0!	-530	59	5!	159	5	1!	70	1	0!
4!	4!	226	7	4!	271	27	1!	220	18	1!	-631	145	7!	303	33	2!	104	4	0!
5!	5!	167	8	14!	-131	2	0!	501	31	5!	634	50	8!	-733	66	15!	-377	18	4!
6!	6!	111	8	5!	399	51	3!	187	11	1!	-96	3	0!	260	22	2!	-269	23	2!
7!	7!	207	10	5!	-158	10	0!	312	38	2!	247	24	1!	-291	33	3!	-717	201	19!
8!	8!	219	8	8!	-490	50	4!	59	1	0!	-287	17	2!	-573	68	9!	634	84	13!
9!	9!	418	8	4!	584	164	6!	-253	31	1!	-472	107	5!	490	115	7!	-29	0	0!
10!	10!	261	8	7!	-164	7	0!	484	56	4!	714	123	11!	-552	73	9!	92	2	0!

12!	12!	394	7	5!	507	78	3!	204	13	1!	-864	225	13!	471	67	5!	197	12	1!
13!	13!	130	7	2!	117	10	0!	97	7	0!	-322	77	2!	218	35	1!	32	1	0!
14!	14!	578	8	4!	601	144	6!	73	2	0!	-810	262	14!	597	142	10!	560	27	2!
15!	15!	560	8	5!	-408	56	3!	139	6	0!	-6	0	0!	-689	159	13!	1008	340	32!
16!	16!	370	8	3!	-17	0	0!	397	93	3!	369	80	3!	-244	35	2!	-520	160	8!
17!	17!	555	8	3!	472	146	4!	-30	1	0!	-552	200	6!	526	182	8!	200	26	1!
18!	18!	106	8	6!	-239	17	1!	291	25	2!	279	23	2!	-357	38	4!	80	2	0!
19!	19!	207	8	4!	287	39	1!	105	5	0!	-6	0	0!	201	19	1!	552	144	10!
20!	20!	187	7	9!	164	4	0!	626	66	6!	240	10	1!	-381	24	3!	-703	83	13!
21!	21!	333	10	10!	-118	3	0!	420	37	4!	47	0	0!	-750	117	19!	921	176	31!
22!	22!	560	8	5!	-408	56	3!	139	6	0!	-6	0	0!	-689	159	13!	1008	340	32!
23!	23!	158	10	3!	-407	115	3!	20	0	0!	99	7	0!	-217	33	2!	-71	3	0!
24!	24!	77	8	36!	361	6	2!	130	1	0!	-429	9	4!	305	4	3!	1093	57	38!
25!	25!	47	8	6!	22	0	0!	24	0	0!	209	13	1!	-323	32	3!	69	1	0!
26!	26!	91	8	4!	93	4	0!	387	69	3!	49	1	0!	1	0	0!	-186	16	1!
27!	27!	207	8	3!	318	50	2!	309	47	2!	-263	34	1!	57	2	0!	-391	75	5!
28!	28!	310	8	39!	475	10	4!	615	16	7!	-589	15	7!	19	0	0!	-2493	269	195!
29!	29!	41	10	3!	-239	33	1!	8	0	0!	-67	3	0!	-97	5	0!	-5	0	0!
30!	30!	205	8	2!	36	1	0!	285	68	2!	307	80	2!	-70	4	0!	-246	51	2!
31!	31!	109	8	5!	-356	46	2!	55	1	0!	-125	6	0!	-304	34	3!	247	22	2!
32!	32!	205	10	4!	-31	0	0!	274	36	2!	119	7	0!	-231	26	2!	529	135	10!
33!	33!	210	8	20!	-461	18	3!	298	8	2!	399	14	3!	-1133	111	36!	-828	59	22!
34!	34!	155	10	13!	523	42	5!	377	22	3!	-699	75	12!	79	1	0!	312	15	4!
35!	35!	198	8	7!	-383	38	2!	228	14	1!	45	1	0!	-643	108	12!	378	37	4!
36!	36!	288	8	4!	603	141	6!	-141	8	0!	-411	65	3!	315	38	3!	-303	36	3!
37!	37!	393	8	14!	1199	174	23!	-1205	176	27!	-496	30	5!	-87	1	0!	-320	12	3!
38!	38!	555	8	3!	472	146	4!	-30	1	0!	-552	200	6!	526	182	8!	200	26	1!
39!	39!	963	7	77!	3296	201	147!	-5827	629	528!	911	15	14!	-2476	114	144!	427	3	5!
40!	40!	96	8	4!	95	4	0!	112	6	0!	-417	83	4!	39	1	0!	-54	1	0!
41!	41!	418	8	4!	584	164	6!	-253	31	1!	-472	107	5!	490	115	7!	-29	0	0!
42!	42!	471	8	5!	555	100	5!	134	6	0!	-701	160	10!	432	61	5!	665	144	14!
43!	43!	572	8	47!	-3232	380	170!	-1956	139	71!	-603	13	8!	635	15	11!	-807	24	20!
44!	44!	217	8	8!	299	20	1!	12	0	0!	-617	85	8!	313	22	3!	636	90	13!
45!	45!	205	8	2!	-36	1	0!	285	68	2!	307	80	2!	-70	4	0!	-246	51	2!
46!	46!	211	8	4!	-287	36	1!	260	29	1!	322	45	2!	-427	79	5!	222	21	2!
47!	47!	211	7	3!	119	6	0!	41	1	0!	-56	1	0!	83	3	0!	674	199	12!
48!	48!	428	8	9!	-491	45	4!	277	14	1!	293	16	2!	-1006	188	29!	942	165	28!
49!	49!	189	8	17!	-232	5	1!	527	28	5!	871	76	16!	-876	77	22!	-170	3	1!
50!	50!	669	7	20!	-2538	465	87!	-1470	156	34!	-587	25	6!	580	24	8!	20	0	0!

!	11	QLT	POID	INR!	1#F	COR	CTR!	2#F	COR	CTR!	3#F	COR	CTR!	4#F	COR	CTR!	5#F	COR	CTR!
51!	51!	328	8	21!	-51	0	0!	388	12	3!	1800	265	67!	619	31	11!	-481	19	7!
52!	52!	237	8	7!	345	30	2!	-49	1										


```

177! 1! 91! 73! 0! 994!*
176! 1! 4! 99! 0! 995!*
175! 1! 37! 103! 0! 995!*
174! 1! 151! 118! 0! 995!*
173! 0! 149! 158! 0! 995!*
172! 0! 148! 150! 0! 996!*
171! 0! 86! 68! 0! 996!*
170! 0! 115! 147! 0! 996!*
169! 0! 2! 34! 0! 996!*
168! 0! 42! 44! 0! 996!*
167! 0! 160! 142! 0! 997!*
166! 0! 144! 74! 0! 997!*
165! 0! 156! 88! 0! 997!*
164! 0! 146! 70! 0! 997!*
163! 0! 140! 153! 0! 998!*
162! 0! 23! 29! 0! 998!*
161! 0! 7! 32! 0! 998!*
160! 0! 47! 55! 0! 998!*
159! 0! 50! 129! 0! 998!*
158! 0! 75! 61! 0! 998!*
157! 0! 136! 121! 0! 999!*
156! 0! 123! 114! 0! 999!*
155! 0! 137! 12! 0! 999!*
154! 0! 83! 21! 0! 999!*
153! 0! 52! 135! 0! 999!*
152! 0! 108! 112! 0! 999!*
151! 0! 8! 89! 0! 999!*
150! 0! 40! 13! 0! 999!*
149! 0! 141! 101! 0! 1000!*
148! 0! 93! 3! 0! 1000!*
147! 0! 119! 57! 0! 1000!*
146! 0! 60! 110! 0! 1000!*
145! 0! 78! 36! 0! 1000!*
144! 0! 46! 18! 0! 1000!*
143! 0! 54! 82! 0! 1000!*
142! 0! 19! 106! 0! 1000!*
141! 0! 107! 113! 0! 1000!*
140! 0! 132! 95! 0! 1000!*
139! 0! 138! 133! 0! 1000!*
138! 0! 134! 127! 0! 1000!*
137! 0! 125! 76! 0! 1000!*
136! 0! 122! 104! 0! 1000!*
135! 0! 130! 100! 0! 1000!*
134! 0! 111! 41! 0! 1000!*
133! 0! 96! 80! 0! 1000!*
132! 0! 38! 17! 0! 1000!*
131! 0! 51! 65! 0! 1000!*
130! 0! 94! 98! 0! 1000!*
129! 0! 11! 59! 0! 1000!*
128! 0! 62! 63! 0! 1000!*
127! 0! 9! 79! 0! 1000!*
126! 0! 45! 30! 0! 1000!*
125! 0! 14! 97! 0! 1000!*
124! 0! 67! 85! 0! 1000!*
123! 0! 117! 31! 0! 1000!*
122! 0! 102! 56! 0! 1000!*
121! 0! 105! 16! 0! 1000!*
120! 0! 22! 15! 0! 1000!*

```

1REPRESENTATION DE LA CLASSIFICATION HIERARCHIQUE

```

50**
!!
111!
!!
59-!
!
53!!
!!
71-!
!
43--

```

39-----

69-----

62! |

63- |

90-----

91-----

73- |

51! |

|

65- |

72- |

64! |

|

61- |

2-----

| | |

34- | |

| | |

42! | |

| | |

44- | |

| | |

24- | |

| | |

47! | |

| | |

55- | |

| | |

19! | |

| | |

106- | |

| | |

38**-----

!! |

17-! |

| | |

95-! |

| | |

52!! |

!! |

94!! |

!! |

98-! |

| | |

100-! |

| | |

4! |

!! |

99-! |

| | |

14! |

!! |

97-! |

| | |

76-! |

| | |

12-! |

| | |

111*- |

| | |

41- |

| | |

9! |

| | |

79- |

| | |

96! |

| | |

781
 !
 36-
 107!
 !
 113-
 101-
 75!
 !
 6-
 108!
 !
 112-
 27-
 77-
 93!
 !
 3-
 40!
 !
 13-
 37*-----
 !
 103-
 22*-----
 !
 15-
 66!
 !
 48-
 83!
 !
 21-
 115*-----
 !
 119!
 !
 57-
 117!
 !
 31-
 114-
 88-
 116!
 !
 35-
 84-
 8!
 !
 89-
 118-
 28*-----
 !
 87*-----
 !
 67!
 !

85-
 102**-----
 !!
 56-!
 !
 104-!
 !
 105!!
 !!
 16-!
 !
 20-!
 !
 71!
 !!
 32-!
 !
 58-!
 !
 23*-
 !
 29-
 86!
 !
 68-
 92-
 45!
 !
 30-
 26-
 60!
 !
 110-
 70-
 81!
 !
 109-
 46*-----
 !
 18-
 !
 74-
 !
 25-
 !
 54!
 !
 82-
 !
 10!
 !
 49!
 !
 5-
 !
 33*-----
 !
 1-

1FIN NORMALE DU PROGRAMME CAHVOR

1BIBLIOTHEQUE ADDAD - VERS. 83 -

0ANALYSE DES CORRESPONDANCES (ANCORR - 201)
 D'APRES : YAGOLNITZER ET TABET

0CARTE 1 - TITRE DE L'ANALYSE
 Bassin-versant Eaton - ANCORR

OBJET 161	-0.14959	0.17542	-0.18379	0.08969	0.02974	-0.16628
OBJET 171	-0.09895	0.06906	-0.02952	-0.10812	0.02163	0.07746
OBJET 181	-0.27735	-0.00584	-0.01950	0.03371	0.14436	-0.06014
OBJET 191	-0.19069	0.14267	-0.25291	-0.11510	-0.01985	0.14588
OBJET 201	-0.22439	-0.06671	0.20734	0.06143	-0.10267	0.11911
OBJET 211	-0.18321	0.10426	-0.13049	-0.03668	-0.15580	0.48199
OBJET 221	-0.32817	-0.00932	-0.02908	-0.20047	-0.01005	-0.24880
OBJET 231	-0.12403	0.01130	0.19731	0.47150	0.26376	-0.04490
OBJET 241	-0.22125	-0.31729	-0.07770	-0.01412	-0.13326	0.14178
OBJET 251	-0.23355	0.27796	-0.22847	0.02800	0.23327	0.00643
OBJET 261	-0.23054	0.00037	0.28587	0.04038	-0.07213	-0.06584

1 LES VALEURS PROPRES VAL(1)= 1.00000

NUM ITER ! VAL PROPRE ! POURCENT ! CUMUL ! HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE

! 2 ! 0 !	0.47320	13.844	13.844
! 3 ! 1 !	0.39045	11.423	25.267
! 4 ! 1 !	0.38133	11.156	36.424
! 5 ! 1 !	0.27612	8.078	44.502
! 6 ! 1 !	0.23024	6.736	51.238
! 7 ! 2 !	0.21888	6.404	57.642
! 8 ! 1 !	0.20506	5.999	63.641
! 9 ! 2 !	0.19513	5.709	69.349
! 10 ! 2 !	0.17337	5.072	74.422
! 11 ! 2 !	0.16746	4.899	79.321
! 12 ! 2 !	0.14820	4.336	83.656
! 13 ! 2 !	0.12759	3.733	87.389
! 14 ! 2 !	0.11050	3.233	90.622
! 15 ! 2 !	0.08736	2.556	93.178
! 16 ! 1 !	0.06262	1.832	95.010
! 17 ! 1 !	0.04541	1.329	96.338
! 18 ! 2 !	0.04005	1.172	97.510
! 19 ! 4 !	0.03662	1.071	98.581
! 20 ! 2 !	0.02919	0.854	99.435
! 21 ! 1 !	0.00883	0.258	99.694
! 22 ! 2 !	0.00761	0.222	99.916
! 23 ! 2 !	0.00187	0.055	99.971
! 24 ! 3 !	0.00100	0.029	100.000
! 25 ! 1 !	0.00000	0.000	100.000
! 26 ! 3 !	0.00000	0.000	100.000

! I1 ! QLT POID INR1 ! 1#F COR CTR1 ! 2#F COR CTR1 ! 3#F COR CTR1 ! 4#F COR CTR1 ! 5#F COR CTR1

11 1 ! 691	7 371	-791 35	91 381	8 31	-360 7	21-1927 205 941-2807 436 2391
21 2 ! 270	8 51 455 110	41 -253 34	11 -467 116	51 110	6 01 93 5 01	
31 3 ! 255	7 41 333 61	21 -342 64	21 -472 123	41 104	6 01 41 1 01	
41 4 ! 255	7 41 333 61	21 -342 64	21 -472 123	41 104	6 01 41 1 01	
51 5 ! 182	8 191 -220 6	11 937 114 191 188	5 11 -580 44 101 325 14 41			
61 6 ! 200	8 41 393 105 31	-27 1 01 -67 3	01 335 76 31 -152 16 11			
71 7 ! 348	10 41 -229 39	11 365 98 31 10 0	01 -127 12 11 -519 199 111			
81 8 ! 248	8 71 -254 24	11 -124 6 01 -351 45	31 -624 142 121 296 32 31			
91 9 ! 508	8 51 656 215	81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41			
101 10 ! 522	8 51 -137 10	01 764 313 131 156 13	11 -283 43 21 515 143 101			
111 11 ! 926	7 211-2563 638 971-1501 219	401 260 7 11 762 56 151 268 7 21				
121 12 ! 437	7 51 606 155 51 -488 101	41 -615 160 71 224 21 11 5 0 01				
131 13 ! 181	7 31 179 26 01 -90 7	01 -327 87 21 229 42 11 -155 20 11				
141 14 ! 642	8 51 703 268 91 -570 176	71 -493 132 51 353 67 41 9 0 01				
151 15 ! 407	8 71 -442 67 31 219 16 11 -161 9	11 -657 148 131 697 167 181				
161 16 ! 336	8 31 -78 5 01 630 307 91 87	6 01 -147 17 11 -49 2 01				
171 17 ! 576	8 41 575 229 61 -360 90 31 -372 96	31 457 145 61 -155 17 11				
181 18 ! 322	8 41 -331 64 21 333 64 21 91	5 01 -169 17 11 545 173 111				
191 19 ! 163	8 51 334 55 21 106 6 01 2 0	01 198 19 11 413 83 61				
201 20 ! 166	7 121 170 5 01 723 87 91 -130	3 01 -162 4 11 631 67 121				
211 21 ! 440	10 61 -216 21 11 547 133 71 -65	2 01 -587 154 121 541 130 121				
221 22 ! 407	8 71 -442 67 31 219 16 11 -161 9	11 -657 148 131 697 167 181				
231 23 ! 278	10 41 -434 135 41 138 14 01 -24	0 01 -168 20 11 -387 108 61				
241 24 ! 366	8 51 417 85 31 -314 49 21 -305 46	21 116 7 01 603 179 131				
251 25 ! 129	8 71 -68 2 01 236 20 11 179	11 11 -263 24 21 453 72 71				
261 26 ! 57	8 41 96 6 01 255 43 11 -59	2 01 -88 5 01 -10 0 01				
271 27 ! 162	8 41 331 66 21 175 19 11 -337 69	31 75 3 01 -82 4 01				
281 28 ! 155	8 101 507 64 51 -85 2 01 -583 85	71 106 3 01 85 2 01				
291 29 ! 150	10 51 -239 34 11 34 1 01 -126	10 01 -82 4 01 -413 102 71				
301 30 ! 228	8 31 -32 1 01 464 195 51 62	3 01 16 0 01 -174 27 11				
311 31 ! 106	8 71 -365 50 21 33 0 01 -237 21	11 -285 30 21 104 4 01				
321 32 ! 224	10 51 -57 3 01 403 91 41 -71	3 01 -181 18 11 -438 108 81				
331 33 ! 736	8 281 -547 26 51 638 35 91 -19	0 01 -1170 118 421 -2538 556 2351				
341 34 ! 263	10 101 511 75 51 -144 6 11 -409 48	41 96 3 01 678 131 201				
351 35 ! 386	8 81 -471 65 41 332 32 21 -143	6 01 -584 100 101 794 184 231				

371 37 ! 562	8 61 785 256 111 -710 210	111 -310 40 21 322 43 31 -178 13 11
381 38 ! 576	8 41 575 229 61 -360 90 31 -372 96	31 457 145 61 -155 17 11
391 39 ! 953	7 931 2225 109 731-3880 331 2701 3498	269 2241-3318 242 2791 334 2 31
401 40 ! 97	8 41 91 5 01 -90 5 01 -377 84	31 27 0 01 72 3 01
411 41 ! 508	8 51 656 215 81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41
421 42 ! 480	8 61 644 172 71 -436 79 41 -424 75	41 216 19 11 574 136 121
431 43 ! 889	8 201-2417 717 1041-1123 155 271 192	5 11 308 12 31 -84 1 01
441 44 ! 480	8 61 644 172 71 -436 79 41 -424 75	41 216 19 11 574 136 121
451 45 ! 228	8 31 -32 1 01 464 195 51 62	3 01 16 0 01 -174 27 11
461 46 ! 504	8 51 -377 74 31 498 130 51 116	7 01 -332 58 31 670 235 161
471 47 ! 164	7 41 152 11 01 22 0 01 -34	1 01 92 4 01 567 148 101
481 48 ! 565	8 81 -488 77 41 385 48 31 -136	6 01 -820 217 201 821 218 251
491 49 ! 182	8 191 -220 6 11 937 114 191 188	5 11 -580 44 101 325 14 41
501 50 ! 874	7 221-2410 533 861-1753 282 551 115	1 01 637 37 101 465 20 71

! I1 ! QLT POID INR1 ! 1#F COR CTR1 ! 2#F COR CTR1 ! 3#F COR CTR1 ! 4#F COR CTR1 ! 5#F COR CTR1

511 51 ! 551	8 71 -118 5 01 910 291 181 823 238	151 213 16 11 17 0 01
521 52 ! 642	8 51 703 268 91 -570 176 71 -493 132	51 353 67 41 9 0 01
531 53 ! 941	7 231-2841 710 1191-1533 207 421 176	3 11 461 19 51 -207 4 11
541 54 ! 475	10 41 -121 11 01 644 303 101 151 17	11 -169 21 11 411 123 71
551 55 ! 227	8 41 288 51 11 -105 7 01 -184 21	11 220 30 11 440 119 71
561 56 ! 228	8 31 -32 1 01 464 195 51 62 3 01 16	0 01 -174 27 11
571 57 ! 212	11 71 -205 20 11 -24 0 01 -397 76	51 -453 99 81 -178 15 21
581 58 ! 129	8 51 231 24 11 368 61 31 151 10	01 -78 3 01 -266 32 31
591 59 ! 926	7 211-2563 638 971-1501 219 401 260	7 11 762 56 151 268 7 21
601 60 ! 230	10 51 -34 1 01 261 42 21 -92	5 01 41 1 01 -545 181 131
611 61 ! 551	8 71 -118 5 01 910 291 181 823 238	151 213 16 11 17 0 01
621 62 ! 802	8 131 111 2 01 569 61 71 1659 522	611 1055 211 341 -175 6 11
631 63 ! 802	8 131 111 2 01 569 61 71 1659 522	611 1055 211 341 -175 6 11
641 64 ! 368	8 71 155 8 01 622 128 81 678 151	101 476 75 71 -138 6 11
651 65 ! 551	8 71 -118 5 01 910 291 181 823 238	151 213 16 11 17 0 01
661 66 ! 246	8 241 -357 13 21 403 17 31 -181	3 11 -990 101 301 1041 112 401
671 67 ! 103	8 91 333 29 21 290 22 21 -436 50	41 47 1 01 46 1 01
681 68 ! 148	10 61 -209 20 11 56 1 01 52	1 01 -249 28 21 -466 98 91
691 69 ! 749	8 151 420 28 31 308 15 21 1723 477	651 1124 203 381 -392 25 61
701 70 ! 77	8 61 -126 6 01 298 34 21 -197 15	11 -237 21 21 -50 1 01
711 71 ! 953	8 201-2371 707 1001-1289 209 361 167	4 11 471 28 71 -208 5 21
721 72 ! 834	8 131 -133 3 01 1105 223 261 1694 524	631 673 83 141 -103 2 01
731 73 ! 719	8 141 -372 25 21 840 128 151 1654 495	601 625 71 121 52 0 01
741 74 ! 329	8 41 -91 5 01 598 214 81 131 10	01 -120 9 01 391 91 61
751 75 ! 227	8 51 458 104 41 -131 8 01 -180 16	01 207 21 11 -394 77 61
761 76 ! 642	8 51 703 268 91 -570 176 71 -493 132	51 353 67 41 9 0 01
771 77 ! 100	8 31 166 25 01 95 8 01 53	3 01 235 51 21 -122 14 11
781 78 ! 508	8 51 656 215 81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41
791 79 ! 508	8 51 656 215 81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41
801 80 ! 508	8 51 656 215 81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41
811 81 ! 329	8 41 -91 5 01 598 214 81 131	10 01 -120 9 01 391 91 61
821 82 ! 269	4 61 50 1 01 692 97 51 89	2 01 -239 12 11 886 158 141
831 83 ! 502	8 81 -248 20 11 650 138 91 -96	3 01 -772 195 181 667 146 161
841 84 ! 257	10 81 -554 116 61 138 7 01 -224	19 11 -525 104 101 -174 11 11
851 85 ! 103	8 91 333 29 21 290 22 21 -436 50	41 47 1 01 46 1 01
861 86 ! 181	10 61 -169 14 11 -86 4 01 31	0 01 -109 6 01 -573 158 141
871 87 ! 223	8 91 577 93 61 -246 17 11 -471 62	51 429 51 61 -26 0 01
881 88 ! 220	10 71 -514 105 51 -4 0 01 -246	24 21 -385 59 51 -281 31 31
891 89 ! 211	8 61 -382 62 31 85 3 01 -230	23 11 -520 116 81 132 7 11
901 90 ! 597	8 371 910 55 151 -751 37 121 2757 502 1671	188 2 11 -86 0 01
911 91 ! 719	8 141 -372 25 21 840 128 151 1654 495	601 625 71 121 52 0 01
921 92 ! 82	10 101 -121 4 01 -12 0 01 -451	60 51 -141 6 11 -198 12 21
931 93 ! 190	8 41 138 13 01 -256 44 11 -403 108	41 190 24 11 -53 2 01
941 94 ! 432	8 41 476 155 41 -448 137 41 -373	95 31 253 44 21 39 1 01
951 95 ! 576	8 41 575 229 61 -360 90 31 -372	96 31 457 145 61 -155 17 11
961 96 ! 508	8 51 656 215 81 -500 125 51 -189 18	11 426 91 61 -342 58 41
971 97 ! 642	8 51 703 268 91 -570 176 71 -493	132 51 353 67 41 9 0 01
981 98 ! 432	8 41 476 155 41 -448 137 41 -373	95 31 253 44 21 39 1 01
991 99 ! 363	8 31 348 114 21 -238 54 11 -252	60 11 357 120 41 -125 15 11
1001 100 ! 432	8 41 476 155 41 -448 137 41 -373	95 31 253 44 21 39 1 01

! I1 ! QLT POID INR1 ! 1#F COR CTR1 ! 2#F COR CTR1 ! 3#F COR CTR1 ! 4#F COR CTR1 ! 5#F COR CTR1

1011 101 ! 323	8 31 348 114 21 -238 54 11 -252	60 11 357 120 41 -125 15 11
1021 102 ! 228	8 31 -32 1 01 464 195 51 62 3 01 16	0 01 -174 27 11
1031 103 ! 642	8 51 703 268 91 -570 176 71 -493 132	51 353 67 41 9 0 01
1041 104 ! 228	8 31 -32 1 01 464 195 51 62 3 01 16	0 01 -174 27 11
1051 105 ! 336	8 31 -78 5 01 630 307 91 87	6 01 -147 17 11 -49 2 01
1061 106 ! 172	7 61 405 57 21 141 7 01 -23	0 01 134 6 01 539 102 91
1071 107 ! 256	8 41 377 97 31 9 0 01 -363	90 31 238 39 21 -207 29 21
1081 108 ! 139	8 31 150 21 01 131 16 01 -243	55 11 138 18 11 -177 29 11

110:110	57	8	41	96	6	0	255	43	11	-59	2	0	-88	5	0	-10	0	0
111:111	508	8	51	656	215	81	-500	125	51	-189	18	11	426	91	61	-342	58	4
112:112	275	10	51	122	9	0	-25	0	0	-354	77	31	64	2	0	-548	186	131
113:113	148	8	31	302	73	21	-73	4	0	-227	41	11	194	30	11	0	0	0
114:114	143	8	81	-237	18	11	-176	10	11	-358	42	31	-389	49	51	268	23	31
115:115	143	8	81	-237	18	11	-176	10	11	-358	42	31	-389	49	51	268	23	31
116:116	257	10	81	-374	52	31	78	2	0	-321	38	31	-641	153	151	-176	12	11
117:117	106	8	71	-365	50	21	33	0	0	-237	21	11	-285	30	21	104	4	0
118:118	248	8	71	-254	24	11	-124	6	0	-351	45	31	-624	142	121	296	32	31
119:119	96	8	81	-184	10	11	77	2	0	-331	34	21	-348	37	41	199	12	11

! ! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000!

! J1 ! QLT POID INR! 1#F COR CTR! 2#F COR CTR! 3#F COR CTR! 4#F COR CTR! 5#F COR CTR!

1dra1	829	3	53	2279	80	311	-3706	213	98	5064	397	188	-2977	137	90	258	1	11
2dra2	756	64	30	669	280	61	-462	134	35	-576	208	56	454	129	48	-94	5	21
3dra3	528	60	31	-81	4	11	786	346	95	554	172	48	69	3	11	-85	4	21
4dra4	96	14	43	-469	21	61	163	3	11	-405	15	61	-728	50	27	273	7	51
5dra5	329	17	42	-539	34	101	359	15	61	-379	17	61	-1470	250	131	352	14	91
6dra6	938	8	531	-3674	628	2391	-2321	250	116	316	5	21	1079	54	351	174	1	11
7isep	557	25	37	-969	186	50	-143	4	11	-185	7	21	-518	53	241	-1244	307	169
81ol1	651	140	81	201	210	121	65	22	21	-266	370	26	1	0	01	97	49	61
9isag	723	10	46	140	1	0	796	40	16	2961	547	225	1453	132	751	-247	4	31
10isaf	126	4	48	-386	4	11	1215	38	16	105	0	01	-1363	48	281	1174	36	25
11isabl	642	3	531	-973	15	61	816	10	51	-307	1	11	-2947	135	881	-5569	481	377
12idorg	938	8	531	-3674	628	2391	-2321	250	116	316	5	21	1079	54	351	174	1	11
13aroc	855	1	58	3235	74	311	-6210	272	138	5664	226	118	-6314	281	202	696	3	31
14idecl	365	92	22	-467	262	43	214	55	11	136	22	41	-312	15	41	91	10	31
15idec2	137	41	36	470	73	191	-243	20	61	-308	31	101	203	14	61	5	0	0
16idec3	261	22	42	807	102	31	-768	92	34	370	21	81	104	2	11	-533	44	28
17idec4	55	10	45	480	15	51	186	2	11	-675	29	12	115	1	0	376	9	61
18itran	81	77	26	-14	0	0	-44	2	0	75	5	11	274	65	21	-104	9	41
19idiff	329	36	40	515	71	201	-829	184	64	-373	37	13	-55	1	0	367	36	21
20irece	241	50	32	-205	19	41	577	153	43	169	13	41	-240	26	11	255	30	14
21piel	477	34	41	-16	0	0	445	47	17	-124	4	11	-447	47	24	1262	379	232
22pie2	626	108	171	229	99	121	-55	6	11	-377	269	40	-16	0	0	-364	251	62
23pie3	791	15	44	63	0	0	994	100	39	2347	560	222	1117	127	70	-174	3	21
24icave	519	49	34	-986	415	101	-219	21	61	-39	1	0	-316	43	18	307	40	20
25icvex	634	55	33	819	320	77	-611	179	52	74	3	11	525	132	54	13	0	0
26irect	316	53	32	1	0	0	775	288	82	108	6	21	-164	13	51	-137	9	41

! ! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000!

IFIN NORMALE DU PROGRAMME ANCORR

1B I B L I O T H E Q U E A D D A D - VERS. 83 -

OCCLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE - METHODE DES VOISINS RECIPROQUES (CAHOR - 204)

AUTEUR : J. JUAN

OCARTE 1 - TITRE DE L'ANALYSE

Bassin-versant Eaton - CAHOR

OCARTE 2 - PARAMETRES GENERAUX : NI, NJ, IOPT, LECIJ, STCAH

119 5 1 1 1

OCARTE 3 - OPTIONS : HISTO, DESCR, ARBRE

1 1 1

OCARTE 4 - NOMS DES VARIABLES :

FAC1 FAC2 FAC3 FAC4 FAC5

1

SOMME DES INDICES DE NIVEAU 0.17513E+01

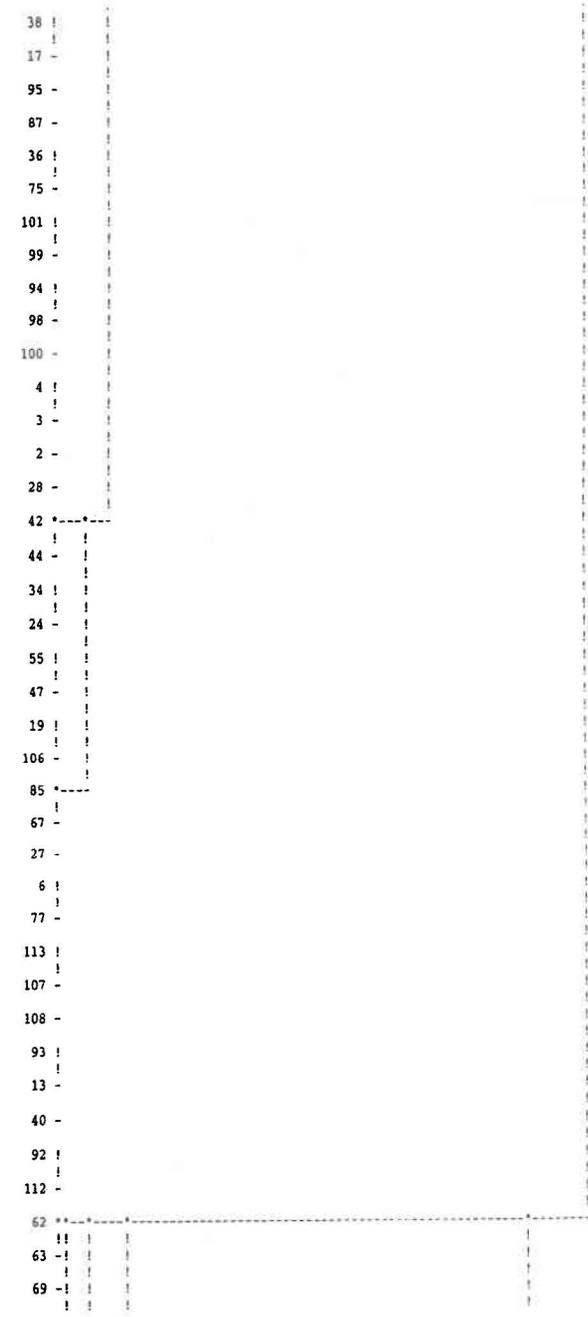
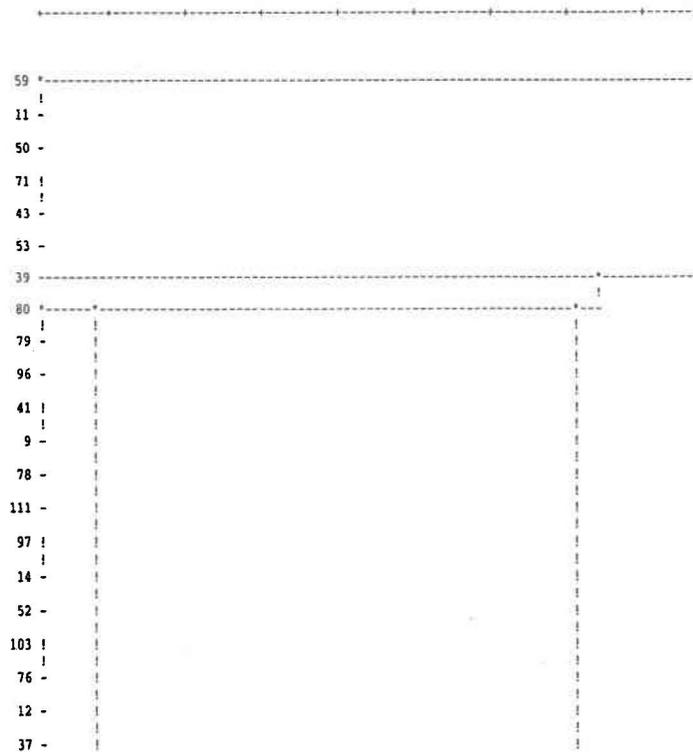
! J ! I(J) ! A(J)! B(J)!T(J)!T(Q)! HISTOGRAMME DES INDICES DE NIVEAU DE LA HIERARCHIE

237	410	219	236	234	234	.....
236	305	39	235	174	408	.....
235	292	230	234	167	575	.....
234	259	231	233	148	723	.....
233	140	232	215	80	803	.....
232	68	226	229	39	842	.....
231	42	228	90	24	865	.....
230	34	223	227	19	885	.....
229	31	220	225	18	903	.....
228	23	224	209	13	916	.....
227	23	221	216	13	929	.....
226	16	218	211	9	938	.....
225	10	214	210	6	943	.....

223	71	153	222	41	953	.....
222	61	192	217	31	956	.....
221	51	195	185	31	959	.....
220	51	208	197	31	962	.....
219	51	191	204	31	965	.....
218	51	212	133	31	967	.....
217	41	205	200	21	969	.....
216	31	213	199	21	971	.....
215	31	33	11	21	973	.....
214	31	198	201	21	975	.....
213	31	161	207	21	976	.....
212	21	193	206	11	978	.....
211	21	203	166	11	979	.....
210	21	188	173	11	980	.....
209	21	144	64	11	981	.....
208	21	187	176	11	982	.....
207	21	194	181	11	983	.....
206	21	177	178	11	984	.....
205	21	163	190	11	985	.....
204	21	168	53	11	986	.....
203	11	180	66	11	986	.....
202	11	143	69	11	987	.....
201	11	170	139	11	988	.....
200	11	148	186	11	988	.....
199	11	92	112	11	989	.....
198	11	189	137	11	990	.....
197	11	183	164	11	990	.....
196	11	135	72	01	991	.....
195	11	141	162	01	991	.....
194	11	179	184	01	992	.....
193	11	169	25	01	992	.....
192	11	167	37	01	993	.....
191	11	124	50	01	993	.....
190	11	182	126	01	993	.....
189	11	152	58	01	994	.....
188	11	174	165	01	994	.....
187	01	120	140	01	994	.....
186	01	157	28	01	995	.....
185	01	175	156	01	995	.....
184	01	172	108	01	995	.....
183	01	57	116	01	996	.....
182	01	36	75	01	996	.....
181	01	159	40	01	996	.....
180	01	158	48	01	996	.....
179	01	61	77	01	996	.....
178	01	155	10	01	997	.....
177	01	20	82	01	997	.....
176	01	171	89	01	997	.....
175	01	55	47	01	997	.....
174	01	29	23	01	997	.....
173	01	160	60	01	998	.....
172	01	113	107	01	998	.....
171	01	132	119	01	998	.....
170	01	109	70	01	998	.....
169	01	46	18	01	998	.....
168	01	71	43	01	998	.....
167	01	154	12	01	999	.....
166	01	21	83	01	999	.....
165	01	86	68	01	999	.....
164	01	88	84	01	999	.....
163	01	150	87	01	999	.....
162	01	34	24	01	999	.....
161	01	128	27	01	1000	.....
160	01	32	71	01	1000	.....
159	01	93	13	01	1000	.....
158	01	138	35	01	1000	.....
157	01	130	21	01	1000	.....
156	01	19	106	01	1000	.....
155	01	131	54	01	1000	.....
154	01	145	134	01	1000	.....
153	01	151	111	01	1000	.....
152	01	149	125	01	1000	.....
151	01	146	147	01	1000	.....
150	01	127	95	01	1000	.....
149	01	136	56	01	1000	.....
148	01	122	100	01	1000	.....
147	01	121	78	01	1000	.....
146	01	123	96	01	1000	.....

144!	0!	129!	65!	0!1000!*
143!	0!	62!	63!	0!1000!*
142!	0!	97!	14!	0!1000!*
141!	0!	42!	44!	0!1000!*
140!	0!	118!	8!	0!1000!*
139!	0!	26!	110!	0!1000!*
138!	0!	22!	15!	0!1000!*
137!	0!	105!	16!	0!1000!*
136!	0!	45!	30!	0!1000!*
135!	0!	91!	73!	0!1000!*
134!	0!	103!	76!	0!1000!*
133!	0!	5!	49!	0!1000!*
132!	0!	117!	31!	0!1000!*
131!	0!	81!	74!	0!1000!*
130!	0!	4!	3!	0!1000!*
129!	0!	61!	51!	0!1000!*
128!	0!	85!	67!	0!1000!*
127!	0!	38!	17!	0!1000!*
126!	0!	101!	99!	0!1000!*
125!	0!	104!	102!	0!1000!*
124!	0!	59!	11!	0!1000!*
123!	0!	80!	79!	0!1000!*
122!	0!	94!	98!	0!1000!*
121!	0!	41!	9!	0!1000!*
120!	0!	114!	115!	0!1000!*

REPRESENTATION DE LA CLASSIFICATION HIERARCHIQUE



```

73 -
72 -
61 *
51 -
65 -
64 -
90 -
46 -
18 -
25 -
20 -
82 -
81 -
74 -
54 -
10 -
5 -
49 -
22 *
15 -
35 -
48 -
66 -
21 -
83 -
114 *
115 -
118 -
8 -
117 -
31 -
119 -
89 -
57 -
116 -
88 -
84 -
45 **
30 -

```

```

56 -!
104 !!
!!
102 -!
58 -!
105 !!
!!
16 -!
109 !!
!!
70 -!
26 !!
!!
110 -!
29 *-
23 -
86 -
68 -
32 -
7 -
60 -
33 *
1 -

```

IFIN NORMALE DU PROGRAMME CAHVOR

IBIBLIOTHEQUE ADDAD - VERS. 83 -

ANALYSE DES CORRESPONDANCES (ANCORR - 201)
D'APRES : YAGOLNITZER ET TABET

OCARTE 1 - TITRE DE L'ANALYSE

Bassin-versant Eaton - ANCORR

OCARTE 2 - PARAMETRES GENERAUX : NI,NJ,NF,NIZ,NJ2,LBCIJ,STFI,STFJ
81 22 5 0 0 1 3 3

OCARTE 3 - OPTIONS : IOUT,IVP,IF,JP,IGR
1 1 1 1 1

OCARTE 5 - DEMANDE DE GRAPHIQUES :
123304310013330431002333043100143304310015330431002433043100000000000000000000

OCARTE 6 - NOMS DES VARIABLES :
dra2 dra3 dra4 dra5 seep loli sagl safi sabl dorg piel pie2 pie3 ind1 ind2 ind3 ind4 penf penn dif
tran rece

OCARTE 7 - FORMAT DES DONNEES
(8X,A4,22F3.0)

1
LES POIDS DES LIGNES ET DES COLONNES SONT MULTIPLIES PAR 10 ** 0
LES VALEURS DU TABLEAU SONT MULTIPLIEES PAR 10 ** 3

NOMJ(J) ! diff tran rece					
PJ(J)	!	37	27	17	492
37	!	0	1000	0	8
47	!	1000	0	0	6
80	!	0	0	1000	6
133	!	1000	0	0	6
134	!	0	1000	0	6
162	!	0	0	1000	6
164	!	0	0	1000	5
166	!	1000	0	0	6
167	!	0	0	1000	5
168	!	0	0	1000	6
169	!	0	0	1000	6
170	!	0	0	1000	5

172	1000	0	0	6
173	1000	0	0	6
174	0	1000	0	5
175	0	1000	0	6
176	0	1000	0	8
177	0	1000	0	6
178	1000	0	0	6
182	0	1000	0	6
190	0	0	1000	6
191	0	1000	0	6
192	0	1000	0	5
193	0	1000	0	6
194	1000	0	0	6
195	0	0	1000	6
196	1000	0	0	7
197	0	1000	0	6
198	1000	0	0	6
199	1000	0	0	6
200	0	1000	0	6
201	1000	0	0	6
202	0	1000	0	6
203	0	0	1000	6
204	1000	0	0	6
205	1000	0	0	6
206	0	1000	0	6
207	1000	0	0	6
225	1000	0	0	6
226	1000	0	0	6
227	1000	0	0	6
229	0	1000	0	7
230	1000	0	0	6
239	0	1000	0	6
352	1000	0	0	6
359	1000	0	0	6
360	1000	0	0	6
361	0	1000	0	6
362	0	1000	0	6
363	1000	0	0	6
374	0	1000	0	6
376	1000	0	0	6
377	0	0	1000	6
388	0	1000	0	6
390	1000	0	0	6
391	1000	0	0	6
399	1000	0	0	6
407	1000	0	0	6
409	0	0	1000	7
410	0	1000	0	6
411	0	1000	0	8
412	0	0	1000	7
413	1000	0	0	6
414	1000	0	0	6
415	1000	0	0	6
416	0	0	1000	7
417	1000	0	0	6
419	0	1000	0	7
420	0	0	1000	4
421	1000	0	0	6
422	1000	0	0	6
423	0	0	1000	6
424	1000	0	0	7
425	1000	0	0	6
429	1000	0	0	6
430	0	1000	0	6
434	1000	0	0	6
435	0	1000	0	6
438	0	1000	0	6
439	0	1000	0	7

TABEAU DES VALEURS PROPRES ET DES VECTEURS PROPRES

NUMERO	VAL PROPRE 1	VAL PROPRE 2	VAL PROPRE 3	VAL PROPRE 4	VAL PROPRE 5	VAL PROPRE 6
	1.00000	0.36975	0.33841	0.31012	0.23323	0.21571
OBJET 1	-0.27791	0.25296	-0.07644	0.04614	-0.00557	0.05818
OBJET 2	-0.21621	-0.36132	-0.03390	0.17350	-0.05400	0.10335
OBJET 3	-0.13525	0.17579	0.14833	0.12782	0.04032	-0.28846
OBJET 4	-0.11928	-0.06271	-0.18268	-0.31383	-0.17461	-0.08370

OBJET 61	-0.39303	0.09178	-0.04586	0.03099	0.07947	0.01671
OBJET 71	-0.06376	-0.34857	0.23695	0.24728	0.16515	0.04415
OBJET 81	-0.04508	-0.14085	-0.09185	-0.43741	0.16620	-0.24996
OBJET 91	-0.04508	-0.13679	-0.04272	0.01400	-0.37352	-0.25917
OBJET 101	-0.04508	-0.00047	0.56737	-0.32121	-0.36721	0.43000
OBJET 111	-0.14952	-0.20161	0.01428	-0.37169	0.43448	-0.15182
OBJET 121	-0.35784	-0.23031	-0.07558	0.08878	-0.11360	0.01304
OBJET 131	-0.11043	-0.46128	0.14423	0.29582	0.07336	0.04040
OBJET 141	-0.15617	-0.25532	-0.18939	-0.13660	-0.14854	-0.27093
OBJET 151	-0.27423	0.20254	0.32511	-0.06234	0.02513	-0.23811
OBJET 161	-0.21621	-0.02986	-0.12659	0.10794	0.30453	0.38381
OBJET 171	-0.13525	-0.05844	-0.11541	0.07000	-0.24899	0.22506
OBJET 181	-0.21621	-0.06725	0.44221	0.12781	-0.06076	-0.34233
OBJET 191	-0.34335	0.04616	-0.23013	-0.09686	0.08446	0.23251
OBJET 201	-0.27423	0.29399	0.01679	0.17379	0.05191	-0.09011
OBJET 211	-0.23426	-0.27477	-0.12869	0.07893	-0.10157	-0.03833
OBJET 221	-0.18588	-0.08040	0.22670	-0.38611	0.13675	0.21252
1 LES VALEURS PROPRES	VAL(1)=	1.00000				

HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE

NUM	ITER	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	!
2	0	0.36975	13.860	13.860	!
3	1	0.33841	12.685	26.544	!
4	2	0.31012	11.624	38.169	!
5	1	0.23323	8.742	46.911	!
6	2	0.21571	8.086	54.997	!
7	2	0.18871	7.073	62.070	!
8	2	0.17721	6.642	68.713	!
9	1	0.15411	5.777	74.489	!
10	3	0.14519	5.442	79.932	!
11	2	0.14268	5.348	85.280	!
12	2	0.10820	4.056	89.336	!
13	2	0.09823	3.682	93.018	!
14	3	0.06624	2.483	95.501	!
15	2	0.04871	1.826	97.327	!
16	3	0.04282	1.605	98.932	!
17	3	0.02329	0.873	99.805	!
18	2	0.00521	0.195	100.000	!
19	0	0.00000	0.000	100.000	!
20	1	0.00000	0.000	100.000	!
21	2	0.00000	0.000	100.000	!
22	4	0.00000	0.000	100.000	!

11 ! QLT POID INR ! 1#F COR CTR ! 2#F COR CTR ! 3#F COR CTR ! 4#F COR CTR ! 5#F COR CTR !

1	37	596	16	14	-261	30	3	-722	229	251	-462	94	111	-718	226	361	-200	18	3
2	47	637	12	4	476	237	7	-300	94	3	224	52	2	285	85	4	402	169	9
3	80	722	12	82	-1155	74	44	-689	26	17	-3009	502	356	860	41	391	-1196	79	81
4	133	217	12	9	-140	10	1	66	2	0	-247	31	2	564	160	17	-169	14	2
5	134	384	12	5	102	9	0	-401	147	6	174	28	1	181	30	2	430	169	10
6	162	311	12	5	371	118	5	189	31	1	-349	104	5	156	21	1	207	37	2
7	164	628	10	14	-224	14	1	886	218	24	-824	189	22	731	149	23	-456	58	10
8	166	724	12	10	613	167	12	677	204	17	378	64	6	30	0	0	-806	289	37
9	167	679	10	13	-310	28	3	-11	0	0	-853	214	24	1100	356	53	525	81	13
10	168	283	12	14	-14	0	0	-316	33	4	-694	161	19	135	6	1	495	82	14
11	169	688	12	48	-1887	340	117	1553	230	87	941	85	35	592	33	18	38	0	0
12	170	596	10	12	-135	6	0	343	38	4	-999	324	33	836	227	30	-4	0	0
13	171	596	10	12	-135	6	0	343	38	4	-999	324	33	836	227	30	-4	0	0
14	172	378	12	5	46	2	0	-280	66	3	330	92	4	246	51	3	447	168	11
15	173	254	12	10	541	138	10	-71	2	0	354	59	5	338	54	6	12	0	0
16	174	437	10	11	-458	71	6	-365	45	4	-371	46	5	866	252	33	263	23	3
17	175	384	12	5	102	9	0	-401	147	6	174	28	1	181	30	2	430	169	10
18	176	368	16	11	36	1	0	-423	97	9	-381	79	8	-588	187	24	-92	5	1
19	177	464	12	13	-910	286	27	-435	65	7	-404	56	6	287	28	4	-286	28	5
20	178	377	12	6	118	10	0	468	165	8	354	95	5	-61	3	0	-371	104	8
21	182	785	12	48	-2156	447	153	963	89	33	1464	206	84	616	37	20	261	7	4
22	190	228	12	11	176	13	1	-151	10	1	-225	22	2	-166	12	1	629	171	22
23	191	336	12	12	-735	199	18	122	5	1	-30	0	0	592	129	18	-78	2	0
24	192	411	10	12	-372	44	4	532	89	9	-341	37	4	497	78	11	-718	163	24
25	193	264	12	9	53	1	0	-446	99	7	178	16	1	-361	64	7	411	84	10
26	194	378	12	5	46	2	0	-280	66	3	330	92	4	246	51	3	447	168	11
27	195	141	12	12	290	33	3	122	6	1	-98	4	0	429	72	10	257	26	4
28	196	386	14	12	-99	4	0	-451	93	9	180	15	1	-683	212	28	372	63	9
29	197	555	12	18	-1381	485	63	-233	14	2	457	53	8	-87	2	0	-56	1	0
30	198	552	12	3	622	530	13	-4	0	0	103	14	0	65	6	0	-39	2	0
31	199	173	12	7	226	34	2	-404	109	6	-5	0	0	-109	8	1	-183	22	2
32	200	79	12	15	118	4	0	-217	15	2	307	30	4	-308	30	5	21	0	0
33	201	724	12	10	613	167	12	677	204	17	378	64	6	30	0	0	-806	289	37

35!	203!	311	12	5!	371	118	5!	189	31	1!	-349	104	5!	156	21	1!	207	37	2!
36!	204!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
37!	205!	637	12	4!	476	237	7!	-300	94	3!	224	52	2!	285	85	4!	402	169	9!
38!	206!	89	12	4!	248	71	2!	-106	13	0!	53	3	0!	-39	2	0!	-11	0	0!
39!	207!	173	12	7!	226	34	2!	-404	109	6!	-5	0	0!	-109	8	1!	-183	22	2!
40!	225!	637	12	4!	476	237	7!	-300	94	3!	224	52	2!	285	85	4!	402	169	9!
41!	226!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
42!	227!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
43!	229!	556	14	11!	-591	173	13!	-590	172	15!	-62	2	0!	-645	205	25!	-90	4	1!
44!	230!	637	12	4!	476	237	7!	-300	94	3!	224	52	2!	285	85	4!	402	169	9!
45!	239!	214	12	7!	-148	137	11!	-506	156	9!	-54	2	0!	-212	28	2!	-155	15	1!
46!	352!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
47!	359!	230	12	10!	-3	0	0!	-325	50	4!	333	52	4!	-295	41	5!	428	87	10!
48!	360!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
49!	361!	384	12	5!	102	9	0!	-401	147	6!	174	28	1!	181	30	2!	430	169	10!
50!	362!	464	12	11!	239	24	2!	575	139	12!	329	45	4!	-73	2	0!	-778	254	34!

! ! ! QLT POID INR! 1PF COR CTR! 2PF COR CTR! 3PF COR CTR! 4PF COR CTR! 5PF COR CTR!

51!	363!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
52!	374!	640	12	20!	-1456	494	70!	219	11	2!	602	85	14!	-175	7	2!	-433	44	11!
53!	376!	724	12	10!	613	167	12!	677	204	17!	378	64	6!	30	0	0!	-806	289	37!
54!	377!	377	12	7!	297	58	3!	641	270	15!	-203	27	2!	68	3	0!	-170	19	2!
55!	388!	384	12	5!	102	9	0!	-401	147	6!	174	28	1!	181	30	2!	430	169	10!
56!	390!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
57!	391!	410	12	9!	687	250	16!	224	27	2!	233	29	2!	118	7	1!	-429	97	10!
58!	399!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
59!	407!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
60!	409!	303	14	10!	-272	40	3!	-248	33	3!	-210	24	2!	-140	11	1!	598	194	24!
61!	410!	529	12	21!	-1255	337	52!	279	17	3!	834	149	27!	-323	22	5!	134	4	1!
62!	411!	518	16	15!	-110	5	1!	-677	184	22!	-288	33	4!	-830	276	48!	225	20	4!
63!	412!	368	14	13!	-314	39	4!	-286	32	3!	-208	17	2!	-605	145	22!	582	135	22!
64!	413!	173	12	7!	-226	34	2!	-404	109	6!	-5	0	0!	-109	8	1!	-183	22	2!
65!	414!	230	12	10!	-3	0	0!	-325	50	4!	333	52	4!	-295	41	5!	428	87	10!
66!	415!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
67!	416!	165	14	9!	-147	13	1!	5	0	0!	-314	59	5!	-329	64	7!	221	29	3!
68!	417!	552	12	3!	622	530	13!	-4	0	0!	103	14	0!	65	6	0!	-39	2	0!
69!	419!	359	14	13!	-89	3	0!	-444	80	8!	-460	86	10!	-669	182	27!	-135	7	1!
70!	420!	915	8	103!	-4	0	0!	4259	538	436!	-2210	145	128!	-1900	107	126!	2057	126	160!
71!	421!	675	12	5!	548	275	10!	448	184	7!	248	57	2!	-23	0	0!	-415	158	10!
72!	422!	637	12	4!	476	237	7!	-300	94	3!	224	52	2!	285	85	4!	402	169	9!
73!	423!	311	12	5!	371	118	5!	189	31	1!	-349	104	5!	156	21	1!	207	37	2!
74!	424!	304	14	13!	232	23	2!	-356	54	5!	-417	74	8!	-580	143	21!	-158	11	2!
75!	425!	378	12	5!	46	2	0!	-280	66	3!	330	92	4!	246	51	3!	447	168	11!
76!	429!	724	12	10!	613	167	12!	677	204	17!	378	64	6!	30	0	0!	-806	289	37!
77!	430!	290	12	6!	174	25	1!	346	98	4!	199	32	2!	-126	13	1!	-388	123	9!
78!	434!	378	12	5!	46	2	0!	-280	66	3!	330	92	4!	246	51	3!	447	168	11!
79!	435!	632	12	15!	-1132	378	42!	-129	5	1!	686	139	18!	306	28	5!	529	83	16!
80!	438!	464	12	13!	-910	286	27!	-435	65	7!	-404	56	6!	287	28	4!	-286	28	5!
81!	439!	545	14	65!	-1122	103	48!	-321	8	4!	96	1	0!	-1932	306	228!	-1240	126	101!

! ! ! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000!

! J1 ! QLT POID INR! 1PF COR CTR! 2PF COR CTR! 3PF COR CTR! 4PF COR CTR! 5PF COR CTR!

1!	dra2!	314	77	32!	553	275	64!	-160	23	6!	92	8	2!	-10	0	0!	97	8	3!
2!	dra3!	536	47	43!	-1016	425	131!	-91	3	1!	447	82	30!	-121	6	3!	222	20	11!
3!	dra4!	285	18	56!	790	77	31!	-638	50	22!	526	34	16!	144	3	2!	-991	121	83!
4!	dra5!	406	14	48!	-320	11	4!	-891	88	33!	-1465	239	98!	-707	56	30!	-326	12	7!
5!	seep!	570	22	43!	-409	32	10!	-705	96	33!	-412	33	12!	-1453	408	202!	17	0	0!
6!	loli!	515	154	4!	142	283	8!	-68	65	2!	44	27	1!	98	134	6!	20	5	0!
7!	sagl!	551	4	61!	-3324	276	122!	2162	117	56!	2160	117	61!	1251	39	27!	322	3	2!
8!	safi!	543	2	62!	-1900	45	20!	-1185	17	8!	-5403	360	191!	1780	39	28!	-2575	82	62!
9!	sabl!	388	2	53!	-1845	49	19!	-551	4	2!	173	0	0!	-4001	231	140!	-2670	103	67!
10!	dorg!	856	2	93!	-6	0	0!	7321	439	322!	-3968	129	103!	-3934	127	135!	4430	161	185!
11!	pie1!	658	22	61!	-820	92	41!	56	0	0!	-1384	264	138!	1403	271	189!	-472	31	23!
12!	pie2!	804	128	13!	391	584	53!	-123	58	6!	138	73	8!	-153	90	13!	17	1	0!
13!	pie3!	741	12	58!	-2540	509	213!	760	46	21!	1492	176	88!	321	8	5!	170	2	2!
14!	ind1!	467	24	51!	-994	179	65!	-705	90	36!	-487	43	19!	-459	38	22!	-806	117	73!
15!	ind2!	684	75	35!	449	161	41!	690	379	106!	-127	13	4!	44	2	1!	-403	130	57!
16!	ind3!	515	47	46!	-84	3	1!	-341	45	16!	278	30	12!	680	178	93!	824	261	147!
17!	ind4!	236	18	52!	-263	9	3!	-496	33	13!	288	11	5!	-889	104	62!	773	79	51!
18!	penf!	790	47	47!	-189	13	5!	1190	528	196!	329	40	16!	-136	7	4!	-735	202	117!
19!	pena!	759	118	17!	82	17	2!	-390	389	53!	-157	63	9!	119	36	7!	315	253	54!
20!	difi!	486	75	34!	652	354	86!	36	1	0!	353	104	30!	91	7	3!	-153	19	8!
21!	tran!	357	55	40!	-713	261	75!	-320	52	17!	188	18	6!	-209	22	10!	-76	3	1!
22!	rece!	570	35	53!	-263	17	6!	709	124	51!	-1157	329	149!	355	31	19!	531	69	45!

! ! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000! 1000!

IFIN NORMALE DU PROGRAMME ANCORR
I B I B L I O T H E Q U E A D D A D - V E R S . 8 3 -

OCLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE - METHODE DES VOISINS RECIPROQUES (CAHVOR - 204)
AUTEUR : J. JUAN

OCARTE 1 - TITRE DE L'ANALYSE
Bassin-versant Eaton - CAHVOR
OCARTE 2 - PARAMETRES GENERAUX : NI,NJ,IOP,T,LECIJ,STCAH
81 5 1 1 1

OCARTE 3 - OPTIONS : HISTO,DESCRI,ARBRE
1 1 1

OCARTE 4 - NOMS DES VARIABLES :
FAC1 FAC2 FAC3 FAC4 FAC5

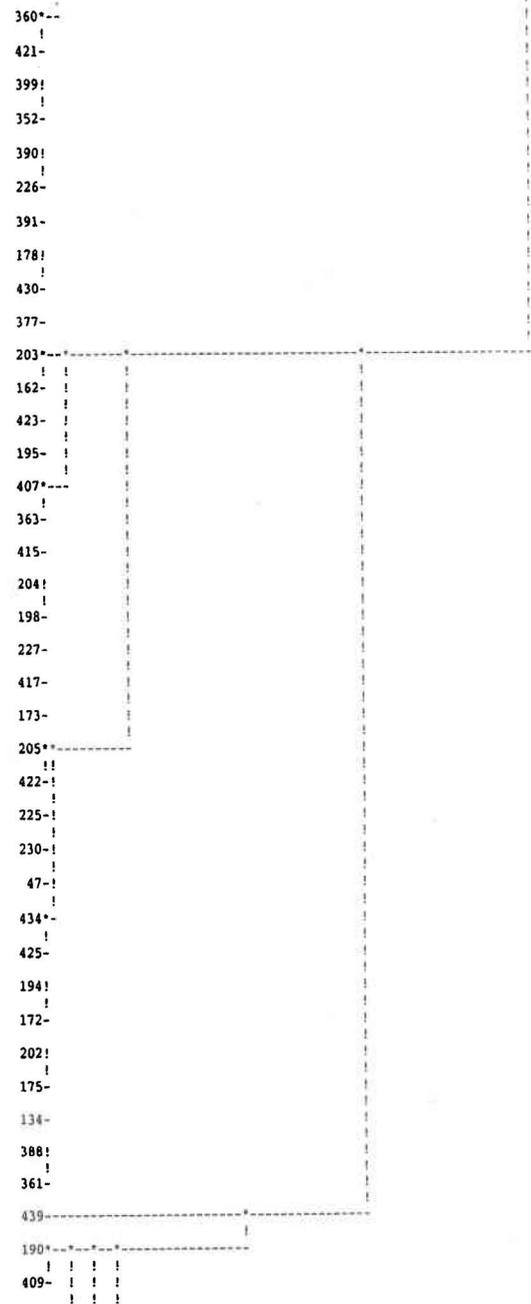
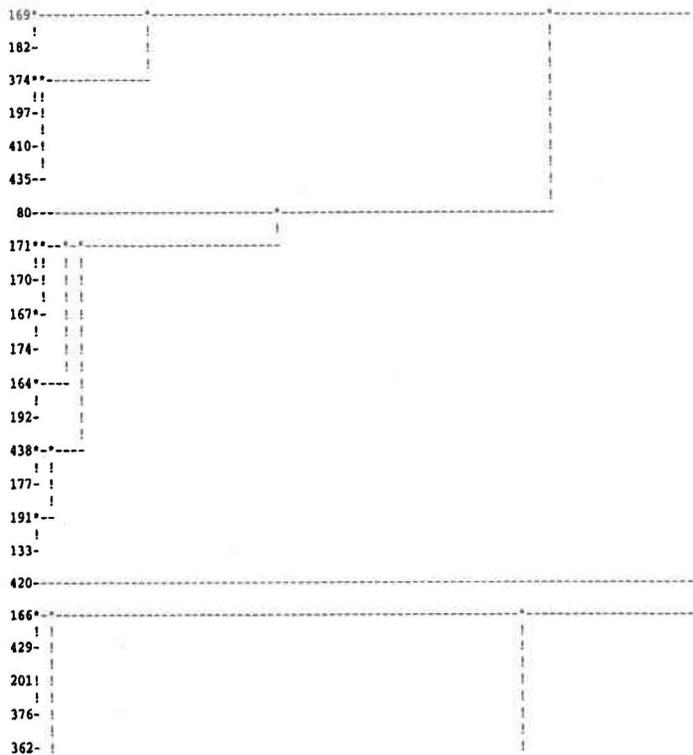
SOMME DES INDICES DE NIVEAU 0.14672E+01

! J ! I(J) ! A(J)! B(J)!T(J)!T(Q)! HISTOGRAMME DES INDICES DE NIVEAU DE LA HIERARCHIE

!	161!	274!	160!	158!	187!	187!	.....
!	160!	250!	159!	70!	170!	357!	.....
!	159!	191!	154!	156!	130!	487!	.....
!	158!	178!	146!	157!	122!	609!	.....
!	157!	118!	153!	155!	80!	689!	.....
!	156!	93!	3!	151!	63!	753!	.....
!	155!	75!	81!	152!	51!	804!	.....
!	154!	45!	140!	144!	31!	834!	.....
!	153!	35!	147!	142!	24!	858!	.....
!	152!	28!	150!	141!	19!	877!	.....
!	151!	20!	149!	145!	14!	891!	.....
!	150!	19!	148!	130!	13!	905!	.....
!	149!	16!	143!	133!	11!	915!	.....
!	148!	12!	139!	126!	8!	923!	.....
!	147!	12!	121!	125!	8!	931!	.....
!	146!	10!	124!	138!	7!	938!	.....
!	145!	8!	94!	132!	6!	944!	.....
!	144!	7!	137!	79!	5!	949!	.....
!	143!	7!	98!	134!	5!	954!	.....
!	14						

104!	0!	89!	66!	011000!*
103!	0!	90!	73!	011000!*
102!	0!	85!	64!	011000!*
101!	0!	88!	40!	011000!*
100!	0!	93!	5!	011000!*
99!	0!	87!	42!	011000!*
98!	0!	13!	12!	011000!*
97!	0!	58!	46!	011000!*
96!	0!	26!	14!	011000!*
95!	0!	8!	76!	011000!*
94!	0!	80!	19!	011000!*
93!	0!	34!	17!	011000!*
92!	0!	48!	71!	011000!*
91!	0!	33!	53!	011000!*
90!	0!	35!	6!	011000!*
89!	0!	59!	51!	011000!*
88!	0!	37!	72!	011000!*
87!	0!	36!	30!	011000!*
86!	0!	78!	75!	011000!*
85!	0!	39!	31!	011000!*
84!	0!	56!	41!	011000!*
83!	0!	65!	47!	011000!*
82!	0!	55!	49!	011000!*

IREPRESENTATION DE LA CLASSIFICATION HIERARCHIQUE



412-
168-
414-
359-
193-
196-
207-
199-
413-
239-
200-
206-
424-
176-
419-
229-
411-
37-

FIN NORMALE DU PROGRAMME CNVOR

ANNEXE 12

Légende de la carte des types de dépôts

DEPOTS DE SURFACE

1	Dépôts glaciaires	
1A	Till régional indifférencié épais (>0,5 m)	[11]
1AR	Till régional indifférencié mince (entre 0,3 et 0,5 m) sur roc	[12]
1S	Till local épais dérivé de schistes (>0,5 m)	[13]
1SS	Till local mince dérivé de schistes (entre 0,3 et 0,5 m) sur schistes	[14]
2	Dépôts fluvio-glaciaires	
2A	De contact glaciaire	
2AF	Sable fin	[21]
2AG	Sable grossier, pierrosité > à 20%	[22]
3	Dépôts fluviatiles	
3A	Alluvions actuelles	
3AS	Sable, pierrosité < à 20%	[31]
3B	Alluvions subactuelles	
3BL	Limon et sable très fin	[32]
3BF	Sable fin, pierrosité < à 20%	[33]
3BG	Sable et gravier, pierrosité > à 20%	[34]
4	Dépôts glacio-lacustres	
4BL	Argile et limon	[41]
4BF	Sable fin, pierrosité < à 20%	[42]
7	Dépôts organiques	
7P	Tourbe épaisse (> à 1 m)	[71]
7A	Tourbe mince (entre 0,4 et 1 m) sur argile et limon	[72]
7T	Tourbe mince (entre 0,4 et 1 m) sur till ou sable	[73]
8	Affleurements rocheux	
R	Grès et placages de till	[81]
S	Schistes et placages de till ou d'altérites	[82]

ANNEXE 13

Valeurs prises par les différentes variables
entrant dans l'analyse pour chaque polygone cartographique

- Type de dépôts
- Indice de qualité du drainage
- Pente moyenne
- Orientation prédominante moyenne
- Concavité - Convexité prédominantes moyennes
- Capacité diffusante, réceptrice et transmettrice

Type de dépôt par polygone cartographique

1	11	101	12	201	11	301	11	401	11	501	11
2	11	102	11	202	11	302	11	402	12	502	11
3	11	103	11	203	11	303	11	403	11	503	11
4	11	104	11	204	12	304	11	404	11	504	41
5	11	105	11	205	11	305	11	405	11	505	31
6	11	106	22	206	11	306	73	406	11	506	41
7	13	107	11	207	12	307	11	407	11	507	41
8	14	108	12	208	12	308	11	408	11	508	32
9	11	109	11	209	11	309	11	409	11	509	41
10	13	110	11	210	12	310	11	410	34	510	41
11	12	111	11	211	12	311	11	411	11	511	41
12	11	112	11	212	12	312	12	412	11	512	11
13	12	113	12	213	11	313	71	413	12	513	11
14	11	114	11	214	41	314	11	414	11	514	11
15	11	115	12	215	11	315	11	415	11	515	11
16	11	116	11	216	11	316	11	416	11	516	41
17	11	117	12	217	11	317	73	417	12	517	13
18	11	118	22	218	11	318	12	418	12	518	13
19	11	119	11	219	12	319	12	419	11	519	11
20	12	120	11	220	11	320	11	420	71	520	11
21	11	121	11	221	12	321	11	421	12	521	11
22	11	122	41	222	73	322	12	422	11	522	11
23	11	123	11	223	12	323	12	423	12	523	11
24	11	124	22	224	11	324	11	424	11	524	33
25	11	125	12	225	11	325	12	425	11	525	41
26	11	126	22	226	11	326	11	426	11	526	41
27	11	127	11	227	12	327	11	427	11	527	11
28	41	128	11	228	11	328	12	428	12	528	11
29	41	129	11	229	11	329	11	429	11	529	32
30	22	130	11	230	11	330	12	430	12	530	12
31	11	131	11	231	11	331	11	431	12	531	11
32	11	132	11	232	11	332	11	432	12	532	11
33	12	133	41	233	12	333	11	433	11	533	12
34	12	134	11	234	11	334	11	434	11	534	12
35	11	135	11	235	11	335	11	435	34	535	12
36	12	136	11	236	11	336	11	436	11	536	11
37	11	137	11	237	11	337	11	437	11	537	12
38	12	138	11	238	12	338	11	438	41	538	73
39	12	139	11	239	11	339	11	439	31		
40	81	140	11	240	22	340	22	440	11		
41	12	141	11	241	11	341	11	441	12		
42	11	142	11	242	11	342	34	442	11		
43	12	143	12	243	71	343	11	443	11		
44	11	144	11	244	11	344	11	444	11		
45	11	145	11	245	11	345	11	445	73		
46	12	146	12	246	11	346	11	446	11		
47	11	147	11	247	11	347	11	447	73		
48	11	148	12	248	11	348	12	448	13		
49	11	149	11	249	11	349	11	449	41		
50	11	150	11	250	11	350	41	450	11		
51	11	151	12	251	11	351	41	451	11		
52	11	152	22	252	11	352	12	452	11		
53	11	153	12	253	12	353	11	453	12		
54	11	154	11	254	12	354	11	454	73		
55	73	155	11	255	11	355	11	455	11		
56	11	156	11	256	11	356	11	456	11		
57	11	157	12	257	11	357	11	457	12		
58	11	158	12	258	41	358	11	458	11		
59	11	159	11	259	22	359	11	459	11		
60	11	160	11	260	12	360	12	460	11		
61	11	161	11	261	12	361	11	461	11		
62	73	162	11	262	11	362	11	462	41		
63	11	163	34	263	34	363	12	463	41		
64	11	164	41	264	41	364	71	464	41		
65	11	165	11	265	11	365	11	465	31		
66	11	166	11	266	11	366	11	466	33		
67	11	167	41	267	11	367	11	467	11		
68	41	168	11	268	73	368	11	468	11		
69	14	169	22	269	11	369	12	469	11		
70	12	170	41	270	11	370	11	470	11		
71	11	171	41	271	11	371	34	471	11		
72	11	172	11	272	11	372	11	472	11		
73	12	173	11	273	11	373	11	473	72		
74	11	174	41	274	11	374	34	474	11		
75	11	175	11	275	11	375	11	475	14		
76	11	176	11	276	41	376	11	476	11		
77	11	177	41	277	11	377	11	477	11		
78	22	178	11	278	41	378	12	478	11		
79	11	179	11	279	41	379	11	479	11		
80	42	180	11	280	41	380	11	480	11		
81	11	181	11	281	41	381	11	481	11		
82	11	182	22	282	11	382	11	482	11		
83	73	183	11	283	11	383	11	483	12		
84	22	184	11	284	41	384	12	484	11		
85	22	185	11	285	11	385	12	485	11		
86	11	186	11	286	12	386	11	486	11		
87	73	187	11	287	11	387	11	487	11		
88	22	188	11	288	12	388	11	488	12		
89	11	189	41	289	11	389	11	489	11		
90	11	190	11	290	11	390	12	490	11		
91	11	191	41	291	12	391	11	491	11		
92	73	192	41	292	11	392	13	492	11		
93	12	193	11	293	12	393	11	493	11		
94	11	194	11	294	11	394	11	494	11		
95	11	195	11	295	11	395	11	495	73		
96	73	196	11	296	11	396	11	496	11		
97	11	197	34	297	11	397	11	497	11		
98	11	198	12	298	11	398	11	498	11		
99	11	199	12	299	12	399	12	499	11		
100	22	200	11	300	12	400	11	500	11		

Indice de qualité du drainage par polygone cartographique

1	4	101	2	201	4	301	2	401	5	501	3
2	3	102	2	202	2	302	3	402	2	502	3
3	2	103	5	203	2	303	3	403	2	503	2
4	5	104	3	204	2	304	5	404	4	504	2.5
5	2	105	3	205	2	305	3	405	2	505	2.5
6	3	106	2.5	206	2	306	6	406	5	506	2.5
7	4	107	4	207	2	307	2	407	2	507	4.5
8	2	108	2	208	2	308	4	408	2	508	2.5
9	4	109	4	209	3	309	2	409	3	509	4.5
10	2	110	3	210	2	310	2	410	2.5	510	2.5
11	2	111	4	211	2	311	5	411	5	511	2.5
12	3	112	2	212	2	312	2	412	3	512	4
13	2	113	2	213	5	313	6	413	2	513	3
14	4	114	3	214	2.5	314	2	414	3	514	2
15	3	115	2	215	2	315	3	415	2	515	4
16	5	116	2	216	2	316	2	416	3	516	4.5
17	2	117	2	217	5	317	6	417	2	517	3
18	2	118	1	218	3	318	2	418	2	518	2
19	3	119	2	219	2	319	2	419	5	519	3
20	2	120	5	220	4	320	5	420	6	520	2
21	5	121	3	221	2	321	3	421	2	521	5
22	2	122	2.5	222	6	322	2	422	2	522	2
23	5	123	5	223	2	323	2	423	2	523	3
24	2	124	1	224	4	324	2	424	5	524	2.5
25	3	125	2	225	2	325	2	425	3	525	2.5
26	2	126	2.5	226	2	326	3	426	5	526	2.5
27	3	127	2	227	2	327	2	427	4	527	2
28	2.5	128	5	228	2	328	2	428	2	528	3
29	2.5	129	2	229	3	329	5	429	4	529	2.5
30	2.5	130	4	230	2	330	2	430	2	530	2
31	2	131	2	231	4	331	2	431	2	531	5
32	2	132	5	232	4.5	332	2	432	2	532	5
33	2	133	4.5	233	2	333	4	433	4	533	2
34	2	134	2	234	2	334	2	434	3	534	2
35	3	135	2	235	5	335	4	435	2.5	535	2
36	2	136	2	236	3	336	4	436	5	536	2
37	5	137	2	237	3	337	2	437	2	537	2
38	2	138	3	238	3	338	2	438	2.5	538	2
39	2	139	2	239	2	339	2	439	2.5		
40	1	140	5	240	2.5	340	5	440	3		
41	2	141	3	241	3	341	4	441	2		
42	3	142	2	242	3	342	2.5	442	4		
43	2	143	2	243	6	343	3	443	2		
44	3	144	4	244	2	344	2	444	4		
45	2	145	3	245	2	345	4	445	6		
46	2	146	2	246	4	346	5	446	3		
47	2	147	3	247	2	347	2	447	6		
48	3	148	2	248	4	348	2	448	3		
49	2	149	5	249	2	349	4	449	4.5		
50	3	150	2	250	3	350	2.5	450	3		
51	4	151	2	251	2	351	4.5	451	3		
52	3	152	2.5	252	5	352	2	452	2		
53	4	153	2	253	2	353	3	453	2		
54	3	154	4	254	2	354	3	454	6		
55	6	155	3	255	3	355	3	455	2		
56	5	156	2	256	2	356	2	456	4		
57	2	157	2	257	3	357	2	457	2		
58	2	158	2	258	2.5	358	3	458	3		
59	2	159	3	259	2.5	359	3	459	2		
60	3	160	3	260	2	360	2	460	3		
61	5	161	3	261	2	361	2	461	3		
62	6	162	2	262	2	362	4	462	4.5		
63	3	163	2.5	263	2.5	363	2	463	4.5		
64	5	164	2.5	264	2.5	364	6	464	4.5		
65	4	165	3	265	4	365	3	465	4.5		
66	5	166	4	266	3	366	2	466	2.5		
67	3	167	2.5	267	3	367	4	467	3		
68	2.5	168	5	268	6	368	4	468	3		
69	2	169	2.5	269	2	369	3	469	2		
70	2	170	2.5	270	4	370	5	470	5		
71	2	171	2.5	271	2	371	2.5	471	2		
72	2	172	3	272	4	372	2	472	3		
73	2	173	4	273	3	373	2	473	6		
74	3	174	2.5	274	3	374	2.5	474	2		
75	2	175	2	275	3	375	3	475	2		
76	3	176	5	276	2.5	376	4	476	3		
77	2	177	4.5	277	3	377	2	477	2		
78	2.5	178	3	278	2.5	378	2	478	3		
79	2	179	3	279	2.5	379	4	479	2		
80	4.5	180	2	280	2.5	380	2	480	2		
81	2	181	4	281	2.5	381	2	481	3		
82	2	182	2.5	282	4	382	2	482	2		
83	6	183	4	283	3	383	4	483	2		
84	2.5	184	2	284	2.5	384	2	484	3		
85	2.5	185	2	285	5	385	2	485	3		
86	2	186	2	286	2	386	4	486	2		
87	6	187	5	287	5	387	2	487	3		
88	2.5	188	2	288	2	388	2	488	2		
89	3	189	2.5	289	3	389	3	489	2		
90	2	190	2	290	2	390	2	490	2		
91	2	191	2.5	291	2	391	4	491	2		
92	6	192	2.5	292	2	392	2	492	3		
93	2	193	2	293	2	393	5	493	4		
94	3	194	3	294	4	394	4	494	4		
95	2	195	4	295	3	395	3	495	6		
96	6	196	3	296	3	396	4	496	2		
97	2	197	2.5	297	5	397	2	497	4		
98	2	198	2	298	2	398	2	498	2		
99	2	199	2	299	2	399	2	499	3		
100	2.5	200	4	300	2	400	2	500	2		

Pente moyenne par polygone cartographique

1	1.22	101	6.2	201	2.11	301	4.66	401	4.38	501	2.75
2	2.8	102	1.82	202	3.46	302	4.8	402	4.37	502	3.23
3	3.09	103	3.52	203	7.65	303	3.48	403	3.33	503	4.33
4	3.01	104	4.14	204	6.4	304	2.29	404	2.21	504	3.66
5	3.42	105	5.32	205	4.65	305	2.61	405	0.86	505	2.87
6	2.65	106	2.34	206	4.02	306	1.89	406	4.83	506	4.36
7	2.23	107	3.5	207	4.54	307	3.11	407	5.48	507	2.22
8	6.7	108	5.25	208	10.9	308	3.16	408	4.81	508	1.98
9	5.12	109	4.83	209	5.54	309	1.52	409	4.76	509	4.55
10	1.88	110	3.04	210	2.64	310	1.9	410	1.15	510	3.79
11	3.12	111	3.01	211	3.26	311	3.4	411	3.58	511	2.69
12	2.83	112	7.19	212	8.96	312	4.15	412	3.91	512	1.6
13	3.91	113	4.34	213	3.6	313	0.54	413	5.94	513	1.11
14	2.35	114	2.5	214	5.78	314	3.64	414	4.11	514	1.29
15	3.58	115	7.1	215	5.38	315	2.99	415	4.39	515	1.69
16	0.97	116	3.34	216	8.01	316	5.01	416	3.43	516	3.14
17	2.11	117	8.49	217	5.63	317	3.64	417	5.01	517	2.29
18	4.2	118	3.92	218	6.05	318	2.84	418	3.79	518	1.73
19	4.75	119	4.69	219	5.3	319	4.04	419	5	519	1.62
20	3.59	120	1.4	220	1.99	320	2.72	420	1.25	520	3.43
21	2.86	121	2.51	221	2.74	321	4.98	421	2.65	521	2.51
22	3.92	122	5.05	222	2.49	322	3.4	422	5.13	522	2.84
23	2.35	123	2.86	223	5.03	323	5	423	4.47	523	4.8
24	5.03	124	7.37	224	3.88	324	6.33	424	5.09	524	1.25
25	4.48	125	2.15	225	3.11	325	6.63	425	5.19	525	3.92
26	5.47	126	5.8	226	0.83	326	2.81	426	4.18	526	3.25
27	3.18	127	2.32	227	4.52	327	3.45	427	1.52	527	1.44
28	3.25	128	3.03	228	4.68	328	4.41	428	5.04	528	2.48
29	4.84	129	3.99	229	4.32	329	2.15	429	2.95	529	1.12
30	4.04	130	2.7	230	6.26	330	3.07	430	2.85	530	2.61
31	1.63	131	4.54	231	3.55	331	5.86	431	4.71	531	3.7
32	2.68	132	4.1	232	2.66	332	4.9	432	2.2	532	2.81
33	3.68	133	8.39	233	4.92	333	3.17	433	1.95	533	2.05
34	5.3	134	4.78	234	3.62	334	4.79	434	4.45	534	1.2
35	3.34	135	4.76	235	4.44	335	1.95	435	5	535	4.37
36	3.65	136	6.05	236	4.85	336	3.24	436	4.25	536	9.78
37	3.64	137	6.19	237	4.72	337	4.48	437	5.03	537	3.97
38	5.01	138	4.31	238	3.26	338	2.66	438	3.29	538	0.99
39	5.84	139	5.24	239	4.75	339	3.29	439	1.13		
40	4.67	140	4.72	240	2.98	340	2	440	3.94		
41	5.49	141	5.64	241	3.91	341	4.41	441	5.6		
42	3.49	142	4.9	242	6.84	342	1.88	442	3.14		
43	3.1	143	11.3	243	4.38	343	4.67	443	2.08		
44	3.35	144	3.36	244	4.73	344	2.43	444	1.6		
45	4.12	145	4.58	245	3	345	3.04	445	1.88		
46	2.67	146	5.36	246	2.35	346	2.5	446	2.83		
47	5.87	147	3.97	247	2.04	347	3.66	447	1.88		
48	4.18	148	4.93	248	2.87	348	2.41	448	2.85		
49	4.48	149	2.53	249	2.35	349	3.3	449	2.8		
50	0.43	150	2.51	250	5.39	350	7.46	450	2.96		
51	3.08	151	1.48	251	2.61	351	4.66	451	3.69		
52	1.4	152	5.66	252	2.04	352	2.17	452	2.11		
53	1.3	153	4.53	253	3.92	353	4.68	453	2.51		
54	1.71	154	1.47	254	9.7	354	4.3	454	2.53		
55	1.84	155	6.19	255	8.96	355	4.29	455	2.81		
56	1.86	156	5.29	256	4.81	356	5.61	456	2.07		
57	5.87	157	2.38	257	5.73	357	2.8	457	2.57		
58	4.36	158	6.98	258	3.34	358	3.55	458	3.22		
59	1.67	159	4.29	259	4.53	359	3.52	459	6.48		
60	0.12	160	3.49	260	7.34	360	2.51	460	3.03		
61	1.31	161	1.34	261	3.79	361	3.9	461	3.34		
62	1	162	4.54	262	7.65	362	2.31	462	3.6		
63	0.25	163	1.68	263	2.81	363	4.24	463	3.12		
64	0.35	164	2.99	264	3.69	364	1.78	464	3		
65	3.14	165	2.77	265	4.31	365	4.54	465	1.14		
66	3.26	166	2.73	266	7.1	366	2.58	466	2.5		
67	3.28	167	3.93	267	4.77	367	3.04	467	4.04		
68	4.69	168	3.42	268	3.15	368	2.28	468	3.39		
69	1.79	169	2.1	269	2.98	369	3.19	469	4.11		
70	2.88	170	3.4	270	4.4	370	1.75	470	3.2		
71	9.16	171	3.99	271	4.89	371	1.21	471	0.9		
72	5.32	172	3.99	272	3.54	372	3.12	472	2.38		
73	5.13	173	3.06	273	3.05	373	3.6	473	0.99		
74	4.21	174	4.45	274	3.42	374	2.67	474	2.68		
75	3.3	175	5.93	275	3.16	375	3.05	475	1.71		
76	4.07	176	3.29	276	2.77	376	2.72	476	0.25		
77	5.51	177	6.58	277	3.33	377	2.82	477	1.86		
78	4.34	178	2.64	278	2.31	378	2.94	478	1.12		
79	5.87	179	4.08	279	4.17	379	1.66	479	2.94		
80	3.6	180	0.71	280	2.65	380	2.19	480	1.4		
81	5.72	181	2.9	281	1.57	381	4.12	481	1.97		
82	4.69	182	2.85	282	2.78	382	2.25	482	6.04		
83	3.35	183	3.72	283	4.72	383	1.44	483	3.93		
84	3.31	184	3.96	284	3.33	384	3.58	484	1.6		
85	5.3	185	3.9	285	3.1	385	5.06	485	1.2		
86	1.91	186	6.26	286	6.56	386	3.11	486	3.37		
87	2.11	187	3.31	287	5.29	387	5.44	487	3.58		
88	3.58	188	3.59	288	1.97	388	4.44	488	2.35		
89	2.65	189	2.95	289	3.98	389	4.17	489	0.98		
90	3.15	190	4.14	290	5.32	390	2.32	490	3.81		
91	5.39	191	2.71	291	6.49	391	4.26	491	2.67		
92	1.64	192	2.41	292	5.34	392	2.03	492	3.96		
93	4.33	193	4.15	293	8.45	393	1.98	493	1.24		
94	3.07	194	3.98	294	6.66	394	1.78	494	0.39		
95	3.31	195	3.2	295	2.54	395	2.38	495	2.17		
96	1.12	196	4.79	296	2.12	396	2.56	496	1.02		
97	1.18	197	3.2	297	3.73	397	3.93	497	2.39		
98	3.13	198	3.46	298	2.58	398	3.21	498	1.49		
99	5.3	199	4.07	299	4.69	399	2.68	499	1.16		
100	3.88	200	3.1	300	6.99	400	5.9	500	1.33		

Orientation prédominante moyenne par polygone cartographique

1 259.1	101 261.43	201 271.02	301 27.79	401 298.32	501 46.89
2 271.45	102 248.39	202 78.44	302 25.01	402 242.88	502 70.79
3 234.09	103 230.4	203 79.27	303 312.9	403 230.69	503 83.54
4 154.51	104 231.13	204 90.6	304 174.14	404 275.47	504 71.64
5 269.82	105 231.9	205 328.63	305 287.34	405 244.5	505 209.43
6 243.37	106 233.47	206 288.28	306 226.65	406 52.8	506 70.77
7 242.08	107 228.37	207 242.53	307 102.7	407 210.93	507 77.04
8 278.2	108 244.5	208 182.23	308 303.65	408 51.05	508 163.09
9 191.4	109 41.8	209 301.89	309 201.76	409 42.14	509 285.06
10 227.6	110 109.4	210 249.63	310 96.72	410 126.76	510 92.95
11 157.07	111 33.22	211 47.85	311 237.36	411 29.85	511 90.29
12 216.12	112 39.73	212 53.73	312 144.12	412 20.98	512 48.17
13 275.14	113 46.33	213 297.91	313 110.62	413 175.26	513 108.23
14 231.02	114 32.89	214 42.56	314 48.38	414 76.59	514 108.91
15 234.71	115 50.75	215 317.03	315 38.83	415 35.92	515 131.28
16 265.6	116 60.05	216 288.43	316 117.32	416 331.33	516 149.25
17 235.37	117 59.36	217 110.97	317 297.03	417 332.83	517 297.21
18 233.45	118 64.78	218 40.55	318 102.03	418 41.72	518 281.29
19 285.94	119 267.35	219 103.21	319 168.1	419 336.15	519 253.83
20 200.78	120 338.66	220 298.57	320 85.59	420 295.62	520 62.41
21 236.75	121 311.81	221 151.53	321 71.15	421 218.92	521 89.54
22 252.75	122 60.52	222 337.36	322 80.28	422 335.4	522 86.25
23 217.41	123 33.83	223 268.34	323 78.45	423 72.65	523 54.86
24 226.47	124 265.02	224 273.94	324 30.57	424 269.33	524 97.43
25 228.2	125 186.14	225 308.24	325 94.14	425 31.49	525 269.84
26 227.49	126 258.82	226 224.63	326 303.6	426 56	526 85.56
27 237.47	127 311.4	227 188.31	327 274.01	427 253.55	527 98.86
28 227.54	128 280.88	228 177.32	328 305.16	428 274.07	528 65.39
29 225.51	129 278.7	229 205.74	329 166.97	429 310.45	529 210.44
30 228.28	130 306.89	230 185.47	330 73.94	430 95.53	530 261.22
31 229.12	131 318.19	231 202.48	331 80.93	431 292.01	531 252.2
32 172.53	132 277.79	232 275.04	332 55.52	432 87.51	532 91.05
33 232.3	133 206.62	233 165.59	333 48.31	433 96.24	533 85.01
34 209.27	134 27.92	234 274.95	334 52.47	434 68.64	534 75.13
35 80.86	135 46.21	235 255.27	335 282.68	435 221.28	535 104.59
36 197.85	136 65.34	236 298.12	336 73.71	436 37.48	536 257.27
37 209.46	137 310.77	237 291.26	337 71.57	437 39.92	537 294.36
38 200.08	138 306.64	238 318.88	338 89.38	438 47.2	538 182.58
39 247.32	139 273.35	239 170.94	339 174.28	439 214.43	
40 193.13	140 327.3	240 240.79	340 61.49	440 39.55	
41 184.42	141 338.45	241 295.54	341 71.11	441 136.38	
42 272.66	142 328.22	242 292.3	342 253.48	442 248.29	
43 273.54	143 65.92	243 287.1	343 60.68	443 74.2	
44 146.03	144 229.8	244 31.89	344 97.91	444 238.31	
45 243.78	145 321.02	245 236.19	345 65.65	445 295.55	
46 199.63	146 44.12	246 29.33	346 57.28	446 296.31	
47 217.4	147 218.42	247 58.3	347 64.72	447 249.5	
48 245.58	148 52.46	248 236.61	348 65.95	448 235.54	
49 217.69	149 290.82	249 242.8	349 48.06	449 282.53	
50 257.05	150 271.11	250 265.95	350 221.2	450 289.39	
51 221.52	151 318.49	251 235.46	351 226.47	451 268.72	
52 224.55	152 265.54	252 277.04	352 309.44	452 242.62	
53 213.12	153 282.46	253 251.15	353 218.02	453 255.9	
54 206.57	154 105.98	254 227.77	354 204.74	454 298.67	
55 215.31	155 58.1	255 247.54	355 258.12	455 85.13	
56 198	156 40.02	256 231.86	356 227.02	456 99.77	
57 181.04	157 78.53	257 244.11	357 280.27	457 239.44	
58 191.21	158 89.25	258 246	358 261.87	458 328.65	
59 220.96	159 54.21	259 259.06	359 289.31	459 39.05	
60 317.12	160 315.61	260 43.46	360 214.67	460 295.27	
61 240.67	161 284.17	261 127.05	361 311.4	461 286.61	
62 275.27	162 55.28	262 19.53	362 274.34	462 274.44	
63 256.78	163 219.83	263 255.53	363 234.27	463 245.33	
64 280.87	164 206.5	264 263.44	364 237.25	464 247.94	
65 186.21	165 37.58	265 277.76	365 270.32	465 193.94	
66 212.82	166 321.42	266 157.98	366 213.39	466 52.49	
67 219.65	167 298.53	267 324.05	367 47.15	467 31.1	
68 208.1	168 291.59	268 84.02	368 105.79	468 36.9	
69 217.98	169 307.34	269 203.83	369 67.15	469 45.38	
70 177.09	170 307.61	270 49.5	370 88.05	470 33.88	
71 124.3	171 108.03	271 103.57	371 231.05	471 185.99	
72 210.57	172 61.59	272 321.78	372 205.59	472 300.28	
73 176.47	173 90.21	273 48.14	373 264.29	473 74.03	
74 194.28	174 100.76	274 60.91	374 245.27	474 41.66	
75 165.04	175 27.34	275 324.77	375 216.07	475 96.72	
76 218.76	176 284.43	276 318.91	376 202.15	476 131.22	
77 204.62	177 253.51	277 293.18	377 200.32	477 68.29	
78 198.94	178 311.09	278 52.47	378 100.28	478 59.47	
79 221.42	179 44.08	279 262.79	379 199.74	479 63.63	
80 238.11	180 245.53	280 245.44	380 195.74	480 125.54	
81 226.58	181 303.94	281 241.67	381 203.85	481 67.4	
82 245.87	182 283.78	282 179.73	382 153.02	482 52.18	
83 222.08	183 284.27	283 51.51	383 303.83	483 64.19	
84 299.96	184 299.94	284 62.97	384 106.79	484 39.79	
85 286.89	185 96.26	285 63.3	385 94.15	485 48.87	
86 248.32	186 93.1	286 58.24	386 73.88	486 51.76	
87 238.91	187 209.09	287 63.08	387 101.16	487 81.15	
88 282.69	188 56.33	288 83.83	388 167.52	488 100.67	
89 264.83	189 287.27	289 56.72	389 223.24	489 103.39	
90 299.7	190 270.93	290 59.36	390 206.07	490 120.16	
91 272.13	191 59.08	291 51.95	391 278.63	491 109.2	
92 272.72	192 26.81	292 47.21	392 295.2	492 92.29	
93 306.11	193 90.33	293 73.53	393 181.47	493 180.75	
94 302.68	194 119.77	294 151.78	394 233.17	494 47.48	
95 298.59	195 26.57	295 314.26	395 255.31	495 71.47	
96 304.57	196 20.66	296 226.86	396 280.07	496 84.12	
97 295.67	197 275.49	297 326.06	397 309.28	497 110.12	
98 311.17	198 70.69	298 122.22	398 210.36	498 96.35	
99 256.87	199 129.01	299 231.33	399 172.69	499 61.83	
100 278.71	200 59.23	300 185.73	400 312.2	500 97.35	

Concavité / Convexité par polygone cartographique

1 -0.34	100 -1.19	200 0.08	300 -0.56	400 0.01	500 0.17
2 0.09	101 1.15	201 -0.56	301 0.06	401 -1.39	501 0.23
3 0.69	102 1.22	202 -0.36	302 0.33	402 1.07	502 0.15
4 -1.31	103 0.20	203 0.78	303 -0.13	403 0.01	503 1.20
5 0.88	104 0.91	204 3.00	304 -0.55	404 0.11	504 -0.31
6 0.26	105 -0.07	205 0.12	305 -0.02	405 1.43	505 -1.80
7 -0.59	106 2.05	206 1.19	306 -0.13	406 -1.45	506 -0.60
8 2.79	107 -0.63	207 1.19	307 0.81	407 0.75	507 -0.27
9 -2.35	108 1.54	208 4.86	308 0.04	408 0.74	508 -0.86
10 0.75	109 -0.74	209 -0.97	309 0.60	409 -0.61	509 -0.90
11 0.61	110 0.87	210 1.96	310 0.81	410 -0.57	510 0.63
12 -0.11	111 0.70	211 0.36	311 1.17	411 -0.81	511 -0.52
13 1.17	112 -1.58	212 0.91	312 1.73	412 -1.07	512 -0.11
14 -0.82	113 -1.47	213 -0.69	313 -0.97	413 1.26	513 0.20
15 0.16	114 0.22	214 0.69	314 -0.78	414 -0.29	514 0.75
16 0.38	115 0.18	215 0.43	315 -0.69	415 0.70	515 -0.30
17 0.63	116 -1.39	216 0.51	316 -2.13	416 -0.48	516 0.01
18 0.52	117 1.52	217 -0.73	317 -1.54	417 1.40	517 0.25
19 -0.70	118 -0.33	218 -0.61	318 1.25	418 1.44	518 0.16
20 1.64	119 1.36	219 2.62	319 1.24	419 -0.24	519 0.03
21 -1.25	120 -0.24	220 -0.16	320 -1.56	420 -1.09	520 -0.01
22 2.31	121 0.01	221 1.96	321 0.28	421 1.07	521 -0.45
23 -1.55	122 1.11	222 -1.13	322 1.41	422 -0.23	522 1.03
24 0.37	123 -0.04	223 1.02	323 0.30	423 0.00	523 -0.38
25 0.85	124 1.05	224 -0.90	324 -2.13	424 -1.00	524 -0.66
26 -0.01	125 3.11	225 0.31	325 -0.07	425 -0.23	525 0.20
27 0.28	126 -3.21	226 0.85	326 -0.78	426 -1.41	526 0.37
28 -0.35	127 0.27	227 2.38	327 0.13	427 -0.66	527 0.32
29 -1.36	128 -0.37	228 -0.07	328 1.65	428 1.48	528 -0.34
30 0.91	129 0.77	229 -0.22	329 -0.86	429 -1.12	529 -1.54
31 0.64	130 0.00	230 1.04	330 1.57	430 1.16	530 -0.13
32 0.40	131 -0.51	231 -0.16	331 0.07	431 -0.40	531 -0.41
33 -1.18	132 -1.01	232 -0.50	332 0.03	432 0.44	532 -1.68
34 2.08	133 0.94	233 0.74	333 -0.75	433 -0.85	533 1.21
35 1.05	134 0.06	234 0.96	334 0.79	434 0.64	534 0.34
36 0.45	135 -0.16	235 -2.71	335 -1.25	435 -0.61	535 1.88
37 -1.21	136 -0.51	236 0.36	336 -2.64	436 -1.15	536 0.41
38 0.43	137 0.65	237 -0.84	337 0.72	437 0.16	537 0.39
39 -0.64	138 -0.24	238 -0.22	338 0.60	438 -0.25	538 -1.36
40 2.18	139 0.56	239 -3.91	339 0.54	439 -2.00	
41 0.41	140 0.21	240 0.13	340 -1.75	440 -0.67	
42 0.37	141 -0.82	241 -0.22	341 -0.04	441 1.32	
43 2.03	142 -0.25	242 0.06	342 -0.77	442 -0.86	
44 0.30	143 -0.80	243 0.69	343 -0.50	443 0.46	
45 0.82	144 -0.93	244 -0.03	344 0.16	444 -0.02	
46 0.95	145 0.64	245 0.92	345 -0.88	445 -0.81	
47 0.30	146 1.25	246 0.28	346 -2.47	446 -0.23	
48 0.12	147 0.17	247 0.21	347 -0.03	447 -1.59	
49 0.58	148 1.02	248 -0.38	348 1.30	448 0.93	
50 -0.16	149 -0.28	249 0.80	349 -1.03	449 -0.77	
51 -0.62	150 1.51	250 0.50	350 0.88	450 0.52	
52 0.60	151 0.54	251 0.67	351 -2.82	451 -0.05	
53 -0.30	152 -1.20	252 0.20	352 1.31	452 0.35	
54 0.28	153 0.25	253 0.81	353 -0.46	453 1.18	
55 -0.89	154 -1.15	254 1.96	354 1.00	454 -1.08	
56 -0.24	155 -0.57	255 -0.61	355 0.32	455 0.90	
57 0.76	156 -0.65	256 0.31	356 0.93	456 -0.44	
58 -0.05	157 1.15	257 0.28	357 1.10	457 0.74	
59 -0.06	158 -0.02	258 0.19	358 -0.46	458 0.37	
60 -0.22	159 -0.95	259 -1.07	359 -0.02	459 -0.14	
61 0.20	160 0.04	260 -0.24	360 1.16	460 -0.02	
62 0.28	161 -0.27	261 1.01	361 0.33	461 0.96	
63 0.01	162 1.31	262 0.53	362 -0.87	462 0.04	
64 -0.39	163 -1.49	263 -2.62	363 3.09	463 0.13	
65 0.71	164 0.76	264 -1.60	364 -0.53	464 0.34	
66 -0.29	165 -0.03	265 -0.52	365 -0.12	465 -1.30	
67 0.27	166 -0.19	266 -0.62	366 0.46	466 -0.26	
68 0.36	167 0.76	267 0.63	367 -0.16	467 -0.30	
69 0.44	168 -1.70	268 -1.71	368 -0.77	468 0.21	
70 1.67	169 0.94	269 0.97	369 0.41	469 1.20	
71 -2.76	170 1.40	270 -0.22	370 -0.94	470 -1.77	
72 1.03	171 1.10	271 0.73	371 -0.37	471 0.68	
73 1.08	172 0.47	272 0.00	372 0.34	472 0.02	
74 -0.23	173 -0.65	273 0.72	373 1.13	473 -0.13	
75 0.18	174 0.64	274 0.26	374 -2.91	474 0.30	
76 -0.45	175 0.01	275 -0.72	375 0.09	475 0.56	
77 0.75	176 -2.33	276 0.14	376 -1.50	476 0.17	
78 0.55	177 -0.77	277 0.54	377 -2.12	477 0.21	
79 -0.83	178 0.15	278 0.89	378 0.41	478 0.12	
80 -0.01	179 0.03	279 0.51	379 -0.21	479 0.37	
81 0.74	180 1.47	280 -0.56	380 0.35	480 0.18	
82 0.30	181 -0.97	281 0.41	381 0.56	481 -0.80	
83 -4.92	182 0.14	282 -0.66	382 1.06	482 -0.64	
84 3.25	183 0.85	283 -0.78	383 0.07	483 1.10	
85 0.85	184 0.38	284 1.37	384 0.62	484 0.00	
86 2.31	185 1.15	285 0.09	385 -0.72	485 0.13	
87 -2.27	186 1.18	286 -0.17	386 0.18	486 0.32	
88 -1.30	187 -2.14	287 -2.97	387 0.28	487 -0.69	
89 0.71	188 0.19	288 0.86	388 0.49	488 1.71	
90 1.76	189 0.05	289 -1.34	389 -0.20	489 -0.34	
91 0.45	190 -0.05	290 0.90	390 0.49	490 0.36	
92 -0.85	191 -0.95	291 0.47	391 -0.93	491 0.30	
93 2.24	192 0.01	292 0.99	392 0.50	492 0.09	
94 -0.67	193 0.85	293 4.12	393 -1.68	493 0.14	
95 0.92	194 -1.22	294 -1.63	394 -1.51	494 -0.21	
96 -0.08	195 -0.18	295 -0.11	395 0.64	495 0.00	
97 1.52	196 -0.18	296 -0.86	396 -1.12	496 0.40	
98 0.51	197 -1.58	297 -1.04	397 -0.07	497 0.75	
99 0.40	198 1.00	298 1.20	398 2.15	498 0.46	
	199 0.72	299 2.50	399 1.77	499 0.08	

Capacité diffusante, réceptrice et transmettrice des polygones cartographiques

1	121	101	31	201	111	301	120	401	111	501	221
2	120	102	30	202	221	302	30	402	111	502	31
3	110	103	121	203	30	303	221	403	120	503	221
4	110	104	31	204	110	304	110	404	110	504	31
5	110	105	222	205	111	305	221	405	30	505	212
6	222	106	30	206	221	306	30	406	221	506	30
7	221	107	222	207	110	307	110	407	120	507	30
8	110	108	30	208	111	308	30	408	30	508	222
9	110	109	30	209	31	309	110	409	30	509	212
10	110	110	31	210	30	310	221	410	222	510	30
11	110	111	211	211	121	311	30	411	221	511	120
12	221	112	211	212	30	312	30	412	30	512	30
13	110	113	30	213	222	313	221	413	112	513	111
14	31	114	120	214	110	314	30	414	120	514	120
15	120	115	31	215	30	315	30	415	110	515	30
16	30	116	211	216	30	316	111	416	30	516	222
17	30	117	120	217	111	317	30	417	110	517	121
18	31	118	30	218	30	318	212	418	30	518	120
19	111	119	30	219	110	319	110	419	221	519	31
20	111	120	121	220	120	320	221	420	30	520	31
21	120	121	121	221	110	321	120	421	121	521	221
22	110	122	30	222	110	322	112	422	120	522	30
23	120	123	121	223	30	323	30	423	30	523	121
24	31	124	30	224	221	324	121	424	120	524	222
25	30	125	30	225	120	325	31	425	120	525	222
26	221	126	110	226	110	326	30	426	110	526	221
27	221	127	120	227	110	327	30	427	120	527	121
28	30	128	213	228	120	328	120	428	111	528	30
29	120	129	221	229	221	329	30	429	120	529	222
30	221	130	30	230	110	330	110	430	221	530	110
31	120	131	30	231	121	331	122	431	30	531	110
32	221	132	212	232	222	332	221	432	30	532	120
33	221	133	120	233	221	333	221	433	110	533	120
34	111	134	221	234	111	334	120	434	121	534	222
35	110	135	121	235	221	335	30	435	221	535	110
36	31	136	221	236	31	336	120	436	122	536	121
37	212	137	30	237	221	337	30	437	221	537	120
38	30	138	120	238	110	338	110	438	212	538	110
39	221	139	111	239	221	339	30	439	212		
40	111	140	111	240	222	340	110	440	30		
41	30	141	120	241	31	341	221	441	111		
42	31	142	120	242	212	342	30	442	110		
43	110	143	221	243	30	343	123	443	110		
44	30	144	30	244	120	344	120	444	110		
45	30	145	30	245	111	345	30	445	30		
46	111	146	111	246	221	346	30	446	221		
47	120	147	30	247	111	347	222	447	221		
48	30	148	30	248	120	348	110	448	30		
49	120	149	30	249	120	349	110	449	30		
50	110	150	30	250	110	350	221	450	30		
51	221	151	222	251	110	351	222	451	221		
52	31	152	222	252	30	352	120	452	122		
53	120	153	30	253	30	353	31	453	110		
54	121	154	30	254	111	354	111	454	111		
55	110	155	221	255	30	355	111	455	110		
56	120	156	120	256	221	356	30	456	110		
57	121	157	111	257	221	357	121	457	111		
58	221	158	120	258	221	358	221	458	110		
59	221	159	221	259	221	359	110	459	120		
60	30	160	120	260	30	360	111	460	30		
61	110	161	30	261	111	361	221	461	30		
62	110	162	31	262	30	362	221	462	30		
63	110	163	213	263	30	363	110	463	30		
64	221	164	30	264	30	364	120	464	30		
65	30	165	120	265	221	365	122	465	212		
66	120	166	120	266	30	366	30	466	221		
67	221	167	30	267	221	367	221	467	30		
68	221	168	30	268	30	368	31	468	121		
69	122	169	30	269	30	369	30	469	30		
70	110	170	30	270	111	370	221	470	110		
71	30	171	30	271	111	371	213	471	111		
72	110	172	120	272	111	372	110	472	110		
73	30	173	120	273	111	373	110	473	223		
74	120	174	221	274	221	374	213	474	110		
75	31	175	222	275	120	375	30	475	120		
76	31	176	221	276	221	376	121	476	110		
77	221	177	212	277	120	377	30	477	120		
78	30	178	111	278	110	378	221	478	30		
79	221	179	110	279	120	379	222	479	110		
80	30	180	110	280	212	380	30	480	110		
81	222	181	121	281	111	381	120	481	121		
82	30	182	221	282	212	382	111	482	30		
83	212	183	30	283	221	383	30	483	111		
84	111	184	111	284	110	384	110	484	221		
85	30	185	110	285	221	385	30	485	110		
86	111	186	120	286	120	386	221	486	120		
87	120	187	30	287	110	387	221	487	221		
88	221	188	120	288	110	388	221	488	120		
89	31	189	31	289	221	389	30	489	110		
90	121	190	30	290	111	390	110	490	31		
91	120	191	221	291	120	391	110	491	31		
92	110	192	221	292	30	392	30	492	31		
93	110	193	221	293	110	393	221	493	121		
94	221	194	120	294	110	394	221	494	221		
95	120	195	31	295	31	395	221	495	221		
96	30	196	120	296	110	396	221	496	30		
97	110	197	212	297	120	397	30	497	30		
98	110	198	120	298	110	398	110	498	120		
99	30	199	121	299	110	399	111	499	30		
100	31	200	221	300	120	400	121	500	110		

ANNEXE 14

Les différents logiciels utilisés dans le cadre de la présente recherche

Nom	Editeur	Version
Corel Draw pour Windows	Corel Corporation	3.0
Surfer pour Windows	Golden Software Inc.	5.0
MapViewer pour Windows	Golden Software Inc.	1.1
Excel pour Windows	Microsoft	4.0
Lotus 1-2-3 pour DOS	Lotus	2.4
Idrisi pour DOS	Buffalo	4.0
ADDAD	Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse des Données, 22, rue Charcot, F-75013 PARIS, France	-
Profort pour DOS	IBM Corp. & Ryan McFarland Corp.	1.0
Word pour Windows	Microsoft	6.0
LEUROC	Université de Lausanne & Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)	-