



HAL
open science

**Les hydro-écorégions du bassin de la Loire.
Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les
cours d'eau et les bassins-versants**

H. Andriamahefa

► **To cite this version:**

H. Andriamahefa. Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins-versants. Sciences de l'environnement. Doctorat Géographie interface homme-nature et problème d'aménagement, Université Jean Monnet Saint-Etienne, 1999. Français. NNT: . tel-02579099

HAL Id: tel-02579099

<https://hal.inrae.fr/tel-02579099v1>

Submitted on 14 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année 1999

THESE

présentée
devant L'UNIVERSITE JEAN MONNET - SAINT-ETIENNE

pour l'obtention
du DIPLOME DE DOCTORAT
(arrêté du 30 Mars 1992)

présentée et soutenue publiquement le
15/10/1999

par

Heriniaina ANDRIAMAHEFA

LES HYDRO-ECOREGIONS DU BASSIN DE LA LOIRE.

Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours
d'eau et les bassins-versants.

Jury : M. Bernard ETLICHER (Directeur de Recherche)
M. Jean Paul BRAVARD (Rapporteur)
M. Pierre DUMOLARD (Rapporteur)
M. Jacques BETHMONT
M. Louis Charles OUDIN
M. Yves SOUCHON

Travaux réalisés au sein du « Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative »
Unité de Recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques - Cemagref Lyon.

Remerciements.

Je tiens à remercier ici un grand nombre de personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse :

- je remercie B. Etlicher d'avoir accepté de diriger cette thèse,
- je tiens à remercier les membres du jury, et particulièrement les rapporteurs J.P. Bravard et P. Dumolard, qui ont accepté d'évaluer ce travail,
- mes remerciements vont également aux responsables du CRENAM et de la Formation Doctorale de l'Université de St.-Etienne, T. Joliveau, B. Etlicher, J. Bethemont, qui m'ont accueilli, aidé dans la réalisation de mon DEA et de cette thèse,
- ma gratitude à Y. Souchon, Responsable du Laboratoire, qui m'a accordé sa confiance et qui m'a facilité la finition de ce travail,
- je remercie les "têtes pensantes" du Cemagref qui m'ont accueilli et qui m'ont offert non seulement un sujet, mais un bureau, les matériels de travail et l'ensemble des connaissances acquises durant ces années passées chez eux,
- une tranche de la bourse de thèse a été en partie obtenue grâce à la contribution du CRENAM, merci à T. Joliveau,
- mes reconnaissances aux collègues qui ont participé à ce travail : P. Breil, P. Cohen, J.M. Ivol-Rigaut, S. Poquet, H. Pella du Cemagref. B. Dupuis, C. Bessenay, C. Rogers du Crenam, et J.R.Malavoi,
- merci aux relecteurs de ce manuscrit : Y. Souchon, J. Bethemont, J.R. Malavoi, B Etlicher, Ivan et Sylvie (désolé pour le petit nègre, j'y peux rien),
- merci, à Edwige pour la reproduction.

Quelques remerciements personnels :

- les deux thésards de 2nd génération Loire qui ont partagé le terrain, les données, mon bureau et mes ronchons : Jimmy Ivol et Pierre Cohen,
- mes parents (eh oui, mo-maman) et toute la famille de Madagascar,
- l'ensemble des amis et collègues de l'équipe LHQ et de l'équipe CRENAM.

- Cette thèse a commencé par une boutade avec J.R. Malavoi. Il a "tout fait" pour que je puisse revenir en France et faire une thèse (Merci à tous ceux qui ont cotisé). Sans oublier l'ensemble des débats constructifs sur la "science", "l'Afrique" durant ce travail. Sans lui je ne serais pas arrivé là.

- Mamadou Sylvie, du début (avec JR) jusqu'à l'accouchement de ce travail "a-t-été" constamment présente. Elle a enduré de ces années thèse, je la remercie pour toute sa patience. La force de finir vient de Vanille Soa, qui m'a accompagné durant les deux dernières années.

Ma thèse a été écrite en totalité en français, et je compte faire mon dernier mot de remerciement en malgache :

Misaotra anareo tompoko ô!

Une pensée à Laurence.

Résumé.

Les théories sur l'organisation des systèmes (Allen et Star, 1982) nous apprennent que les structures à large échelle gouvernent généralement celles à grain plus fin et la plupart des procédures de classification des systèmes aquatiques se basent sur les fortes associations et interactions entre les écosystèmes terrestre et aquatique (Hynes, 1975).

La méthode des écorégions (Omernik, 1980) ou hydro-écorégions (Wasson et al., 1993) s'appuie sur ces propriétés. Elle identifie des limites à travers de l'analyse de régions écologiques homogènes basées sur la distribution spatiale des variables de contrôle de l'écosystème aquatique : géologie, relief, climat. Sur le bassin de la Loire, une première étude (Wasson et al., 1993) a permis d'identifier 6 hydro-écorégions de premier niveau.

Notre travail a permis de constituer une multitude de plans d'information (caractéristiques physiographiques, réseau hydrographique, occupation du sol, caractéristiques socio-économiques, stations hydrologiques, échantillons de tronçons, des segments, ...), d'outils (SIG et télédétection) et d'analyses (statistiques) à l'échelle du bassin versant de la Loire (120.000 km²).

Notre objectif premier étant de mieux caractériser et valider les hydro-écorégions établies empiriquement à partir des structures physiques globales et des caractéristiques anthropiques des cours d'eau et des bassins-versants.

Pour cela, nous avons analysé plusieurs thèmes :

- les variables de contrôles de l'écosystème aquatique (géologie, climat, relief, réseau hydrographique),
- la morphologie et la morphodynamique des cours d'eau,
- l'hydrologie,
- les aménagements directs (barrages, chenalisation et entretien),
- l'utilisation du sol (population, élevage et occupation du sol).

Ensuite, nous proposons d'autres méthodes objectives de régionalisation sur chaque compartiment étudié, et revenons sur la validation du découpage d'expert à partir des analyses statistiques obtenues dans les étapes précédentes.

Les régions définies se distinguent les unes des autres de point de vue des **caractéristiques physiographiques** : relief, précipitation et géologie. Nous pouvons ainsi dissocier les régions du Massif Central des Tables Calcaires et Massif Armoricaïn. Ceci étant, aucune des régions définies n'a pas d'identité régionale forte. En effet, nous avons pu rencontrer sur l'ensemble des régions des altitudes faibles ou des précipitations moyennes. La variabilité intra-régionale est aussi très forte. Nous pouvons ainsi rencontrer des altitudes allant de 100 m à 1200 m dans la région Massif Central Plateau Limousin.

En général, les ressemblances entre la carte de l'hydro-écorégion et la carte de la géologie ou la carte de la végétation naturelle (écorégions de Dupias et Rey, 1985) sont fortes.

Du point de vue **morphologie des cours d'eau**, nous avons rencontrées les modalités de pente de la vallée forte et les versants en gorge dans les deux régions Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier. A l'opposé, la région Massif Armoricaïn est marqué par des vallées très peu incisées et l'élargissement des vallées est progressif avec la taille du cours d'eau. Les Tables Calcaires sont composées des vallées plates. Le type de **faciès d'écoulement** rapide RAP n'est rencontré que dans la région Massif Central Plateau Limousin cette région. D'autre part le Massif Armoricaïn, et dans une

certaines mesures les Tables Calcaires, on trouve une diversité de faciès faible et une dominance des types faciès plats (PLA) pour les petits cours d'eau et chenaux lenticulaires (CLE) pour les grands cours d'eau. Bien que prévisible, l'intérêt de l'étude repose plutôt sur la quantification de ces phénomènes.

Du point de vue **hydrologique**, nous avons analysé particulièrement pour ce compartiment les caractéristiques dites "éco-hydrologiques" de l'écoulement. Nous avons pu définir 4 traits éco-hydrologiques à partir des 240 stations naturelles : les régimes dominés par des crues prévisibles, des crues imprévisibles, des étiages prévisibles, et des étiages imprévisibles.

La répartition des traits éco-hydrologiques concorde en grande partie avec la classification statistique et le découpage en hydro-écorégions d'experts. Le résultat de la Classification Ascendante Hiérarchique CAH nous a montré 3 grandes zones homogènes dans lesquelles nous retrouvons l'entité Tables Calcaires (TC) au nord de la Loire, l'entité granitique du Massif Armoricaire (MA) sud intérieur, et une entité haut bassin composée du Limousin (MCPL) et du Haut bassin Loire-Allier (MCBLA).

Nous avons étudié 3 types d'aménagement direct : **les ouvrages transversaux, la chenalisation et les entretiens des cours d'eau** à partir des données Schémas Départementaux de Vocation Piscicole (SDVP). Quelques traits marquants ont pu être identifiés sur les analyses effectuées. 90% des tronçons de 5 kilomètres linéaires étudiés présentent au moins une intervention humaine au sens des documents de travail SDVP. La fréquence moyenne des barrages sur l'ensemble du bassin de la Loire est de 0,45 par tronçon-individu, soit 1 à 2 barrages en moyenne par tronçon de 5km. Plus de la moitié des tronçons étudiés ne sont pas entretenus, et ce sont les petits cours d'eau qui sont les plus concernés. Plus du quart des tronçons-individus sont touchés par des interventions humaines de type chenalisation.

Ces différentes caractéristiques ont une composante régionale marquée. D'une part, les hydro-écorégions Sédimentaires, Tables Calcaires et Massif Central Dépressions Sédimentaires sont les plus touchées ; elles présentent le plus fort cumul d'impacts du fait de leurs caractéristiques morphologiques ; D'autre part, la plus forte densité et les volumes les plus importants sont localisés dans le Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier et dans ses contreforts.

Nous avons étudié plus **particulièrement l'impact de la gestion humaine sur les traits éco-hydrologiques** plutôt que sur une caractéristique particulière. Ainsi dans le Massif Central Bassin Loire, nous avons une diminution des crues imprévisibles et en contrepartie une augmentation des étiages prévisibles. Dans le Massif Central Plateau Limousin, quelques stations naturelles sont classées en crue prévisible alors que nous n'avons trouvé ce trait pour les stations influencées. Dans le Massif Armoricaire, les stations ont tendance à présenter plus de traits en étiage imprévisible.

De point de vue **socio-économique**, nous pouvons distinguer les régions à forte densité de **la population**, des communes urbaines, de la population dynamique, en constante évolution et active (Massif Armoricaire et Massif Central Dépressions Sédimentaires) ; une région intermédiaire, avec un dynamisme modéré, les Tables Calcaires ; et des régions à faible dynamisme, des communes rurales, une faible densité de population, un dépeuplement constant (Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier).

Au niveau de **l'élevage**, nous avons constaté deux types principaux : une région à élevage intensif (Massif Armoricaire) ; et les autres régions à élevage extensif.

L'Est et l'Ouest du bassin Ligérien se distinguent nettement du point de vue **occupation du sol** : le Haut Bassin Loire Allier est dominé par la forêt (de feuillus) ; du plateau Limousin jusqu'au contour du Morvan, ce sont les prairies qui dominent. Dans les Tables Calcaires Ligériennes, l'occupation dominante est la culture ; alors que dans le Massif armoricain c'est une dominance de prairies et cultures. Ces grandes tendances d'occupation du sol coïncident fortement avec celles établies dans le cadre du découpage en hydro-écorégions établi par Wasson et al. (1993).

Nous avons pu démontrer que la méthode de régionalisation a la faculté d'intégrer plusieurs échelles, de l'habitat aux bassins-versants, de par son approche descendante. Les questionnaires peuvent ainsi obtenir des informations sur les configurations géographiques (spatialisées) des écosystèmes aquatiques pour chaque unité dans la hiérarchie emboîtée (Frissel, 1986).

Le résultat de la régionalisation est un modèle synthétique de l'espace, ou ce qu'on peut appeler communément "**une boîte à outil**". Un tel modèle est d'importance considérable pour guider l'action dans le domaine de la recherche écologique et de la politique de gestion pour les grands bassins versants en rapport avec le socio-système.

Mots-clés : Régionalisation, écorégion, morphologie, anthropisation, utilisation du sol, aménagements, hydrologie, indice d'artificialisation, cours d'eau, Loire.

Mots-clés supplémentaires : Gestion et évaluation intégrées, typologie, classification, bassin versant, type de vallée, faciès d'écoulement, écosystème aquatique, habitat aquatique, indicateurs, réversibilité, occupation du sol.

Abstract.

Theories on the organization of systems (Allen and Star, 1982) learn us that generally structures to large scale govern those to thinner grain and most procedures of classification of the aquatic systems take as a basis on the strong associations and interactions between ecosystems terrestrial and aquatic (Hynes, 1975).

The method of ecoregion (Omernik, 1980, Wasson and al., 1993) leans on these properties. It identifies limits through the analysis of homogeneous ecological regions based on the spatial distribution of control factors of the aquatic ecosystem : geology, relief, climate. On the Loire basin, a first survey (Wasson and al., 1993) permitted to identify 6 regions of first level.

Our work permitted to constitute a multitude of information (physiographic features, network hydrographic, landscape, socioeconomic features, hydrological gages, samples of reaches, segments,...), of tools (GIS and Remote sensing) and of analyses (statistics) to the scale of Loire basin (120.000 km²).

Our first objective being to characterize and to validate the ecoregion established empirically from the global physical structures and the characteristic anthropogenics of rivers and the basins. For it, we analyzed several themes :

- control factors of the aquatic ecosystem (geology, climate, relief, hydrographic network),
- river morphology and morphodynamic,
- hydrology,
- dams, channelization and restoration,
- the landuse (population, raising and landscape).

Then, we propose other objective methods of regionalization on every studied compartment, and let's come back on the validation of expert's carving from the statistical analyses gotten in the previous stages.

We could demonstrate that the method of regionalization has the faculty to integrate several scales, of the habitat to the basin, by its scaling-down approach. Decision makers can get information thus on the geographical configurations of the aquatic ecosystems for every unit in the fit together hierarchy (Frissel, 1986).

The result of the regionalization is a synthetic model of the space, or what one can call commonly "a tool". Such a model is considerable importance to guide the action in the domain of the ecological research and the politics of management for the large basins in relation with the sociosystem.

Keywords : Regionalization, ecoregion, anthropization, landuse, channelization, morphology, hydrology, streams, Loire basin.

Supplementary keywords : Integrated management and assessment, typology, classification, watershed, valley type, mesohabitat, aquatic ecosystem, indicator, reversibility, landscape.

Avant-propos.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une convention passée entre l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, et le Cemagref de Lyon et le CRENAM-CNRS UMR 5600 de St.-Etienne intitulée : "**Approche écosystémique du bassin de la LOIRE : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion**" (Wasson et al., 1993).

La loi sur l'eau de 1992 préconise le maintien et le respect du fonctionnement global des cours d'eau au sein d'une gestion plus intégrée des ressources en eau. Or, cette ressource et son utilisation sont étroitement liées à des facteurs régionaux ; climat, géologie et topographie conditionnent les milieux et les systèmes humains. L'objectif de ces travaux est donc d'**aider à la définition de règles de gestion régionalisées** des cours d'eau, qu'il s'agisse de la composante spatiale (lits majeur et mineur) ou temporelle (débits), physique ou anthropique.

Sur le bassin de la Loire, une première étude («Loire I» : Wasson et al., 1993) a permis de tracer les contours de régions distinctes, avec deux approches complémentaires. La première approche a abouti au découpage d'hydroécorégions : les critères retenus sont la géologie, l'hydrogéologie, le relief et le climat. Les morphorégions, quand à elles, ont été définies comme des entités géographiques présentant une certaine homogénéité dans la morphologie des vallées.

Plusieurs compartiments sont depuis analysés, et font partie d'une thèse ou d'une étude spécifique au Cemagref de Lyon sur cette base d'hydro-écorégion :

- la variabilité hydrologique, thèse d'Alexis Malafosse (1995),
- les poissons, étude Belliard-Boet (1997)
- la régulation hydrologique, étude de Guy Oberlin (1997),
- les modèles Débit-durée-fréquence (Qdf) pour les crues et les étiages, étude de Gilles Galea (1997),
- les invertébrés benthiques, thèse de Jeanne Marie Ivol-Rigaut (1998),
- l'habitat aquatique, thèse de Pierre Cohen (1998).

Notre travail consiste à l'amélioration du SIG mis en place au Crenam et l'acquisition des données, l'analyse de l'anthropisation des cours et du bassin versant de la Loire. C'est la valorisation de ce travail qui constitue la majeure partie de cette thèse.

Nous tenons à remarquer que diverses personnes se sont associées pour la réalisation de ce travail, et ceci dans divers domaines :

- P. Cohen et J.R. Malavoi pour le recueil de donnée sur la morphologie et la morphodynamique des cours d'eau, Chapitre 2,
- H. Pella pour les manipulations sous SIG, du Chapitre 3,
- P. Breil pour les calculs des caractéristiques éco-hydrologiques du Chapitre 4,
- S. Poquet pour les programmes et les corrections des programmes sous Avenue et C++ , les traitements sur le réseau hydrographique et le Modèle Numérique du Terrain.

SOMMAIRE COURT.

LES HYDRO-ECOREGIONS DU BASSIN DE LA LOIRE.
--

<i>Morphologie, hydrologie , pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins-versants.</i>
--

REMERCIEMENTS.

RESUME.

ABSTRACT.

AVANT-PROPOS.

INTRODUCTION GENERALE.

1. Objectifs de l'étude.....	3
2. Cadre de l'étude.	4
3. Hypothèses	10
4. Les outils et les matériels utilisés.	12

PARTIE 1.**CHAPITRE 1 : LES ECOREGIONS.**

I.1. Introduction.	19
I.2. Bases méthodologiques.....	19
I.3. Méthodes de régionalisation.	25
I.4. Les résultats des régionalisations sur le bassin de la loire.....	30
I.5. Discussions et conclusions.	41

CHAPITRE 2 : TYPOLOGIE REGIONALE DE LA MORPHOLOGIE ET DE LA MORPHODYNAMIQUE DES COURS D'EAU.

II.1. Introduction.....	51
II.2. Bases méthodologiques.	52
II.3. Méthodologie du recueil de données.....	59
II.4. Méthodes de traitement et d'analyse des données.....	67
II.5. Les résultats.....	68
II.6. Conclusion.	85

PARTIE 2

Introduction.....	97
Typologie des objectifs d'interventions en rivière.	98
Typologie des impacts d'interventions en rivière.	99
Application au bassin de la loire.	102

CHAPITRE 3 : LES AMENAGEMENTS DIRECTS : BARRAGES, CHENALISATION ET ENTRETIEN.

III.1. Introduction.	107
III.2. Les données disponibles.	107
III.3. Les données utilisées dans le cadre de cette étude.	109
III.4. Méthodes d'analyse.	115
III.5. Résultats à partir des sdvp.....	115
III.6. Les résultats du fichier "barrages" de l'agence loire-bretagne.....	126
III.7. Conclusion.....	133

CHAPITRE 4 : LES MODIFICATIONS DES REGIMES HYDROLOGIQUES.

IV.1. Introduction.....	137
IV.2. Bases méthodologiques.....	138
IV.3. Présentation des données hydrométriques.....	139
IV.4. Les caractéristiques d'écoulement étudiées.....	141
IV.5. Méthode d'analyse comparative des découpages régionaux à base statistique et à base d'avis d'experts.....	147
IV.6. Les résultats.....	151
IV.7. Conclusions.....	177

CHAPITRE 5 : L'UTILISATION DU SOL.

V.1. Introduction.....	183
V.2. Matériels et méthodes.....	184
V.3. Les traitements.....	188
V.4. Les résultats.....	191
V.5. Conclusions.....	212

PARTIE 3.**CHAPITRE 6 : INDICE D'ANTHROPISATION DES COURS D'EAU DU BASSIN DE LA LOIRE.**

VI.1. Introduction.....	221
VI.2. Indices d'anthropisation : terminologie et cadre conceptuel.....	222
VI.3. Méthodes d'estimation des indices d'anthropisation. variabilité régionale.....	224
VI.4. <i>Exemple 1.</i> utilisation du sol.....	225
VI.5. <i>Exemple 2.</i> barrage, pente de la vallée et facies d'écoulement.....	228
VI.6. <i>Exemple 3.</i> dynamique des cours d'eau et chenalisation.....	233
VI.7. Conclusions et discussions.....	237

CONCLUSION GENERALE.

1. Rappel des objectifs.....	241
2. Validation des hydro-écorégions.....	242
3. Les écorégions (après validation) : un cadre de gestion.....	251
4. Les découpages régionaux : un cadre spatial aux fins de changements d'échelle, un "filtre régional".....	252
5. Perspectives.....	253

BIBLIOGRAPHIE

SOMMAIRE.

LES HYDRO-ECOREGIONS DU BASSIN DE LA LOIRE.
--

<i>Morphologie, hydrologie , pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins-versants.</i>
--

REMERCIEMENTS.

RESUME.

ABSTRACT.

AVANT-PROPOS.

INTRODUCTION GENERALE.

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	3
2. CADRE DE L'ETUDE.	4
2.1. PLAN DE L'ETUDE.....	4
2.2. PROCEDURE DES COLLECTES DE DONNEES.....	8
3. HYPOTHESES.....	10
4. LES OUTILS ET LES MATERIELS UTILISES.	12
4.1.1. <i>Les outils.</i>	12
4.1.2. <i>Analyses statistiques.</i>	12
4.1.3. <i>Les unités spatiales d'intégration.</i>	13

PARTIE 1.**CHAPITRE 1 : LES ECOREGIONS.**

I.1. INTRODUCTION.	19
I.2. BASES METHODOLOGIQUES.	19
I.2.1. DEFINITIONS, OBJECTIFS ET LIMITES DES ECOREGIONS.....	19
I.2.1.1. <i>Définitions des écorégions.</i>	19
I.2.1.2. <i>Objectifs de la régionalisation.</i>	21
I.2.2. QUELQUES EXEMPLES DE REGIONALISATION ET D'ECOREGIONS APPLIQUES A LA PROBLEMATIQUE DE L'ECOSYSTEME AQUATIQUE.	21
I.2.2.1. <i>L'exemple Nord Américain.</i>	22
I.2.2.2. <i>L'exemple du Canada.</i>	22
I.2.2.3. <i>L'exemple de Nouvelle-Zélande : Harding et Winterbourn (1997).</i>	23
I.2.2.4. <i>Quelques applications de l'écorégion en écosystème aquatique.</i>	23
I.3. METHODES DE REGIONALISATION.	25
I.3.1. LES FACTEURS MIS EN JEU POUR UNE DELIMITATION DE LA REGION.	25
I.3.1.1. <i>La géologie.</i>	25
I.3.1.2. <i>Les climats.</i>	25
I.3.1.3. <i>La topographie.</i>	26
I.3.1.4. <i>La végétation naturelle et potentielle.</i>	26
I.3.1.5. <i>La morphologie et la géomorphologie.</i>	26
I.3.2. TRAITEMENTS.	27
I.3.2.1. <i>la délimitation qualitative.</i>	27
I.3.2.2. <i>La délimitation quantitative.</i>	28
I.4. LES RESULTATS DES REGIONALISATIONS SUR LE BASSIN DE LA LOIRE.	30
I.4.1. LES REGIONALISATIONS D'EXPERT.	30
I.4.1.1. <i>Les écorégions de Dupias et Rey (1985).</i>	30
I.4.1.2. <i>Les hydro-écorégions du bassin de la Loire (Wasson et al., 1993).</i>	31
I.4.2. LA REGIONALISATION QUANTITATIVE.	37
I.5. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS.	41

CHAPITRE 2 : TYPOLOGIE REGIONALE DE LA MORPHOLOGIE ET DE LA MORPHODYNAMIQUE DES COURS D'EAU.

II.1. INTRODUCTION.....	51
II.2. BASES METHODOLOGIQUES.	52
II.2.1. QUELQUES APPROCHES SIMILAIRES.	52
II.2.1.1. Une approche par type de vallée : Cupp (1989).....	52
II.2.1.2. les morphorégions de Bethemont (1993).	53
II.2.2. NOTION D'ECOSYSTEME AQUATIQUE.....	56
II.2.2.1. Les compartiments de l'espace aquatique.	56
II.2.2.2. Notions d'échelle spatiale et d'habitat aquatique.	56
II.2.2.3. Notion de tronçon homogène.	57
II.2.2.4. Typologie des faciès d'écoulements.	58
II.3. METHODOLOGIE DU RECUEIL DE DONNEES.....	59
II.3.1. LES DONNEES "TYPE DE VALLEE".....	59
II.3.1.1. Les paramètres de classification.....	59
II.3.1.2. les variables morphologiques.	59
II.3.1.3. Stratégie d'échantillonnage et répartition spatiale des tronçons étudiés.	62
II.3.2. LES DONNEES "FACIES D'ECOULEMENT".....	63
II.3.2.1. Paramètres de classification et les méthodes de mesure.	63
II.3.2.2. Stratégie d'échantillonnage.	63
II.3.2.3. Les cours d'eau sélectionnés et leur répartition spatiale.	64
II.4. METHODES DE TRAITEMENT ET D'ANALYSE DES DONNEES.....	67
II.4.1. LES TYPES DE VALLEE.	67
II.4.2. LES FACIES D'ECOULEMENT.	67
II.5. LES RESULTATS.	68
II.5.1. LES TYPES DE VALLEE.....	68
II.5.1.1. Caractéristiques des variables morphologiques par hydro-écorégion et par rang.	68
II.5.1.2. Caractérisation des types de vallée par hydro-écorégion.	69
II.5.1.3. Approche de type de vallée selon une combinaison des variables morphologiques, (Cupp, 1989)...	73
II.5.1.4. Résultats des analyses statistiques multivariées en ACM. Découpage sans a priori en CAH.	74
II.5.1.5. Résultats des analyses statistiques multivariées. Validation des hydro-écorégions.	76
II.5.2. LES FACIES D'ECOULEMENT.	79
II.5.2.1. Influence régionale sur la variabilité longitudinale des types de faciès.	79
II.5.2.2. La diversité des faciès d'écoulement par hydro-écorégion.....	82
II.5.2.3. Pourcentage des faciès lotique/lentique par hydro-écorégion.....	82
II.5.2.4. Pourcentage des faciès profonds/peu profonds par hydro-écorégion.	84
II.6. CONCLUSION.	85

PARTIE 2.

INTRODUCTION.....	97
TYPOLOGIE DES OBJECTIFS D'INTERVENTIONS EN RIVIERE.....	98
TYPOLOGIE DES IMPACTS D'INTERVENTIONS EN RIVIERE.....	99
APPLICATION AU BASSIN DE LA LOIRE.....	102

CHAPITRE 3 : LES AMENAGEMENTS DIRECTS : BARRAGES, CHENALISATION ET ENTRETIEN.

III.1. INTRODUCTION.	107
III.2. LES DONNEES DISPONIBLES.....	107
III.2.1. LES SCHEMAS DE VOCATION PISCICOLE.	108
III.2.1.1. Les données morphologiques.....	108
III.2.1.2. Les données hydrologiques.....	108
III.2.1.3. Les données concernant les aménagements.....	108
III.2.2. LE FICHIER "BARRAGES" DE L'AGENCE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE.	109

III.3. LES DONNEES UTILISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.	109
III.3.1. LES INTERVENTIONS DIRECTES.	109
III.3.1.1. <i>Les aménagements transversaux. les barrages.</i>	109
III.3.1.2. <i>Les aménagements longitudinaux.</i>	110
III.3.1.3. <i>Les actions d'aménagement au sens large.</i>	111
III.3.2. LES TRONÇONS RENSEIGNES.	111
III.3.2.1. <i>Nombre total de tronçons renseignés.</i>	111
III.3.2.2. <i>Quelques considérations sur le recueil de données.</i>	111
3.2.2.1. L'inadéquation du recueil de données.	111
3.2.2.2. Les petits cours d'eau.	112
3.2.2.3. Les problèmes liés aux dossiers des schémas piscicoles.	112
3.2.2.4. Les aménagements non représentés dans un SDVP.	112
III.4. METHODES D'ANALYSE.	115
III.5. RESULTATS A PARTIR DES SDVP.	115
III.5.1. ANALYSE DE LA REPARTITION DES INTERVENTIONS EN FONCTION DES RANGS UNIQUEMENT.	115
III.5.1.1. <i>La fréquence des barrages.</i>	115
III.5.1.2. <i>Les actions d'entretien.</i>	116
III.5.1.3. <i>Les actions de chenalisation.</i>	116
III.5.1.4. <i>Les actions d'aménagement au sens large.</i>	117
III.5.2. ANALYSE DE LA REPARTITION DES INTERVENTIONS EN FONCTION DES HYDRO-ECOREGIONS ET DES RANGS.	117
III.5.2.1. <i>La fréquence des barrages.</i>	117
III.5.2.2. <i>Les actions d'entretien.</i>	119
III.5.2.3. <i>Les actions de chenalisation.</i>	120
III.5.2.4. <i>Les actions d'aménagement au sens large.</i>	121
III.5.3. ANALYSES DE LA RELATION DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES COURS D'EAU ET DES FREQUENCES D'INTERVENTIONS. TYPOLOGIE.	123
III.6. LES RESULTATS DU FICHER "BARRAGES" DE L'AGENCE LOIRE-BRETAGNE.	126
III.6.1. LOCALISATION ET DENSITE DES OUVRAGES.	126
III.6.2. DISTRIBUTION DES HAUTEURS DE BARRAGE.	127
III.6.3. VOLUMES RETENUS.	127
III.6.4. VOCATION DES OUVRAGES.	130
6.4.1.1. la régulation hydrologique.	130
6.4.1.2. l'irrigation.	130
6.4.1.3. L'hydroélectricité.	130
6.4.1.4. Alimentation en eau potable.	130
6.4.1.5. Industries et navigation.	131
6.4.1.6. Loisirs.	133
III.6.4.2. <i>Autres caractéristiques.</i>	131
III.7. CONCLUSION.	133

CHAPITRE 4 : LES MODIFICATIONS DES REGIMES HYDROLOGIQUES.

IV.1. INTRODUCTION.	137
IV.2. BASES METHODOLOGIQUES.	138
IV.3. PRESENTATION DES DONNEES HYDROMETRIQUES.	139
IV.3.1. QUALIFICATION DES STATIONS EN REGIMES NATUREL OU INFLUENCE.	139
IV.3.2. ECHELLES DE TEMPS DES VARIABLES HYDROLOGIQUES.	141
IV.4. LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ETUDIEES.	141
IV.4.1. LES CARACTERISTIQUES DE DEBITS.	141
IV.4.2. CHOIX D'UN DEBIT DE STANDARDISATION POUR LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ECO-HYDROLOGIQUES.	142
IV.4.3. LES CARACTERISTIQUES ECO-HYDROLOGIQUES.	144
IV.4.3.1. <i>Les débits classiques.</i>	144
IV.4.3.2. <i>Les descripteurs "Cemagref".</i>	144
IV.4.3.3. <i>Les caractéristiques d'écoulement de prévisibilité et de saisonnalité.</i>	145
IV.4.3.4. <i>Les caractéristiques d'écoulement dites "éco-hydrologiques" des espèces aquatiques.</i>	145
IV.4.3.5. <i>Les caractéristiques d'écoulement pour estimer l'altération hydrologique.</i>	145
IV.5. METHODE D'ANALYSE COMPARATIVE DES DECOUPAGES REGIONAUX A BASE STATISTIQUE ET A BASE D'AVIS D'EXPERTS.	147

IV.5.1. ANALYSE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ENTRE LES STATIONS NATURELLES ET LES STATIONS INFLUENCEES.	147
IV.5.2. DEFINITION DES TRAITS ECO-HYDROLOGIQUES A PARTIR DES STATIONS NATURELLES. ANALYSE COMPARATIVE AVEC LES STATIONS INFLUENCEES.	147
IV.5.3. PERTINENCE DES HYDRO-ECOREGIONS ET ESSAI DE REGIONALISATION DES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES A PARTIR DES STATIONS NATURELLES.....	148
IV.6. LES RESULTATS.	151
IV.6.1. UNE ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT.	151
IV.6.2. UNE ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES STATIONS NATURELLES ET INFLUENCEES SUR LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ECO-HYDROLOGIQUES.	153
IV.6.3. ANALYSE DE CORRELATION DES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT A PARTIR DES STATIONS NATURELLES.....	156
IV.6.4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMALISEES.	156
IV.6.5. DETERMINATION DE TRAITS ECO-HYDROLOGIQUES.....	160
IV.6.6. INFLUENCES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES SUR LES TRAITS ECO-HYDROLOGIQUES.....	162
IV.6.6.1. Résultats des traits hydrologiques. Analyse des effets des ouvrages hydrauliques selon l'appartenance à une région.	162
IV.6.6.2. Analyse des effets des ouvrages hydrauliques sans a priori d'appartenance à une région.	165
IV.6.7. PERTINENCE DU DECOUPAGE EN HYDRO-ECOREGIONS A PARTIR D'UNE ANALYSE DISCRIMINANTE.	168
IV.6.8. CARACTERISATION ECO-HYDROLOGIQUE ET VALIDATION DU DECOUPAGE D'EXPERTS EN HYDRO-ECOREGIONS. COMPARAISON INTER-REGIONS.	169
IV.6.9. TYPOLOGIE BASEE SUR UNE CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH) DES CARACTERISTIQUES ECO-HYDROLOGIQUES.	172
IV.7. CONCLUSIONS177	177

CHAPITRE 5 : L'UTILISATION DU SOL.

V.1. INTRODUCTION.....	183
V.2. MATERIELS ET METHODES.....	184
V.2.1. LES DONNEES.....	184
V.2.1.1. Les données INSEE/RGA - RGP.	184
V.2.1.2. Les données CORINE Land Cover.....	184
V.2.2. CHOIX METHODOLOGIQUES.	185
V.3. LES TRAITEMENTS.....	188
V.3.1. LES TRAITEMENTS SURFACIQUES.....	188
V.3.1.1. Traitement des données INSEE.....	188
V.3.1.2. Traitement des données CORINE.....	188
V.3.2. LES TRAITEMENTS LINEAIRES.....	190
V.3.2.1. Traitement des données BD Carthage (1:50 000 ^{ème}).	190
V.3.2.2. La superposition entre le buffer et l'occupation du sol.	190
V.4. LES RESULTATS.....	191
V.4.1. LES RESULTATS. CARACTERISATION DES HYDRO-ECOREGIONS.....	191
V.4.1.1. La population du bassin de la Loire.....	191
V.4.1.2. Les élevages du bassin de la Loire.....	195
V.4.1.3. L'occupation du sol du bassin de la Loire. Analyse surfacique.....	198
V.4.1.4. Les occupations du sol à l'échelle du linéaire des cours d'eau. Caractérisation par hydro-écorégion.....	206
V.4.2. LES RESULTATS. ESSAI DE REGIONALISATION DE L'UTILISATION DU SOL SANS A PRIORI.....	210
V.4.2.1. Résultats des occupations des sols calculées à partir des données CORINE sur des bassins versants unitaires.	210
V.5. CONCLUSIONS.....	212

PARTIE 3.

CHAPITRE 6 : INDICE D'ANTHROPISATION DES COURS D'EAU DU BASSIN DE LA LOIRE.

VI.1. INTRODUCTION.....	221
VI.2. INDICES D'ANTHROPISATION : TERMINOLOGIE ET CADRE CONCEPTUEL.....	222

VII.2.1. DEFINITIONS.	222
VII.2.2. OBJECTIFS.	222
VII.2.3. HYPOTHÈSES.	224
VI.3. METHODES D'ESTIMATION DES INDICES D'ANTHROPISATION. VARIABILITE REGIONALE.	224
VI.4. EXEMPLE 1. UTILISATION DU SOL.	225
VII.4.1. MÉTHODE.	225
VII.4.2. RESULTAT.	225
VI.5. EXEMPLE 2. BARRAGE, PENTE DE LA VALLEE ET FACIES D'ECOULEMENT.	228
VII.5.1. MÉTHODE.	228
VII.5.2. RESULTAT.	230
VI.6. EXEMPLE 3. DYNAMIQUE DES COURS D'EAU ET CHENALISATION.	233
VII.6.1. MÉTHODE.	233
VII.6.2. RESULTATS.	233
VI.7. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS.	237

CONCLUSION GENERALE.

1. RAPPEL DES OBJECTIFS.	241
2. VALIDATION DES HYDRO-ECOREGIONS.	242
2.1. CADRE PHYSIQUE GLOBAL.	242
2.2. CARACTERISTIQUES ANTHROPIQUES.	248
3. LES ECOREGIONS (après validation) : UN CADRE DE GESTION.	251
4. LES DECOUPAGES REGIONAUX : UN CADRE SPATIAL AUX FINS DE CHANGEMENTS D'ECHELLE, UN "FILTRE REGIONAL".	252
5. PERSPECTIVES.	253

BIBLIOGRAPHIE

Introduction générale.

Dans cette introduction générale, nous établirons les objectifs de l'étude, mettrons en place le plan de l'étude, puis identifierons les paramètres, les méthodes de collecte de données, les hypothèses de simplification et les procédures d'analyse de données ainsi que la restitution des résultats pour atteindre ces objectifs.

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE.

Pour gérer un écosystème, plusieurs informations sur la nature et la distribution des phénomènes qui régissent cet écosystème sont nécessaires. Il faut définir, pour développer ce type d'information, des bases de travail et bâtir les inventaires des composants qui le constituent. Nous devons pour cela obtenir de meilleures informations sur la distribution, les configurations, les processus, et les rapprochements entre les systèmes physiques et les systèmes biologiques régissant les processus écologiques, incluant les effets de l'utilisation de l'espace et des activités de l'homme. Au sein d'un dispositif complexe d'acteurs de la gestion au sens large, le chercheur aura pour tâche de questionner la pertinence des paramètres et des plans d'information. Tout en mettant à disposition des supports et des outils performants.

L'évaluation écosystémique offre un moyen d'intégrer les connaissances entre les disciplines (notamment sociales, économiques et biophysiques), méthodes et niveaux de résolutions. Elle synthétise et intègre ces informations sous une forme utile pour les acteurs participant au processus décisionnel en matière d'environnement. La recherche dans les différentes composantes de l'écosystème aquatique conduit à comprendre : (i) la connaissance et la prédiction des impacts de l'homme dans l'ensemble de cet écosystème et l'état de l'environnement, (ii) la quantification des valeurs des variables et des processus responsables de ces impacts, et (iii) l'évaluation de la potentialité de la tolérance du milieu vis à vis de ces impacts.

La plupart des procédures de classification des systèmes aquatiques se basent sur les fortes associations et interactions entre les écosystèmes terrestre et aquatique, et donc par conséquent, elles mettent en avant le rôle des traits géographiques qui influencent l'état du bassin-versant (Likens et Bormann, 1974 ; Hynes, 1975 ; Lotspeich, 1980 ; Lotspeich et Platts, 1982 ; Brussock et al., 1985 ; Frissel et al., 1986 ; Naiman et al., 1990). Les méthodes de la régionalisation écologique, ou écorégions, s'inscrivent dans ce cadre, car elles groupent des déterminants physiques connus qui structurent et contrôlent la fonction de l'écosystème aquatique (Lotspeich, 1980). La supposition intrinsèque à cette approche est que les écosystèmes et leurs composants montrent une différenciation régionale qui est le reflet de différentes combinaisons de facteurs biogéographiques : géologie climat, sols et relief (Larsen et al., 1986; Omernik, 1987, Wasson, Bethemont et al., 1993, Gérardin et al, 1997).

C'est ce challenge très "holistique" (Rowe et Sheard, 1981 ; Bailey, 1983) que nous avons tenté de relever dans cette thèse. Nous tenterons ainsi de mettre en évidence les caractéristiques régionales d'un grand bassin français, la Loire, son hydrosystème, ses caractéristiques physiques (géologie, hydrologie, pédologie...) mais aussi socio-économiques (occupation des sols du bassin-versant et des vallées...). L'objectif étant de proposer à terme, plusieurs plans d'informations pour l'établissement des orientations de gestion écologique adaptées à chaque "type fonctionnel régional".

Ce travail s'inscrit parfaitement donc dans le cadre des différentes lois françaises : (i) sur l'orientation de gestion par Bassin (Loi Pêche, 1984) et plus récemment sur l'établissement des SDAGE (Loi sur l'eau, 1992). En effet, les outils d'analyse à ces échelles, à notre connaissance, faisaient défaut jusqu'à une période récente, et ne constituaient pas le lien entre le bassin-versant (surfacique) et les cours d'eau (linéaire). Il pourrait s'avérer ainsi être un outil d'aide à la décision reposant sur une **régionalisation** des phénomènes et des problèmes de l'hydrosystème. C'est un parti pris fort, qui fait l'hypothèse d'un fonctionnement et de pressions différenciées, donc de solutions de couches différenciées.

2. CADRE DE L'ETUDE.

Pour aborder la question de l'anthropisation des cours d'eau sur un bassin de l'ordre de 120.000 km², il faut, en premier lieu, définir les espaces géographiques dans lesquels cette approche multidisciplinaire est conduite. L'approche en écorégions ou en hydro-écorégions (application des écorégions dans le cadre de l'étude sur le bassin de la Loire) répond à cette fin, c'est aussi le cadre initial de notre travail qui est inclus dans un ensemble d'approches (Wasson, Bethemont et al., 1993). Son objectif est de rendre plus lisibles et plus convaincantes la finalité, les problématiques et l'organisation des informations en vue de la gestion des milieux aquatiques.

Nous avons pris en considération une démarche descendante. En effet nous considérons que la portée d'une étude régionale serait nécessaire pour prédire les conditions potentielles et présentes de systèmes aquatiques sur les niveaux locaux. Nous avons aussi émis l'hypothèse que le développement d'un schéma hiérarchique de la régionalisation est basé sur les potentialités et les capacités de l'environnement mais pas de son état actuel ni des états de ses composants (Warren, 1979).

Sachant que l'état de l'écosystème est déterminé par les facteurs naturels et les facteurs anthropiques qui réagissent réciproquement dans l'espace et le temps, la régionalisation est destinée :

- à satisfaire une gamme d'applications à diverses échelles d'analyse écologique, dont par exemple la planification durable des ressources,
- au développement d'une approche écologique plus standardisée à l'échelle nationale, voire européenne,
- à la classification et à la cartographie des écosystèmes.

Précisons que si nous voulons quantifier l'impact de l'homme sur le milieu, ainsi que les potentialités de restauration de ces divers milieux, il faut pouvoir évaluer l'écart entre un état naturel (état du cours d'eau en équilibre morphodynamique actif ou stabilisé) et un état artificialisé (état modifiant la morphologie qui serait obtenu par l'équilibre des processus morphodynamiques).

Précisons également que la notion de région peut ne pas être la même pour les scientifiques, les gestionnaires et les décideurs politiques. Les propositions que nous faisons

doivent donc être soumises à la critique des parties prenantes aux modalités de la gestion (Agence de l'Eau, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), en l'occurrence le bassin de la Loire.

Précisons enfin que notre travail n'a pas une portée exhaustive, mais propose seulement une méthode de mise en œuvre.

L'erreur aléatoire attachée à une telle méthode est assez grande et, c'est pourquoi, nous ne devons pas accorder trop d'ampleur à chaque étude effectuée mais nous pouvons, en revanche, en tirer une tendance globale.

Cette étude a une vision large des phénomènes d'anthropisation des cours d'eau, elle serait et servirait donc comme un élément de première approche d'une étude des milieux aquatiques et en aucun cas ne devrait ou ne pourrait se substituer aux études spécifiques nécessaires aux études de cas.

2.1. PLAN DE L'ETUDE.

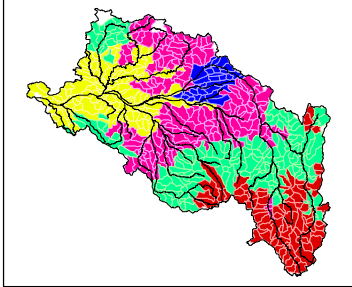
La thèse se structure selon la figure I.1 et se divise en 3 grandes parties (Figure I.2). Son ossature concerne la validation du découpage d'expert (les hydro-écorégions) et la mise en place ensuite, la comparaison avec un découpage objectif basé sur des analyses statistiques.

Partie 1. Cette approche à la fois écosystémique et régionale peut être définie comme une évaluation complète et globale de l'état de l'environnement. Elle reconnaît la complexité des écosystèmes, met l'accent sur le fait que les êtres humains font en réalité partie des écosystèmes et elle adopte les écorégions comme unités spatiales. Elle examine les inter-relations dans et entre les composantes régionales. Les interactions peuvent se produire (1) entre les éléments d'une même écorégion, (2) entre les écorégions, (3) entre les composantes environnementales et les activités humaines, et (4) entre les éléments sociaux, économiques et environnementaux. L'objectif de la mise en place d'une typologie régionale est donc de tester une méthodologie qui permettrait à terme de classer l'ensemble de l'aréal (région) et du linéaire des cours d'eau, de définir et de quantifier ensuite clairement chaque type identifié précédemment.

INTRODUCTION GENERALE

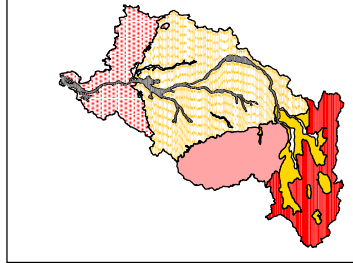
**Etape 1 - Partie 1
REGIONALISATION**

Découpage objectif en écorégions



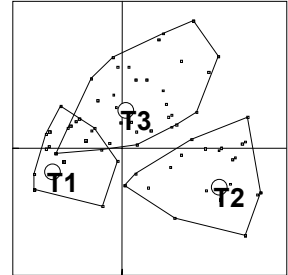
5 régions obtenues sur 4 variables

Découpage en hydro-écorégions
Avis d'experts



Validation
- type de vallée
- faciès d'écoulement

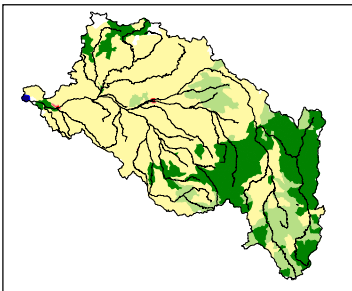
Classification des types de vallée
Méthode statistique
Exemple Rang 1 - 3 types



Type de vallée : T1 = Type 1 ;
T2 = Type 2 ; T3 = Type 3 ;

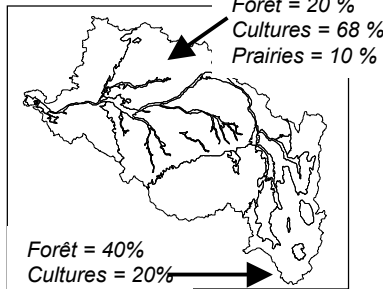
**Etape 2 - Partie 2
ANTHROPISATION**

Découpage objectif de l'anthropisation
Test sur le bassin versant

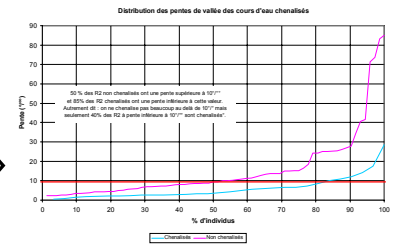


Occupation dominante par BV en 5 classes

Analyse de l'anthropisation sur canevas hydro-écorégion :
- l'utilisation du sol,
- les barrages, entretien et chenalisation
- les modifications des régimes hydrologiques.



Découpage objectif de l'anthropisation
Test sur le linéaire du cours d'eau



**Etape 3 - Partie 3
EXEMPLE D'INDICES D'ARTIFICIALISATIONS**

Essai d'indice d'anthropisation sur canevas hydro-écorégion :
Exemples sur :
- l'habitat aquatique
- dynamique des cours d'eau

CONCLUSION GENERALE

Figure 1.1 : Structure et démarche globale de la thèse appliquée au bassin de la Loire.

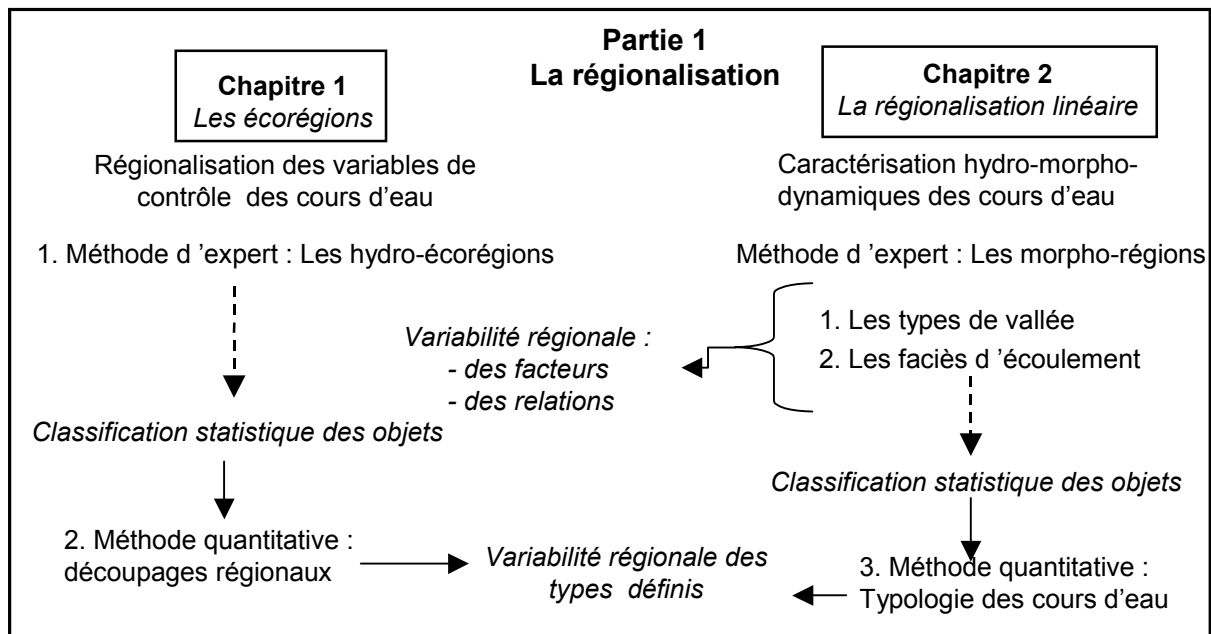


Figure 1.2.a : Partie 1, La régionalisation.

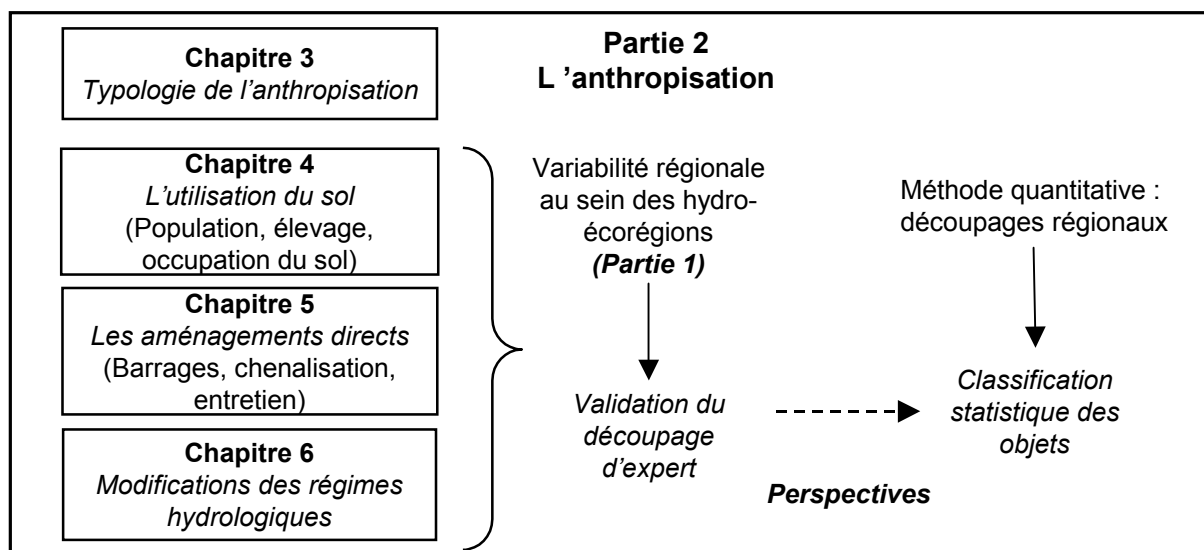


Figure 1.2.b : Partie 2, L'anthropisation.

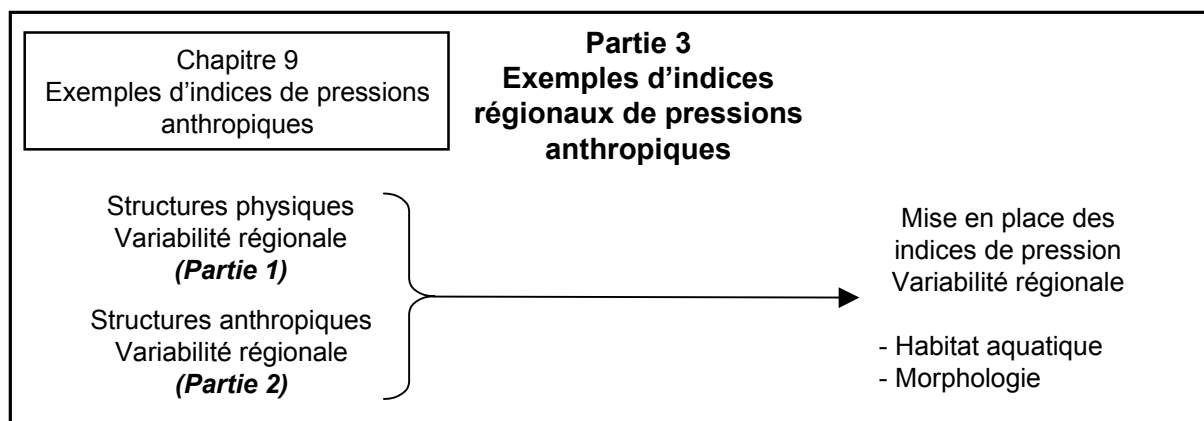


Figure 1.2.c : Partie 3, Exemples d'indices régionaux.

Figure 1.2 : Structure et démarche de parties, de chapitres de la thèse.

Partie 2. Cette partie propose ensuite – sans prétendre à l'exhaustivité - de développer des séries d'exemples d'anthropisation des cours d'eau qui reflètent aussi bien les états de l'écosystème que les processus qui visent à le stabiliser ou à le modifier. Ces exemples permettront d'évaluer les croisements d'échelles spatiales, impliquant l'utilisation des outils statistiques, et leur application à travers les découpages en écorégions. En outre, ces exemples seront basés sur l'information prête, accessible et disponible dans le cadre d'un Système d'Information Géographique (SIG), donc modifiable en temps réel. Cette étude implique l'évaluation de l'état de l'écosystème à partir de la quantification et la répartition régionale des caractéristiques de l'anthropisation des cours d'eau du bassin de la Loire.

Les objectifs sont (i) d'analyser l'association de la typologie du milieu (écosystème) et la typologie des structures (socio-système), (ii) de faire ressortir une typologie des "pathologies" régionales dominantes des cours d'eau en fonction de leurs caractéristiques écologiques, et hydrologiques naturelles, ainsi que l'occupation humaine. Quatre catégories majeures d'anthropisation des écosystèmes aquatiques ont été prises en compte :

- l'utilisation du sol,
- les aménagements directs des cours d'eau,
- les modifications des régimes hydrologiques.

Partie 3. La dernière partie de la thèse se propose d'abord de définir un indice de pression des types d'anthropisation exprimé en termes d'indice d'artificialisation, étant entendu que celui-ci dépend de la fragilité des milieux et de leur faculté de récupération face à des agressions. Ensuite d'estimer l'intensité régionale de cet indice d'artificialisation. Comme ce thème est très large, nous nous limitons à quelques exemples et études de cas concernant certains objectifs (dynamique des cours d'eau, habitat aquatique). Nous avons essayé de développer quelques exemples qui intègrent les facteurs à l'échelle de la région avec les caractéristiques hydrologiques et physiques des cours d'eau à l'échelle des tronçons pour en tirer des indices. Ces indices régionaux de l'état des rivières sont des approches importantes pour l'évaluation écologique. Les indices biologiques (par exemple IBGN) sont une des sources principales d'information sur l'état écologique des eaux de surface, et les mesures des indices d'artificialisation aideraient beaucoup à interpréter cette information biologique.

2.2. PROCEDURE DES COLLECTES DE DONNEES.

Nous avons rassemblé (à partir d'études antérieures, notamment : Wasson, Bethemont et al., 1993 et Bessenay et al., 1997), collecté et développé une grande base de données spatiales, organisées en système d'information géographique et réparties comme dans le Tableau I.1.

Ce tableau présente la structure de notre base. Par la suite et dans chaque chapitre étudié, nous rentrerons plus en détail sur les caractéristiques de ces données et les moyens mis en œuvre pour leur collecte.

Comme nous l'avons dit, notre travail porte sur les 3 causes majeures d'altération et d'artificialisation du milieu : l'occupation humaine des bassins versants, les aménagements directs des cours d'eau, et enfin la gestion hydrologique. Outre ces quatre grands thèmes, nous avons aussi comme principale base de données les caractéristiques physiques des cours d'eau et de leurs bassins versants : géologie, climat, type de vallée, faciès d'écoulement.

Tableau I.1 : Thèmes abordés dans la thèse et données.

CHAPITRE	ÉTUDE	COMPARTIMENT ETUDIE	RÉGIONS TESTÉES	ECHANTILLONS
1	REGIONALISATION AREALE	Ecorégions	5	600 bassins versants unitaires
2	REGIONALISATION LINEAIRE	Type de vallée	5	750 tronçons
		Faciès d'écoulement	3	210 tronçons
4	UTILISATION DU SOL	Population, élevage, occupation du sol,	5	5900 communes et 32 Départements 600 bassins versants unitaires
5	AMENAGEMENTS DIRECTS	Barrage, chenalisation, entretien des cours d'eau	5	450 tronçons et 1260 barrages recensés.
6	REGIMES HYDROLOGIQUES	Caractéristiques de débits classiques et éco-hydrologiques	5	345 stations hydrométriques
Annexe	TRANSFERT DE NUTRIMENTS	Productions de nitrates	5	600 bassins versants unitaires
Annexe	ENERGIE SPECIFIQUE ET GRANULOMETRIE	Indice de réversibilité des chenalisations	3	250 tronçons

Le tableau I.1 met en évidence :

- la grande quantité d'informations traitées. Etant donnée la surface totale du bassin de la Loire, la quantité d'informations traitées lui est proportionnelle,
- l'hétérogénéité et la disparité des données prises en compte dans le cadre de cette étude, que ce soit en taille ou en précision,
- l'absence de lien entre les différentes bases de données. Les données analysées pour les différents composants n'ont pas de structure de liaisons, il est donc difficile d'interpréter des relations directes entre ces composants. Un des objectifs des écorégions est d'établir une relation et une liaison indirecte à partir d'un cadre spatial,
- les données utilisées dans un chapitre et retraitées dans un autre.

Malgré ces défauts, le temps et les contraintes de l'acquisition dictent fréquemment l'usage de données existantes. Le besoin continu d'utiliser les données existantes comme une base de décision de l'environnement est une des controverses les plus importantes concernant le développement d'un système intégré de l'environnement.

3. HYPOTHESES

Se placer à une échelle telle que celle du bassin de la Loire, conduit à établir des hypothèses de simplification et de cadrage vis-à-vis de plusieurs paramètres : les données, les outils, les précisions, l'échelle d'approche. Nous citons quelques unes de ces hypothèses.

- **Notion de cours d'eau moyen.**

L'approche que nous menons dans cette étude est dans sa majorité centrée sur les cours d'eau de rang 2 à 5 (à l'échelle de 1:50.000ème) .

La définition des rangs dépend largement des échelles où elle est déterminée. Les cours d'eau de rang 3 sur une échelle de 1:10.000ème passent au rang 1 à l'échelle de 1:100.000ème. C'est pourquoi, travaillant à l'échelle du 1: 50.000ème, nous avons omis l'analyse des cours de rang 1 sur certains compartiments. De même, pour les cours d'eau pérennes et non pérennes dont la définition dépend de la saison du passage pendant la collecte d'informations.

Pour les grands cours d'eau d'un rang supérieur à 5, nous considérons qu'ils commencent à avoir des caractéristiques de fonctionnement propres avec un héritage de plusieurs écorégions traversées. C'est pourquoi nous les avons exclu dans cette étude. Nous verrons dans le Tableau I.2 que les cours d'eau de rang 1 calculés à partir du BDCarthage© (1:50.000ème, Source IGN et Agence de l'Eau Loire Bretagne) constituent plus de la moitié (57 %) du total linéaire dans le bassin de la Loire, alors que les cours d'eau de rang supérieur à 5 ne constituent que 8 % seulement de l'ensemble linéaire.

Tableau I.2 : Distribution des rangs de Strahler sur le bassin de la Loire, calculée sur le BDCarthage©.

<i>Rang de Strahler</i>	<i>Linéaire Total (en</i>	<i>% du Linéaire</i>
Rang 0	100	0%
Rang 1	55500	57%
Rang 2	19550	20%
Rang 3	10530	11%
Rang 4	5650	6%
Rang 5	3420	4%
Rang 6	1620	2%
Rang 7	600	1%
Rang 8	500	1%
Loire	97480	100%

- **Notion d'homogénéité des données.**

Une des hypothèses majeures sur laquelle repose cette étude, est l'utilisation de données **homogènes, disponibles**, pertinentes et reproductibles (aide à la décision des découpages du SAGE ou similaire) à l'échelle du bassin.

- **Notion de précision.**

L'approche basée sur un diagnostic portant sur chaque système par type de milieu et type de problème ne permet pas de prendre comme facteur important la précision mais la

pertinence en terme de fonctionnement et l'homogénéité à l'échelle du bassin. Nous ne nous exprimerons donc dans cette étude qu'en termes de tendances des perturbations régionales du milieu.

- **Notion d'échelle.**

Pour développer, évaluer, et intégrer des indicateurs à travers de multiples échelles spatiales, l'étude utilisera une stratégie hiérarchisée d'échantillonnage et une stratégie de modélisation intégrant des données rassemblées aux échelles régionales, aux échelles locales, et aux échelles de l'habitat (toutes les dimensions en fonction du sujet biologique étudié). Ces données seront employées pour identifier, à chaque échelle, les indicateurs qui reflètent un ou plusieurs processus critiques pour l'écosystème ou des variables liées à l'intégrité de cet écosystème. L'étude développera et testera des indicateurs représentant des variables et des processus de forçage fondamentaux aux échelles spatiales multiples, et les intégrera dans un système permettant l'identification de leurs tendances.

- **La notion d'acteur et d'objectif.**

La diversité des situations dans un espace géographique donné est grande, entre catégories d'acteurs comme au sein d'une même catégorie. En conséquence, l'idée qu'il serait efficace (en imaginant que cela soit possible) d'imposer une solution unique à un problème donné est illusoire : pertinente pour certains des acteurs concernés, la solution imposée ne le serait pas pour tous. Au contraire, c'est une offre diversifiée, conçue en fonction d'un diagnostic sur la région qui met en évidence aussi bien les problèmes généraux que le choix des différents acteurs, qu'il faut proposer aux personnes impliquées dans ces processus, afin qu'elles en tirent les éléments de nouvelles pratiques. Nous reconnaissons pourtant que notre approche est proche de celle des biologistes et des spécialistes de l'écologie aquatique sans qu'elle se limite pour autant à ces deux domaines.

La question que l'on doit traiter en premier lieu est évidemment celle de **l'identification des enjeux régionaux** et des besoins réels en recherche. Elle nécessite bien sûr des avis d'experts et la synthèse des connaissances disponibles, connaissances déjà nombreuses en raison des travaux conduits antérieurement. L'obtention d'une **représentation globale de la structure et du fonctionnement actuel de la région** est donc au cœur de la démarche écorégionale proposée.

- **Notion d'histoire.**

Dans chacun de ces points de vue, c'est la situation actuelle de la région qui est analysée. Pour les analyses plus ponctuelles, les connaissances des processus historiques qui ont agi sur le système, seraient nécessaires et amélioreraient celles qui sont actuellement acquises.

- **Notion d'outil d'interprétation pour les autres compartiments notamment biologique de l'écosystème aquatique.**

Cette thèse fait partie d'un ensemble d'études dont les thématiques couvrent les macroinvertébrés benthiques et communautés algales, la chimie des eaux, l'habitat physique et morphodynamique, les peuplements de poissons, l'hydrologie, l'occupation du sol, les écorégions, la cartographie (Wasson et Bethemont et al., 1993 ; Malafosse, 1995 ; Belliard, 1995 ; Bessenay, 1997 ; Ivoll, 1998 ; Cohen, 1998, entre autres). Ces études ont été menées

par le Cemagref et l'Université de St.-Etienne. Elle n'a pas la prétention d'en être la synthèse, mais plutôt le contrepoint géographique .

4. LES OUTILS ET LES MATERIELS UTILISES.

4.1.1. LES OUTILS.

La gestion à large échelle nécessite un nouveau type d'approche mais aussi des outils adaptés. Nous avons à notre disposition des logiciels de télédétection et de Système d'Information Géographique, ainsi que des outils d'analyse statistique.

- Les matériels informatiques.

- ✓ Ordinateurs :

Traitement : 2 PC Pentium ® 200 et 75

- La géomatique.

- ✓ Logiciels :

Télédétection : Teravue ®, Idrisi ®

SIG : Arcview ® et Spatial Analyst ®, Mapinfo ®, Idrisi ®, ArcInfo ®

L'ensemble de notre approche se base sur l'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG). Même si dans le cas actuel, aucun lien géographique n'a été réalisé entre les différents compartiments et leur base de données pour rendre le système et l'approche plus interactifs.

4.1.2. ANALYSES STATISTIQUES.

- ✓ Logiciels Statistiques:

Statistica ®, Statview ® et Systat ®, Statlab ®, ADE4 ®.

Nous donnons quelques techniques d'analyse statistique qui sont utilisées dans le cadre de cette étude, sans entrer dans les détails des procédures et des fondements de ces analyses (cependant, quelques notions sont données en Annexe I) :

- statistiques descriptives classiques : moyenne, mode, écart-type, ...
- présentations des résultats statistiques : en quantiles, en histogrammes.
- les différentes techniques de comparaison des distributions,
 - paramétriques ANOVA,
 - non paramétriques KRUSKAL-WALLIS,
 - non paramétriques U MANN-WHITNEY,
- l'analyse de régression simple et multiple,
- l'analyse discriminante,
- l'analyse factorielle et l'analyse de correspondance : composante principale, factorielle multiple, de correspondance principale et multiple, de correspondance en nombre flou,
- l'analyse de classification hiérarchique et la classification par arbre de régression.

Elles ont été souvent utilisées par plusieurs auteurs (*in* Gallant et al., 1989) comme outil de régionalisation, mais aussi comme outil de validation des écorégions.

4.1.3. LES UNITES SPATIALES D'INTEGRATION.

Pour analyser les phénomènes spatiaux dans un processus de large échelle, nous avons besoin de définir l'Unité Spatiale d'Intégration ou **USI** avec laquelle nous caractérisons les données. Cette USI est très variable suivant les objectifs à atteindre.

Plusieurs types d'unités spatiales d'intégration USI ont été pris en compte dans cette thèse :

- * les tronçons (pour les types de vallée)
- * les stations hydrologiques
- * le bassin-versant unitaire
- * Le centre communal
- * Les pixels de 1km/1km

Nous présentons ici quelques explications pour la mise en place et les différentes données pouvant être associées à chaque USI :

- **Le pixels de 1km².**

Les données de Modèle Numérique de Terrain que nous avons obtenu ont une résolution de 1km² (USGS-DEM). Nous utilisons cette base de résolution pour intégrer des données spécifiquement physiographiques mais aussi concernant l'occupation du sol (Chapitre 1 et 4). Nous rappelons que dans le cadre de l'étude Loire Phase I (Bethemont, Wasson et al., 1993), les pixels d'intégration sont de 10km*10km.

- **Le bassin-versant unitaire.**

Une méthode automatique de détermination des USI élémentaires à partir d'un Modèle Numérique de Terrain est utilisée dans le cadre de cette étude (MNT au pas de 1 km sus-nommé). Le programme utilisé détermine pour chaque maille le nombre de mailles en amont, puis cherche tous les points hauts pour délimiter les bassins versants topographiques, en tenant compte d'une taille moyenne définie par l'utilisateur (environ 200 km²). Nous verrons en détail ce choix dans le Chapitre 1. Toutes les variables étudiées sont ensuite affectées à un bassin-versant où les analyses ont été effectuées (Chapitre 5) (figure I.3).

- **Les centres communaux.**

Les données INSEE sont fournies sur une base de découpage communal. Les champs des variables INSEE sont affectés aux positions des centres communaux. Nous avons gardé cette structure pour les analyses concernant les populations, les élevages et les occupations du sol du Chapitre 5 (figure I.4).

- Les tronçons et segments homogènes des cours d'eau.

Le tronçon est une combinaison répétitive de segments. Ses limites sont des discontinuités d'ordre géomorphologique, hydrologique, géologique définissant des types de vallée (pente de la vallée, morphologie du lit, rang) (Cupp, 1989).

Le segment est caractérisé par une relative homogénéité des faciès ou des séquences de faciès, par la morphologie en plan (sinuosité du lit) et la dynamique du lit.

Le choix d'une Unité ou d'une autre influe évidemment sur les analyses effectuées ainsi que sur les résultats obtenus. Nous avons omis volontairement dans cette thèse la comparaison des résultats entre les différentes Unités qui relève d'autres problématiques : fiabilité des données, transferts d'échelle.

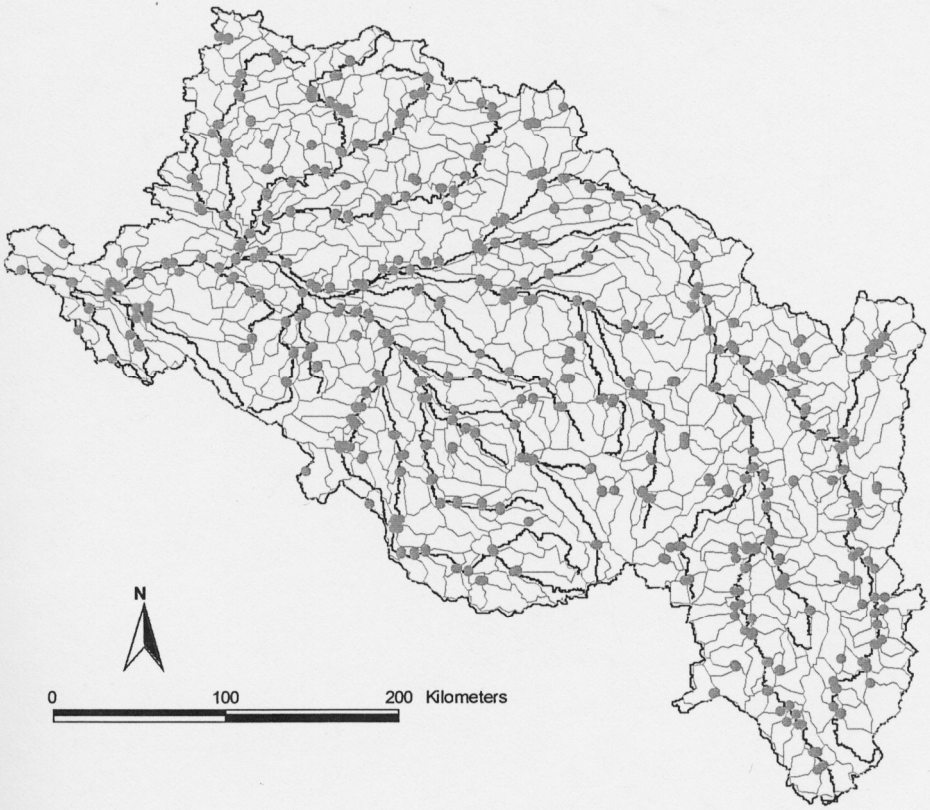


Figure I.3 : Les 600 bassins versants et leurs exutoires du bassin de la Loire.

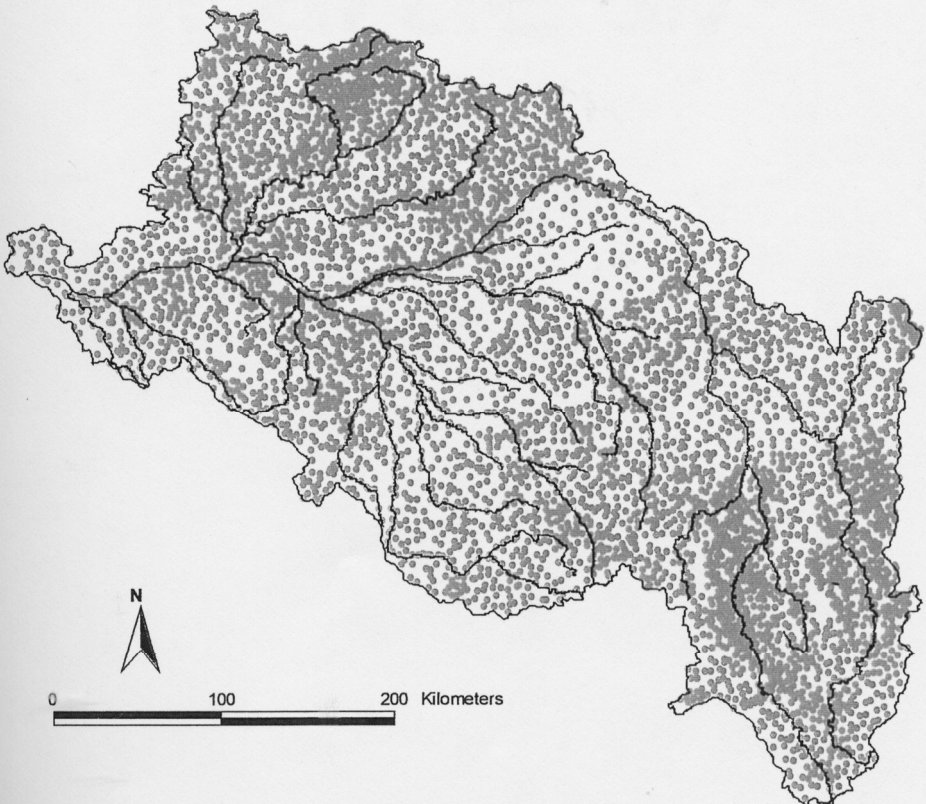


Figure I.4 : Les 5500 centres communaux du bassin de la Loire.

Partie 1.

Chapitre 1

Les Ecorégions.

I.1. INTRODUCTION.

Toute gestion environnementale comporte une base spatiale. D'où la nécessité de classer l'espace en entités pertinentes au sein desquelles, il est possible d'apprécier les caractéristiques mesurables de l'environnement. La qualité de cette gestion repose sur la compréhension des modèles ou filtres spatiaux de l'écosystème associables aux caractéristiques écologiques. De façon pragmatique, il est ainsi nécessaire de définir des régions.

Dans ce sens, la régionalisation est nécessaire pour améliorer nos efforts dans la planification, la gestion aux niveaux régional (DIREN, Agence de l'Eau) et national (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Inter-Agence), pour harmoniser les différentes approches notamment par l'intermédiaire de bases spatiales communes. Elle est de nature à faire progresser notre compréhension de la distribution des phénomènes qui régissent l'écosystème aquatique, et peut faciliter la prise de décision et de planification. En outre, la régionalisation peut nous aider en tant que "filtre" ou "cadre" d'interprétation des données écologiques (Southwood, 1977 ; Tonn, 1990 ; Poff, 1998).

Ce chapitre présente le principe des classifications régionales de l'écosystème aquatique. Il montre comment la régionalisation peut être utilisée dans la planification et la gestion des ressources aquatiques. Il expose les méthodes de la mise en place de l'écorégion. Nous nous appuyons tout d'abord sur le découpage d'expert proposé par Wasson, Bethemont et al. (1993). En second lieu nous présentons une autre approche "quantitative", afin de définir une méthode objective applicable à d'autres bassins.

I.2. BASES METHODOLOGIQUES.

I.2.1. DEFINITIONS, OBJECTIFS ET LIMITES DES ECOREGIONS.

I.2.1.1. DÉFINITIONS DES ÉCORÉGIONS.

Nous présentons ici quelques définitions non exhaustives des termes "région", "régionalisation" et "écorégion" ou "région écologique", le concept de région étant avant tout d'ordre géographique (Vidal de la Blache, 1903 ; Claval et Julliard, 1967; Brunet, 1972 ; Hagget, 1990 ; Pinchemel et Pinchemel, 1994 ; Claval, 1997).

Frey (1975) décrit et définit l'existence d'une région dès lors qu'on y observe des schémas particuliers et originaux.

Pour Hart (1982) ; "Une région correspond à une ou plusieurs zones homogènes qui diffèrent d'autres zones. En d'autres termes la variance intra-région est inférieure à la variance inter-région". Cet auteur notait que le concept de "région" est le procédé courant et efficace pour organiser, présenter les informations et promouvoir la communication.

Wiken (1986) donne les définitions suivantes :

«Une région est une aire ou une zone géographique définie par une ou plusieurs caractéristiques ou traits communs qui lui confèrent une certaine homogénéité et la rendent différente des régions environnantes. La régionalisation consiste en découpage d'une surface ou d'une zone par l'utilisation de plusieurs critères afin d'organiser spatialement des milieux dans un ensemble spatial complexe».

«La régionalisation est une méthode de réduction et d'élimination des détails qui n'ont, en valeur moyenne, aucune influence dans un grand ensemble spatial».

La régionalisation est un processus réducteur des phénomènes géographiques complexes en unités aréales bien distinctes. L'étude des régions a été un des sujets majeurs de la géographie durant ces deux derniers siècles. Au cours du vingtième siècle, les paradigmes majeurs ont transformé le centre fondamental et les perceptions méthodologiques qui regardent comment une région est définie. Le centre fondamental de la géographie régionale de 1900-1930 était descriptif, avec pour objectif la définition et la classification "des régions uniques" (Herbertson, 1905 ; Joerg, 1914 ; Sauer, 1925 ; Vidal de la Blache 1926 ; Hettner 1927 ; Dickinson 1939). Ensuite vers les années 1940, l'usage de méthodes géographiques régionales avait décliné, suite à l'émergence de la Géographie de la Nature (Hartshorne, 1939 ; Healey 1983 ; Hartshorne 1955 ; Schaefer 1953 ; Guelke 1977 pour une discussion supplémentaire de ce sujet). Dans les années 1950, les géographes ont utilisé des méthodes plus quantitatives pour spécifier des régions uniques.

Remarque : Ces définitions n'appartiennent qu'à une école de pensée de la géographie. D'autres définitions existent sur les problématiques de la région (polarisation, espace vécu, par exemple) (Hagget, 1977, entre autre). Cette idée d'homogénéité régionale n'est plus guère acceptée que par les géographes physiciens.

Les techniques quantitatives ont pris leur essor pendant les années 1950-1960 avec l'évolution de l'approche systématique. Ces techniques, décrites entre autres par Bunge (1966), fournissent des outils pour aider à définir des régions, outils dont l'usage peut être reconductible d'une région à l'autre. L'approche quantitative préconisée par cette géographie débouche sur une science de l'espace, dont les outils sont la géométrie et la statistique (Haggett et Chorley, 1967 ; Hagget, 1977). Les techniques statistiques et mathématiques pour identifier des régions ont été encouragées largement (Hoag, 1958 ; Latham, 1959 ; Dacey, 1960 ; Isard, 1960 ; Bunge, 1966,) et ont été utilisées dans les études écologiques pour la classification d'attributs géographiques (par exemple, Clifford et Stephenson, 1975 ; Pielou, 1977 ; Vandemeer, 1981 ; Gauch, 1987).

Malgré l'extrême irrégularité de la biosphère, plusieurs études ont montré qu'elle n'est pas occupée de façon anarchique. En effet la répartition des écosystèmes est distribuée en zonation "régulière" dans le plan horizontal. Cette zonation ne peut se faire qu'à petite échelle (de sous continent), elle est définie comme des macro-écosystèmes ou grandes unités écologiques (Ramade, 1993). Les entités écologiques définies à différents niveaux hiérarchiques sont basées sur des concepts et une terminologie développés par de nombreux scientifiques et gestionnaires de ressources naturelles américains et canadiens (Collins, 1952 ; Crowley, 1967 ; Wertz et Arnold, 1972 ; Rowe, 1980 ; Allen et Starr, 1982 ; Barnes et al., 1982 ; Forman et Godron, 1986 ; Bailey, 1987 ; Meentemeyer, 1987 ; Gallant et al., 1989 ; Cleland et al., 1992). Tansley a présenté le terme d'"écosystème" dès 1935. Le terme d'écorigions est inventé en 1967 par Crowley, et la première cartographie de la classification des régions écologiques est établie par Bailey en 1976 sur l'ensemble des

États Unis. Cette carte des écorégions est utilisée pour représenter des régions relativement homogènes en écosystèmes ou entre les organismes et leurs environnements (Omernik, 1987).

"La classification écologique du territoire est une méthode de définition et de classification de régions de la surface terrestre présentant des caractéristiques écologiques propres. Chaque région constitue un ensemble distinct résultant de l'entremêlement et de l'interaction des facteurs présents : formes de relief, eau, sols, végétation, climat, faune et influence humaine. L'importance relative de ces facteurs varie en fonction des régions. Cette approche globale de la classification des terres peut s'appliquer progressivement et proportionnellement tant aux écosystèmes les plus limités qu'aux vastes écosystèmes". Wiken (1986)

I.2.1.2. OBJECTIFS DE LA REGIONALISATION.

La régionalisation s'est développée afin d'étudier, décrire et communiquer les informations spatiales. Les écorégions des milieux aquatiques sont conçues pour servir de forum en vue d'encourager le développement d'une approche harmonisée des problématiques de cours d'eau à large échelle, pour la classification et la cartographie des écosystèmes aquatiques, ainsi qu'en vue d'une application judicieuse de cette approche à la gestion et à la planification adaptées à leur type et à leur sensibilité aux interventions humaines.

Il s'agit avant tout d'un outil d'aide à la décision établi à partir d'une multitude de connaissances, à l'usage des gestionnaires, aux fins de compréhension et de régionalisation globale des phénomènes et problèmes du fonctionnement écologique de l'hydrosystème.

Les objectifs principaux de la régionalisation reposent sur les quelques principes suivants (cités dans Rowe et Sheard, 1981 ; Wiken, 1986 ; Gallant et al., 1989) :

- fournir une méthode systématique pour classier et délimiter l'ensemble des cours d'eau ou des bassins versants basée sur des associations de facteurs physiques, biologiques, écologiques et anthropiques à différentes échelles spatiales et à divers niveaux de généralisation (Kwakernaak, 1987), classer et distinguer les associations normales des facteurs écologiques,
 - décrire, caractériser, quantifier et définir des variables à l'intérieur d'une région,
 - comparer la similarité (homogénéité) et la différence (hétérogénéité) écologique entre les régions,
 - extrapoler les résultats à grande échelle (Ackerson et Pech, 1980 ; Mitchell, 1991 ; Townsend, 1981 ; Franklin, 1987),
 - sélectionner des sites représentatifs des données ainsi que des sites de références (Davis et Dozier, 1990), identifier des zones de protection,
 - établir des critères et des objectifs raisonnables et significatifs (Carroll et Morain, 1992 ; Davis et Dozier, 1990),

I.2.2. QUELQUES EXEMPLES DE REGIONALISATION ET D'ECOREGIONS APPLIQUES A LA PROBLEMATIQUE DE L'ECOSYSTEME AQUATIQUE.

En utilisant une approche bioclimatique à une échelle globale, plusieurs chercheurs ont développé des classifications écologiques à l'échelle planétaire : Holdridge (1967), Walter et Box (1976), Udvardy (1975), et Bailey (1989a, b). Bailey (1983) a proposé que son système hiérarchique soit mis en œuvre aux échelles régionales et locales en appliquant des concepts de stratification de Wertz et Arnold (1972). D'autres bases de classification sont proposées aux échelles régionales incluant celles de Driscoll et al. (1984), Omernik (1987),

et Gallant et al. (1989) aux Etats-Unis et ceux de Wiken (1986) et du groupe de travail d'écorégions (1989) au Canada. Des concepts sont également présentés pour la classification écologique en sous-régions aux échelles locales pour les Etats-Unis (Barnes et al., 1982), le Canada (Collins 1952 ; Jones et al., 1983), et l'Allemagne (Barnes, 1984).

I.2.2.1. L'EXEMPLE NORD AMERICAIN.

Les tentatives de délimitation des régions écologiques aux Etats-Unis dans le but de répartir l'intégrité écologique ont inclus plusieurs approches : la cartographie de la végétation naturelle potentielle (Kuchler, 1970), les régions des ressources naturelles (Austin, 1972 ; USDA, 1981), les écorégions des Etats-Unis (Bailey, 1976), et les écorégions d'Omernik étendues sur le territoire des Etats-Unis (Omernik, 1980 et 1987).

- **Les écorégions de Bailey (1976).**

A l'échelle écorégionale les unités écologiques sont identifiées par des différences de régimes climatiques globaux, continentaux et régionaux et la physiographie brute. Le principe de base est que le climat régit des gradients d'énergie et d'humidité, agissant de ce fait en tant que contrôle primaire des écosystèmes localisés. Trois niveaux d'écorégions adaptés de Bailey sont identifiés dans la hiérarchie (Bailey, 1976, 1980).

- **Les écorégions de Omernik (1987).**

L'approche d'Omernik pour définir les écorégions fournit une structure pour évaluer la gestion de l'environnement (Gallant et al., 1989) à large échelle. Elle est basée sur l'hypothèse que les écosystèmes et leurs composants affichent des modèles régionaux qui sont reflétés dans des combinaisons spatiales de facteurs causaux, tel que climat, sols, géologie, végétation, et physiographie. La compilation d'Omernik pour les Etats-Unis sans l'Alaska (échelle 1: 7.500.000) est basée sur l'estimation qualitative de ces quatre sources de données primaires. Elles ont été complétées au fur et à mesure par d'autres variables : densité des réseaux hydrographiques, pente des versants. La limite est définie par jugement d'experts. Vaillant et al. (1989) ont reconnu que dans quelques régions, les écorégions proposées étaient trop hétérogènes pour être de grand usage pour la gestion, d'où la nécessité d'utiliser une méthode semblable mais avec des données de plus haute résolution.

Remarques : Les écorégions de la Seine : En 1990, Gallant et al. ont proposé une délimitation en écorégions du bassin de la Seine, suivant la méthode présentée par Omernik. Ils sont arrivés à définir 7 régions du bassin.

Rohm et al. (1987) ont une approche équivalente et proposent les mêmes critères de découpage qu'Omernik : géomorphologie globale, types et utilisation des sols, végétation naturelle potentielle.

I.2.2.2. L'EXEMPLE DU CANADA.

- **Les écorégions de Wiken (1986).**

Le cadre écologique utilisé au Canada décrit les zones écologiquement distinctes de la surface de la terre à différents niveaux de généralisation allant des écozones à grande

échelle aux écodistricts plus détaillés. Il se fonde sur un système commun de classification et de cartographie des écosystèmes terrestres mis au point dans les années 1970 et 1980 par l'intermédiaire du Comité canadien de classification écologique du territoire.

La version la plus récente, montrant les écozones et les écorégions développées à l'échelle 1:1 000 000ème, a été mise au point en mai 1994, elle est disponible sur papier et en format du SIG. On y trouve des descriptions de chaque écozone et de chaque écorégion en quatre niveaux de généralisation. Les écorégions sont des subdivisions de l'écozone caractérisées par la topographie ou de grands assemblages distinctifs des topographies régionales, de petits macro ou mésoclimats, la végétation, les sols, l'eau et les modèles de l'activité humaine régionale. Les écorégions constituent le pont principal entre les économies d'échelle sous-continentales et les écodistricts plus localisés.

- **Le Cadre Écologique de Référence défini par le Ministère de l'Environnement du Québec (Gérardin et al., 1997).**

Le Cadre Ecologique de Référence correspond à des cartes écologiques, à des classifications écologiques et à des interprétations sur les capacités intrinsèques du territoire. Il est au cœur d'une base de données à référence spatiale dans laquelle il est associé à une panoplie d'informations sur le territoire et les ressources : occupation et utilisation du sol, infrastructures, limites administratives ou légales, données socio-économiques (Gerardin et Lachance, 1997, Ducruc, 1998). Cette approche a été appliquée à beaucoup de sites aux échelles moyennes et grandes : le bassin-versant de Saint-Charles (500 km²) (Vincent Gerardin et al, 1997), au Burkina Faso (Ducruc et Gerardin, 1993), entre autres.

I.2.2.3. L'EXEMPLE DE NOUVELLE-ZELANDE : HARDING ET WINTERBOURN (1997).

La classification pour établir les écorégions a été effectuée à partir de six variables macro-environnementales : couverture végétale, socle géologique, lithologie, relief, pluviométrie et régions climatiques. 12 écorégions sont proposées à partir de la digitalisation des cartes et de leur traitement sous SIG. Chaque écorégion se distingue des autres à partir d'une suite de caractéristiques "types" macro-environnementales.

Remarques : Au niveau européen, un découpage en écorégions a été développé en Hollande (Klijn et al., 1995), ainsi qu'un exemple de mise en place des régions écologiquement homogènes dans les environs de Madrid en Espagne (De Agar et al., 1995).

I.2.2.4. QUELQUES APPLICATIONS DE L'ECOREGION EN ECOSYSTEME AQUATIQUE.

Plusieurs compartiments de l'écosystème aquatique ont été étudiés pour valider, pour montrer la pertinence ou re-découper les écorégions établies aux États-Unis, au Canada et en Nouvelle-Zélande. Plusieurs articles scientifiques sont écrits sur ce sujet, nous ne donnons ici que quelques exemples. Ils concernent globalement trois grandes catégories :

- la qualité de l'eau (Omernik et Griffith, 1986 ; Hughes et Larsen, 1988 ; Clarke et al. , 1991 ; Ravichandran et al. , 1996),

- l'hydrologie (Beable et McKerchar, 1982 ; Hughes, 1987 ; Hughes et James, 1989 ; Poff et Ward, 1989 ; Jowett et Duncan, 1990).

- les caractéristiques et la qualité des lacs (Heiskary et al. , 1987 ; Heiskary et Wilson, 1989 ; Omernik et al. , 1991 ; Rohm et al. , 1995),

- l'habitat aquatique et le peuplement de poissons (Hawkes et al. , 1986 ; Rohm et Giese. , 1987 ; Hughes et al. , 1987 ; Hughes et Larsen, 1988 ; Whittier et al., 1988 ; .Lyons, 1989 ; Bryce et Clarke, 1996 ; Lyons, 1996).

Tableau 1.1. : Synthèse des études (déterminantes) sur les écorégions.

Auteurs	Année	Lieu	<i>Etablissement des écorégion</i> superficie (en km ²) – nombre de régions	Critères
Bailey	1976, 1981, 1994, 1995.	Etats-Unis		Climat (végétation naturelle, sols, géomorphologie)
Dupias et Rey	1985	France	600 000 km ² - 14	Phyto-sociologie.
Wiken	1986 (compilation)	Canada		relief, climats, une végétation, sols, eaux, activités humaines.
Omernik	1987	Etats-Unis	- 76	Géomorphologie, géologie, sols, physiographie, végétation (ancienne, actuelle, potentielle), utilisation du sol, précipitation.
Bailey	1989	Continents	- 31	Climat (+ végétation naturelle, sols, géomorphologie)
Gallant et al.	1991	Bassin de la Seine	- 8	Géomorphologie, géologie, sols, physiographie, végétation (ancienne, actuelle, potentielle), utilisation du sol, précipitation.
Wasson et al.	1993	Loire	120 000 km ²	Géologie, climat, relief.
De Agar et al.	1995	Madrid (Espagne)	8000 km ²	Altitude, précipitation, température, végétation, eaux.
Tabacchi	1995	France	600 000 km ² - 4 à 256	Hypsométrie, pédologie, hydrolithologie, température, pluviométrie, occupation du sol.
Klijn et al.	1995	Hollande	- 6	Géologie, géomorphologie, hydrogéologie, eaux, sols, végétation, faunes.
Gérardin et al.	1997	Québec,	km ² - 13	climat, géologie, sols, végétation, faune, occupation et utilisation du sol, infrastructures, limites administratives ou légales, données socio-économiques.
Harding et Winterboun	1997	Nouvelle Zélande	80 000 km ² - 12	Climat, altitude, végétation, sols, géologie, précipitation.

I.3. METHODES DE REGIONALISATION.

I.3.1. LES FACTEURS MIS EN JEU POUR UNE DELIMITATION DE LA REGION.

A l'échelle de la région, les unités écologiques sont définies par la topographie générale, le processus géomorphologique, la géologie surperficielle, le sol, le climat et la configuration de la communauté locale, normale et potentielle (Townshend, 1981 ; Mitchell, 1991, Forman et Godron 1986). Ces facteurs affectent des distributions biotiques, l'hydrologie, des régimes normaux de perturbation et l'utilisation du sol en général. À ce niveau, les dispositifs et les processus terrestres peuvent également avoir une influence forte sur des caractéristiques écologiques des habitats aquatiques (Platts, 1979 ; Ebert et al., 1991). Nous pouvons donc énumérer l'hypothèse suivante :

Fonctionnement du cours d'eau = f° (variables de contrôle à différentes échelles)

Nous considérons donc comme hypothèse de départ que les variables exprimées à l'échelle de la "région" pourraient expliquer des processus et des réponses du fonctionnement biologique et écologique de l'hydrosystème. Et l'objectif de l'approche est de pouvoir quantifier à terme l'apport "régional" dans cette équation.

Les variables mises en jeu dans l'établissement des écorégions et qui sont souvent citées dans la littérature (Bailey, 1978 ; Omernik, 1980, entre autres) reposent sur 5 grands thèmes :

I.3.1.1. LA GEOLOGIE.

La géologie permet de connaître la gamme de sédiments susceptibles d'être transportés, qui contribueront à la formation des alluvions du lit et qui contrôleront en partie le développement des formes majeures (faciès). Elle donne un aperçu global des probabilités d'apports de fines d'origine minérale, de la disponibilité en charge solide, de la nature du substrat présent dans la rivière, et de la composition physico-chimique de l'eau. Des informations sur les caractéristiques hydrogéologiques et lithologiques lui sont souvent liées. Elle est souvent exprimée par grandes familles de roches cristallines, volcaniques et de roches sédimentaires.

Figure 1.1 : La géologie et ses couches dérivées du bassin de la Loire. (Planche Annexe)

Figure 1.2 : Les sols du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

Figure 1.3 : La vulnérabilité de l'aquifère du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

I.3.1.2. LES CLIMATS.

La climatologie intègre les principaux régimes hydrologiques, autre variable de contrôle de la morphologie des lits fluviaux. Elle intègre :

* le paléoclimat ou l'héritage climatique,

- * les précipitations, l'extension des zones des pluies,
- * les limites des zones à déficit et surplus hydrique,
- * la température
- * l'étendue des zones neigeuses et à glaciers.

Figure 1.4 : Les précipitations du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

Figure 1.5 : Le bilan hydrique du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

I.3.1.3. LA TOPOGRAPHIE.

Le relief donne la gamme des pentes et les formes générales des profils en long. Il permet de dégager les contraintes structurales limitant les possibilités d'évolution des systèmes fluviaux et par conséquent les modèles morphologiques les plus probables. Il assimile :

- * l'altitude,
- * la pente, et
- * la complexité topographique

Figure 1.6 : Le relief du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

Figure 1.7 : La pente des versants du bassin de la Loire. (Planche Annexe).

I.3.1.4. LA VEGETATION NATURELLE ET POTENTIELLE.

Les cartes de la végétation naturelle peuvent contenir la nature de la végétation avec l'espèce dominante, les différents stades de succession des peuplements et des groupements. Alternativement, d'autres cartes peuvent présenter la végétation potentielle i.e. la végétation climax qui serait présente en l'absence de l'interférence de l'homme. Ces dernières sont une résultante de la composition entre les facteurs sols, climats et la topographie de la région étudiée. Dans le cas du bassin-versant de la Loire, la carte de la végétation potentielle est représentée par la carte des phyto-écorégions de Dupias et Rey (1985).

I.3.1.5. LA MORPHOLOGIE ET LA GEOMORPHOLOGIE.

La géomorphologie (structurale) caractérise des ensembles physionomiquement homogènes, des reliefs terrestres et continentaux ainsi que ses modelés.

La morphologie des cours d'eau concerne les formes des vallées (en gorge, plate), des profils (en plan ou à travers) ainsi que les faciès d'écoulement (radier, plat, mouille).

Remarques : D'autres variables ou plans d'information peuvent être rajoutés à ces dernières. Leur contribution dans les analyses dépend du choix effectué ainsi que des objectifs à atteindre. Il s'agit d'autres caractéristiques morphologiques des cours d'eau et des bassins-versants :

- le réseau hydrographique et son rang,
- les caractéristiques morphométriques du bassin-versant.

I.3.2. TRAITEMENTS.

Deux méthodes de délimitation en matière d'écorégion sont à considérer : la méthode qualitative et la méthode quantitative :

I.3.2.1. LA DELIMITATION QUALITATIVE.

- la **délimitation qualitative**, repose plutôt sur les appréciations des experts qui influent sur la sélection, l'analyse et la classification des données pour constituer les régions. La plupart des découpages régionaux sont souvent basés sur l'expertise des individus qui ont une connaissance spécifique des phénomènes et des processus locaux. Une technique évidemment pertinente mais qui peut être fortement subjective et peu extrapolable par manque de méthodologie explicite et reproductible.

Remarque : les résultats des approches d'experts sont surtout difficilement à utiliser dans des documents à caractère plus ou moins réglementaire ou servant de base à leur élaboration.

- Les écorégions de Dupias et Rey (1985).

Les régions phyto-écologiques ou écorégions de la France par Dupias et Rey (1985) : une carte de région écologique a été mise en place par Dupias et Rey en 1985, elle est basée sur la phyto-écologie (végétation potentielle) en premier niveau, mais qui intègre aussi la nature des roches et le climat et au niveau inférieur, l'anthropisation du milieu terrestre. Ce type de régionalisation a pour objectif l'illustration du paysage végétal potentiel. Les écorégions ainsi définies représentent donc une délimitation de l'espace géographique sans se soucier de la caractéristique principale de l'hydrosystème : le bassin-versant et l'orientation amont-aval du système linéaire.

- Les hydro-écorégions du bassin de la Loire, Wasson et al. (1993).

Sur le bassin de la Loire, une première étude («Loire I» : Wasson et al., 1993) a permis de tracer les contours de régions distinctes. L'approche a abouti au découpage en hydro-écorégions. Wasson, Bethemont et al. (1995), Wasson (1996) ont basé leur démarche de régionalisation sur la hiérarchisation des facteurs de contrôle du fonctionnement physique et écologique des hydrosystèmes. Les déterminants "de premier ordre" sont : la géologie, le climat, et le relief qui sont des facteurs facilement cartographiables donc régionalisables. L'objectif final selon les auteurs est de pouvoir différencier les régions en termes de structure et de fonctionnement ainsi que de pouvoir élaborer des modèles prédictifs, applicables en gestion, par type régional défini.

Nous reprenons les résultats de cette étude (Wasson et al., 1993). La carte des hydro-écorégions du Bassin Loire a été produite en deux phases : (Wasson et al., 1993) et une autre amélioration (Wasson et Andriamahefa, en cours).

La mise en place des cartes des hydro-écorégions a été réalisée en plusieurs étapes :

- une première analyse qui a consisté à superposer les différentes couches de facteurs de contrôle de l'écosystème aquatique,
- la deuxième analyse qui fait appel à des experts, en l'occurrence Bethemont et Wasson pour évaluer la pertinence du premier découpage,

- nous avons réalisé ensuite la description des facteurs de contrôle des hydro-écorégions à partir des outils Système d'Information Géographique et de la base de données construites à cette fin (Wasson et al., 1993 ; Bessenay et al., 1997). C'est une manière de :
 - valider le découpage à partir des variables qui sont censées le représenter selon les auteurs,
 - préciser les caractéristiques de ces régions définies, i.e. passer d'une définition des régions qualitatives à des informations quantitatives (profils statistiques des différentes variables).

I.3.2.2. LA DELIMITATION QUANTITATIVE.

La **délimitation quantitative** utilise des statistiques pour sélectionner, analyser et classer les données afin de déterminer les régions. Ces évaluations sont basées particulièrement sur la quantité et la qualité des données ainsi que sur l'interprétation de leur relation avec les écosystèmes. Cela implique que les données utilisées soient prédéterminées et suffisantes pour effectuer les analyses. Nous pouvons associer dans cette catégorie toutes les méthodes statistiques citées auparavant,

Les outils : L'usage du SIG est utile pour interpréter et déterminer les limites d'unités écorégionales. Le résultat, qui sera progressivement enrichi, servira au choix des sites de recherche et fournira la base de l'extrapolation des résultats. Ces composants peuvent être analysés individuellement et être combinés. Une combinaison des composants peut être aussi simultanément évaluée dans la conception de la région. Pour le moment, le SIG nous a servi de base de données spatialisées d'où nous avons extrait les plans d'informations afin de les analyser à l'aide d'un autre outil qui est l'analyse statistique. Ensuite, nous revenons dans le SIG pour illustrer et spatialiser ces résultats statistiques.

Les unités d'analyse : Le bassin-versant élémentaire constitue l'unité spatiale d'intégration. Ces unités constituent la structure spatiale principale pour chercher la délimitation convenable de la région.

"...Nous devons insister sur la nécessité, dans ce type de travail, de ne pas perdre de vue le fait que nos résultats dépendent de nos unités" (Kendall et Yule, 1950). "Si les mailles choisies, en tant qu'unités spatiales sont arbitraires, il faut mettre en question l'utilité des mesures faites sur elles et le résultat des études fondées sur leur utilisation" (Openshaw, 1981). Pour gérer un cours d'eau en tant qu'hydroécosystème, il est indispensable, avant toute autre approche, de comprendre et gérer le fonctionnement de son bassin-versant (Hynes, 1975 ; Lotspeich, 1980). C'est pourquoi nous avons pris le bassin-versant comme individu de base ou Unité Spatiale d'Intégration USI pour la suite de notre travail (Andriamahefa, 1998). En effet, de l'amont vers l'aval, chaque cours d'eau évolue au fur et à mesure des régions traversées et des confluences successives, du fait du cumul de bassins versants élémentaires, dont les apports solides et liquides influent sur son fonctionnement physique et biologique (Omernik et Bailey, 1997).

Analyses statistiques : L'approche décrite ici représente une tentative d'aborder le problème de la régionalisation sans a priori. Avec pour objectif la production d'un modèle de procédures d'identification et de délimitation des unités spatiales du bassin ligérien.

Les démarches sont réalisées en plusieurs étapes :

- choix des variables. Nous nous sommes limités à quatre grands facteurs de contrôle de l'écosystème aquatique : la géologie, les précipitations, les sols et l'altitude,
- extraction et codage de données. Le raisonnement sur les combinaisons entre variables est possible à partir des pourcentages de surface représentés par les modalités des variables au sein d'une USI bassin-versant (King, 1993). Les surfaces de la probabilité

d'occurrence ont été produites pour chacune des catégories de couches thématiques étudiées. Ce sont ces pourcentages de surface qui représentent le codage flou,

- ACM. Nous avons effectué une ACM sur un tableau de 600 lignes représentant les bassins versants unitaires et de 35 colonnes représentant les caractéristiques des 4 thèmes. L'objectif de cette analyse est (1) d'identifier les variables (couches) de départ prépondérantes pour expliquer les structures spatiales si ces structures existent et (2) de réduire le nombre de variables en facteurs principaux.

- CAH : L'algorithme de la distance euclidienne a été utilisé sur les 600 bassins versants et les 3 axes factoriels obtenus dans l'étape précédente. La règle d'agrégation est la méthode de Ward.

• Les structures de données.

Dans cet exemple d'analyse, nous avons sélectionné et codé quatre couches d'informations thématiques de la manière suivante :

- la géologie est disponible pour la région de la Loire à l'échelle de 1/500.000ème dans l'Atlas cartographique du CRENAM (1996) basé sur les travaux du BRGM 1992. On y distingue 14 types géologiques.

- Geo1 = Alluvions récentes
- Geo2 = Miocène/Pliocène
- Geo3 = Eocène/Oligocène
- Geo4 = Crétacé supérieur
- Geo5 = Crétacé inférieur
- Geo6 = Jurassique supérieur
- Geo7 = Jurassique inférieur
- Geo8 = Trias
- Geo9 = Carbonifère
- Geo10 = Sédiments primaires
- Geo11 = Basaltes
- Geo12 = Micashistes
- Geo13 = Roches granitiques
- Geo14 = Infra-cambrien

- les couvertures des sols sont issues des cartes nationales des sols établies par l'INRA à l'échelle du 1 :1.000.000ème. On y distingue 8 catégories de sols.

- Sol1 = Alluvions récentes
- Sol2 = Rendzines
- Sol3 = Sols bruns calcaires
- Sol4 = Sols bruns et lithosols
- Sol5 = Sols sur formations cristallines
- Sol6 = Sols podzoliques de plaine
- Sol7 = Sols lessivés
- Sol8 = Sols hydromorphes

- l'altitude est dérivée du Modèle Numérique de Terrain (USGS DEM) de résolution 1km*1km. Elle est ensuite répartie en 10 catégories :

- mnt 1 = 0 – 35 m
- mnt 2 = 35 – 60 m
- mnt 3 = 60 – 75 m
- mnt 4 = 75 – 115 m
- mnt 5 = 115 – 155 m
- mnt 6 = 155- 200 m
- mnt 7 = 200 –300 m
- mnt 8 = 300 – 500 m
- mnt 9 = 500 – 1000 m
- mnt 10 = > 1000 m

- les précipitations sont mesurées au moyen des lignes isohyètes établies par la Météorologie Nationale à l'échelle du 1 :1.000.000ème. Elles varient sur l'ensemble du bassin de la Loire de 400 mm à 1200 mm. Nous avons recensé 7 catégories.

- P 400 = isohyète < 600 mm
- P 600 = isohyète 600 < < 700 mm
- P 700 = isohyète 700 < < 800 mm
- P 800 = isohyète 800 < < 900 mm
- P 900 = isohyète 900 < < 1000 mm
- P 1000 = isohyète 1000 < < 1200 mm
- P 1200 = isohyète 1200 < < 1500 mm
- P 1500 = isohyète > 1500 mm

Remarque : les items de la géologie et des sols sont les mêmes que ceux utilisés par les experts.

Nous avons ainsi un tableau de données de 600 individus décrits par 4 variables réparties en 40 catégories. L'outil SIG nous a permis et nous permettra dans l'avenir d'intégrer d'autres facteurs de contrôle : occupation du sol, densité de drainage, température.

NB : Une autre méthode quantitative est présentée dans le travail de Tabacchi (1995). L'objectif de cette étude dérive des phyto-écorégions établies par Dupias et Rey précédemment. Elle est appliquée sur l'ensemble du territoire français avec comme compartiments cibles les systèmes fluviaux, elle est destinée à fournir des régions hydrologiquement homogènes pour ces derniers.

L'approche est quantitative, basée sur des 10 facteurs (ou plans d'informations) qui sont susceptibles de contrôler les qualités de l'eau à l'échelle 1:000.000ème. Les unités spatiales d'intégration sont les départements, le maillage communal et à la fin les unités phyto-écorégions de Dupias et Rey.

La méthode statistique utilisée repose sur des analyses de partition par arbres de régression et par classification hiérarchique. Les résultats comportent sur l'ensemble de la France 660 unités pouvant être classées en sept niveaux (**4, 8 à 256** régions).

Figure 1.8 : Les écorégions "hydrologiques" du bassin de la Loire 8 niveaux (Planche Annexe).

I.4. LES RESULTATS DES REGIONALISATIONS SUR LE BASSIN DE LA LOIRE.

I.4.1. LES REGIONALISATIONS D'EXPERT.

I.4.1.1. LES ECOREGIONS DE DUPIAS ET REY (1985).

Ce découpage très global offre 3 niveaux majeurs de subdivision. Il distingue dans un premier temps **14** grandes "zones de premier ordre", qui sont de grandes unités éco-physiographiques relativement classiques basées sur des paramètres géologiques, géomorphologiques et climatiques globaux : I : Massif schisteux rhénan, II : Bassin parisien et vallée de la Loire, III : Vosges, IV : Plaine d'Alsace, V : Massif armoricain, VI : Jura, VII : Bassins du Rhône et de la Saône., VIII : Alpes, IX : Région méditerranéenne, X : Massif Central, XI : Bassin aquitain, XII : Région landaise, XIII : Pyrénées, XIV : Corse.

A l'intérieur de ces zones de premier ordre se distinguent les zones de deuxième ordre dont les critères de délimitation intègrent le relief (montagnes, plateaux, vallées.) et la

géologie (couverture sédimentaire, couverture alluviale récente ou ancienne, massif cristallin), à une échelle plus locale.

Une zone de troisième niveau a été nécessaire pour sectoriser ces unités sur la base de critères phyto-écologiques et d'utilisation des sols.

Figure 1.9 : Les phyto-écorégions du bassin de la Loire niveau 1 (Planche Annexe).

I.4.1.2. LES HYDRO-ECOREGIONS DU BASSIN DE LA LOIRE (WASSON ET AL., 1993).

Les hydro-écorégions du Bassin Loire se répartissent en **6** régions majeures, et **18** hydro-écorégions identifiées comme suit (Figures 1.10 et 1.11) :

Tableau 1.2. : Les Hydro-écorégions de la Loire.

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3	
Massif Armoricaïn	MA	Granitiques Armoricaïns Nord Est Granitiques Armoricaïns Est Intérieur Granitiques Armoricaïns Sud Intérieur	GANE GAEI GASI		
Massif Central Bassin cristallin Loire-Allier	MCBLA	Terres Granitiques Orientales Hautes Terres Granitiques Orientales Hautes Terres Volcaniques	TGO HTGO HTV	Orientales Humides	HTVH HTVO
Massif Central : dépressions sédimentaires	MCDS	Dépressions Internes Fossés Tectoniques Limagnes	DI FT LI		
Massif Central Plateau Limousin	MCPL	Granitique Limousin Hautes Terres Limousines	GL HTL	Orientales Humides	HTLO HTLH
Tables Calcaires	TC	Beauce Sèche Epanrages Eluviaux Tables Calcaires Nord Loire Tables Calcaires Sud Loire	BS EE TCNL TCSL		
	VA	Vallées alluviales et estuaires	VA		
Loire	6		16		4

Les caractéristiques des hydro-écorégions données ici ne concernent que les niveaux 1 du découpage réalisé par Wasson et al..

- **MA Massif Armoricaïn.**

Un massif cristallin où le relief est beaucoup moins marqué que dans le Massif Central. Cette région est composée au deuxième niveau de 3 sous-régions : GANE Armoricaïn Nord Est, GAEI Armoricaïn Est Intérieur, GASI Armoricaïn Sud Intérieur (Tableau 1.3).

Pour l'ensemble du Massif Central, les contours des régions définies par des variables comme l'altitude ("hautes terres") ou le substrat géologique (basalte) sont lissés en fonction des formes du relief pour mieux prendre en compte l'effet "massif structural" qui impose des caractéristiques particulières aux cours d'eau qui en découlent (formes des vallées, chimie des eaux, hydrologie). Cette grande région est très morcelée. Le Massif Central peut se scinder en trois grands ensembles : un ensemble Limousin, très homogène, ensuite le Haut Bassin Loire Allier qui apparaît comme la région la plus complexe et enfin les dépressions sédimentaires.

- **MCBLA Massif Central Bassin Loire-Allier.**

Le Haut Bassin Loire Allier apparaît comme la région la plus complexe. Les améliorations apportées concernent principalement une meilleure prise en compte du relief et de la pluviométrie dans cette région. Elle se subdivise en TGO Terres granitiques orientales. HTGO Hautes terres granitiques orientales, au relief beaucoup plus élevé (> 1000 m) et accidenté. Comme pour les hautes terres Limousines, l'hydro-écorégion "Hautes terres Volcaniques" peut se séparer en deux sous-ensembles. HTVO orientales (Cézallier Mont Dore) composées essentiellement de formations basaltiques et HTVH Hautes terres volcaniques humides, cette région est beaucoup plus arrosée. Enfin, l'hydro-écorégion Hautes Terres Climat Cévenoles HTCC majoritairement granitique, est délimitée de manière beaucoup plus précise comme la région où les pluies journalières décennales dépassent 100 mm (Tableau 1.4).

- **MCDS Massif Central Dépressions Sédimentaires.**

Cette hydro-écorégion hétérogène quant au relief, est scindée en trois hydro-écorégions : FT Fossés tectoniques (Confluence de l'Allier et la Loire). LI Limagnes (grande Limagne, plaine du Forez). DI Dépressions internes au relief plus accidenté (haute vallée de l'Allier, bassin du Puy). Le fossé d'Ambert se rattacherait à cet ensemble, mais il s'en distingue par des précipitations beaucoup plus abondantes. Cette petite dépression apparaît à la limite inférieure de ce qu'il est pertinent d'individualiser en tant qu'entité régionale. Nous ne l'avons donc pas prise en compte (Tableau 1.5).

- **MCPL Massif Central Plateau Limousin.**

C'est une région de faible altitude, aux pentes plus modérées et au climat océanique localement altéré par l'altitude. Elle se subdivise en deux sous-régions : GL Granitique Limousin, Hautes Terres Limousines les "Hautes Terres Limousines" HTL, qui dépassent les 1000 mètres d'altitude, et au sein desquelles on peut distinguer un troisième niveau le plateau de Millevaches, HTLH Hautes Terres Limousines Humides particulièrement arrosées et les Hautes Terres Limousines Est, HTLE moins arrosées (Tableau 1.6).

- **TC Tables Calcaires.**

Cette région fait partie de l'ensemble calcaire du bassin parisien. Elle est ensuite subdivisée en quatre : TCNL Tables calcaires Nord Loire, TCSL Tables calcaires Sud Loire, BS Beauce sèche, EE Epandages Eluviaux. La partie au Nord de la Loire présente une perméabilité plus accentuée que la région Sud. La Beauce est caractérisée par sa forte perméabilité ce qui a pour conséquence une densité de drainage très faible. La région Epandages Eluviaux comprend la Brenne et la Sologne, caractérisées par des placages argileux qui imperméabilisent les Tables Calcaires (Tableau 1.7).

Remarque : VA Vallées Alluviales et estuaire Cette région n'est pas étudiée dans le cadre de ce travail, à cause de la spécificité de ces cours d'eau (grands cours d'eau des vals).

- **Loire.**

Nous avons donné dans le Tableau 1.8, à titre indicatif, les caractéristiques physiographiques du bassin de la Loire.

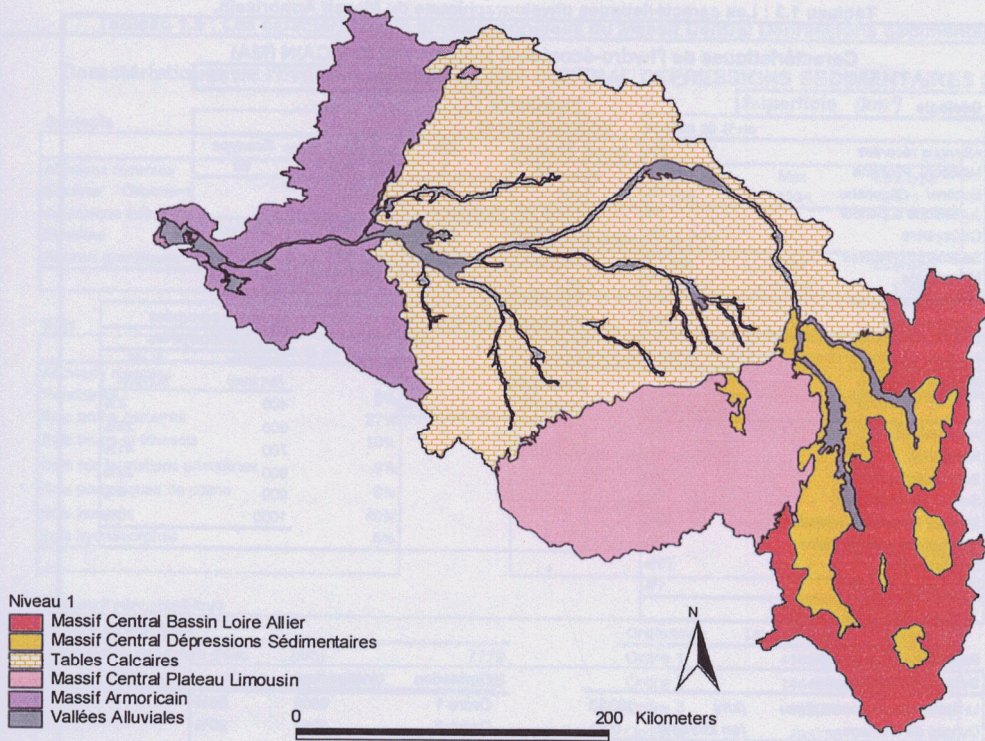


Figure 1.10 : Hydro-écorégions de la Loire niveau 1 (Wasson et al., 1993).

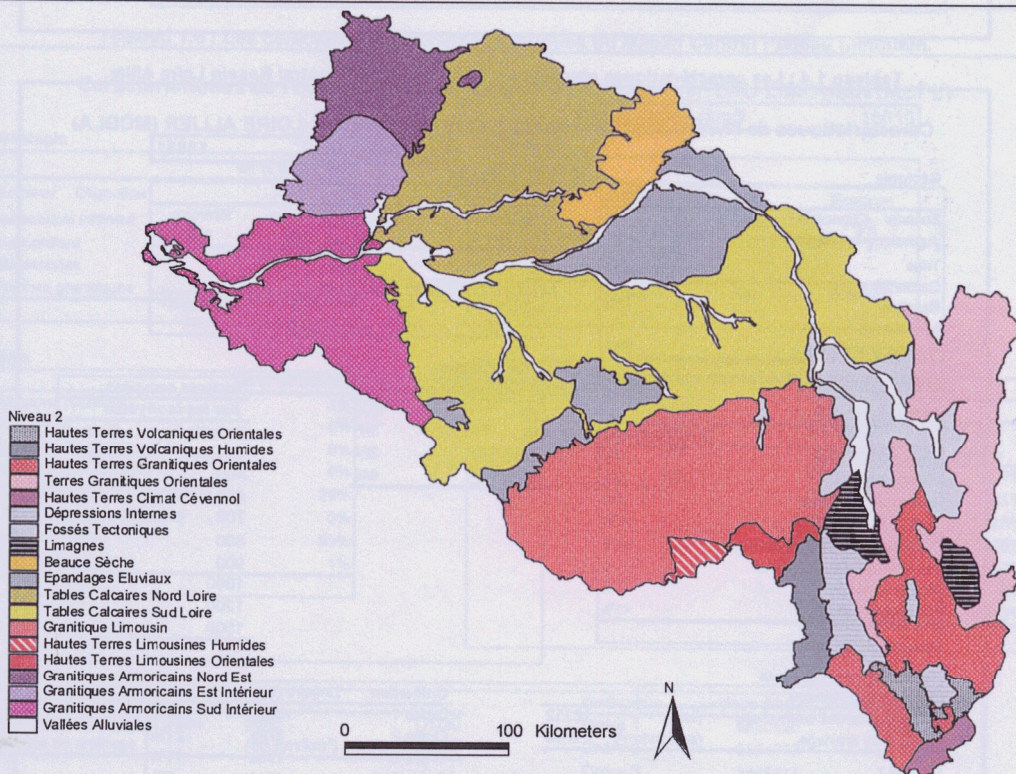


Figure 1.11 : Hydro-écorégions de la Loire niveau 2 (Wasson et al., 1993).

Tableau 1.3 : Les caractéristiques physiographiques du Massif Armoricaïn

Caractéristiques de l'hydro-écorégion MASSIF ARMORICAÏN (MA)

Superficie (km²) 17981

Géologie

en % de surface	
Alluvions récentes	5%
Miocène/ Pliocène	2%
Eocène/ Oligocène	1%
Jurassique supérieur	1%
Carbonifère	4%
Sédiments primaires	8%
Micashistes	11%
Roches granitiques	33%
Infra-cambrien	35%

Sols

en % de surface	
Alluvions récentes	4%
Rendzines	1%
Sols bruns calcaires	2%
Sols bruns et lithosols	1%
Sols sur formations cristallines	12%
Sols podzoliques de plaine	5%
Sols lessivés	75%
Sols hydromorphes	1%

Topographie

Altitude (en m)			
Moyenne	Min	Max	Ecartype
107	1	407	66

Pente des versants en (°)			
Moyenne	Min	Max	Ecartype
0,59	0,00	4,81	0,46

Précipitations

Pluviométries annuelles		Surfaces occupées par les isohyètes	
		Isohyète (en mm)	% de surface
Max	1200	400	2%
Min	400	600	23%
Ecart-type	175	700	41%
Moyenne	742	800	22%
		900	9%
		1000	3%

Réseau hydrographique

Densité de drainage			Ordination		
	(km)		Linéaire (km)	en %	
Linéaire total des cours d'eau	16323		Ordre 1	9503	58%
Densité de drainage	0,91		Ordre 2	3285	20%
			Ordre 3	1716	10%
			Ordre 4	1070	7%
			Ordre 5	580	4%
			Ordre 6	202	1%
			Ordre 7	9	0%
			Ordre 8	0	0%
			Non Classé	7	0%

Tableau 1.4 : Les caractéristiques physiographiques du Massif Central Bassin Loire Allier

Caractéristiques de l'hydro-écocoréon MASSIF CENTRAL BASSIN LOIRE ALLIER (MCBLA)			
		Superficie (km²)	18631
Géologie		Topographie	
	en % de surface	Altitude (en m)	
Eocène/ Oligocène	4%	Moyenne	Min
Jurassique inférieur	3%	741	210
Trias	1%	Max	1768
Carbonifère	5%	Ecartype	318
Basaltes	13%	Pente des versants en (°)	
Micashistes	1%	Moyenne	Min
Roches granitiques	73%	2,58	0,01
		Max	12,85
		Ecartype	1,81
		Précipitations	
		Pluviométries annuelles	
		Max	1500
		Min	400
		Ecart-type	254
		Moyenne	849
		Surfaces occupées par les isohyètes	
		Isohyète	% de surface
		(en mm)	
		400	1%
		600	5%
		700	11%
		800	25%
		900	23%
		1000	23%
		1200	8%
		1500	4%
Sols		Réseau hydrographique	
	en % de surface	Densité de drainage	
Alluvions récentes	0%	Linéaire total des cours d'eau (km)	18352
Rendzines	0%	Densité de drainage (en km/km ²)	0,99
Sols bruns calcaires	6%	Ordination	
Sols bruns et lithosols	32%	Linéaire (km)	en %
Sols sur formations cristallines	56%	Ordre 1	10968 60%
Sols podzoliques de plaine	0%	Ordre 2	3788 21%
Sols lessivés	4%	Ordre 3	1986 11%
Sols hydromorphes	0%	Ordre 4	1014 6%
		Ordre 5	393 2%
		Ordre 6	172 1%
		Ordre 7	3 0%
		Ordre 8	0 0%
		Non Classé	15 0%

Tableau 1.5 : Les caractéristiques physiographiques du Massif Central Dépressions Sédimentaires

Caractéristiques de l'hydro-écorégion MASSIF CENTRAL DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES (MCDS)		Superficie (km ²)	8126
Géologie		Topographie	
en % de surface		Altitude (en m)	
Alluvions récentes	15%	Moyenne	Min
Eocène/ Oligocène	70%	368	165
Jurassique inférieur	2%	Max	1234
Basaltes	1%	Ecartype	171
Roches granitiques	12%	Pente des versants en (°)	
		Moyenne	Min
		1,29	0,00
		Max	10,10
		Ecartype	1,36
Sols		Précipitations	
en % de surface		Pluviométries annuelles	
Alluvions récentes	8%	Max	1000
Rendzines	6%	Min	400
Sols bruns calcaires	27%	Ecart-type	147
Sols bruns et lithosols	10%	Moyenne	721
Sols sur formations cristallines	3%	Surfaces occupées par les isohyètes	
Sols podzoliques de plaine	0%	Isohyète % de surface	
Sols lessivés	40%	(en mm)	
Sols hydromorphes	6%	400	11%
		600	31%
		700	36%
		800	19%
		900	3%
Réseau hydrographique		Ordination	
Densité de drainage		Linéaire (km)	en %
Linéaire total des cours d'eau (km)	7779	Ordre 1	4169303 53%
Densité de drainage (en km/km ²)	0,96	Ordre 2	1444695 19%
		Ordre 3	865275 11%
		Ordre 4	493750 6%
		Ordre 5	350928 4%
		Ordre 6	403299 5%
		Ordre 7	74719 1%
		Ordre 8	
		Non Classé	1981 0%

Tableau 1.6 : Les caractéristiques physiographiques du Massif Central Plateau Limousin

Caractéristiques de l'hydro-écorégion MASSIF CENTRAL PLATEAU LIMOUSIN (MCPL)			
			Superficie (km²) 18010
Géologie		Topographie	
<i>en % de surface</i>			
Eocène/ Oligocène	3%	Altitude (en m)	
Jurassique inférieur	1%	<i>Moyenne</i>	<i>Min</i>
Carbonifère	3%	416	105
Micashistes	6%	<i>Max</i>	<i>Ecartype</i>
Roches granitiques	88%	1001	166
		Pente des versants en (°/°)	
		<i>Moyenne</i>	<i>Min</i>
		1,26	0,01
		<i>Max</i>	<i>Ecartype</i>
		7,72	0,85
Sols		Précipitations	
<i>en % de surface</i>			
Alluvions récentes	1%	Pluviométries annuelles	
Rendzines	0%	Max	1500
Sols bruns calcaires	6%	Min	600
Sols bruns et lithosols	0%	Ecart-type	250
Sols sur formations cristallines	29%	Moyenne	936
Sols podzoliques de plaine	0%	Surfaces occupées	
Sols lessivés	63%	par les isohyètes	
Sols hydromorphes	1%		<i>Isohyète</i>
			<i>(en mm)</i>
			<i>% de surface</i>
			600 1%
			700 21%
			800 28%
			900 26%
			1000 17%
			1200 4%
			1500 2%
Réseau hydrographique			
Densité de drainage		Ordination	Linéaire (km) en %
Linéaire total des cours d'eau	(km) 17030	Ordre 1	9860520 58%
Densité de drainage	(en km/km ²) 0,95	Ordre 2	3594879 21%
		Ordre 3	1845337 11%
		Ordre 4	997595 6%
		Ordre 5	496770 3%
		Ordre 6	234681 1%
		Ordre 7	
		Ordre 8	
		Non Classé	

Tableau 1.7 : Les caractéristiques physiographiques des Tables Calcaires

Caractéristiques de l'hydro-écorégion TABLES CALCAIRES LIGERIENNES (TC)

Superficie (km²) 49526

Géologie

	en % de surface
Alluvions récentes	3%
Miocène/ Pliocène	10%
Eocène/ Oligocène	16%
Crétacé supérieur	38%
Crétacé inférieur	1%
Jurassique supérieur	16%
Jurassique inférieur	14%

Topographie

Altitude (en m)			
Moyenne	Min	Max	Ecartype
138	14	441	54

Pente des versants en (°/°)

Moyenne	Min	Max	Ecartype
0,50	0,00	4,05	0,41

Sols

	en % de surface
Alluvions récentes	5%
Rendzines	22%
Sols bruns calcaires	17%
Sols bruns et lithosols	4%
Sols sur formations cristallines	1%
Sols podzoliques de plaine	7%
Sols lessivés	41%

Précipitations

Pluviométries annuelles		Surfaces occupées par les isohyètes	
		Isogyète (en mm)	% de surface
Max	1000		
Min	400		
Ecart-type	151		
Moyenne	664	400	6%
		600	50%
		700	35%
		800	7%

Réseau hydrographique

Densité de drainage		
Linéaire total des cours d'eau	(km)	32425
Densité de drainage	(en km/km ²)	0,65

Ordination	Linéaire (km)	en %
Ordre 1	18458	57%
Ordre 2	6446	20%
Ordre 3	3662	11%
Ordre 4	1911	6%
Ordre 5	1197	4%
Ordre 6	393	1%
Ordre 7	141	0%
Ordre 8	174	1%
Non Classé	54	0%

Tableau 1.8 : Les caractéristiques physiographiques de la Loire (à titre indicatif)

Caractéristiques de l'hydro-écorégion BASSIN DE LA LOIRE

Géologie

	en % de surface
Alluvions récentes	7%
Miocène/ Pliocène	5%
Eocène/ Oligocène	13%
Crétacé supérieur	16%
Crétacé inférieur	0%
Jurassique supérieur	7%
Jurassique inférieur	7%
Trias	0%
Carbonifère	2%
Sédiments primaires	1%
Basaltes	2%
Micashistes	3%
Roches granitiques	31%
Infra-cambrien	6%

Sols

	en % de surface
Alluvions récentes	6%
Rendzines	10%
Sols bruns calcaires	11%
Sols bruns et lithosols	7%
Sols sur formations cristallines	15%
Sols podzoliques de plaine	4%
Sols lessivés	44%
Sols hydromorphes	3%

Topographie

Altitude (en m)			
Moyenne	Min	Max	Ecartype
282	0	1768	271

Pente des versants en (°)			
Moyenne	Min	Max	Ecartype
1,00	0,00	12,85	1,18

Précipitations

Pluviométries annuelles		Surfaces occupées par les isohyètes	
		Isohyète (en mm)	% de surface
Max	1500	400	4%
Min	400	600	31%
Ecart-type	223	700	30%
Moyenne	777	800	16%
		900	10%
		1000	7%
		1200	2%
		1500	1%

Réseau hydrographique

Densité de drainage			Ordination		
			Linéaire (km)	en %	
Linéaire total des cours d'eau	(km)	97451	Ordre 1	55540	57%
Superficie	(km ²)	117842	Ordre 2	19558	20%
Densité de drainage	(en km/km ²)	0,83	Ordre 3	10532	11%
			Ordre 4	5649	6%
			Ordre 5	3420	4%
			Ordre 6	1617	2%
			Ordre 7	604	1%
			Ordre 8	501	1%
			Non Classé	101	0%

I.4.2. LA REGIONALISATION QUANTITATIVE.

Notre but est de maintenir l'interprétabilité de la classification écorégionale, en fournissant une méthodologie systématique qui pourrait être reconduite par d'autres investigateurs, en procurant une base pour l'extrapolation statistique, et en incorporant une flexibilité dans la définition des limites régionales selon les objectifs spécifiques des études disciplinaires. Cette approche est semblable dans sa nature à la procédure de De Agar et al. (1995) qui dressent une carte de la structure écologique d'une région.

Les résultats des analyses multivariées sont donnés dans la figure 1.12. Les groupes de régions constituées sont illustrés dans la figure 1.13. Enfin, les caractéristiques des groupes définis sont représentés dans le Tableau 1.9.

La figure 1.12.b nous montre le pourcentage de la variance expliquée par rapport au total (en colonne) par chaque axe factoriel (en ligne). Ainsi, les deux premiers axes factoriels représentent 30% de la totale de la variance expliquée.

La figure 1.12.a nous décrit les structures des variables dans le premier plan factoriel F1-F2. Nous pouvons y voir

- un gradient d'altitude et de pluie,
- une association, dans ce plan factoriel, des catégories de pluies fortes, de classe des altitudes fortes et de la géologie d'âge primaire (Axe F1 et F2 négatifs),
- des catégories de faibles pluies associées aux altitudes faibles, des sols et de la géologie d'âge quaternaire composés d'alluvions récentes primaire (Axe F1 positif et F2 négatif),
- des catégories intermédiaires (Axe F1 positif ou négatif et F2 positif).

La figure 1.12.d représente le résultat de la typologie des bassins versants d'après une Classification Ascendante Hiérarchique. Cette typologie est ensuite projetée sur le résultat en plan factoriel de l'ACP. Ensuite, nous avons regroupé dans un polygone l'ensemble des individus appartenant à un groupe. Nous pouvons voir que les régions ainsi définies sont bien discriminées dans ce plan factoriel, à part quelques recoupements, entre la région R2 et R5, et la région R5 et R3.

Nous donnons les caractéristiques des écorégions définies en 5 classes (Tableau 1.9) :

- l'écorégion 1 (R1) constitue l'ensemble du haut bassin de la Loire, de l'Allier, le haut plateau limousin (Plateau des Millevaches). Elle est caractérisée par des pluies fortes, des hautes altitudes, et des sols sur formations cristallines,
- l'écorégion 2 (R2) se situe en majorité dans la partie Centre Est du Massif Armoricaire, le val de Loire, la confluence du Maine, du Loir, de l'Huisne. Elle est caractérisée par des altitudes très faibles,
- l'écorégion 3 (R3) s'étend du Limousin jusqu'au Morvan, en passant par la confluence Loire-Allier. une autre partie se situe dans le Nord Est et le Sud Intérieur du Massif armoricaire. Elle est marquée par une altitude moyenne 200-500m
- l'écorégion 4 (R4) est localisée dans la Beauce (faible pluie, et âge géologique Miocène/Pliocène),
- l'écorégion 5 (R5) s'établit dans les régions sédimentaires au Sud de la Loire, ainsi que le haut bassin du Loir et de l'Huisne.

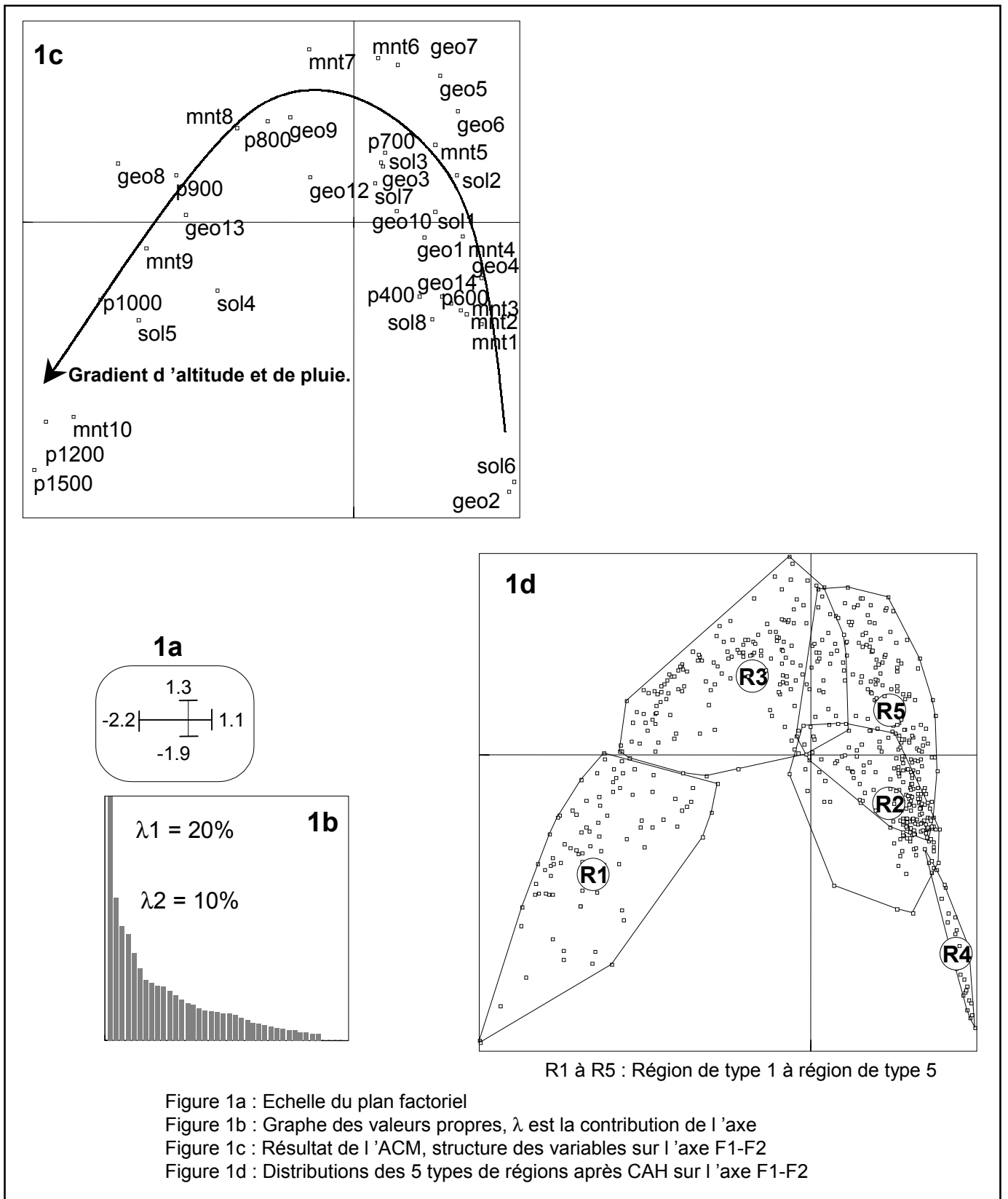


Figure 1.12 : Régionalisation sans a priori : 600 individus BV décrits par 4 variables - géologie - précipitation - relief - sols.

Résultats du premier plan factoriel de l'ACM sur les bassins versants unitaires et de la Classification hiérarchique en 5 groupes.

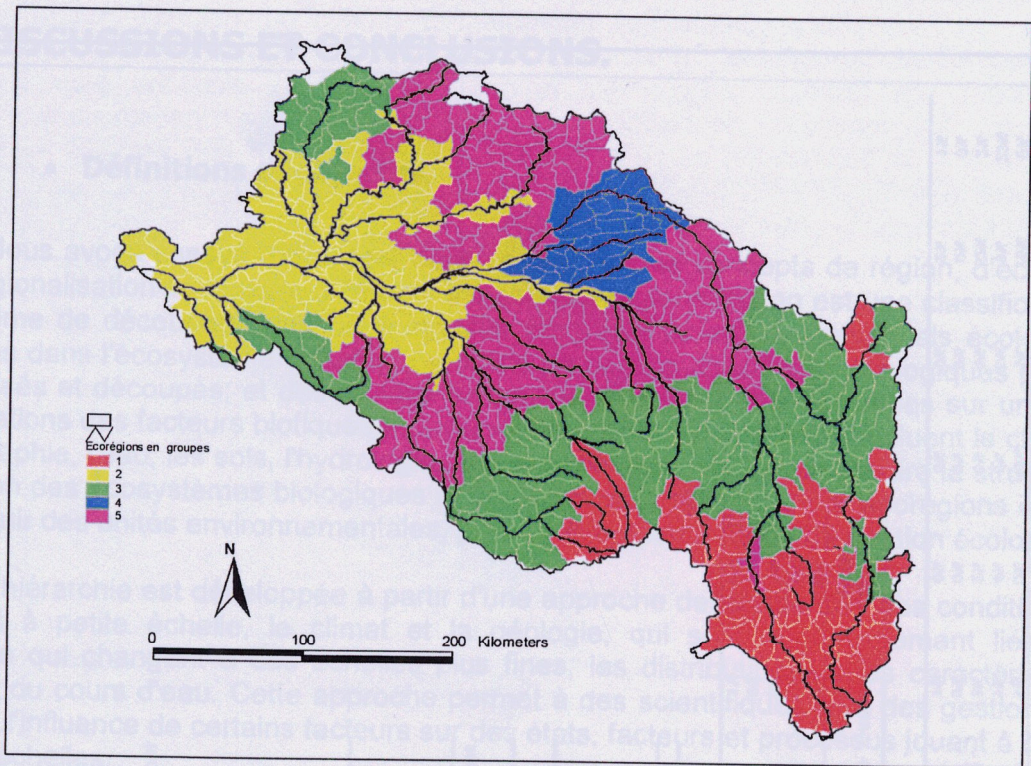


Figure 1.13 : Ecorégions de la Loire en 5 groupes. Analyse quantitative.

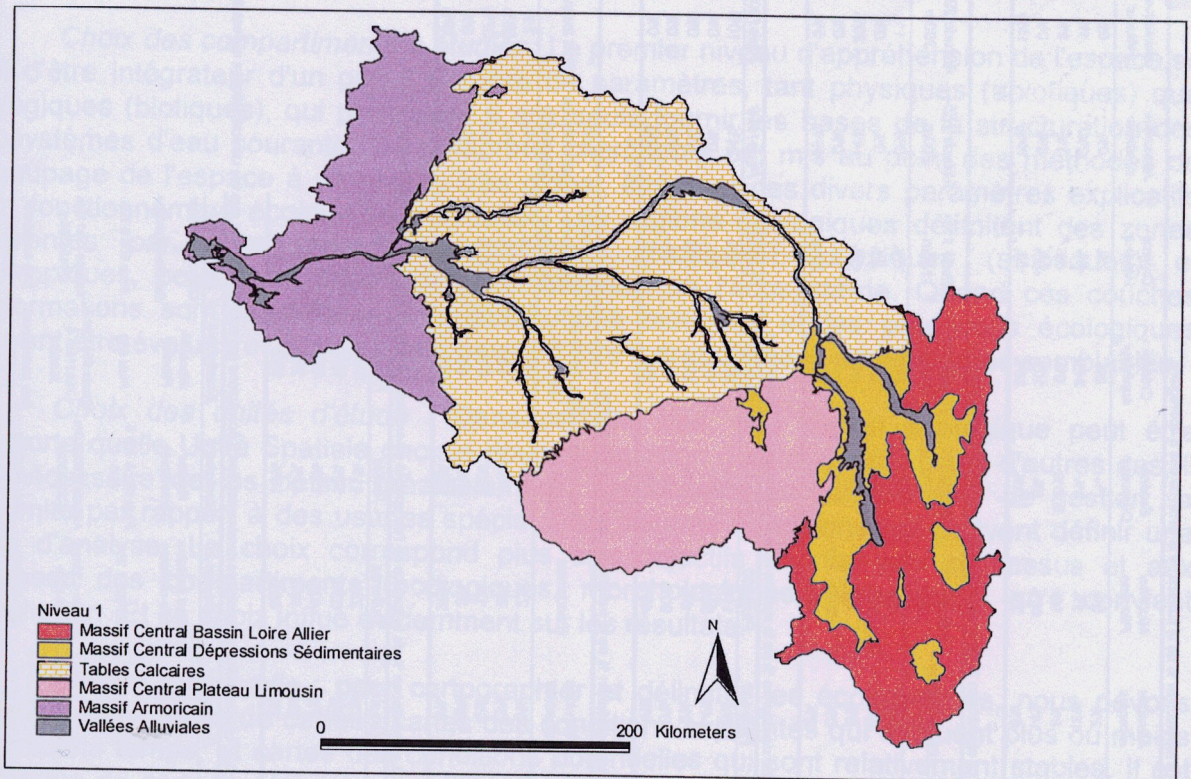


Figure 1.10 : Hydro-écorégions de la Loire niveau 1. Résultat d'expert (Wasson et al., 1993).

Tableau 1.9 : Les caractéristiques physiques des 5 écorégions.

Tableau 1.9.a : La répartition % de la surface de la géologie des 5 écorégions.

Ecorégion	Alluvions récentes	Miocène/Pliocène	Eocène/Oligocène	Crétacé supérieur	Crétacé inférieur	Jurassique supérieur	Jurassique inférieur	Trias	Carbonifère	Sédiments primaires	Basaltes	Micashistes	Roches granitiques	Infra-cambrien
Ecorégion 1	2%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	13%	1%	75%	0%
Ecorégion 2	15%	3%	3%	34%	0%	2%	1%	0%	1%	4%	0%	5%	8%	23%
Ecorégion 3	8%	0%	18%	0%	0%	1%	9%	0%	5%	2%	0%	4%	52%	2%
Ecorégion 4	14%	68%	8%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ecorégion 5	5%	2%	23%	30%	1%	19%	15%	0%	1%	0%	0%	0%	2%	1%

Tableau 1.9.b : La répartition % de la surface de l'altitude des 5 écorégions.

Ecorégion	Altitude < 35m	Altitude 35-60m	Altitude 60-75m	Altitude 75-115m	Altitude 115-155m	Altitude 155-200m	Altitude 200-300m	Altitude 300-500m	Altitude 500-1000m	Altitude > 1000m
Ecorégion 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	8%	32%	58%
Ecorégion 2	49%	31%	13%	5%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
Ecorégion 3	0%	2%	2%	3%	5%	14%	30%	29%	14%	1%
Ecorégion 4	0%	21%	51%	21%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
Ecorégion 5	2%	10%	17%	23%	22%	19%	5%	1%	1%	0%

Tableau 1.9.c : La répartition % de la surface de la précipitation des 5 écorégions.

Ecorégion	Pluie400	Pluie600	Pluie700	Pluie800	Pluie900	Pluie1000	Pluie1200	Pluie1500
Ecorégion 1	5%	11%	13%	16%	18%	24%	10%	4%
Ecorégion 2	14%	53%	28%	5%	0%	0%	0%	0%
Ecorégion 3	2%	6%	30%	35%	21%	6%	0%	0%
Ecorégion 4	0%	90%	9%	0%	0%	0%	0%	0%
Ecorégion 5	4%	45%	44%	6%	1%	0%	0%	0%

Tableau 1.9.d : La répartition % de la surface des sols des 5 écorégions.

Ecorégion	Alluvions récentes	Rendzines	Sols bruns calcaires	Sols bruns et lithosols	Sols sur formations cristallines	Sols podzologiques de plaine	Sols lessivés	Sols hydromorphes
Ecorégion 1	0%	2%	6%	28%	56%	0%	7%	1%
Ecorégion 2	13%	8%	7%	4%	7%	3%	58%	1%
Ecorégion 3	6%	1%	15%	5%	12%	1%	57%	3%
Ecorégion 4	13%	3%	5%	0%	0%	54%	9%	16%
Ecorégion 5	8%	28%	18%	3%	0%	1%	39%	2%

Tableau 1.9.d : La répartition % de la surface de l'occupation du sol des 5 écorégions (donnée ici à titre indicatif).

Ecorégion	Urbains	Cultures	Forêts	Prairies	Eaux
Ecorégion 1	2%	23%	41%	34%	0%
Ecorégion 2	6%	63%	13%	16%	2%
Ecorégion 3	2%	40%	15%	42%	0%
Ecorégion 4	4%	49%	43%	2%	1%
Ecorégion 5	3%	65%	16%	15%	0%

Tableau 1.9.e : Les caractéristiques physiques dominantes des 5 écorégions (ne sont indiquées ici que les caractéristiques qui ont des superficies > 20%).

	Ecorégion 1	Ecorégion 2	Ecorégion 3	Ecorégion 4	Ecorégion 5
Géologie	Roches granitiques	Crétacé supérieur & Infra-cambrien	Roches granitiques	Miocène/Pliocène	Crétacé supérieur & Eocène/Oligocène
Précipitation	Pluie 1000	Pluie 600 & 700	Pluie 800 & 700 & 600	Pluie 600	Pluie 600 & 700
Relief	Altitude > 1000m & 500a1000m	Altitude < 35m & 35-60m	Altitude 200a300m & 300a500m	Altitude 60a75m & 75a115m & 35a60m	Altitude 75a115m & 115a155m
Sols	Sols / cristallines & Sols bruns et lithosols	Sols lessivés	Sols lessivés	Sols podzologiques de plaine	Sols lessivés & Rendzines
Occupation du sol	Forêt & Prairie	Culture	Culture & Prairie	Culture & Forêt	Culture

I.5. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS.

- **Définitions et objectifs.**

Nous avons essayé d'explicitier dans ce chapitre les concepts de région, d'écorégion et de régionalisation sous leurs différents aspects. La régionalisation est une classification et un système de découpage destiné à stratifier progressivement des potentiels écologiques uniformes dans l'écosystème aquatique aux fins de gestion. Des types écologiques peuvent être classés et découpés, et des régions écologiques peuvent être délimitées sur une base d'associations des facteurs biotiques et environnementaux. Ces facteurs incluent le climat, la physiographie, l'eau, les sols, l'hydrologie, afin d'expliquer ou *in fine* de prédire la structure et la fonction des écosystèmes biologiques et écologiques. L'approche par écorégions est utile pour définir des unités environnementales, préliminaire à toute étude de gestion écologique.

La hiérarchie est développée à partir d'une approche descendante : des conditions qui changent à petite échelle, le climat et la géologie, qui sont continuellement liées aux conditions qui changent à des échelles plus fines, les distributions et les caractéristiques biotiques du cours d'eau. Cette approche permet à des scientifiques et à des gestionnaires d'évaluer l'influence de certains facteurs sur des états, facteurs et processus jouant à de plus grandes échelles.

- **Principes.**

Choix des compartiments à étudier : Le premier niveau d'appréhension de l'espace se doit d'être intégrateur d'un grand nombre de paramètres, tant physiques (abiotiques) que biologiques (biotiques), qui pourraient à eux seuls fournir les bases de la structuration des écosystèmes d'eau courante. De nombreux chercheurs ont mis au point des méthodes de découpage de l'espace à un niveau très global, intégrant ces divers paramètres explicatifs d'un fonctionnement écologique particulier. Les régions écologiques délimitent des zones différentes par leurs potentiels biologiques (biotiques), physiques (abiotiques) et anthropiques, pour caractériser le fonctionnement de l'écosystème. Quand ces couches d'informations sont combinées, les distributions biotiques et les processus écologiques peuvent être évalués et des résultats peuvent être extrapolés aux écosystèmes semblables.

Choix des unités d'étude : Dans certains cas, une région écologique peut être n'importe quelle Unité Spatiale choisie pour l'intégration des analyses. Dans d'autres cas, il est nécessaire de les définir préalablement : les bassins versants, l'unité de gestion, la proximité par rapport à des usages spéciaux ou d'autres conditions qui peuvent définir une zone d'analyse. Le choix correspond plus aux objectifs définis, aux processus et aux réponses des compartiments (écologiques, morphologiques, biologiques) qu'il convient d'expliquer. Et ce choix influe évidemment sur les résultats.

Echelle temporelle : pour cartographier et délimiter les écosystèmes, nous devons combiner deux types de cartes : cartes des conditions existantes qui évoluent plus ou moins vite avec le temps, et cartes des conditions potentielles qui sont relativement stables. Il est préférable de cartographier des conditions potentielles qui expriment la réalité physique et biologique. Ces conditions peuvent ou non s'exprimer pleinement dans l'état actuel de l'écosystème.

Echelle spatiale : Les écosystèmes sont analysables à de nombreuses échelles spatiales, de l'écosphère globale aux microhabitats définis par l'activité microbienne. Le niveau du détail perceptible, le nombre de facteurs et le nombre de variables qui caractérisent ces facteurs augmentent progressivement aux échelles plus fines. Par conséquent, les conditions de données et d'analyse, ainsi que l'investissement pour la classification et la délimitation de l'écosystème augmentent pour des activités mesurées à des échelles plus fines. Pour aborder le niveau d'organisation supérieur, on est amené à synthétiser les données du niveau précédent.

Les bases de données : Les cartes de base (ou cartes primaires) sont nécessaires pour cartographier et délimiter les écosystèmes et les intégrer dans des inventaires de la ressource naturelle. Ces cartes incluent la série de cartes établissant principalement la topographie, la géologie et le climat. Ensuite d'autres couches dérivées (imperméabilité du sol, pente des versants) ou d'autres couches d'information sur la végétation existante, les populations de faune, la distribution de poissons, la démographie, les ressources culturelles, les données économiques, et toutes autres seront des informations nécessaires pour délimiter des écosystèmes afin de répondre aux besoins de la planification et de l'analyse.

Le SIG : Le SIG est un outil servant à combiner ces thèmes séparés d'information, pour définir et délimiter les écosystèmes. Mais les scientifiques et les gestionnaires utilisant cette technologie doivent en même temps intégrer ces thèmes d'information, comprendre les processus d'interaction, et formuler les stratégies de gestion, ce qui n'est pas toujours le cas.

L'avantage majeur de cet outil est d'utiliser ses modèles, et ses capacités de traitement cartographique pour conduire un éventail d'analyses géographiques utilisant des critères aisément disponibles afin de mettre en place des découpages variables suivant la méthode, les critères et les résultats attendus. Et d'intégrer ceux-ci dans un contexte plus léger et plus maniable.

Les outils utilisés : Si l'on souhaite étudier les relations et les interactions entre régions voisines, à l'intérieur ou non d'une même écorégion, il est nécessaire d'analyser chacune de celles-ci comme un ensemble (Diagramme de Venn) : un dispositif écorégional peut être composé de plusieurs entités. Kendall (1939), Isard (1960), Balling (1984) Openshaw (1987) ont présenté un résumé des principes d'analyse statistique utilisés dans la problématique de la régionalisation. Ces techniques sont composées en grande partie par les interprétations des vecteurs propres, l'analyse du groupe, la programmation linéaire, le modèle d'interaction spatiale, l'analyse factorielle, parmi d'autres méthodes d'analyses statistiques.

Hiérarchie emboîtée : Les conditions et les processus agissant à l'échelle des plus grands écosystèmes affectent et ignorent souvent ceux de plus petits écosystèmes, et les propriétés des plus petits écosystèmes émergent dans le contexte de plus grands systèmes (Rowe, 1984 ; Bailey, 1985). Ainsi, des écosystèmes sont conceptualisés en tant qu'occurrence dans un agencement géographique emboîté, avec beaucoup de plus petits écosystèmes inclus dans les plus grands (Allen et Starr 1982, O'Neill et al. 1986, Albert et al. 1986, Gérardin, 1997). Dans le cadre de l'écosystème aquatique, nous tenons compte de la hiérarchie emboîtée proposée par Frissel et al., (1986)(Figure 1.14)

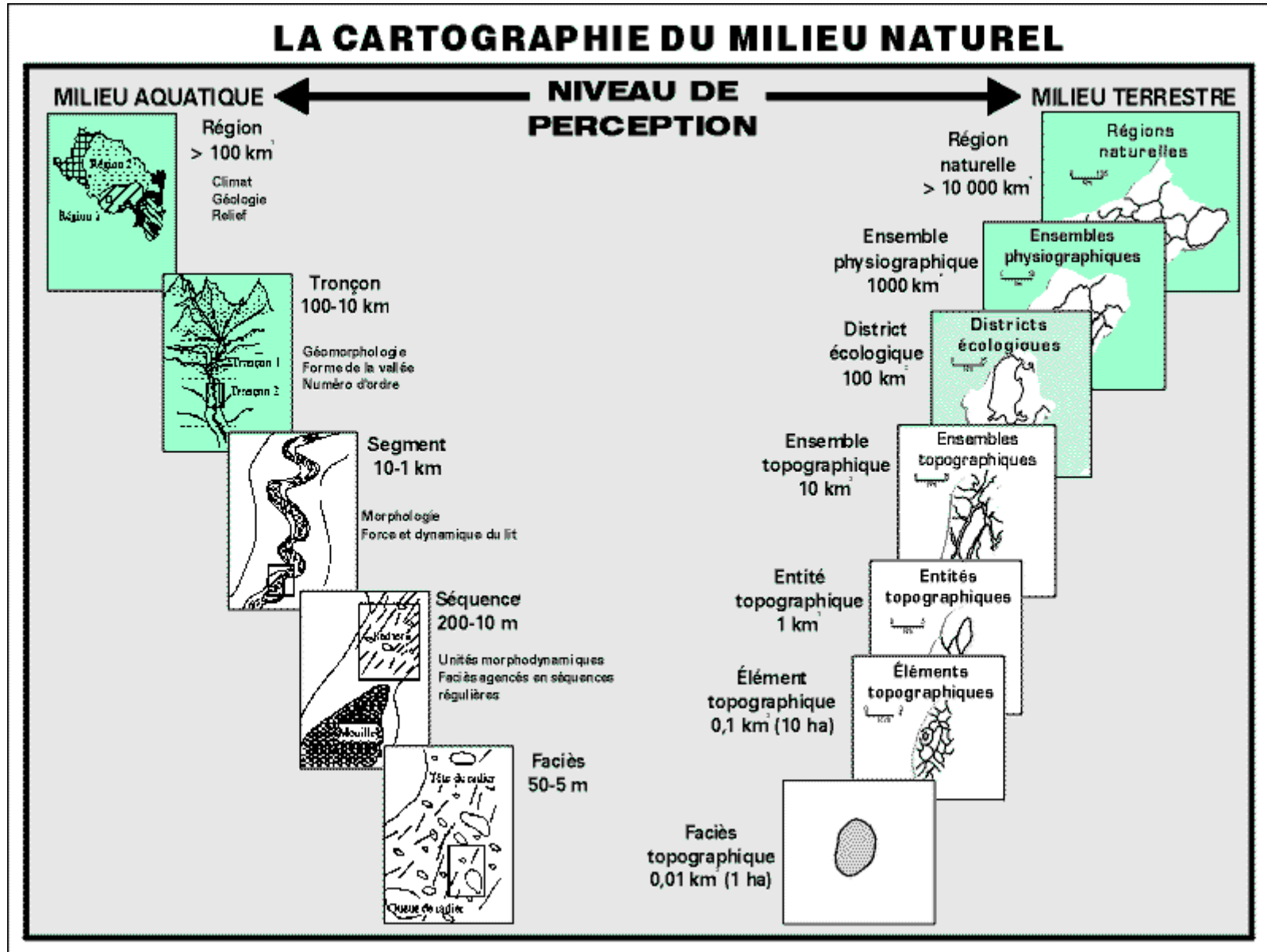


Figure 1.14 : Hiérarchies emboîtées (modifiées) de l'écosystème aquatique de Frissel et al. (1987) et de l'écosystème terrestre de Gérardin et al. (1997). Extrait de Ducruc (1998).

Les différentes échelles pourraient comporter :

- les échelles globales, exprimées par les régions, qui intègrent la biogéographie et la zoogéographie,
- les échelles de "tronçon", où certains acteurs scientifiques ont l'habitude de travailler,
- les échelles locales, exprimées souvent par l'habitat où les biologistes font souvent leurs prélèvements.

L'hypothèse majeure de l'approche "écorégion" stipule que les variables exprimées à l'échelle de la « région » pourraient expliquer des processus et des réponses du fonctionnement biologique et écologique de l'hydrosystème. De cette hypothèse, se déduisent les suivantes :

- dans une région homogène donnée, les fonctionnements des cours d'eau ont des caractères communs ; l'étude de la distribution spatiale de ce fonctionnement est donc rationnelle (Huet, 1949, 1954),
- dans des régions en tous points comparables, on trouvera donc les mêmes fonctionnements des cours d'eau, ce qui implique une notion de prédiction ainsi qu'une démarche déductive, les "comportements" pourraient être cartographiables (règle des pentes/largeurs, Huet, 1954).

L'hypothèse est alors que chaque région ou sous-région présentera, non une gamme de valeurs distinctes de celles des autres régions mais une combinaison probable de valeurs des différentes variables qui lui sera particulière.

• Méthodes.

Nous gardons les grandes lignes de la mise en place des écorégions : les critères, les méthodes, et les résultats, soient :

1. *développer et formaliser les buts et les objectifs.* Nous pensons qu'une régionalisation est liée avant tout à l'objectif poursuivi. Actuellement, l'écorégion que nous avons développé n'est associée à aucun objectif (habitat aquatique, qualité de l'eau). Le lien entre la typologie et l'optimisation de la gestion intégrée n'est pas encore défini, beaucoup d'autres mécanismes (naturels et humains) sont en jeu. C'est pourquoi nous avons proposé, dans le cadre de cette étude, **de baser la typologie comme base de connaissance élémentaire des objectifs** de gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante.

2. *choisir une information appropriée pour les objectifs du projet.* Les écorégions sont différenciées par le climat, la physiographie et la géologie. Nous devons avant cela signaler que le choix de la non-hiérarchisation des critères (pas de pondération sur les variables) permettant la classification n'est pas toujours évidente et qu'elle a avant tout un intérêt pratique. Ceci étant, il sera possible dans l'avenir d'établir des coefficients de pondération, en fonction des objectifs poursuivis.

Le processus de stratification utilise les cartes thématiques disponibles concernant le climat, la géologie, les sols, et le relief. Les différences sur la méthodologie, qualitative ou quantitative, des écorégions résident sur :

- les critères, dans certains cas, sur les informations supplémentaires, la végétation, la structure du réseau hydrographique,
- les techniques d'analyse qui sont développées pour fournir la traduction en unités écorégionales. La délimitation qualitative fait souvent appel à des experts connaissant le milieu et l'espace étudié. Par contre, la délimitation quantitative utilise des outils statistiques ou géomatiques.

3. *Choix et caractéristiques des groupes de régions à définir* : Les résultats consistent à définir le nombre efficient de régions et les niveaux de découpage dans un espace donné. Souvent les résultats varient selon les niveaux de perception, de précision, de complexité des variables ou selon les objectifs. Le pas définitif étant la production d'un découpage régional adéquat et adapté aux objectifs de départ. Ce choix reste encore arbitraire dans notre cas, néanmoins quelques méthodes statistiques sont actuellement disponibles pour déterminer le nombre optimal de régions en fonction du nombre d'individus et du nombre de variables analysées (Bourgeron, 1998).

- **Les facteurs mis en jeu.**

Les variables utilisées dans la mise en place de la régionalisation permettent d'intégrer implicitement les facteurs globaux contrôlant les cours d'eau. Le choix des différentes variables potentiellement explicatives à diverses échelles d'approche dépend :

- de la hiérarchisation des facteurs de contrôle,
- de la méthode de délimitation des objets,
- de l'analyse du fonctionnement à étudier.

La qualité de l'écosystème est déterminée par les facteurs "naturels" et les facteurs dits "anthropogéniques" qui interagissent dans l'espace et le temps.

Les questions que nous avons posées dans l'étude des écorégions ligériennes (qui sont des systèmes fortement et anciennement anthropisés) sont les suivantes :

- est-il possible d'établir des écorégions en se basant simplement sur les causes du phénomène, sur les facteurs de contrôle du système sous-jacents au concept de capacité potentielle ? Et de prendre en compte dans ce sens que les facteurs dits naturels,
- pour aborder "l'anthropisation", est-il nécessaire de s'attaquer tout d'abord à la notion de pression sur les milieux naturels ?
- est-ce judicieux de ne pas associer les modifications apportées par l'homme dans la définition préalable des écorégions, qui est avant tout un concept de gestion ?
- est-ce qu'un système "naturel" existe dans un bassin-versant ou dans un cours d'eau ou fleuve d'Europe Occidentale ?
- est-ce qu'il faut prendre en compte comme système naturel un système faiblement anthropisé ou un système anthropisé délaissé ? Prendre en compte le concept de "système naturel le moins anthropisé".
- les modifications apportées par l'homme ne sont elles pas fonctions des caractéristiques des milieux où ils se trouvent ?
- est-il possible de séparer deux systèmes dépendants ?

Nous sommes conscients de la difficulté de répondre actuellement à ces questions. Une pleine connaissance de la nature systémique des trois idées principales de l'adaptation humaine à, de la modification de, et de la dépendance sur l'environnement est absolument nécessaire. Cette interaction homme-nature dans certaines régions dépend, aussi, de plus en plus des interactions entre les régions.

Les systèmes anthropisés tels les aménagements des cours d'eau (directs ou induits à travers son bassin-versant) conservent malgré tout certaines caractéristiques naturelles : en premier lieu les facteurs de contrôle globaux tels le climat, la géologie et le relief ainsi que la répartition des végétations naturelles.

- Limites

Problèmes de finalité.

D'un point de vue général, il semble difficile d'élaborer une typologie utilisable pour tous les types d'approche écologique des cours d'eau. En effet, selon le choix des phénomènes que l'utilisateur cherchera à mettre en évidence, plusieurs découpages de l'espace, hiérarchisés ou non, pourront présenter des avantages. Ainsi un chercheur désirant expliquer la distribution de diverses espèces d'invertébrés benthiques ou de poissons sera-t-il plutôt intéressé par un premier découpage de l'espace axé sur des critères d'ordre biogéographique. Un chercheur travaillant sur la structuration des groupes faunistiques fonctionnels (notion de niche écologique, de rôle joué par un groupe fonctionnel dans l'architecture écologique globale du système) préférera baser sa typologie des cours d'eau sur des critères écologiques globaux (régions écologiques par exemple) pour descendre ensuite au niveau des types d'écoulement (faciès, séquences de faciès).

Que se soit dans une optique de scientifique ou de gestionnaire, il est souvent nécessaire d'associer une typologie à la question posée : pour quelle utilisation, pour quel objectif et pour quel écosystème cible ? Il est difficile de superposer ou de combiner chaque composant des typologies sectorielles : hydrologie, biologie, morphologie. L'élaboration d'une typologie globale et intégrée reste une opération très complexe. Une méthode de Cadre Ecologique de Référence (CER) a été menée au Canada (Gérardin et al., 1997) pour transcender ces problèmes mais elle reste marquée par son orientation "écologique". Une typologie régionale devrait donc s'appliquer à un objectif bien défini et spécifique au plan scientifique. Nous acceptons que les bornes exactes pour chaque niveau envisagé dans ce processus et développé dans la formation des écorégions puissent ne pas s'adapter à chaque besoin d'analyse et de gestion.

Problèmes d'échelle.

La structure et la fonction des écosystèmes comportent plusieurs échelles d'espace et de temps. En conséquence, nous devons identifier des sources de variabilité spatiale et temporelle tout en évaluant et en classifiant les écosystèmes (Delcourt et al. 1983 ; Forman et Godron 1986).

Si l'association des facteurs de contrôle qui définissent les écosystèmes est très importante, tous les facteurs ne sont pas également importants à toutes les échelles spatiales. A petite échelle, les facteurs importants sont en grande partie abiotiques, tandis qu'à des échelles plus fines, ils sont biotiques.

Problèmes de méthode.

Les unités géographiques délimitées sur la surface terrestre tirent leur identité propre des différences marquant une combinaison de caractéristiques dans les facteurs physiques dans l'espace. Les facteurs déterminants varient donc selon le lieu à toutes les échelles.

L'avantage principal de l'approche par écorégions est qu'elle fournit aisément une structure interprétable pour étudier l'écosystème qui est basé sur une intégration de caractéristiques physiques reconnaissables pour une grande part. L'inconvénient principal tient à son caractère subjectif (c.-à-d., basé sur jugement expert), de sorte que les résultats varient selon les options des scientifiques impliqués. Quelques scientifiques avancent qu'il n'existe pas une délimitation d'un écosystème mais plusieurs et que celles-ci dépendent trop souvent des points de vue des analystes qui les proposent. En effet, différents critères peuvent conduire à des cartes radicalement différentes pour une même zone.

La régionalisation est souvent établie à partir des macro-observations et des macro-données qui sont mesurées à petite échelle. Elle intègre donc des variables dites "primaires" qui n'ont pas de précision statistique et qui sont souvent exprimées en termes qualitatifs.

En dernier lieu, il faut remarquer que le concept de "région" est encore peu familier pour les hydrobiologistes, plutôt habitués à raisonner en termes de réseaux et de linéaires. Cette dimension fera l'objet d'une analyse particulière au Chapitre 2.

- **Vers une définition d'efficacité de la régionalisation.**

Le premier problème de la régionalisation (au sens de l'agrégation) est traité dans un contexte de statistique spatiale. Est ce que la classification spatiale doit tenir compte ou non de la notion de contiguïté et de voisinage ?

Le deuxième problème porte sur les perspectives de l'approche qui reposent sur les notions de régions homogènes et de régions fonctionnelles :

- les régions homogènes sont souvent décrites comme relativement statiques et d'intérêt statistique,
- les régions fonctionnelles correspondent à l'une des perspectives scientifiques de la régionalisation qui a été de re-acheminer la régionalisation vers un fonctionnalisme (concept des régions "fonctionnelles").

En effet, est ce qu'il faut chercher à mettre au point un découpage multidisciplinaire (correspondant aux intérêts du gestionnaire) et qui diminue sa signification pour une discipline donnée (correspondant aux intérêts de tel ou tel scientifique) ? Ou est-il nécessaire de faire plusieurs découpages régionaux associés chacun à une discipline ? Ensuite, est-il possible à partir de ces différents découpages régionaux de simuler un autre découpage synthétique ? Ce qui revient à définir les différentes disciplines en jeu.

- **Similitude entre plusieurs découpages.**

Notre hypothèse de travail se base sur les analogies visuelles entre les différents découpages réalisés sur le bassin de la Loire. La carte primaire qui est la carte géologique pourrait résumer ces analogies. En effet, la géologie a une place prépondérante dans la régionalisation des cours d'eau ligériens.

Les ressemblances spatiales parmi les cartes sont déterminées en superposant à partir du SIG chaque carte avec une autre carte et en mesurant la similitude statistique entre les paires. Cette similitude statistique est mesurée à partir du calcul du coefficient de "indétermination" ("incertainty") [U] (Clifford et Stephenson, 1975 ; Vandermeer, 1981). Le coefficient de "indétermination" [U] est la proportion symétrique de l'indétermination d'une carte qui résulte de la connaissance des valeurs des catégories correspondantes aux autres cartes. (Goodman et Kruskal, 1972). Il est basé sur les surfaces communes des différentes catégories de chaque carte et de la carte qui lui est superposée. Les unités de comparaison sont actuellement les polygones, le calcul statistique est accompagné d'une pondération surfacique.

La formule pour calculer [U] est :

$$U = 2 * [H(X) + H(Y) - H(XY)] / [H(X) + H(Y)]$$

$$H(X) = \sum_i (n_{je}/n) \ln(n_{je}/n)$$

$$H(Y) = \sum_j (n_{ej}/n) \ln(n_{ej}/n)$$

$$H(XY) = \sum_i \sum_j (n_{ij}/n) \ln(n_{ij}/n)$$

H (X) : indice de diversité la carte X.

n_{je} : proportion surfacique de chaque catégorie (i catégories) de la carte X

n_{ej} : proportion surfacique de chaque catégorie (j catégories) de la carte Y

n : somme des proportions surfaciques des deux cartes X et Y

[U] qui est compris entre 0 à 1. Les basses valeurs de [U] indiquent que les cartes qui ont été comparées sont dissemblables, et à l'inverse, une valeur de [U] proche de 1 indique que le découpage des deux cartes se ressemble.

Tableau 1.10. : Tableau du coefficient d'incertitude entre les différents découpages du bassin de la Loire.

Niveaux (Catégories)	14	6	6	12	8	5
	Géologie	Dupias et Rey	Wasson	Bethemont	Tabacchi	Andriamahefa
Géologie	1	0.64	0.44	0.34	0.36	0.37
Dupias et Rey		1	0.73	0.58	0.58	0.51
Wasson			1	0.59	0.63	0.54
Bethemont				1	0.49	0.46
Tabacchi					1	0.47
Andriamahefa						1

En général, les ressemblances parmi les ensembles de cartes sont fortes comme indiqué par les hauts coefficients d'indétermination (Tableau 1.9). Les coefficients [U] varient de 0.34 à 0.73. La plus forte valeur de [U] correspond à la paire hydro-écorégion / Dupias et Rey suivie de Dupias et Rey / Géologie. Il faut rappeler que [U] tient compte dans son calcul, des petits polygones qui constituent les différences de frontières entre la paire de cartes. Même si cette frontière indique les mêmes correspondances de catégories.

Par rapport à la carte primaire, les valeurs du coefficient de [U] varient de 0.34 à 0.64 entre la carte de la géologie et les autres cartes des écorégions ou morphorégions, variant de 0.4 à 0.7. La plus forte valeur de ressemblance avec la carte géologie revient aux écorégions établies par Dupias et Rey.

- **Place des écorégions par rapport aux autres découpages des gestionnaires.**

Parallèlement à ces régions écologiques, les gestionnaires ont adopté d'autres découpages établis à partir de données et contraintes d'ordre administratif.

La question qui nous semble intéressante maintenant est : quelles sont les pertinences respectives de ces deux découpages dans la perspective d'une gestion écologique? Quelle amélioration devrait prendre en compte les écorégions pour s'adapter aux régions de gestion ?

- **Un cadre spatial pour étudier l'anthropisation des cours d'eau des grands bassins.**

Nous n'utiliserons plus par la suite que les hydro-écorégions de niveau 1 de Wasson et al. (1993) avec lesquelles la typologie de l'anthropisation de l'écosystème d'eau courante sera analysée. Ceci en raison d'une ligne directrice de la thèse, fixée au début, i.e. approfondir et valider ce découpage d'expert, ainsi que les disponibilités des données.

- **Lien entre les caractéristiques linéaires des cours d'eau et les écorégions.**

Une dernière question se pose aussi : est-ce-que les cours d'eau à l'intérieur de chaque hydro-écorégion définie ont des caractéristiques bien définies, un "type régional" spécifique à l'échelle du linéaire ? C'est l'objet du chapitre suivant sur la régionalisation linéaire.

Chapitre 2.

Typologie régionale de la morphologie et de la morphodynamique des cours d'eau.

II.1. INTRODUCTION.

La problématique de l'approche typologique régionale par le biais des types de vallée et des faciès d'écoulement s'articule autour de trois questions fondamentales :

- peut-on régionaliser la structure morphologique des cours d'eau par l'intermédiaire de ces variables morphologiques ?
- existe-t-il une influence régionale sur l'évolution longitudinale des caractéristiques physiques des cours d'eau ?
- quelles sont les influences des aménagements sur les différences inter/intra régionales ?

Notre travail intègre une approche visant à :

- ébaucher une première typologie géomorphologique et morphodynamique des cours d'eau du bassin, depuis les plus petits éléments du réseau hydrographique (ordre 1 de Strahler) jusqu'aux cours d'eau majeurs (ordre 5),
- quantifier ces caractéristiques pour chaque couple hydro-écorégion/rang défini dans le Chapitre 1,
- régionaliser (par des méthodes statistiques) la structure morphologique des cours d'eau par le biais soit des types de vallée, soit des faciès d'écoulement, exprimés en variables interprétables en termes d'habitats aquatiques. Ce travail n'aborde pas les problématiques de faciès d'écoulement en terme de morphodynamique des cours d'eau. Notre choix méthodologique aux fins de recueil et de traitement des données se base sur un objectif "habitats piscicoles".
- perfectionner la méthodologie de classification afin de valider le découpage réalisé par Wasson et al. (1993).

Cette démarche implique plusieurs étapes :

- recueillir et assembler l'information sur l'état des rivières. Les méthodes de collecte des données doivent être précises, cohérentes, facilement manipulables et accessibles à l'ensemble des utilisateurs, des gestionnaires et des scientifiques,
- développer et mettre en application une typologie,
- nous avons évité les tronçons artificialisés au moment des observations, cependant les chenalisations (recalibrages, curages) ont influencé la morphologie actuelle dans certains cas (dans les cours d'eau de faible énergie) sans que ce soit visible pour l'observateur. Pour cela, nous n'avons considéré que les tronçons "naturels".

Nous nous limitons à deux entités de la hiérarchie emboîtée des cours d'eau (selon Frissel et al., 1986) : les tronçons et les faciès d'écoulement qui sont les deux entités représentatives et intermédiaires entre l'habitat aquatique (étude à grande échelle) et les données du bassin versant ou des écorégions (étude à petite échelle).

II.2. BASES METHODOLOGIQUES.

II.2.1. QUELQUES APPROCHES SIMILAIRES.

Lotspeich (1980) et Hynes (1975) proposent une classification des cours d'eau axée en premier lieu sur celle des bassins versants. Les paramètres géologiques et climatiques sont employés au même niveau dans la typologie.

Brussock et al. (1985) proposent une approche qui part d'un niveau relativement étroit : le type sédimentologique du cours d'eau (trois types sont définis : le type à blocs, le type à pierres et graviers, le type sableux). Ils définissent ensuite 3 paramètres physiques contrôlant les types : le relief, la lithologie, le régime hydrologique. Ils affirment que la forme du cours d'eau est un paramètre fondamental de la structuration physique et biologique des systèmes d'eau courante. Ils découpent ainsi les Etats-Unis en 6 grandes régions sur la base de la forme la plus probable des cours d'eau ou plus précisément de la succession la plus probable de formes fluviales au sein de chaque région (NB : les auteurs incluent dans la forme fluviale globale, les types et séquences de faciès).

Higler et Mol (1984) ont une approche beaucoup plus quantitative de la typologie des systèmes d'eau courante et semblent pouvoir intégrer la majeure partie des types dans un diagramme logarithmique qu'ils nomment diagramme C_t/R où C_t est ce qu'ils appellent un "facteur de terrain" qui intègre la pente de la ligne d'eau et la rugosité et R est le rayon hydraulique.

$$C_t = 1/n \cdot J^{1/2}$$

$$v = C_t \cdot R^{2/3}$$

$$\log R = 3/2 \log v - 3/2 \log C_t$$

Où v est la vitesse moyenne (en m/s), n le coefficient de rugosité (varie de 0.035 à 0.05 dans les cours d'eau naturels), J la pente de la ligne d'énergie.

Ils soulignent la possibilité de caler les structures de distribution des organismes aquatiques (invertébrés) sur le même diagramme.

II.2.1.1. UNE APPROCHE PAR TYPE DE VALLEE : CUPP (1989).

Plus récemment, Cupp (1989) a mis au point une typologie des cours d'eau dans l'état de Washington, basée sur les caractéristiques morphologiques des vallées fluviales.

Les critères de classifications sont les suivants :

- la pente de la vallée.
- la pente des versants.
- la largeur de l'espace de liberté du cours d'eau (zone de débatement potentiel et de migration des sinuosités ou des tresses).
- l'ordre (au sens de Strahler (1957)),
- le style du cours d'eau (tracé en plan)
- les caractéristiques géomorphologiques du fond de vallée (alluvions, roche mère...)
- la forme dominante de type de vallée (Cupp, 1989) exprimée essentiellement en pente des versants et du degré de contrainte imposé par la vallée (incision par rapport au substratum encaissant).

Nous notons ici que le paramètre majeur utilisé pour une première identification des tronçons est le profil en travers de la vallée. 18 types de "tronçons" sont ainsi identifiés dans l'état de Washington.

II.2.1.2. LES MORPHOREGIONS DE BETHEMONT (1993).

Bethemont propose un découpage du bassin de la Loire dans le cadre du rapport d'étape de l'étude citée en introduction (Wasson et al., 1993). Il est basé sur la géologie dominante de la zone et sur la forme dominante de type de vallée (Cupp, 1989), exprimée essentiellement en terme d'incision par rapport au substratum encaissant (fig. 2.1). Il distingue ainsi, à partir de la carte géologique et de la carte IGN au 1:100 000ème 16 "morphorégions" dont les contours seront à affiner par la suite. Ces 16 morphorégions se regroupent en 6 types majeurs déterminés essentiellement par la géologie (Bethemont in Wasson et al. 1993).

La répartition en fonction des morphorégions de forme plutôt surfacique est la suivante (figure 2.1) :

SEDIMENTAIRE.

Cette morphorégion est caractérisée par la domination d'un relief aplani, elle regroupe en fait l'essentiel des affleurements calcaires du bassin de la Loire. Elle couvre environ 43 000 km², soit plus du tiers du bassin. Les vallées principales sont cependant légèrement encaissées dans le substratum et souvent dominées par des côteaux. Les affluents présentent un encaissement encore plus modéré.

FORMATIONS ELUVIALES.

C'est une sous-morphorégion de la précédente. Elles sont caractérisées par des dépôts mixtes (argiles, blocs non roulés) antérieurs au creusement des vallées et provenant du Massif Central. Il s'agit de deux enclaves au sein de la couverture calcaire correspondant grossièrement à l'emplacement actuel des zones d'étang de la Brenne et de la Sologne. Elles couvrent environ 3000 km².

VOLCANIQUE.

Localisée dans le Massif central, cette morphorégion couvre environ 4000 km² soit 1/30ème du bassin. Son extension se limite aux plateaux du Velay et aux monts d'Auvergne.

- Un premier sous-type correspond aux plateaux basaltiques à écoulement superficiel relativement développé.

- Un second sous type caractérisé par son aréisme (faiblesse du réseau superficiel) correspond aux champs de basalte diaclasés et aux cinérites poreuses.

TYPE CRISTALLIN.

Il est caractérisé par la domination des roches granito-gneissiques du socle et peut être subdivisé en 7 sous-types :

Gorge Incisée.

Très faiblement représenté (500 km²), ce type correspond grossièrement à la haute vallée de l'Allier, il est identifié par la rareté des prairies tourbeuses, des arènes d'altération du granite et la dominance des gorges en V.

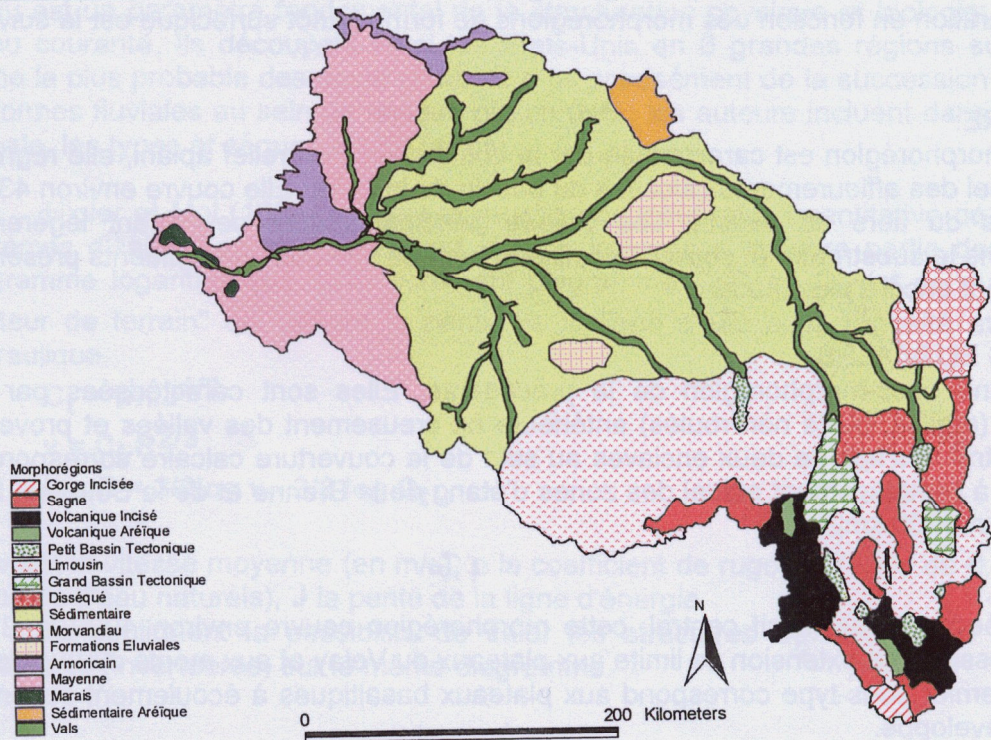


Figure 2.1 : Morphorégions de la Loire (Bethemont, 1993).

Morvandiau.

Le massif du Morvan est caractérisé par une dissection intense du relief associée à un empatement des fonds de vallées par les matériaux de solifluxion. De surface équivalente à 3000 km², cette morphorégion permet de distinguer le massif du Morvan dont les fonds de vallée empâtés sont indicateurs d'un héritage périglaciaire.

Disséqué.

Il englobe les Monts du Lyonnais et de la Madeleine et se distingue des autres types cristallins par un encaissement assez marqué des vallées, une dissection forte sans apparition nette de gorges. Elle correspond approximativement aux contreforts Nord-Est du massif central couvrant 3000 km² environ.

Limousin.

Deuxième morphorégion du bassin en surface occupée (23 000 km², soit 1/6ème du bassin), elle couvre une grande partie du Massif Central. Il est marqué par la prépondérance de vallées relativement encaissées (gorges) alternant avec des tronçons à fond plat (alvéoles).

Sagnes.

La morphorégion "Sagnes" est localisée sur les hautes terres du Massif central et occupe environ 4000 km². Très particulière du point de vue de son fonctionnement hydrologique et morphologique. L'isohypse 750 m semble un des facteurs déterminant l'apparition de ces prairies tourbeuses présentant parfois des revêtements d'arènes remaniés par une dynamique périglaciaire. Les fonds de vallées sont engorgés, ce qui permet une certaine régulation des débits par les tourbières.

Mayenne-Vendée.

Troisième morphorégion majeure en surface occupée (15 000 km², 1/8ème du bassin), elle caractérise l'extrémité ouest cristalline du bassin ligérien. Situées au sud et au nord de la Loire, les vallées inscrites dans cette morphorégion sont globalement moins encaissées que dans le type Plateau Limousin par exemple, en raison de la faiblesse des altitudes moyennes.

Armoricain.

Enclavé dans la région précédente, ce type occupe environ 3500 km². Centré essentiellement sur la vallée de l'Oudon, ce type est caractérisé par des vallées entaillées dans des schistes et des roches dures (plateaux sommitaux).

BASSINS TECTONIQUES.

Les bassins tectoniques occupent 3000 km². Ce type est en fait composé d'unités distinctes ayant en commun une origine tectonique (effondrement) et un remplissage sédimentaire essentiellement oligocène (formations détritiques). Ce type peut être différencié en deux sous-type sur la base de leur développement aréal :

- les petits bassins tectoniques : ils sont parcourus par des cours d'eau provenant des hautes terres avoisinantes et sont bien drainés,
- les grands bassins tectoniques : ils sont caractérisés par la dualité des drainages l'un autochtone, l'autre allochtone. Ce sont des zones de sédimentation alluviale majeure liées à la rupture de pente marquée avec les vallées supérieures.

LES VALLEES PRINCIPALES.

Il s'agit des vallées de la Loire et de ses affluents majeurs. Bien que l'on puisse difficilement parler de morphorégion pour des entités aussi linéairement étendues, Bethemont les a considérées comme des zones particulières (particularités morphologiques telles que terrasses emboîtées, présence éventuelle d'îles hautes et basses), présentant une relative

homogénéité entre elles malgré des différences reposant essentiellement sur la nature du plancher alluvial.

L'ESTUAIRE.

La particularité marine de ce secteur en fait une unité exceptionnelle que nous n'aborderons pas dans le cadre de l'approche typologique.

II.2.2. NOTION D'ECOSYSTEME AQUATIQUE.

II.2.2.1. LES COMPARTIMENTS DE L'ESPACE AQUATIQUE.

La typologie des écosystèmes aquatiques repose sur deux axes complémentaires qui expriment les variations naturelles des cours d'eau :

- le premier axe considère que l'ensemble d'un réseau hydrographique peut s'estimer comme un continuum (le River Continuum Concept, de Vannote et al. 1980, Minshall et al., 1993 ; la zonation longitudinale de Huet, 1949 ; Verneaux, 1977), mais les limites longitudinales sont quelquefois difficiles à préciser,
- le deuxième axe propose une classification par types fonctionnels de l'écosystème d'eau courante à une échelle plus large : le bassin versant ou l'écorégion (Hynes, 1975 ; Bailey, 1976 ; Omernik, 1987).

Ce sont deux approches complémentaires et nécessaires.

II.2.2.2. NOTIONS D'ECHELLE SPATIALE ET D'HABITAT AQUATIQUE.

L'habitat aquatique est la structure physique support des êtres vivants dans les cours d'eau. La perception du milieu physique intègre une dimension spatiale (suivant la taille) et une dimension temporelle (suivant la durée de vie). L'étude de l'habitat du poisson ou de sa distribution peut être agrégée ou désagrégée suivant l'échelle qui intéresse les hydroécologistes.

- **Structure hiérarchique pour une classification de l'habitat de Frissel et al., 1986.**

Frissel et al. (1986) proposent un fonctionnement de l'écosystème aquatique à une échelle plus fine par organisation hiérarchique de différents systèmes en partant du type de vallée, du segment, du tronçon de la succession allant du radier/mouille jusqu'au microhabitat.

- **Hiérarchie de l'habitat de Kershner et al., 1992.**

Kershner et al. (1992) proposent quant à eux une échelle intermédiaire de segment composée de trois unités hiérarchisées pour une première approche de l'étude de l'habitat aquatique :

- le tronçon déterminé par 5 variables : la sinuosité, la pente du cours d'eau, le rapport largeur/profondeur, le type de vallée, et la granulométrie dominante.
- le mésohabitat défini par les faciès d'écoulement (la vitesse, le profil en travers, la localisation, la profondeur)
- le microhabitat déterminé par la vitesse, la profondeur, le substrat du cours d'eau.

- Sectorisation de Malavoi, (1989) et Sectorisation morpho-écologique de Wasson et al., (1993).

Ces deux sectorisations dérivent de celle de Frissel et al., (1986). Elles distinguent trois niveaux d'approche emboîtés :

- une échelle régionale définie par les caractéristiques morphologiques, hydrologiques, et climatiques,
- une échelle locale composée de la vallée, des formes fluviales, des séquences de structures morphodynamiques,
- et une échelle ponctuelle composée de la combinaison substrat-écoulement.

Les différentes échelles d'observations possibles peuvent être hiérarchisées (Figure 1.14) comme suit :

Le microhabitat.

Il s'agit du dernier niveau d'observation du cours d'eau. Il est défini simultanément par trois variables fondamentales pour la communauté piscicole (ou d'autres communautés biologiques) : la hauteur d'eau, la vitesse moyenne du courant, la granulométrie du substrat.

Le faciès.

Un faciès est une unité morphodynamique homogène pour les paramètres de l'habitat : hauteur, vitesse, substrat.

La séquence de faciès.

Les différents faciès se disposent plus généralement par une succession répétitive (plat- radier-mouille). Le faciès ou la séquence de faciès représente l'échelle du territoire quotidien d'un organisme aquatique (Wasson et al., 1993). Ils feront l'objet du développement de la deuxième sous partie de ce Chapitre.

Le segment.

Le segment est caractérisé par une relative homogénéité des faciès ou des séquences de faciès, par la morphologie en plan (sinuosité du lit) et la dynamique du lit.

Le tronçon.

Le tronçon est une combinaison répétitive de segments. Ses limites sont des discontinuités d'ordre géomorphologique, hydrologique, géologique définissant des types de vallée (pente de la vallée, morphologie du lit, rang) (Cupp, 1989). Ils feront l'objet du développement de la première sous-partie de ce Chapitre.

Après avoir évoqué succinctement les différentes échelles de cours d'eau, nous allons détailler plus finement la notion de tronçon, de faciès et de séquence de faciès.

II.2.2.3. NOTION DE TRONÇON HOMOGENE.

L'analyse des données morphologiques est réalisée sur des tronçons homogènes de cours d'eau dont la détermination est basée sur des modifications majeures de certains paramètres :

- le profil en travers de la vallée.

Le premier critère de distinction des tronçons est celui utilisé par Cupp (1989) ainsi que par Bethemont pour la détermination des morphorégions à savoir : le profil en travers de la vallée et particulièrement la pente des versants dominants (Cf. § suivant).

Nous avons considéré arbitrairement que l'existence d'un tronçon homogène pouvait s'établir dès que le linéaire du versant homogène dépassait 2 kilomètres.

NB : Il arrive parfois que des discontinuités soient observées au sein de tronçons homogènes, par exemple au niveau de la largeur du lit majeur ou de la sinuosité du lit mineur. On décrit alors des segments, dont la particularité est d'être récurrents et beaucoup moins longs que les tronçons. Un tronçon en gorge se caractérise ainsi par une alternance de segments à fonds de vallée étroits et d'autres à fonds larges.

- le changement d'ordre.

Un deuxième critère est utilisé pour discriminer les tronçons : le niveau d'ordre dans la hiérarchie de Strahler (1957). Le principe de l'ordination de Strahler est simple : Lorsque deux cours d'eau d'ordre 1, c'est à dire sans ramification de réseau en amont, confluent, ils forment un cours d'eau d'ordre 2. Lorsque deux cours d'eau d'ordre 2 confluent, ils forment un cours d'eau d'ordre 3 et ainsi de suite.

Les rangs de Strahler ont été recalculés sur les cartes 1:100.000ème. Si l'ordination pour les rangs les plus faibles (1 à 4) est relativement aisée sur une carte au 1:100 000ème, il est généralement difficile d'apprécier les ordres supérieurs sans aller rechercher l'ordination sur l'ensemble du linéaire du cours d'eau concerné. Nous avons donc déterminé l'ordre quand celui-ci ne dépassait pas 5 sur l'échelle de Strahler et nous avons créé une catégorie "ordre supérieur à 5" pour les autres.

Nous avons placé des limites de tronçon lorsqu'un changement d'ordre dans les rangs supérieurs à 3 se caractérisait par une modification notable et irréversible des paramètres morphologiques (sinuosité, largeur du lit mouillé ou du lit majeur).

NB : Nous avons attribué le rang 1 aux cours d'eau pérennes (trait plein bleu sur les cartes IGN) et non pérennes (trait pointillé bleu) dès lors que leur longueur développée dépassait 500 m.

II.2.2.4. TYPOLOGIE DES FACIES D'ÉCOULEMENTS.

Différents auteurs ont proposé des terminologies de types de faciès (Bisson et al., 1981; Malavoi, 1989; Hawkins et al., 1993). Nous prenons dans cette étude la définition proposée par Malavoi (1989). Le faciès d'écoulement est défini par Malavoi (1989) comme : une portion de cours d'eau présentant une homogénéité de physionomie générale sur le plan des hauteurs d'eau, des vitesses et de la granulométrie. Sa caractérisation se fait pendant les basses eaux. En effet, les eaux moyennes ont tendance à lisser les caractéristiques hydrodynamiques (ligne d'eau notamment).

Il distingue 10 types majeurs de faciès : mouilles, radiers, plats, rapides, cascades, escaliers, chute, chenal lotique, lones ou boires, faciès particuliers. L'identification sur le terrain se détermine suivant des critères simples tels que les profils en travers et en long, la localisation et le tracé en plan, la granulométrie, la vitesse, et la hauteur d'eau.

Les types de faciès d'écoulement peuvent souvent être divisés en deux groupes :

- faciès à forte vitesse de courant ou faciès de type lotique. Ils sont constitués principalement par des faciès radier et rapide (avec différents sous-groupes), ainsi le plat, dont la présence est souvent liée à la rectitude du tracé en plan.

- faciès à faible vitesse de courant ou faciès de type lentique. Ils sont représentés fréquemment par les mouilles et ses variantes, ainsi que par les plats lentiques.

II.3. METHODOLOGIE DU RECUEIL DE DONNEES.

II.3.1. LES DONNEES "TYPE DE VALLEE".

II.3.1.1. LES PARAMETRES DE CLASSIFICATION.

Nous avons choisi de travailler dans un premier temps sur une typologie des cours d'eau à une échelle macroscopique en nous basant sur des variables morphologiques majeures dont le recueil ne nécessitait pas d'observations de terrain.

Nous avons délibérément limité le nombre de variables morphologiques discriminantes de manière à éviter l'écueil d'une trop grande dispersion de données.

Les variables retenues ne sont pas des variables explicatives de la morphologie mais essentiellement des variables descriptives. Elles pourront cependant être utilisées par la suite comme variables explicatives ou variables de contrôle de la dynamique fluviale et écologique.

Elles sont au nombre de 5 et le détail de leur recueil sera présenté au paragraphe suivant :

- la pente de la vallée,
- la pente des versants,
- la sinuosité du lit,
- la largeur du lit mouillé du cours d'eau,
- la largeur du fond de vallée qui rend compte dans une certaine mesure l'espace de liberté du cours d'eau.

II.3.1.2. LES VARIABLES MORPHOLOGIQUES.

- **L'ordre de Strahler.**

L'ordre de Strahler est calculé pour chaque station sur une carte IGN à l'échelle 1:100.000ème. Le rang fluvial peut permettre de retrouver indirectement la taille des cours d'eau d'une région donnée à partir d'une carte. Cela suppose tout de même d'avoir établi physiquement par ailleurs cette relation sur un échantillon de cours d'eau.

Pour rendre la comparaison plus significative des variables morphologiques qui varient fortement de l'amont vers l'aval (Schumm, 1956 ; Leopold et Wolman, 1957), il nous semble impératif de comparer les cours de même taille, donc notre cas de même rang, en fonction des régions.

Figure 2.2 : Méthode de calcul des ordres de cours d'eau (Annexe).

- **La distance de la station par rapport à la source.**

Mesurée au curvimètre en suivant le tracé de la rivière, de la source jusqu'à l'amont de la station. C'est un autre paramètre qui peut qualifier une taille de rivière. Il nous est difficile de prendre cette information sur l'ensemble des échantillons. Il a été néanmoins mesuré sur les stations de mesures des faciès d'écoulements.

- la pente de la vallée.

La pente de la vallée est mesurée par la différence de cotes en amont et en aval de la localisation de la station, entre deux premières courbes de niveau séquentes ou suivant une distance minimale de 1 km dans des zones de relief très accentuées. La mesure a été effectuée au curvimètre en suivant l'axe du thalweg de la portion définie.

Nous essaierons de garder ce paramètre en variable quantitative sur certaines analyses. Par contre si nécessaire, nous la transformerons en variable qualitative suivant un critère de classification en intervalles par même nombre d'enregistrements.

Nous avons ainsi retenu 7 classes :

- p1 = pente inférieure à 1°/°°
- p2 = pente comprise entre 1 et 2 °/°°
- p3 = pente comprise entre 2 et 3 °/°°
- p4 = pente comprise entre 3 et 6 °/°°
- p6 = pente comprise entre 6 et 10 °/°°
- p5 = pente comprise entre 10 et 20 °/°°
- p7 = pente supérieure à 20°/°°

- la pente des versants.

Elle est déterminée visuellement sur carte 1/25.000ème au moyen de deux "gabarits" valables respectivement pour les cartes dont les équidistances sont de 5m et de 10m (essentiellement dans les secteurs montagneux). Elle est décrite sur 500m de large, de part et d'autre de la vallée (Andriamahefa et Malavoi, 1993).

Nous avons retenu 5 classes de pente :

- v1 = pentes inférieures ou égales à 10%
- v2 = pentes comprises entre 10 et 30%
- v3 = pentes comprises entre 30 et 60%
- v4 = pentes comprises entre 60 et 100%
- v5 = pentes supérieures à 100%

Figure 2.3 : Les gabarits de calcul des pentes des versants (Annexe).

- la sinuosité.

La détermination de la sinuosité (SI) des cours d'eau se fait par "gabarits" (Andriamahefa et Malavoi, 1993) construits à partir de la classification adoptée par la plupart des géomorphologues (Morisawa, 1985). Elle se calcule par le rapport entre la longueur développée de cours d'eau dans sa vallée et la longueur de la vallée elle-même à l'intérieur de la portion définie ci-dessus pour le calcul de la pente moyenne.

Les classes de sinuosité retenues pour le bassin de la Loire se divisent en quatre catégories :

- s1 = rectilignes quand $SI < 1.05$
- s2 = sinueux quand $SI 1.05 < < 1.25$
- s3 = très sinueux quand $SI 1.25 < < 1.5$
- s4 = méandriformes quand $SI > 1.5$

De même, de nombreuses études semblent indiquer, pour les cours d'eau très sinueux à méandriforme, que la longueur d'onde moyenne des méandres est de l'ordre de 12 à 18 fois la largeur du lit mouillé. L'amplitude moyenne étant de l'ordre de 10 à 15 fois la largeur. Ces éléments nous ont aidé à construire des "gabarits", adaptés à l'échelle des cartes (1/25

000ème) ce qui permet de classer rapidement les tronçons de cours d'eau observés dans l'une des 4 catégories (fig. 2.4).

NB : Nous avons vu qu'au sein de tronçons homogènes sur un certain nombre de paramètres majeurs, notamment le profil en travers de la vallée, pouvaient être identifiés des segments se différenciant sur l'une des variables. La sinuosité peut ainsi varier sur un même tronçon pour un certain nombre de raisons. Nous avons donc utilisé un codage en pourcentage lorsque ce cas se présentait. Nous ne retenons que la sinuosité dominante si celle-ci représente plus de 80% du linéaire du tronçon observé. Nous avons agrégé deux catégories si celles-ci étaient sensiblement égales à 80 et 20% du linéaire, la première étant la dominante. Nous avons enfin accolé ces deux catégories sans distinction lorsqu'elles étaient également représentées sur le tronçon.

Figure 2.4 : Les gabarits de calcul de la sinuosité (Annexe).

- la largeur du lit mouillé.

Nous avons opté pour un classement des largeurs observées en 7 catégories :

- w1 = largeur inférieure à 3 m
- w2 = largeur comprise entre 3 et 6 m
- w3 = largeur comprise entre 6 et 10 m
- w4 = largeur comprise entre 10 et 20 m
- w5 = largeur comprise entre 20 et 50 m
- w6 = largeur comprise entre 50 et 100 m
- w7 = largeur supérieure à 100 m

Le problème de la détermination de la largeur du lit mouillé sur carte au 1/25 000 est lié à deux facteurs :

- la largeur est déterminée par l'IGN à partir de photographies aériennes qui sont généralement réalisées en été pour des raisons de qualité de prise de vue. Le débit est alors fréquemment faible (étiage) sur les cours d'eau de ce bassin, alimentés principalement par les pluies océaniques d'automne et de printemps. La largeur reportée sur les cartes correspond donc plutôt à une largeur du lit mouillé en période de basses eaux. Cependant toutes les photos ne sont pas prises à la même date sur tout le bassin et les débits observés, donc les largeurs mouillées, ne correspondent pas partout au même quantile hydrologique.

- deuxième écueil important, il est difficile de distinguer, à l'œil, la largeur du lit pour des valeurs inférieures à 1/4 mm (soit 6 m au 1:25 000ème). Les deux premières catégories de largeur (0-3 m et 3-6 m) sont donc parfois discriminées plus ou moins intuitivement, en fonction de la distance aux sources par exemple.

- la largeur du fond de vallée.

La largeur du fond de vallée est exprimée en largeur de lit mouillé. Nous avons vu en effet que ce n'est pas cette largeur elle-même qui importe, du moins pour l'aspect purement morphologique, mais sa largeur relative par rapport au lit actif.

Nous avons donc défini 5 classes de largeur :

- l1 = largeur comprise entre 1 et 3 fois celle du lit actif
- l2 = largeur comprise entre 3 et 6 fois celle du lit actif
- l3 = largeur comprise entre 6 et 12 fois celle du lit actif
- l4 = largeur comprise entre 12 et 24 fois celle du lit actif
- l5 = largeur supérieure à 24 fois celle du lit actif

Nous avons estimé, pour des raisons de facilité de lecture, que la largeur de l'espace de liberté potentiel du cours d'eau pouvait être approchée en prenant la largeur du fond de la vallée entre les courbes de niveau de valeur 10 m situées de part et d'autre du lit actif. Les deux premières courbes sont utilisées sur les cartes au 1:25 000ème avec équidistance égale à 5 m. La première courbe est utilisée sur les cartes présentant une équidistance de 10 m.

II.3.1.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET REPARTITION SPATIALE DES TRONÇONS ETUDIÉS.

Le document utilisé pour le recueil des paramètres morphologiques est la carte au 1:25 000ème de l'IGN couvrant l'ensemble du bassin de la Loire. Nous avons pointé sur le tableau d'assemblage de l'IGN une centaine de ces cartes dont la surface moyenne est d'environ 260 km² en essayant de les répartir en fonction de la dominance des hydro-écorégions sur la surface du bassin.

Nous avons décrit les 5 variables majeures sur 910 tronçons homogènes de cours d'eau, répartis en fonction de la représentation surfacique des hydro-écorégions sur le bassin de la Loire. Sur chaque carte au 1:25 000ème sélectionnée, nous avons essayé de décrire dans la mesure du possible 5 tronçons de cours d'eau de rang différents et d'une longueur moyenne de l'ordre de 5 km.

Notre échantillonnage couvre donc approximativement 1/4 de la surface totale du bassin. Sur chaque carte, nous avons décrit en moyenne 5 "individus" cours d'eau, représentés par des tronçons homogènes dont l'extension linéaire minimale est de 2 km et la longueur moyenne de 5 km. Nous avons donc analysé environ 7500 km linéaires, soit 1/6 du linéaire total du bassin. Nous avons choisi les tronçons sur des cours d'eau de rang 1 à 5, en fonction de leur présence sur les cartes sélectionnées.

L'objectif est de pouvoir obtenir (si possible) un minimum de 10 individus pour chaque couple "hydro-écorégion et rang". Ce qui nous donne au total 910 tronçons.

Parmi les 910 "individus tronçons" choisis, nous avons pu identifier une centaine sur carte comme rectifiés ou chenalisés sur une partie plus ou moins importante de leur linéaire. Un cours d'eau méandrique sur 2 km devenant rectiligne sur 1 km (par exemple à proximité d'un village) puis redevenant méandrique est décrit comme tronçon homogène globalement naturel mais ayant subi une artificialisation. L'analyse typologique nécessitant des cours d'eau "naturels", nous avons donc exclu dans un premier temps ces éléments manifestement artificialisés. Ils seront par contre utilisés pour la deuxième phase de cette étude concernant le degré d'artificialisation. Nous obtenons ainsi une population "non manifestement aménagée" (à partir de l'examen des cartes 1:25.000ème) de 795 tronçons homogènes dont l'artificialisation n'était pas flagrante.

Le Tableau 2.1 suivant présente la répartition des cours d'eau sur chaque couple hydro-écorégion et rang.

Tableau 2.1 : Nombre d'individus par hydro-écorégion et par rang.

<i>Hydro-écorégions</i>	<i>RANG au 1:100.000ème</i>					
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	
MA	29	38	31	29	6	133
MCBLA	43	55	32	18	4	152
MCDS	30	18	31	9	7	95
MCPL	40	64	53	27	12	196
TC	38	63	53	41	24	219
Loire	180	238	200	124	53	795

II.3.2. LES DONNEES "FACIES D'ECOULEMENT".

II.3.2.1. PARAMETRES DE CLASSIFICATION ET LES METHODES DE MESURE.

- Les types de faciès d'écoulement.

La détermination des faciès se fait visuellement. Nous avons retenu sept grands types de faciès (pour leur description Cf. Annexe 2) qui se rencontrent facilement sur le terrain :

- le faciès de type RAPIDE (**RAP**) regroupant les faciès ESCALIER, CASCADE, RAPIDE et CHUTE,
- le faciès de type MOUILLE (**MOU**) réunissant le type MOUILLE, LONES, FOSSE D'AFFOUILLEMENT,
- le faciès de type RADIER (**RAD**),
- le faciès PLAT (**PLA**),
- le faciès PLAT LENTIQUE (**PLL**),
- le faciès CHENAL LOTIQUE (**CLO**),
- le faciès CHENAL LENTIQUE (**CLE**).

- La largeur moyenne et la longueur des faciès. [Exprimées en m]

Elles sont mesurées sur chaque type de faciès.

La longueur totale de la station est fixée à environ 35 fois la largeur du lit. Cette longueur est considérée comme suffisante pour caractériser un tronçon sur les variables d'habitat (hauteur, vitesse, substrat) (Simonson et al. 1994). Rosgen (1985) propose de décrire un tronçon homogène d'un cours d'eau d'une longueur d'au moins deux méandres complets ou 30 fois la largeur du lit à pleins bords. La longueur du faciès est rapportée à la longueur totale du tronçon.

Remarque : Nous avons recueilli d'autres variables qui ne seront pas utilisées lors de cette étude, mais qui seront intégrées dans les prochains chapitres, pour le calcul des énergies spécifiques. :

- la granulométrie,
- la hauteur des berges,
- la pente des berges.

II.3.2.2. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE.

Nous avons choisi une stratégie d'échantillonnage sur la base des 3 grandes hydro-écorégions dominantes représentant la plus grande partie de la surface du bassin versant de la Loire :

- Massif Central Plateau Limousin,
- Tables Calcaires,
- Massif Armoricaïn.

L'unité de base de l'échantillonnage est le tronçon composé de plusieurs segments de cours d'eau définis dans le §II.2.2.3. Nous avons mesuré les caractéristiques de ces tronçons suivant la dimension longitudinale du cours d'eau, et selon deux critères :

- deux stations mesurées, dans la mesure du possible, à intervalles réguliers de 2,5 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 40 ; 60 km ; de la source,
- une station à chaque changement de type de vallée (paramètres morphologiques physiques : rang de Strahler, sinuosité, pente des versants).

Les cours d'eau peuvent n'appartenir qu'à une seule hydro-écorégion ou traverser plusieurs hydro-écorégions. Notre échantillonnage couvre la plupart des grands cours d'eau des 4 hydro-écorégions retenues, il correspond à 22 rivières. Nous avons mesuré 215 tronçons, soit environ 28.5 km linéaire. Ces tronçons ont été choisis sur des cours d'eau essentiellement de rang 2 à 5 sur les cartes IGN 1:100.000ème.

II.3.2.3. LES COURS D'EAU SELECTIONNES ET LEUR REPARTITION SPATIALE.

Nous avons observé 22 cours d'eau, 215 tronçons, 28.5 km linéaire de tronçons et environ 1200 faciès sur l'ensemble des trois hydro-écorégions du bassin de la Loire.

Tableau 2.2 : Distribution des nombres de segments étudiés selon les hydro-écorégions et les rangs de Strahler 1:100.000ème.

Hydro-écorégions	Nombre de tronçons suivant le rang de STRAHLER					Total
	1	2	3	4	5	
Massif Armoricaïn	4	8	15	15	3	45
Massif Central Plateau Limousin	4	15	19	24	12	74
Tables Calcaires	2	5	18	31	16	72
Total	10	28	52	70	31	191

Tableau 2.3 : Nom des rivières et nombre de tronçons étudiés et leur distribution selon les hydro-écorégions et rang.

Rivière	HER	Nbre tot	R 100				
			1	2	3	4	5
rivière	Niveau 1						
Arconce	Tables Calcaires	8			1	3	4
Arnon	Massif Central Plateau Limousin	6		2	1	3	
	Tables Calcaires	6				1	5
Auron	Massif Central Plateau Limousin	2		2			
	Tables Calcaires	8			2	6	
Clain	Massif Central Plateau Limousin	1			1		
	Tables Calcaires	9			2	4	3
Dolore	Massif Central Plateau Limousin	7	1	1	5		
Gartempe	Massif Central Plateau Limousin	14	1	4	3	3	3
Huisne	Tables Calcaires	9		2	3	3	1
Indre	Massif Central Plateau Limousin	8		2	1	5	
	Tables Calcaires	3				1	2
Loir	Tables Calcaires	6		1	3	2	
Mayenne	Massif Armoricaïn	10	1	2	2	2	3
Orne	Massif Armoricaïn	2	2				
	Tables Calcaires	4			1	3	
Oudon	Massif Armoricaïn	12		2	5	5	
Ozanne	Tables Calcaires	7	2	2	3		
Sarthe	Massif Armoricaïn	3	1		2		
	Tables Calcaires	8			1	6	1
Sevre nantaise	Massif Armoricaïn	12		2	4	6	
Sioule	Massif Central Plateau Limousin	4			1	3	
Sioulet	Massif Central Plateau Limousin	8	1	1	2	4	
Taurion	Massif Central Plateau Limousin	9	1	2	2	3	1
Théols	Tables Calcaires	4			2	2	
Thouet	Massif Armoricaïn	6		2	2	2	
	Massif Central Plateau Limousin	5					5
Vienne	Massif Central Plateau Limousin	10		1	3	3	3

La synthèse des paramètres mesurés est donnée par le Tableau suivant :

Tableau 2.4 : Les paramètres mesurés et leur origine.

<i>Paramètres</i>	<i>Origines</i>	<i>Méthode de mesure</i>
Variables morphologiques physiques (TRONCONS)		
Distance à la source	Carte 1 : 25.000ème	Curvimètre
Rangs	Carte 1 : 25.000ème et 1.100.00ème	Méthode de Strahler
Altitude amont	Carte 1 : 25.000ème	Station
Pente moyenne de la vallée	Carte 1 : 25.000ème	Rapport de dénivelés entre 2 courbes de niveau sécantes
Sinuosité	Carte 1 : 25.000ème	Sur gabarit de sinuosité entre 2 courbes de niveau sécantes
Pente des versants	Carte 1 : 25.000ème	Sur gabarit au niveau de la station
Largeur du fond de la vallée	Carte 1 : 25.000ème et fonction de la largeur du lit	Par rapport à la largeur du lit mouillé et la courbe de niveau de 10m
Largeur du lit mouillé	Observation terrain	Décamètre
Hauteur d'eau moyenne	Observation terrain	Décamètre (données sur quelques stations seulement)
Hauteur des berges	Observation terrain	Visuel
Pente des berges	Observation terrain	Visuel
Facès d'écoulement (SEGMENT)		
Types (7)	Observation terrain	Visuel
Longueur	Observation terrain	Décamètre
Largeur	Observation terrain	Décamètre
Granulométries (Grossières, Dominant1, Dominant2, Accompagnateurs, Fines)	Observation terrain	Gabarit et visuel
Abris	Observation terrain	Visuel sur les types caractérisés
Artificialisation (TRONCON)*		
Entretien du lit (deux rives)	Observation terrain	Visuel
Entretien du ripisylve	Observation terrain	Visuel
Aménagement amont ou aval	Observation terrain	Visuel
Etat de ripisylve	Observation terrain	Visuel (sur certains tronçons)

* variables non utilisées dans cette étude

II.4. METHODES DE TRAITEMENT ET D'ANALYSE DES DONNEES.

II.4.1. LES TYPES DE VALLEE.

Les 5 paramètres majeurs ayant été décrits, **deux options de traitement des données** et d'élaboration d'une typologie sont alors envisageables :

- *analyser l'ensemble des données par des techniques d'analyse statistique descriptive dans l'objectif de caractériser les hydro-écorégions définies.*

Validation du découpage du bassin en hydro-écorégions (Wasson et al., 1993) en quantifiant les caractéristiques des cours d'eau appartenant à une hydro-écorégion. L'objectif est de savoir au moyen de tests appropriés, si les cours d'eau d'une hydro-écorégion donnée ont des caractéristiques physiques et fonctionnelles qui leur sont propres, et de déterminer la variabilité intra et inter hydro-écorégion.

Nous avons choisi aussi de combiner les 2 variables morphologiques largeur fond de vallée et pente des versants, cela conduit à des formes de vallées telles les gorges en V, les vallées plates, les vallées en U. Similaires à celles de Cupp (1989) sur les cours d'eau de l'Etat de Washington et quelques types définis par Rosgen (1997).

Nous avons défini 4 types de formes de vallée :

- Cupp1, les vallées en V : pente de versant forte à très forte V3 et V4 et de largeur fond de vallée faible à très faible L1 et L2,
- Cupp2, les vallées en U : pente de versant très forte V3 et V4, mais de largeur fond de vallée moyenne à très forte, de L3 à L5,
- Cupp3, les vallées plates à fond faible, caractérisées par les faibles pentes des versants V1 et V2 et aussi de faible fond de vallée L1 à L3,
- Cupp4, les vallées plates à fond large, caractérisées par les faibles pentes de versant V1 et V2 et par une forte largeur de fond de vallée L4 et L5.

- *traiter l'ensemble des données au moyen de techniques d'analyses multivariées.*

D'un point de vue conceptuel, cette approche serait satisfaisante car elle autoriserait un classement des cours d'eau sans a priori et permettrait une discrimination des types uniquement sur des bases géométriques et morphologiques. La technique la plus courante pour aboutir à une typologie, est la Classification Ascendante Hiérarchique qui sépare des groupes d'individus sur la base des variables les plus discriminantes, précédée de l'Analyse de Correspondance Multiple ACM en codage flou pour synthétiser la structure des variables.

II.4.2. LES FACIES D'ECOULEMENT.

Nous avons opté pour un traitement des données et d'élaboration d'une typologie à partir d'une analyse de la distribution longitudinale des types et des caractéristiques de faciès d'écoulement. Il s'agit ici de tester une éventuelle influence régionale sur la variabilité longitudinale des faciès d'écoulement.

II.5. LES RESULTATS.

II.5.1. LES TYPES DE VALLEE.

Nous appelons par convenance « type de cours d'eau », un couple hydro-écorégion et rang. Le tableau 2.5 et les figures 2.5 et 2.6 présentent les valeurs de distribution des 5 variables au sein des types de la vallée.

Ce tableau et ces figures permettent de visualiser rapidement :

- les caractéristiques physiques de chaque type,
- l'étendue de la distribution au sein de chaque type (variabilité intra-type),
- les différences entre types (variabilité inter-types),
- les différences entre rang au sein d'une même hydro-écorégion,
- les différences entre hydro-écorégions pour un rang.

II.5.1.1. CARACTERISTIQUES DES VARIABLES MORPHOLOGIQUES PAR HYDRO-ECOREGION ET PAR RANG.

Nous donnons ici les caractéristiques des paramètres étudiés sur l'ensemble du bassin de la Loire, et leur variabilité à l'intérieur d'une région ou selon la dimension longitudinale de la rivière.

- Les pentes de la vallée diminuent de l'amont vers l'aval. Par contre cette évolution diffère d'une région à l'autre. Les cours d'eau du MCBLA ont des pentes de la vallée de 40°/°° en rang 1 et de 3°/°° en rang 5. Les cours d'eau des TC, quant à eux, présentent des pentes évoluant de 6°/°° en rang 1 vers 0.8°/°° en rang 5.

Nous pouvons distinguer ainsi dans ce résultat deux grands groupes : les cours d'eau de montagne (du Massif Central, MCBLA, MCPL, MCDS) de forte pente de la vallée et les cours d'eau de plaine (du Massif Armoricaire MA et les Tables Calcaires (TC)).

- Les pentes des versants sont analysées à partir des valeurs modales de cette variable ainsi que de son étendue, i.e. les valeurs minimales et maximales à l'intérieur d'une région. Nous pouvons dire que les pentes des versants ont une variabilité forte intra-rang et intra-région. En effet, quelles que soient les régions et les rangs étudiés l'étendue des pentes des versants varient de V1 à V4 (sauf pour le Massif Armoricaire où il ne varie que de 1 à 3). Nous pouvons remarquer aussi que seule l'hydro-écorégion MCBLA présente des pentes des versants fortes de V2 à V4, sauf pour les grands cours d'eau de rang 5. Elles sont surtout caractérisées par les cours d'eau de Haut Allier (Chapeauroux, Allagnon) et de la Haute Loire. Enfin, nous n'avons pas de relation entre les pentes des versants et la taille des cours d'eau, donc aucune évolution amont-aval quelles que soient les régions considérées.

- La sinuosité. Les cours d'eau de rang 1 quelle que soit la région considérée sont en majorité, des cours d'eau rectilignes. Les cours d'eau de rang 4 sont manifestement sinueux. Les cours d'eau du Massif Central se distinguent des 2 autres régions (TC et MA). Ils ont des caractéristiques en plan plus sinueuses à partir de rang 2 puis conservent cette valeur de sinuosité. Nous avons remarqué quelques signes d'augmentation de la sinuosité (passage des cours d'eau rectiligne à des cours d'eau sinueux) en fonction du rang dans les 3 régions MA, MCBLA et MCDS. Cette augmentation est visible dans les deux autres régions sauf pour les rangs 5 où les cours d'eau deviennent rectilignes.

- La largeur du lit. Il est difficile d'interpréter cette variable morphologique à cause de son imprécision lors des mesures sur carte. Il apparaît néanmoins que les évolutions amont-aval inter-régions ne sont pas les mêmes selon les régions.

- La largeur de fond de vallée. Nous notons également la grande variabilité de ce paramètre quelle que soit la région (variant de V1-V2 à V5). Les cours d'eau du MCBLA sont en majorité de faible fond de vallée quelque soit le rang (V2 sauf pour le rang 3). A l'inverse, les petits et moyens cours d'eau (rang 1 à 3) des régions MA, MCDS, TC sont dominés par des fonds de vallée larges.

II.5.1.2. CARACTERISATION DES TYPES DE VALLEE PAR HYDRO-ECOREGION.

Nous donnons comme propriétés morphologiques pour chacune des hydro-écorégions et rangs les valeurs modales des cinq caractéristiques étudiées à partir du Tableau 2.5.

- L'hydro-écorégion Massif Armoricaïn :

- Rang 1 : Pente moyenne, versant plat, rectiligne, largeur très faible et fond de vallée large.
- Rang 2 : Pente moyenne, versant plat, rectiligne, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 3 : Pente faible, versant plat, rectiligne, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 4 : Pente faible, versant plat, sinueux, largeur moyenne et fond de vallée étroit.
- Rang 5 : Pente très faible, versant plat, sinueux, forte largeur et fond de vallée moyennement large.

- L'hydro-écorégion Massif Central Bassin Loire Allier :

- Rang 1 : Pente très forte, versant en pente, rectiligne, largeur très faible et fond de vallée étroit.
- Rang 2 : Pente très forte, versant moyen, sinueux, largeur faible et fond de vallée étroit.
- Rang 3 : Pente moyenne, versant en gorge, sinueux, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 4 : Pente moyenne, versant en gorge, sinueux, largeur moyenne et fond de vallée étroit.
- Rang 5 : Pente faible, versant plat, sinueux, forte largeur et fond de vallée étroit.

- L'hydro-écorégion Massif Central Dépressions Sédimentaires :

- Rang 1 : Pente très forte, versant plat, rectiligne, largeur très faible et fond de vallée large.
- Rang 2 : Pente très forte, versant plat, rectiligne, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 3 : Pente faible, versant plat, sinueux, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 4 : Pente faible, versant plat, sinueux, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 5 : Pente faible, versant plat, sinueux, forte largeur et fond de vallée étroit.

- L'hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin :

- Rang 1 : Pente très forte, versant plat, rectiligne, largeur très faible et fond de vallée moyen.
- Rang 2 : Pente très forte, versant plat, sinueux, largeur faible et fond de vallée moyen.
- Rang 3 : Pente très forte, versant plat, sinueux, largeur faible et fond de vallée étroit.
- Rang 4 : Pente moyenne, versant plat, sinueux, forte largeur et fond de vallée étroit.
- Rang 5 : Pente moyenne, versant moyen, rectiligne, forte largeur et fond de vallée étroit.

- L'hydro-écorégion Tables Calcaires :

- Rang 1 : Pente moyenne, versant plat, rectiligne, largeur très faible et fond de vallée large.
- Rang 2 : Pente moyenne, versant plat, rectiligne, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 3 : Pente faible, versant plat, sinueux, largeur faible et fond de vallée large.
- Rang 4 : Pente très faible, versant plat, sinueux, forte largeur et fond de vallée moyen.
- Rang 5 : Pente très faible, versant plat, rectiligne, forte largeur et fond de vallée large.

Tableau 2.5 : Les valeurs modales des variables morphologiques par hydro-écorégion et par rang.

Hydro-écorégions : MA

RANG 1au 1:100.00ème	PENTE DE VALLEE		VG			SI			LARLIT			LARFON		
	Moyenne	Ecart-type	Mode VG	Min VG	Max VG	Mode SI	Min SI	Max SI	Mode LARLIT	Min LARLIT	Max LARLIT	Mode LARFON	Min LARFON	Max LARFON
1	9,68	8,00	1	1	2	1	1	3	1	1	2	5	1	5
2	6,40	4,86	1	1	4	1	1	4	2	1	3	5	1	5
3	4,16	3,39	1	1	4	1	1	4	2	1	4	5	1	5
4	3,28	3,04	1	1	4	2	1	4	4	2	6	2	1	5
5	0,86	0,73	1	1	2	2	1	3	5	3	6	3	1	5

Hydro-écorégions : MCBLA

RANG 1au 1:100.00ème	PENTE DE VALLEE		VG			SI			LARLIT			LARFON		
	Moyenne	Ecart-type	Mode VG	Min VG	Max VG	Mode SI	Min SI	Max SI	Mode LARLIT	Min LARLIT	Max LARLIT	Mode LARFON	Min LARFON	Max LARFON
1	40,75	24,43	3	1	4	1	1	3	1	1	3	2	1	5
2	25,06	19,52	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	5
3	15,66	11,81	4	1	4	2	1	3	2	1	4	5	1	5
4	8,12	5,10	4	1	4	2	1	3	4	2	5	2	1	5
5	3,03	2,62	1	1	4	2	1	4	5	4	5	2	1	4

Hydro-écorégions : MCDS

RANG 1au 1:100.00ème	PENTE DE VALLEE		VG			SI			LARLIT			LARFON		
	Moyenne	Ecart-type	Mode VG	Min VG	Max VG	Mode SI	Min SI	Max SI	Mode LARLIT	Min LARLIT	Max LARLIT	Mode LARFON	Min LARFON	Max LARFON
1	21,28	19,86	1	1	4	1	1	2	1	1	2	5	1	5
2	15,83	12,18	1	1	3	1	1	3	2	1	3	5	1	5
3	5,77	3,94	1	1	3	2	1	4	2	1	5	5	1	5
4	4,38	3,98	1	1	4	2	1	4	2	2	6	5	1	5
5	1,73	0,91	1	1	3	2	1	3	5	5	6	2	1	5

Hydro-écorégions : MCPL

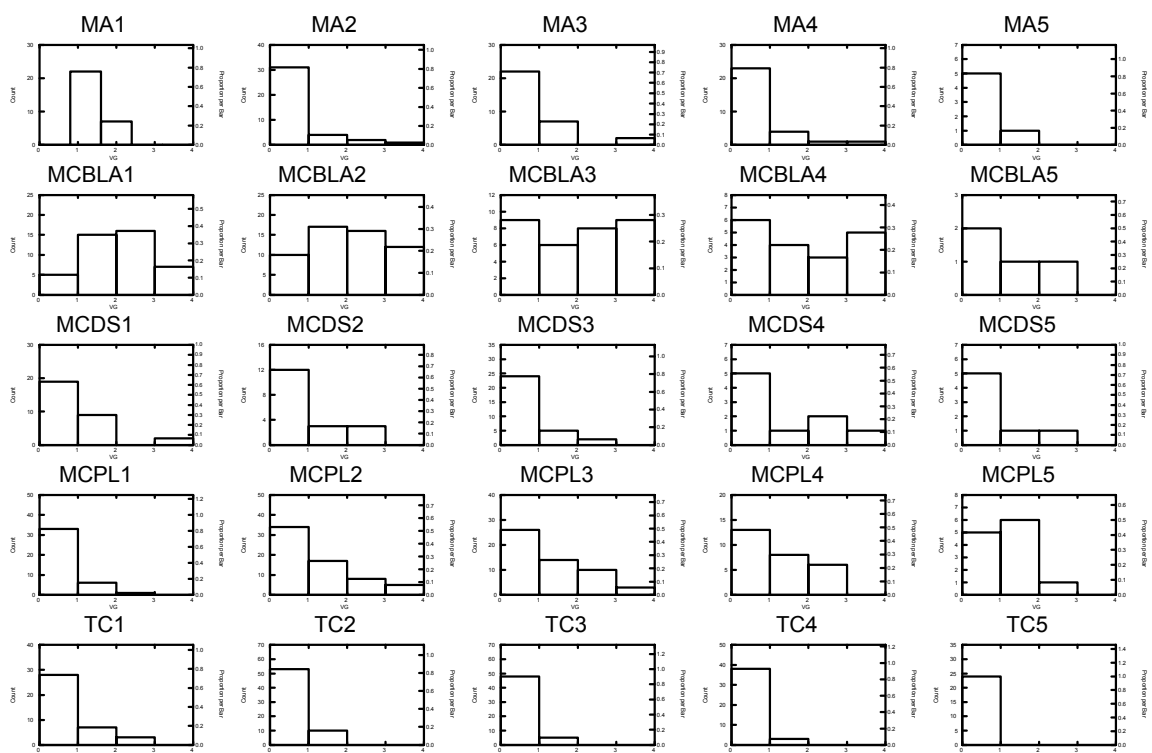
RANG 1au 1:100.00ème	PENTE DE VALLEE		VG			SI			LARLIT			LARFON		
	Moyenne	Ecart-type	Mode VG	Min VG	Max VG	Mode SI	Min SI	Max SI	Mode LARLIT	Min LARLIT	Max LARLIT	Mode LARFON	Min LARFON	Max LARFON
1	21,81	15,71	1	1	3	1	1	3	1	1	2	4	1	5
2	19,84	18,54	1	1	4	2	1	4	2	1	3	4	1	5
3	13,17	9,90	1	1	4	2	1	4	2	1	5	2	1	5
4	7,52	6,61	1	1	3	2	1	4	5	2	5	2	1	5
5	3,35	1,35	2	1	3	1	1	3	5	4	5	2	1	5

Hydro-écorégions : TC

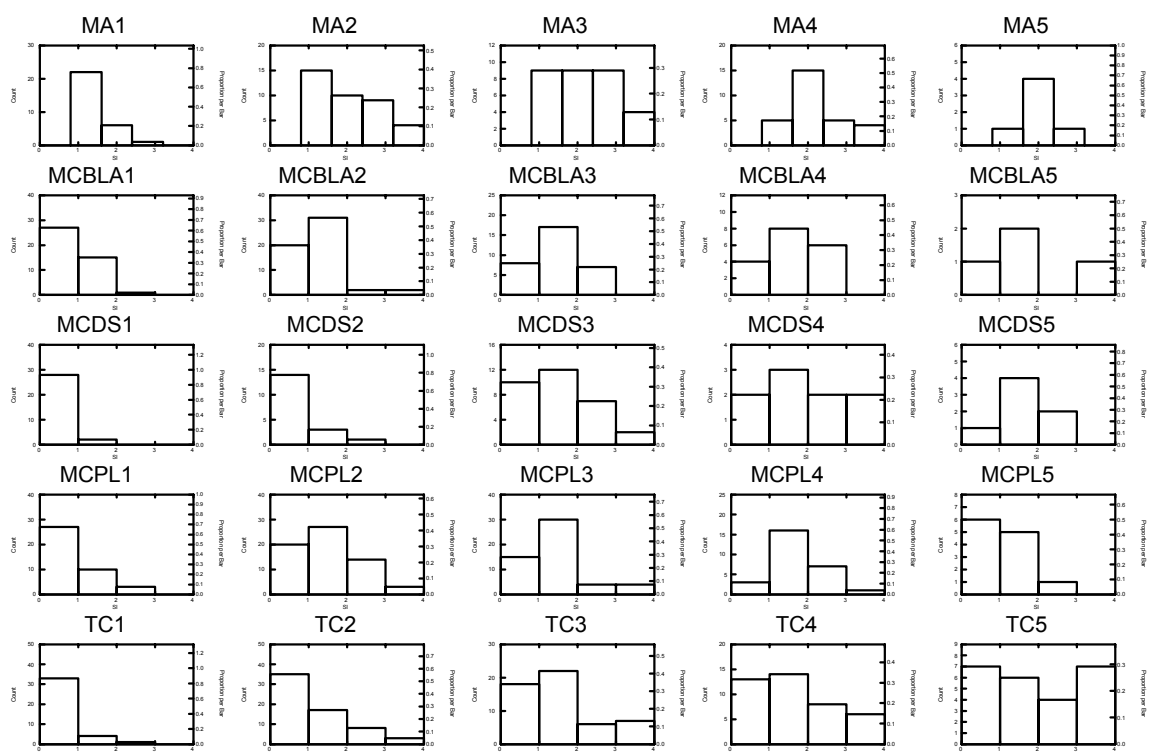
RANG 1au 1:100.00ème	PENTE DE VALLEE		VG			SI			LARLIT			LARFON		
	Moyenne	Ecart-type	Mode VG	Min VG	Max VG	Mode SI	Min SI	Max SI	Mode LARLIT	Min LARLIT	Max LARLIT	Mode LARFON	Min LARFON	Max LARFON
1	6,70	4,18	1	1	3	1	1	3	1	1	3	5	1	5
2	4,91	3,46	1	1	2	1	1	4	2	1	3	5	1	5
3	2,53	1,84	1	1	2	2	1	4	2	1	4	5	1	5
4	1,42	0,76	1	1	2	2	1	4	5	1	5	4	3	5
5	0,79	0,42	1	1	1	1	1	4	5	2	5	5	1	5

Ce tableau montre en même temps :

- les caractéristiques morphologiques des cours d'eau appartenant à une région et un rang
- l'évolution amont des caractéristiques morphologiques,
- la comparaison entre région de cette évolution longitudinale,
- la comparaison entre région des caractéristiques morphologiques pour un même rang
- la variabilité intra-paramètre (écart-type, min et max).

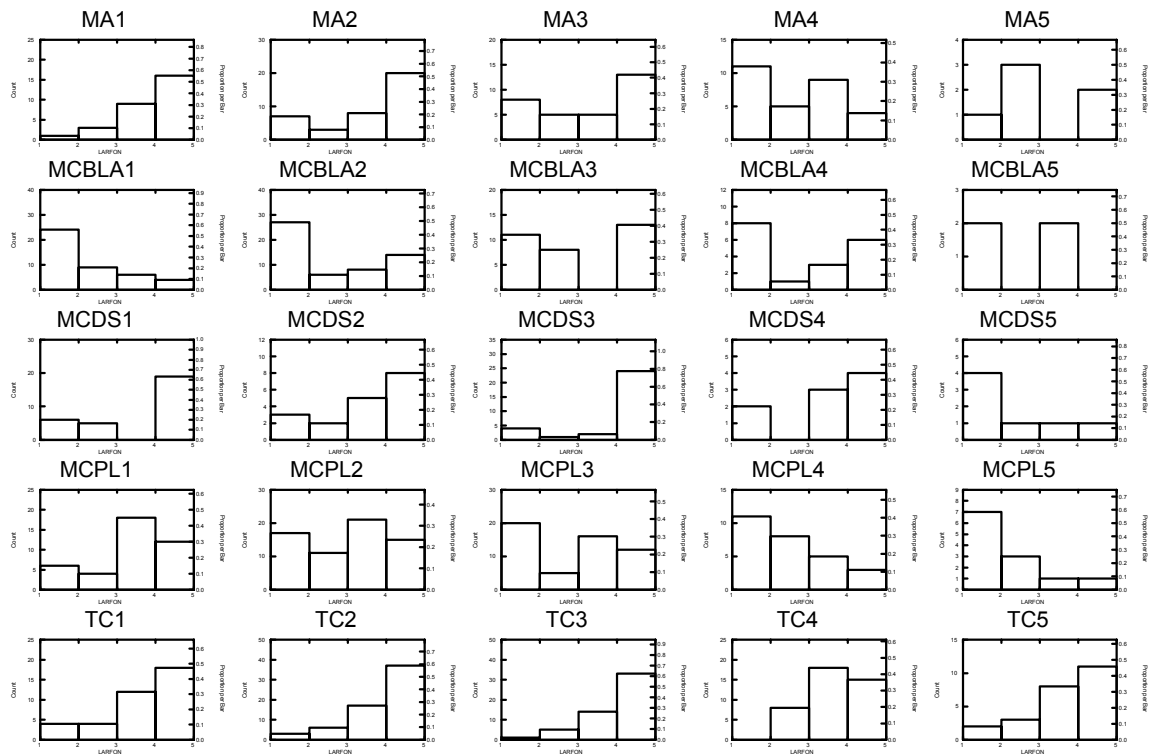


a. Pente des versants

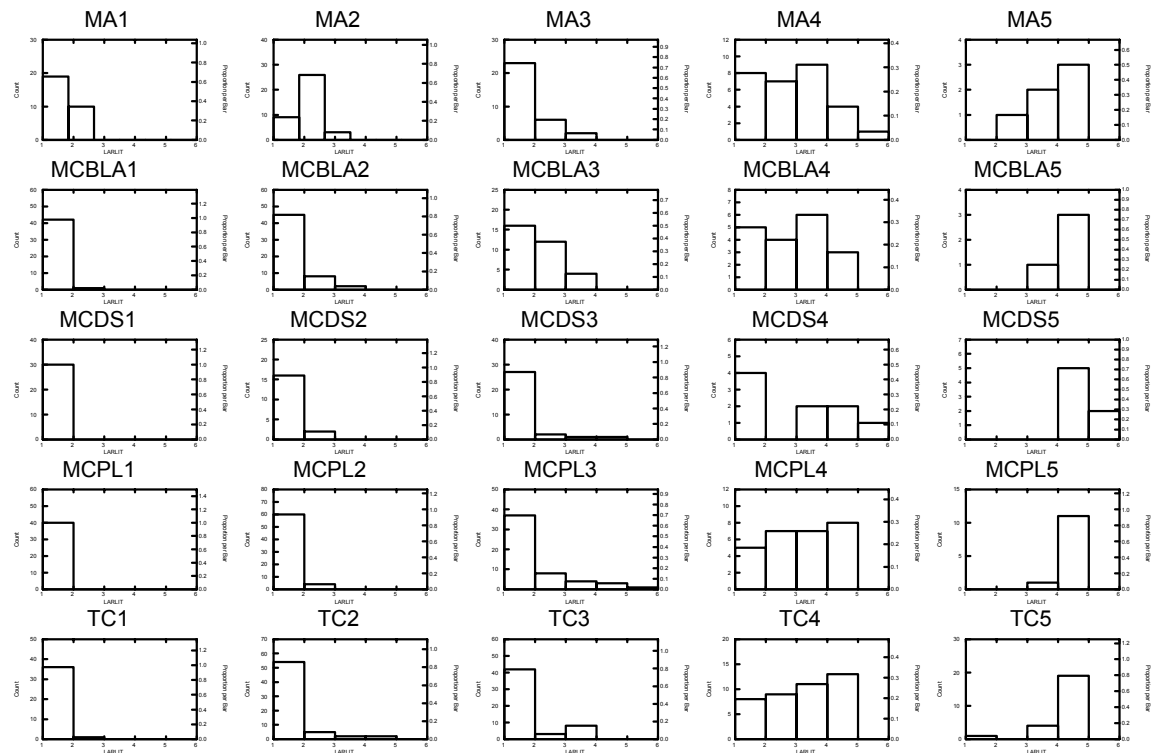


b. Sinuosité

Figure 2.5 : Distribution des 4 variables morphologiques (nominales) par hydro-écorégion et par rang.



c. Largeur fond de vallée



d. Largeur du lit

Figure 2.5 suite : Distribution des 4 variables morphologiques (nominales) par hydro-écorégion et par rang.

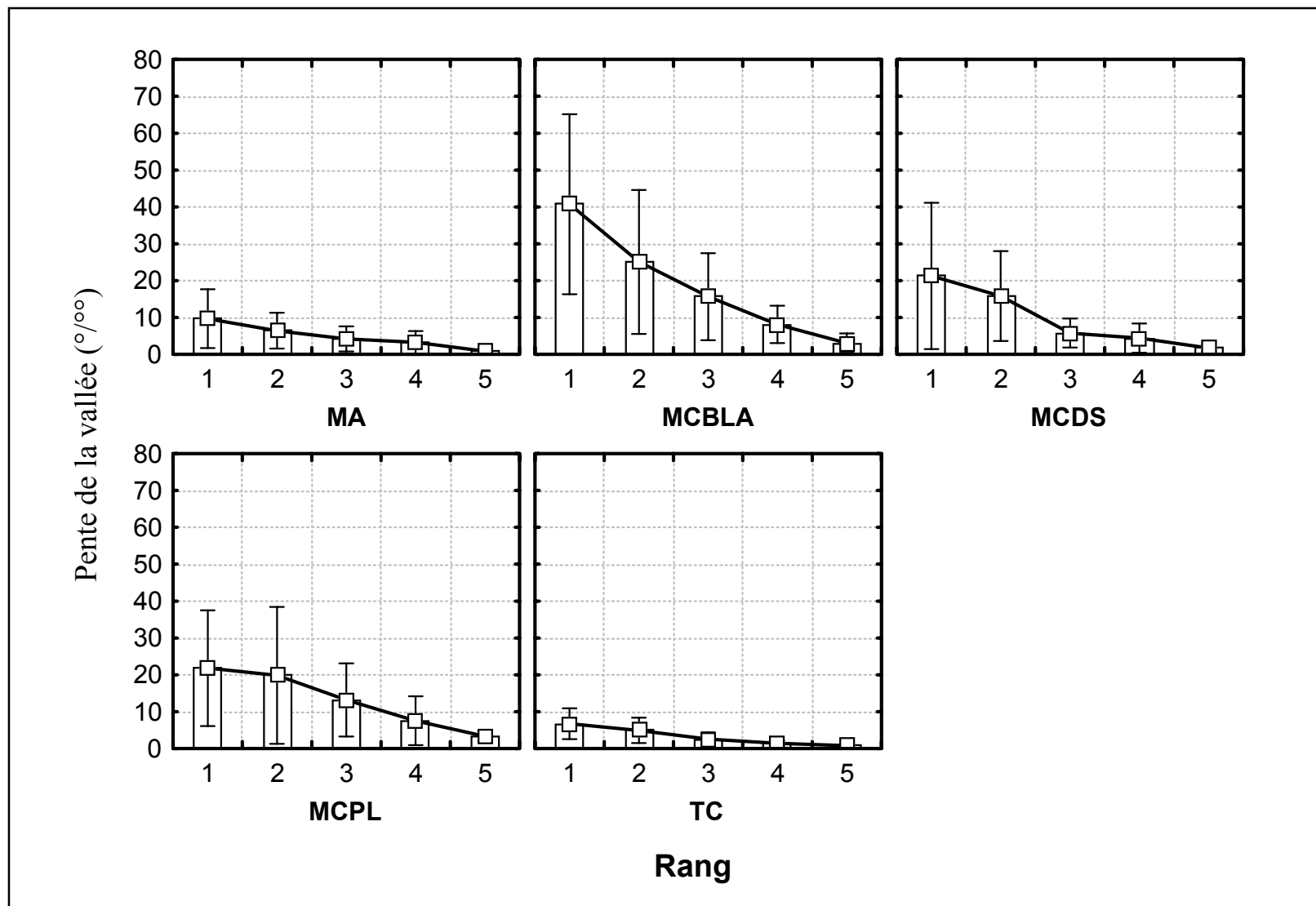


Figure 2.6 : Distribution de la pente de la vallée par hydro-écorégion et par rang.

Nous pouvons remarquer d'après ces résultats que chaque couple hydro-écorégion / rang possède une combinaison des caractéristiques morphologiques qui en majorité lui sont propres. Et que l'évolution amont-aval des caractéristiques morphologiques est différente d'une région à l'autre.

II.5.1.3. APPROCHE DE TYPE DE VALLEE SELON UNE COMBINAISON DES VARIABLES MORPHOLOGIQUES, (CUPP, 1989).

- **Les distributions spatiales des types Cupp.**

Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.6 :

- Cupp1, ces types de vallée sont caractéristiques des petits et moyens cours d'eau (rang 1 à 3) des régions du Massif Central MCBLA, MCDS, MCPL, donc essentiellement des régions à relief très accentué. Ils sont quasi-absents dans les régions MA et TC,
- Cupp2, les vallées en U sont en nombre très faible dans le bassin de la Loire. Elles se trouvent dans les MCBLA et MCDS. Comme le Cupp1, on ne les rencontre pas dans les régions de relief plat,
- Cupp3, ils se trouvent en majorité dans les grands cours d'eau des régions à relief modéré, MA, MCDS et MCPL (rang 4 et 5). On les rencontre néanmoins dans tout le bassin versant de la Loire,
- Cupp4, ce sont les types de vallée les plus répandus dans le bassin de la Loire. Les vallées plates sont souvent les caractéristiques des types de vallées des petits et moyens cours d'eau sauf dans le MCBLA où ils ont un pourcentage plus élevé pour les moyens et grands cours d'eau que les petits cours d'eau.

Tableau 2.6 : Répartition des types Cupp par rang sur le bassin de la Loire.

<i>RANG100</i>	<i>cupp1</i>	<i>cupp2</i>	<i>cupp3</i>	<i>cupp4</i>
1	21.7%	62.2%	10.6%	5.6%
2	20.2%	60.1%	14.3%	5.5%
3	19.5%	63.5%	12.0%	5.0%
4	30.6%	54.0%	12.1%	3.2%
5	43.4%	50.9%	5.7%	0.0%
Loire	23.5%	59.9%	11.9%	4.7%

- **Les distributions longitudinales des types Cupp par hydro-écorégion.**

Les résultats présentés dans le Tableau 2.7 :

- MA, dans cette région, les petits et moyens cours d'eau sont dominés par le Cupp4 et les grands cours d'eau par Cupp3,
- MCBLA, c'est la seule région où les Cupp1 sont dominants (rang 1 à 3) et les moyens et grands cours d'eau sont en majorité de type Cupp4. Avec quelques présences des types Cupp2,
- MCDS, les cours d'eau de cette région ont la même configuration que les cours d'eau du MA sauf le passage de Cupp4 au Cupp3 se fait au rang5,
- MCPL, même configuration que les cours d'eau du MA, avec quelques présences des types Cupp1,

- TC, seule dans cette région où aucune variabilité des types Cupp suivant l'évolution amont-aval des cours d'eau. Ils sont dominés par le type Cupp4. Absence des Cupp1 et Cupp2.

Tableau 2.7 : Répartition des types Cupp par hydro-écorégion et par rang.

HER1	RANG100	Cupp1	Cupp2	Cupp3	Cupp4
MA	1	14%	86%	0%	0%
	2	18%	74%	5%	3%
	3	35%	58%	3%	3%
	4	48%	45%	7%	0%
	5	67%	33%	0%	0%
MCBLA	1	26%	21%	37%	16%
	2	20%	29%	36%	15%
	3	16%	31%	31%	22%
	4	17%	39%	28%	17%
	5	25%	50%	25%	0%
MCDS	1	30%	63%	3%	3%
	2	22%	61%	6%	11%
	3	13%	81%	3%	3%
	4	0%	67%	22%	11%
	5	57%	29%	14%	0%
MCPL	1	23%	75%	3%	0%
	2	27%	53%	17%	3%
	3	25%	51%	23%	2%
	4	48%	30%	22%	0%
	5	75%	17%	8%	0%
TC	1	16%	76%	3%	5%
	2	14%	86%	0%	0%
	3	11%	89%	0%	0%
	4	20%	80%	0%	0%
	5	21%	79%	0%	0%

II.5.1.4. RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES MULTIVARIEES EN ACM. DECOUPAGE SANS A PRIORI EN CAH.

Nous avons considéré qu'il serait nécessaire de réaliser les analyses selon les rangs des cours d'eau. Cela revient à typer les cours d'eau de même taille, par exemple, à différencier les petits cours d'eau en gorge des petits cours d'eau à vallée plate.

Les structures des analyses sont les mêmes pour chaque ordre. Nous avons procédé à un ACM des individus tronçons à partir des 5 variables morphologiques. Par raison de cohérence dans les calculs, nous avons regroupé les catégories qui ont les plus faibles fréquences d'apparition entre elles. Par exemple, pour les grands cours d'eau de rang 5, les individus qui ont des pentes de la vallée de moyenne à très forte valeur ont été groupés. Ensuite, nous avons récupéré les trois axes factoriels de tableau ACM, et nous avons réalisé une CAH sur ces axes. La distance pour la classification retenue est la distance euclidienne, et la méthode d'agrégation est la méthode proposée par Ward.

Enfin, nous n'avons retenu dans cette étude que 3 classes de types de vallée par ordre de cours d'eau. Nous avons opté pour ce choix afin d'avoir 15 types de vallée (3 classes pour 5 rangs), un nombre que nous jugeons suffisant pour typer les cours d'eau du bassin de la Loire. Evidemment, nous pouvons varier ce choix suivant les objectifs ou le nombre de types finaux souhaités.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 2.8 à 2.12 et dans les figures 2.7 à 2.11 :

• Cours d'eau de rang 1.

Nombre d'individus = 180 ; Nombre de catégories = 15

- $p1, p2, p3 = p3$
- $v3, v4 = v3$
- $s2, s3, s4 = s2$
- $w2, w3 = w2$
- $I4 = I5$

Tableau 2.8 : Résultats de la typologie rang 1.

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>	<i>Type 3</i>
Pente de la vallée très faible à moyenne Versant plat Rectiligne Très faible largeur Largeur fond de vallée forte	Pente de la vallée très forte Versant en gorge Largeur fond de vallée très faible	Pente de la vallée forte Versant moyen Sinueux à méandriformes Faible à moyenne largeur Largeur fond de vallée faible à moyen

Figure 2.7 : Premier plan factoriel de l'ACM et du résultat de la CAH (Annexe).

• Cours d'eau de rang 2.

Nombre d'individus = 238 ; Nombre de catégories = 17

- $p1, p2, p3 = p3$
- $v3, v4 = v3$
- $s3, s4 = s3$
- $w3, w4, w5 = w3$
- $I4 = I5$

Tableau 2.9 : Résultats de la typologie rang 2.

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>	<i>Type 3</i>
Pente de la vallée très forte Versant en gorge Largeur moyenne à forte Largeur fond de vallée très faible	Pente de la vallée forte Versant moyen Sinueux à méandriformes Faible largeur Largeur fond de vallée faible à moyen	Pente de la vallée très faible à moyenne Versant plat Rectiligne Très faible largeur Largeur fond de vallée forte

Figure 2.8 : Premier plan factoriel de l'ACM et du résultat de la CAH (Annexe).

• Cours d'eau de rang 3.

Nombre d'individus = 200 ; Nombre de catégories = 17

- $p1, p2, p3 = p3 \text{ \& } p5, p6 = p5$
- $v3, v4 = v3$
- $s3, s4 = s3$
- $w4, w5 = w4$
- $I4 = I5$

Tableau 2.10 : Résultats de la typologie rang 3.

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>	<i>Type 3</i>
Pente de la vallée forte à très forte Versant en gorge Largeur fond de vallée très faible	Pente de la vallée très faible à moyenne Versant plat Très sinueux à méandriformes Largeur moyenne à forte Largeur fond de vallée faible à moyen	Pente de la vallée forte Versant moyen Rectiligne à sinueux Très faible à faible largeur Largeur fond de vallée forte

Figure 2.9 : Premier plan factoriel de l'ACM et du résultat de la CAH (Annexe).

- Cours d'eau de rang 4.

Nombre d'individus = 124 ; Nombre de catégories = 20

- $p1, p2 = p2$ & pas de $p6$

- $v3, v4 = v3$

- $l4 = l5$

Tableau 2.11 : Résultats de la typologie rang 4.

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>	<i>Type 3</i>
Pente de la vallée forte	Pente de la vallée très faible à faible	Pente de la vallée très forte
Versant plat	Versant moyen	Versant en gorge
Très sinueux	Méandriques	Sinueux
Très faible largeur	Largeur moyenne à très forte	Largeur faible
Largeur fond de vallée forte	Largeur fond de vallée Faible à moyen	Largeur fond de vallée très faible

Figure 2.10 : Premier plan factoriel de l'ACM et du résultat de la CAH (Annexe).

- Cours d'eau de rang 5.

Nombre d'individus = 53

Nombre de catégories = 16

- pas de $p5, p6$

- $v2, v3 = v2$ & pas de $v4$

- pas de $w1, w2, w3, w4 = w4$

- $l4 = l5$

Tableau 2.12 : Résultats de la typologie rang 5.

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>	<i>Type 3</i>
Pente de la vallée très forte	Pente de la vallée très faible à faible	Pente de la vallée moyenne
Versant en gorge	Versant plat	Sinueux à très sinueux
Sinueux	Très sinueux à méandriques	Largeur moyenne
Largeur faible	Largeur forte	Largeur fond de vallée forte
Largeur fond de vallée très faible	Largeur fond de vallée forte	

Figure 2.11 : Premier plan factoriel de l'ACM et du résultat de la CAH (Annexe).

II.5.1.5. RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES MULTIVARIEES. VALIDATION DES HYDRO-ECOREGIONS.

Les interprétations réalisées ici ne concernent que les types dominants pour chaque hydro-écorégion. Les résultats de la distribution des types de vallée par rang et par hydro-écorégion sont présentés par la figure 2.12 et les tableaux 2.13 à 2.17.

Remarque : dans la lecture des tableaux 2.8 à 2.12, les caractéristiques des types de vallées type1, type2, type3 sont différentes suivant l'ordre des cours d'eau. Pour connaître les caractéristiques des types de vallée par rang, il faut se référer au § précédent.

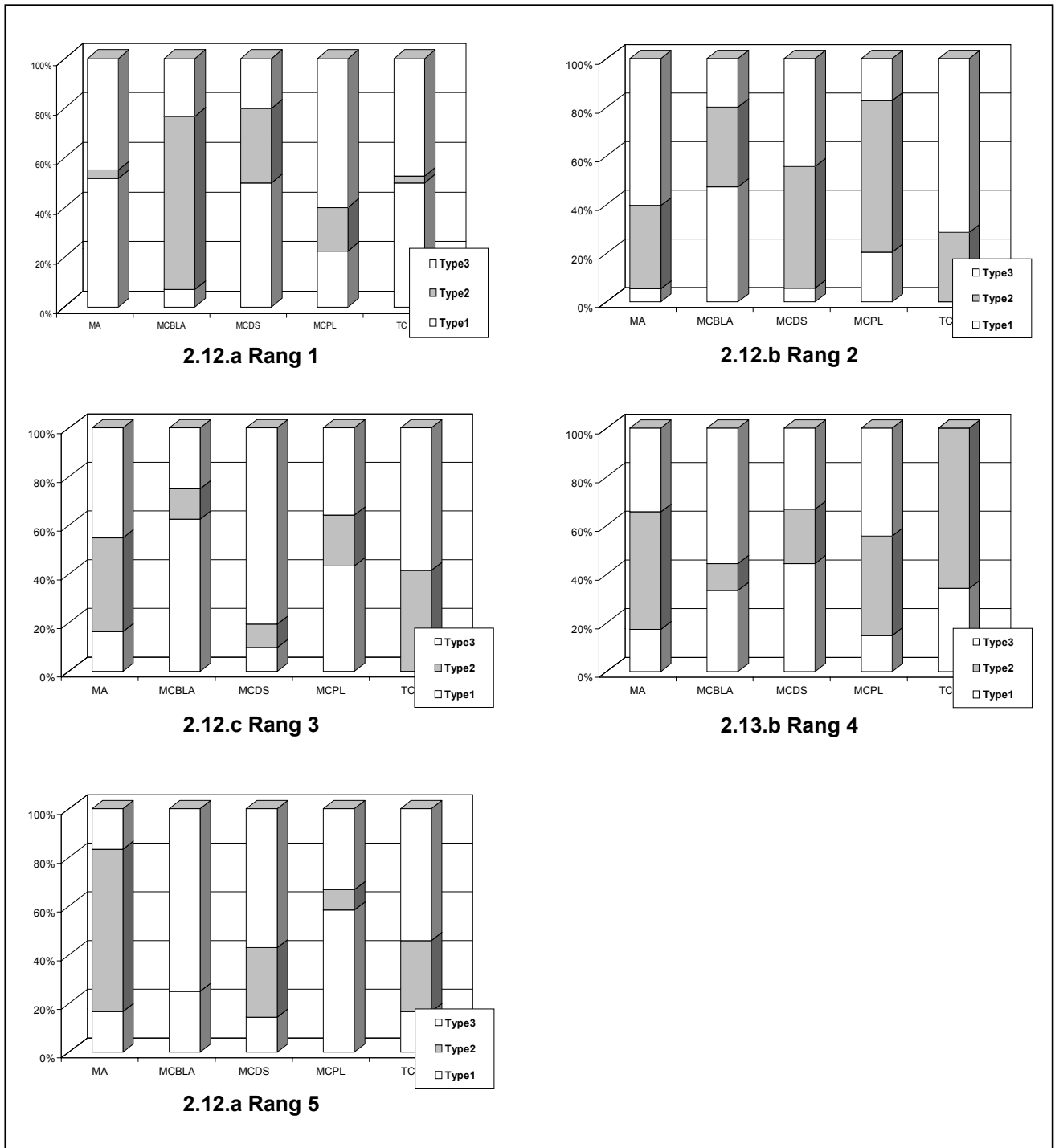


Figure 2.12 : Répartition des types de vallée, définis statistiquement, par hydro-écorégion et selon le rang.

- **Hydro-écorégion Massif Armoricain.**

Tableau 2.13 : Répartition des types de vallée (découpage sans a priori) dans le MA (découpage a priori).

	Type de vallée dominant	Type de vallée accompagnant (>20%)
Rang 1	Type1	Type3
Rang 2	Type3	Type2
Rang 3	Type3	Type2
Rang 4	Type2	Type3
Rang 5	Type2	

- **Hydro-écorégion Massif Central Bassin Loire Allier.**

Tableau 2.14 : Répartition des types de vallée (découpage sans a priori) dans le MCBLA (découpage a priori).

	Type de vallée dominant	Type de vallée accompagnant (>20%)
Rang 1	Type2	Type3
Rang 2	Type1	Type2 & Type3
Rang 3	Type1	Type3
Rang 4	Type3	Type1
Rang 5	Type3	Type1

- **Hydro-écorégion Massif Central Dépressions Sédimentaires.**

Tableau 2.15 : Répartition des types de vallée (découpage sans a priori) dans le MCDS (découpage a priori).

	Type de vallée dominant	Type de vallée accompagnant (>20%)
Rang 1	Type1	Type2 & Type3
Rang 2	Type2	Type3
Rang 3	Type2	Type1
Rang 4	Type1	Type3 & Type2
Rang 5	Type3	Type2

- **Hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin.**

Tableau 2.16 : Répartition des types de vallée (découpage sans a priori) dans le MCPL (découpage a priori).

	Type de vallée dominant	Type de vallée accompagnant (>20%)
Rang 1	Type3	Type1
Rang 2	Type2	Type1
Rang 3	Type1	Type3 & Type2
Rang 4	Type3	Type2
Rang 5	Type1	Type3

- **Hydro-écorégion Tables Calcaires.**

Tableau 2.17 : Répartition des types de vallée (découpage sans a priori) dans le TC (découpage a priori).

	Type de vallée dominant	Type de vallée accompagnant (>20%)
Rang 1	Type1	Type3
Rang 2	Type3	Type2
Rang 3	Type3	Type2
Rang 4	Type2	Type1
Rang 5	Type3	Type2

II.5.2. LES FACIES D'ECOULEMENT.

II.5.2.1. INFLUENCE REGIONALE SUR LA VARIABILITE LONGITUDINALE DES TYPES DE FACIES.

La proportion des différents types de faciès dans chaque hydro-écorégion est évaluée par la moyenne et l'écart-type du pourcentage de longueur pour chaque type de faciès. Nous avons représenté dans le tableau 2.18 la distribution de la moyenne ainsi que l'écart-type du pourcentage de longueur des différents faciès suivant les hydro-écorégions et selon le rang de Strahler. Ce tableau nous permet de visualiser l'évolution de chaque type de faciès au sein d'une même hydro-écorégion en fonction du rang (figure 2.13).

Nous pouvons déduire de ce résultat que :

- le pourcentage de longueur des types de faciès ne dépend pas directement de la nature géologique du milieu. En effet l'hydro-écorégion Massif Armoricaïn (massif granitique armoricaïn) se différencie des autres régions granitiques (Massif Central Plateau Limousin) pour les faciès de type chenal lentique, plat, radier.
- il faut distinguer les régions de reliefs accidentés et plutôt de fortes pentes des cours d'eau (Massif Central Plateau Limousin) des régions plutôt de faible pente et des reliefs moins encaissés : Tables Calcaires et Massif Armoricaïn.
- Le plat courant est systématiquement un des deux faciès dominant dans les trois hydro-écorégions.

- **Hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin.**

Le pourcentage des faciès radier et mouille diminue avec l'augmentation du rang, et inversement au chenal lentique. Les autres faciès chenal lotique, mouille, plat semblent décroître légèrement avec le rang. Le fort pourcentage des faciès rapide est localisé principalement dans les cours d'eau d'ordre 3. Nous n'avons pas une tendance nette des pourcentages de longueur des faciès avec les rangs, sauf pour le faciès type mouille.

- **Hydro-écorégion Massif Armoricaïn.**

Les pourcentages des faciès plats, mouilles et radiers diminuent nettement avec le rang, inversement au chenal lentique.

- **Hydro-écorégion Tables Calcaires.**

Cette région est caractérisée par une nette croissance du pourcentage de longueur de faciès chenal lentique et une réduction du plat lentique avec l'augmentation du rang.

Tableau 2.18 : Moyennes et écart-types des types de faciès en pourcentage de longueur par tronçon.

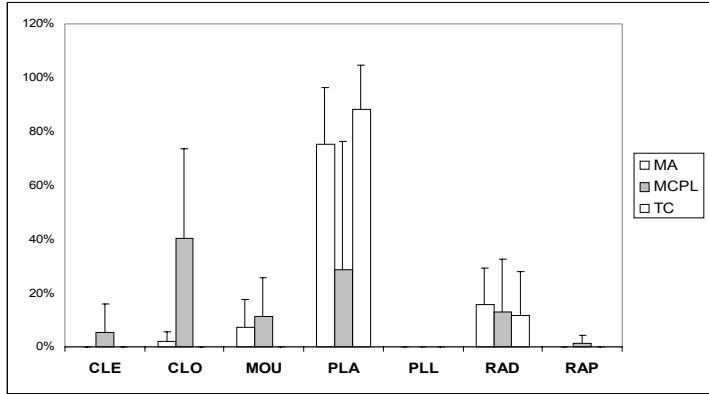
HER	R 100	CLE		CLO		MOU		PLA		PLL		RAD		RAP	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Massif Armoricaïn	1	0%	-	2%	0,04	7%	0,11	75%	0,21	0%	-	16%	0,14	0%	-
	2	1%	0,04	6%	0,08	10%	0,11	60%	0,22	1%	0,03	22%	0,24	0%	-
	3	68%	0,43	4%	0,08	4%	0,10	11%	0,19	2%	0,05	12%	0,16	0%	-
	4	90%	0,28	1%	0,02	0%	-	1%	0,05	8%	0,26	1%	0,03	0%	-
	5	94%	0,10	0%	-	0%	-	4%	0,07	0%	-	1%	0,02	0%	-
Massif Armoricaïn		59%	0,47	3%	0,06	4%	0,08	22%	0,31	3%	0,15	10%	0,16	0%	-
Massif Central Plateau Limousin	1	5%	0,11	40%	0,33	11%	0,15	29%	0,48	0%	-	13%	0,20	1%	0,03
	2	15%	0,21	9%	0,11	17%	0,14	30%	0,17	0%	0,02	28%	0,18	1%	0,03
	3	10%	0,26	10%	0,18	9%	0,14	30%	0,23	0%	0,02	22%	0,16	19%	0,31
	4	4%	0,07	13%	0,21	4%	0,08	45%	0,25	5%	0,08	26%	0,20	4%	0,10
	5	25%	0,45	1%	0,03	1%	0,03	57%	0,50	8%	0,29	7%	0,25	1%	0,04
Massif Central Plateau Limousin		11%	0,25	11%	0,19	8%	0,12	39%	0,31	3%	0,13	22%	0,20	7%	0,18
Tables Calcaïres	1	0%	-	0%	-	0%	-	88%	0,16	0%	-	12%	0,16	0%	-
	2	0%	-	0%	-	6%	0,11	44%	0,51	44%	0,41	5%	0,08	0%	-
	3	41%	0,40	2%	0,06	6%	0,10	28%	0,35	19%	0,35	4%	0,07	0%	-
	4	70%	0,39	4%	0,10	3%	0,06	19%	0,34	0%	-	5%	0,08	0%	-
	5	91%	0,25	0%	-	0%	-	7%	0,25	0%	-	2%	0,03	0%	-
Tables Calcaïres		61%	0,43	2%	0,08	3%	0,07	22%	0,36	8%	0,24	4%	0,07	0%	-

Tableau 2.19 : Moyennes et écart-types de nombre de faciès et d'indice de diversité par tronçon.

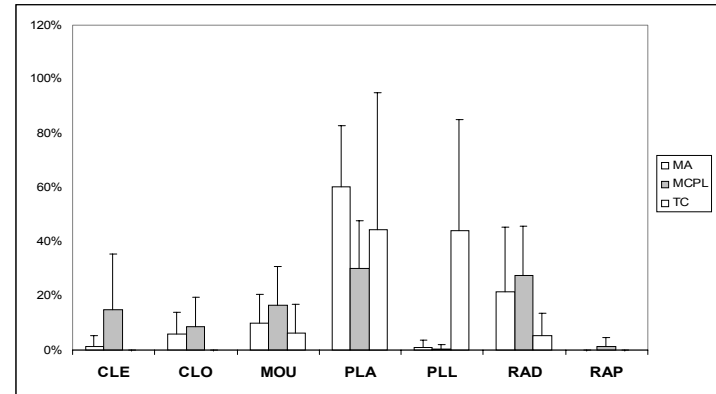
Hydro-écorégion	R 100	Nombre de faciès par		Indice de diversité de	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Massif Armoricaïn	1	3,50	2,38	0,80	0,70
	2	8,00	4,17	1,67	0,75
	3	5,27	5,01	0,92	1,08
	4	1,40	1,55	0,11	0,41
	5	2,33	2,31	0,22	0,39
Massif Armoricaïn		4,11	4,25	0,72	0,94
Massif Central Plateau Limousin	1	7,25	4,92	1,51	1,08
	2	11,33	4,19	2,11	0,65
	3	10,42	5,22	1,85	0,84
	4	10,83	5,62	1,93	0,85
	5	1,58	1,51	0,17	0,40
Massif Central Plateau Limousin		9,14	5,77	1,64	1,00
Tables Calcaïres	1	4,00	4,24	0,87	1,23
	2	4,00	3,46	0,73	0,81
	3	4,44	3,47	0,92	0,89
	4	4,03	4,29	0,65	0,88
	5	2,19	1,68	0,25	0,43
Tables Calcaïres		3,72	3,59	0,64	0,82

Tableau 2.20 : Moyennes et écart-types des faciès lotiques et profonds en pourcentage de longueur par tronçon.

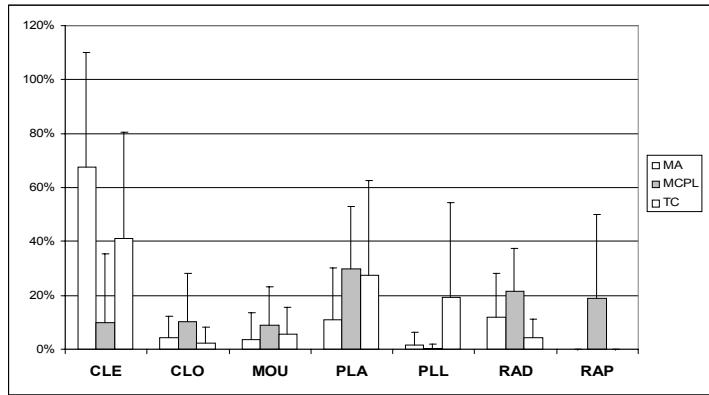
Hydro-écorégion	R 100	Pourcentage de longueur		Pourcentage de longueur	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Massif Armoricaïn	1	93%	0,1	9%	0,11
	2	88%	0,1	17%	0,16
	3	27%	0,4	75%	0,35
	4	3%	0,1	90%	0,28
	5	6%	0,1	94%	0,10
Massif Armoricaïn		34%	0,4	65%	0,41
Massif Central Plateau Limousin	1	83%	0,2	57%	0,44
	2	68%	0,2	40%	0,22
	3	81%	0,3	29%	0,30
	4	88%	0,2	20%	0,24
	5	66%	0,5	27%	0,45
Massif Central Plateau Limousin		78%	0,3	30%	0,31
Tables Calcaïres	1	100%	-	0%	-
	2	50%	0,5	6%	0,11
	3	34%	0,4	49%	0,43
	4	27%	0,4	76%	0,37
	5	9%	0,2	91%	0,25
Tables Calcaïres		28%	0,4	66%	0,42



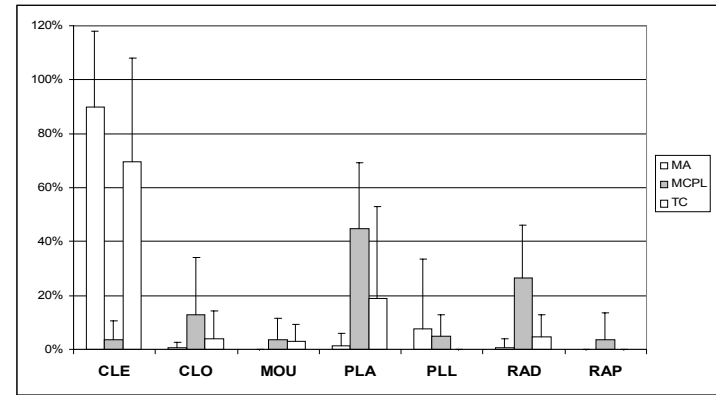
Rang 1



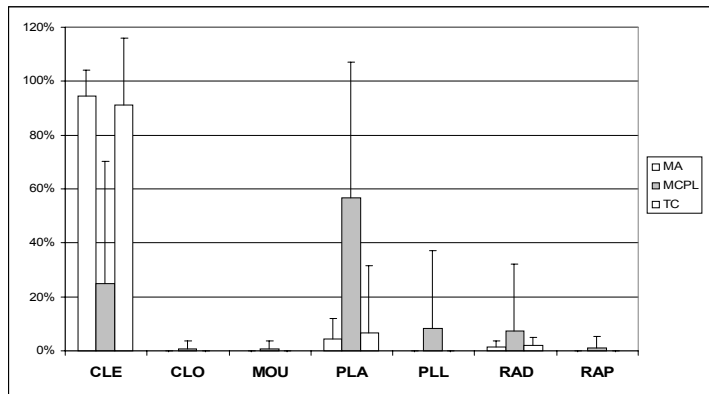
Rang 2



Rang 3



Rang 4



Rang 5

Figure 2.13 Distribution des types de faciès en % de longueur.

II.5.2.2. LA DIVERSITE DES FACIES D'ÉCOULEMENT PAR HYDRO-ECOREGION.

Nous avons ensuite calculé l'indice de diversité de Shannon (Indice de diversité adapté par la proportion linéaire de chaque individu faciès) pour chaque station ayant au moins deux types de faciès. Nous remarquons tout d'abord que dans les hydro-écorégions Massif Armoricaïn et Tables Calcaires la moitié des stations a une diversité nulle (donc n'est représentée que par un type de faciès) alors que dans les régions granitiques du Massif central, cette valeur ne représente que le 1/4 des stations observées pour l'hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin.

Nous rappelons que l'indice de Shannon est calculé par :

$$s = \Sigma[p_i * \ln(p_i)]$$

$$\text{et } P = \Sigma p_i = 1$$

avec p_i : proportion linéaire de chaque individu faciès

Nous avons présenté sur le tableau 2.19, la diversité moyenne des faciès d'écoulement par hydro-écorégion et par rang. La légende de cette carte nous indique une diminution nette des indices de diversité de l'habitat avec l'augmentation du rang. Cette décroissance est beaucoup plus nette dans les rangs 5 (hydro-écorégions Tables Calcaires et Massif Central Plateau Limousin) : les valeurs maximales de la diversité dans le rang 5 correspond à la valeur minimale de la diversité des autres rangs.

Ce graphe nous permet aussi de montrer une comparaison relative des indices de diversité moyens pour chaque hydro-écorégion et chaque ordre du cours d'eau. L'hydro-écorégion Massif Armoricaïn présente une nette décroissance de l'indice de diversité du rang 2 au rang 4. Les résultats de calcul des indices de diversité proposés par Shannon confirment ces résultats : les régions granitiques sont plus diversifiées que les régions calcaires.

Cette diversification de faciès d'écoulement explique la diversité de l'habitat. L'indice de diversité des faciès semble donc un bon descripteur pour une approche régionale de la diversité de l'habitat piscicole.

II.5.2.3. POURCENTAGE DES FACIES LOTIQUE/LENTIQUE PAR HYDRO-ECOREGION.

Le pourcentage lentique et lotique exprime la composante "vitesse" de l'habitat de poisson. La distribution régionale des pourcentages de longueur des faciès type lotique (inversement lentique) pourrait se coupler plus tard à la distribution des poissons (rhéophiles ou lénitophiles par exemple).

La figure 2.14 et le tableau 2.20 présentent l'évolution de la moyenne des pourcentages de longueur des faciès lotique/lentique et profond/peu profond.

La moyenne des pourcentages des faciès lotiques (inversement lentique) diminue beaucoup plus vite dans la région Massif Armoricaïn que dans la région Tables Calcaires. L'hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin présente un pourcentage moyen relativement constant quel que soit le rang.

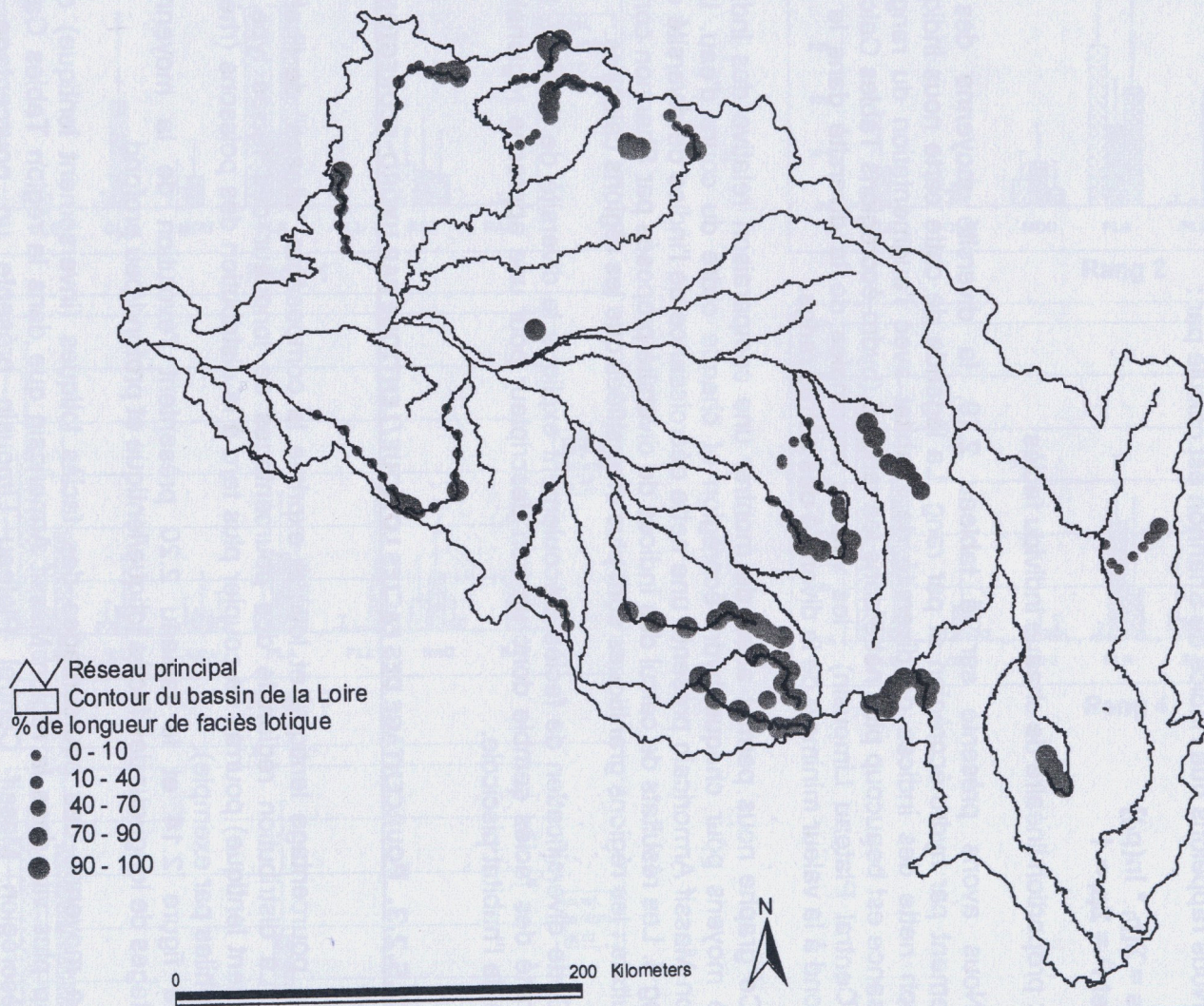


Figure 2.14 : Localisation des stations et distribution des faciès lotiques.

Remarque : Les hydro-écorégions présentent une forte distinction entre elles pour les rangs 2, concernant le pourcentage de longueur de faciès. Elles commencent à se ressembler au fur et à mesure que le rang augmente. Ce qui est l'inverse sur les indices de diversité des faciès où la différence entre les hydro-écorégions diminue quand le rang augmente.

II.5.2.4. POURCENTAGE DES FACIES PROFONDS/PEU PROFONDS PAR HYDRO-ECOREGION.

Les profondeurs des faciès expriment la réponse de l'habitat piscicole à la variabilité hydrologique (zone de refuge dans les faciès profonds pendant la période de sécheresse par exemple). Elles indiquent aussi la potentialité d'accueil pour les gros individus de la faune piscicole. Elles peuvent aussi être directement interprétées par rapport aux "préférences d'habitat" de certaines espèces.

II.6. CONCLUSION.

Le but de ce chapitre était d'ébaucher les caractéristiques régionales du bassin de la Loire et de ses hydrosystèmes à partir des variables morphologiques (type de vallée) et morphodynamiques (faciès d'écoulement) des cours d'eau.

Nous avons choisi les variables étudiées suivant le critère de leur déterminisme présumé dans les fonctions écologiques et morphodynamiques des cours d'eau.

Cinq variables morphologiques sont choisies :

- la pente de la vallée "P" (en variable continue ou regroupée en 6 classes),
- la pente des versants "V" (en 5 classes),
- la sinuosité "S" (en 4 classes),
- la largeur du lit mouillé "W" (en 6 classes),
- la largeur du fond de vallée "L" (en 5 classes).

Sept grands types de faciès sont choisis :

- radier, plat, mouille, rapide, chenal lentique, chenal lotique et plat lentique,
- ils sont groupés en 2 catégories : faciès lotiques/lentiques et profonds/peu profonds,
- la diversité de faciès d'écoulement est aussi analysée.

Le bilan de cette première étape d'élaboration d'une typologie morphologique des cours d'eau du bassin de la Loire était globalement positif. Des bons résultats de typologie sont montrés (figure 2.15) :

- une description des caractéristiques morphologiques et morphodynamiques des cours d'eau du bassin de la Loire, selon ses appartenances en hydro-écorégions et son rang,
- une validation d'une certaine manière du découpage en hydro-écorégions proposé par Bethemont (Wasson et al., 1993) qui, associé à un rang, aboutit à une typologie intéressante. Les caractéristiques morphologiques quantitatives de ces types de cours d'eau ont été précisées et permettent déjà de fournir des éléments importants en termes d'orientations générales de gestion,
- une proposition d'une autre approche de typologie des cours d'eau sans a priori régional. Cette approche croise les concepts de typologie et de sectorisation,
- un test sur la méthodologie de recueil des données qui semble applicable à l'ensemble du bassin.

D'une manière générale, l'hydro-écorégion Tables Calcaires semble mieux typée que les autres régions. Cela signifie qu'il existe une plus grande régularité de configurations physiques (sinuosité mis à part) dans le vaste ensemble Tables Calcaires que dans les hydro-écorégions où domine le socle cristallin.

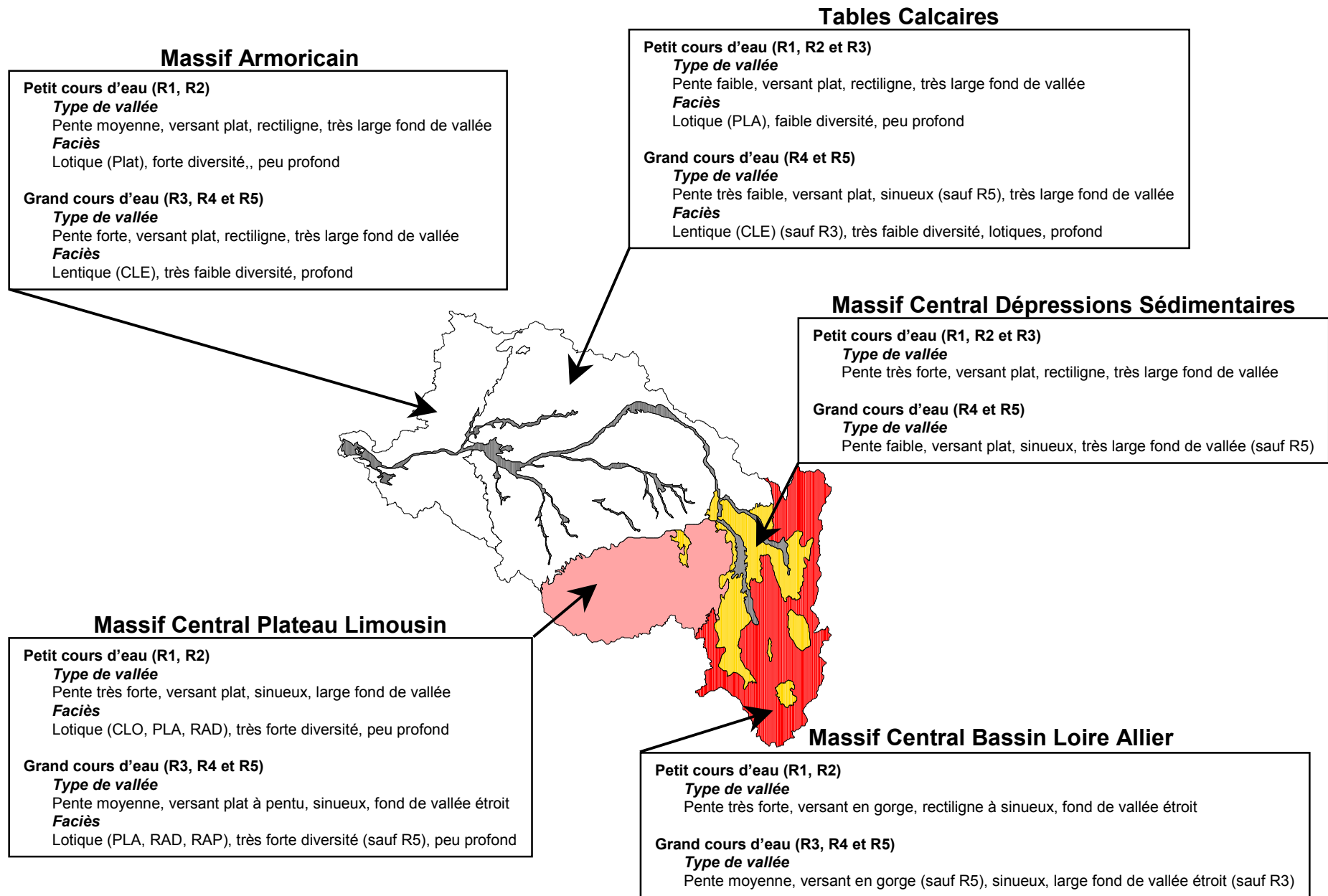


Figure 2.15 : Synthèse des caractéristiques morphologiques, par hydro-écorégion, des cours d'eau du bassin de la Loire.

- Intérêts des variables morphologiques étudiées.

La pente de la vallée.

Son rôle est déterminant dans le fonctionnement morphodynamique des cours d'eau puisqu'elle est identifiée par de nombreux auteurs comme variable de contrôle de la dynamique fluviale (à un niveau inférieur toutefois aux deux variables de contrôle majeurs, non intégrés à ce stade de l'étude que sont : le débit liquide et le débit solide).

Elle détermine en fait en grande partie la pente actuelle du cours d'eau, elle même composante majeure de son énergie potentielle en termes d'érosion et de capacité d'ajustement suite à un aménagement.

La pente des versants.

La pente des versants adjacents au cours d'eau est un paramètre intéressant à plusieurs titres :

- d'un point de vue morphologique, elle détermine (couplée à la géologie) la possibilité de fourniture de matériaux solides autochtones au cours d'eau par le biais des processus d'érosion de versant (torrents de versants et cônes d'éboulis sur les fortes pentes, reptation sur les pentes plus faibles, solifluxion en conditions périglaciaires).

- d'un point de vue socio-économique elle conditionne aussi les possibilités d'implantation d'activités humaines sur ces unités, facteurs déterminant des fonctionnements morphodynamiques et écologiques des cours d'eau (Wasson et al, 1993, voir notamment l'atlas cartographique). Elle est aussi à l'origine de certains aménagements en rivière, du fait même de ces activités humaines (besoin de protection contre les crues, contre l'érosion).

La sinuosité.

La sinuosité est un paramètre d'importance majeure d'un point de vue géomorphologique, elle est indicatrice à elle seule d'un certain nombre de caractéristiques dynamiques du cours d'eau :

- elle augmente généralement de façon inversement proportionnelle à la pente de la vallée,

- elle augmente donc aussi de façon inversement proportionnelle à la puissance spécifique du cours d'eau. Elle est donc indicatrice de la capacité de "réponse" morphologique du cours d'eau à un aménagement,

- on peut souvent la corrélérer aux caractéristiques sédimentologiques des alluvions charriées et elle augmente donc généralement de manière inversement proportionnelle à la granulométrie de la charge solide en transit (et éventuellement de celle des berges),

- elle peut vraisemblablement être corrélée, ce sera d'ailleurs un des développements futurs de l'étude, à la présence et à l'alternance de certains types de faciès d'écoulement. Les cours d'eau très sinueux ou méandriques, et donc à pente généralement faible, présentent des alternances de très longues "mouilles", dans les concavités (faciès caractérisés par de fortes profondeurs et des vitesses très lentes) et de "radiers" au niveau des points d'inflexion des sinuosités (zones peu profondes, à écoulement rapide et à granulométrie grossière).

D'un point de vue biologique, on peut considérer les faciès d'écoulement comme de bons indicateurs des "habitats aquatiques", tant pour la faune que pour la flore.

Si un lien clair peut être établi entre les caractéristiques générales de la vallée, dont la sinuosité du lit, et la présence/fréquence des types de faciès, un grand pas vers la typologie fonctionnelle sera franchi.

D'un point de vue socio-économique enfin, la sinuosité est souvent indicatrice de perturbations et d'artificialisations de l'écosystème aquatique. En effet, on observe souvent des portions de cours d'eau rectilignes intercalées entre des tronçons sinueux à

méandrique. Un peu d'expérience suffit généralement pour identifier là un dysfonctionnement morphologique dû le plus souvent à une rectification commandée par un besoin de protection contre les crues.

La largeur du lit mouillé.

La prise en compte de la largeur permet de classer le cours d'eau dans une catégorie d'importance. Ruisseau, petit cours d'eau, petite rivière, sans qu'une classification standard ait fait l'unanimité jusqu'alors. Le rang de Strahler, que nous avons utilisé par ailleurs pour notre première approche typologique, est une notion beaucoup moins immédiate que la largeur. C'est pourquoi les deux paramètres ont été utilisés, même s'il existe une forte redondance entre eux.

La largeur du lit mouillé est un paramètre écologique essentiel en ce sens qu'elle conditionne en grande partie la biomasse faunistique et floristique présente dans le cours d'eau. Elle est enfin utilisée par les géomorphologues pour le calcul d'autres paramètres géométriques ou morphodynamiques tels que le rapport largeur/profondeur, longueur d'onde et amplitude des sinuosités naturelles (cf. § précédent) et enfin la variable suivante qui est la largeur du fond de vallée.

NB : Il faut signaler ici que la largeur utilisée par les chercheurs est généralement soit la largeur mouillée pour un débit médian soit la largeur à pleins bords. Il est difficile d'obtenir dans le cadre d'une étude régionale une de ces deux valeurs.

La largeur du fond de vallée.

Tout cours d'eau naturel de type méandrique ou sinueux dispose sur les marges de son lit actif, d'une zone d'expansion qui lui permet de maintenir un tracé en plan en équilibre par rapport aux débits liquides et solides qui lui sont imposés par la nature et qui sont les deux variables essentielles de contrôle de la dynamique et de la morphologie fluviale (Bravard, 1997).

La largeur moyenne de cet espace de liberté a été évaluée par de nombreux auteurs à 10 à 15 fois la largeur du lit actif à pleins bords. Cette valeur correspond à l'amplitude moyenne de nombreux trains de méandres ayant pu être analysés (la littérature scientifique anglo-saxonne en est particulièrement prodigue).

Si cet espace de liberté n'est pas respecté (endiguement étroit, enrochements de deux berges opposées), on peut s'attendre à de nombreuses modifications morphologiques du cours d'eau tels que l'enfoncement du lit par érosion progressive ou régressive.

Ces modifications morphologiques outre l'impact majeur qu'elles peuvent avoir sur l'hydrologie (augmentation des pointes de crues du fait de la réduction des zones naturelles d'écrêtement), sur l'hydraulique (modification du régime du transport solide), sur les ouvrages d'art (effondrement de ponts, de digues, de seuils de moulin) ont aussi des impacts écologiques majeurs qu'il convient de ne pas négliger.

Ces impacts écologiques sont multiples, nous n'en développons donc que trois à titre d'exemple :

- l'enfoncement du lit signifie enfoncement de la nappe d'accompagnement, dépérissement de la forêt alluviale et remplacement par un cortège d'espèces à bois durs, donc à une banalisation des milieux puisque ces espèces sont déjà présentes en dehors de la plaine alluviale,

- la réduction de l'espace de liberté du cours d'eau a pour effet de stopper de manière quasi irréversible (réversibilité fonction de la nature de l'aménagement) le processus de rajeunissement permanent des formes alluviales et de leur végétation associée (vorigines). Ce rajeunissement lié aux crues et à la migration du chenal vif est le garant d'une diversité maximale des milieux et donc de la faune aquatique et terrestre qui leur sont associées. La constriction de l'espace de liberté signifie donc à court terme le dépérissement et la disparition de toute la faune et la flore inféodées aux milieux alluviaux mobiles,

- cela entraîne aussi un abandon des bras morts ou latéraux dont le rôle écologique est fondamental (reproduction de certaines espèces de poissons, zones de refuge en période de crue).

Toutefois, certains cours d'eau ont un espace de liberté naturellement restreint (gorges étroites, rivières encaissées) auquel ils ont adapté leur géométrie en travers et en plan et ont atteint ainsi des conditions correctes d'équilibre dynamique.

Il importait donc ici, d'inclure cette variable majeure dans la typologie pour deux raisons :

- elle permet de quantifier le degré de contrainte naturelle du lit,
- elle permettra, dans le cadre de l'analyse de l'artificialisation, d'en évaluer le degré de contrainte artificielle, voire de quantifier l'écart par rapport à la situation naturelle. Il sera vraisemblablement possible à terme d'établir à partir de cet écart, des perspectives d'évolution du cours d'eau.

La sinuosité et la largeur fond de vallée sont deux variables extrêmement importantes en termes de typologie fonctionnelle du fait de leur corrélation probable avec :

- des paramètres écologiques (sinuosité <-> faciès d'écoulement <-> habitats aquatiques),
- des paramètres morphodynamiques (largeur de fond de vallée <-> espace de liberté du cours d'eau <-> équilibre morphologique dynamique).

Faciès d'écoulement.

Nous remarquons le rôle principal tenu par les échelles : faciès et séquence de faciès. Elles tiennent une fonction de lien entre la morphologie (tronçon), qui correspond à des processus physiques, et l'habitat qui lui, est un concept biologique (par rapport aux poissons). La plupart des différentes études des faciès ont une finalité pour l'habitat aquatique (Bisson et al., 1981 ; Aadland, 1993 ; Baran et al., 1993).

L'échelle de faciès et de séquence de faciès est relativement importante pour la compréhension de l'habitat parce qu'elle constitue l'échelle du territoire quotidien d'un individu-poisson. Leur structure séquentielle formée d'association de zones rapides et lentes crée la diversité de l'habitat du poisson. Il est donc possible d'extrapoler spatialement les potentialités d'habitat des peuplements piscicoles par le biais des faciès.

L'avantage majeur de l'étude des habitats aquatiques, tient à ce que ceux-ci constituent la passerelle la plus utilisée pour établir des corrélations entre les processus morphodynamiques (qui caractérisent le compartiment physique) et les fonctionnements écologiques (compartiment biologique). Et dans cette optique, les deux entités étudiées (tronçon et faciès d'écoulement) dans ce chapitre font partie intégrante des entités emboîtées de l'habitat aquatique.

• Limites de l'approche.

Nous rappelons que la comparaison inter-région se fait sur la base de la référence spatiale du bassin de la Loire. Intégrer d'autres cours d'eau de bassins différents dans l'analyse induira des changements dans les résultats.

Les principales limites dans l'interprétation des résultats reposent sur :

- Il est difficile de positionner les limites ou les seuils des "types" ou des "secteurs". Ce choix reste toujours subjectif. Un "secteur" ou un "type" est en même temps dépendant des entités amont. C'est la base même de l'hydrosystème (Amoros et Petts, 1993),
- Il est difficile de choisir le niveau de perception des variables mises en jeu pour pouvoir définir une typologie "optimale" et "fonctionnelle",
- Il est difficile de concilier les intérêts des différents acteurs et gestionnaires travaillant à diverses échelles, à l'aide d'une seule typologie.

Le problème d'application de la notion de faciès apparaît plus :

- sur les grands cours d'eau où ils se disposent en mosaïque plus qu'en succession longitudinale (études Garonne, Malavoi, 1995 et Rhône, Cemagref, 1995).
- avec un biais lié aux observateurs, surtout pour les faciès hybrides (radier-plat, radier-rapide, faciès de transition : chenal lotique, limites des aires des faciès) (Roper et al., 1995)
- sur les types de faciès, ou même la typologie des faciès d'écoulement utilisée dans cette étude correspond à des cours d'eau à forte énergie (Malavoi, 1989).
- les faciès sont des unités morphodynamiques, donc ils ne sont pas stables et dépendent des énergies de la dernière crue ou des dépôts pendant la période d'étiage (Frissel et al., 1986). Même s'il existe des remplacements homothétiques de séquences, i.e. un faciès peut ne pas être géographiquement modifié mais se retrouver translaté dans les deux dimensions latérales et longitudinales, à l'occasion d'une crue.

- **Perspectives.**

Toutefois, les étapes suivantes sont encore nécessaires pour conclure définitivement cette première approche typologique, à savoir :

- la classification réalisée dans cette étude reste statistique, nous pensons qu'une classification fonctionnelle pourrait être plus adaptée pour certaines questions : par exemple, une classification des pentes selon la distribution des poissons (Classification des cours d'eau, Huet, 1949),
- il faut tenir compte d'autres facteurs morphologiques comme l'énergie spécifique des cours d'eau, les pentes réelles des faciès, la distance aux sources,
- il est probable aussi que le débit intervienne comme paramètre explicatif supplémentaire (débit de pleins bords par exemple, d'après Leopold et Wolman, 1957, les paléo-débites). Il sera donc nécessaire de connaître ces paramètres pour affiner l'analyse de la répartition des types définis.

- **Prospectives : amélioration et généralisation de la méthode de caractérisation de la morphologie des vallées à partir d'un outil SIG. Exemple sur un réseau fictif.**

Nous avons essayé à partir d'un outil SIG de caractériser les cours d'eau sur les mêmes variables morphologiques : pente de la vallée, sinuosité, pente des versants, largeur de fond de vallée, taille de cours d'eau (largeur du lit).

Pour valider cette approche, nous avons choisi une portion de cours d'eau du bassin de la Vienne comme réseau test, avec les logiciels de SIG : ArcView et Spatial Analyst et les logiciels WinDev et C++ comme compilateur et programmeur. Les données utilisées sont :

- un MNT de 1km²*1km² (USGS DEM) et de 75m (Visual DEM),
- un BDCarthage à l'échelle de 1:50.000ème,

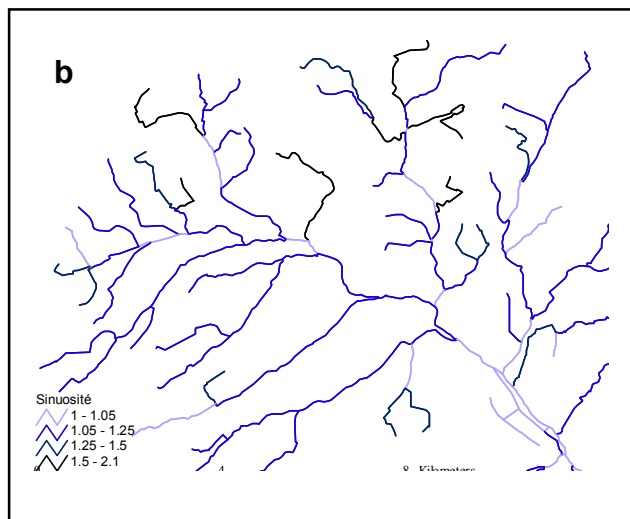
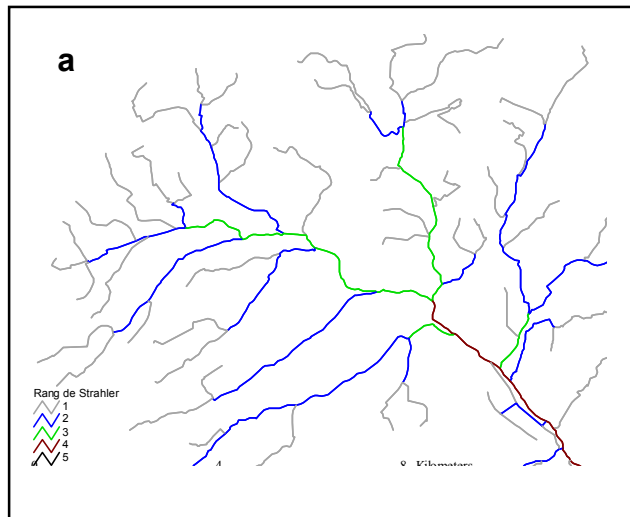
Nous avons pu généraliser ainsi sur l'ensemble du réseau hydrographique les variables suivantes :

- le rang du cours d'eau (selon 3 méthodes Strahler, Scheiddegger, Schreeve),
- la pente de la vallée,
- la combinaison de deux variables rang/pente qui nous ramène à la combinaison taille/pente de la zonation de Huet (1954).
- la sinuosité,

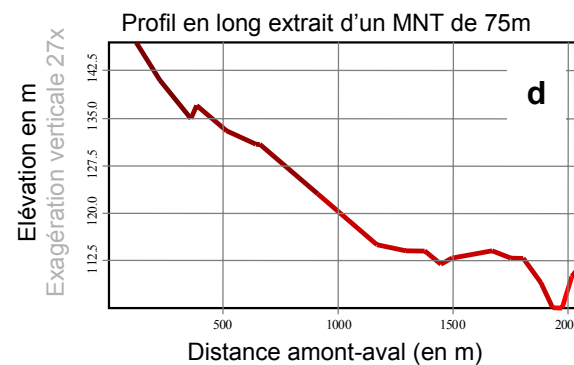
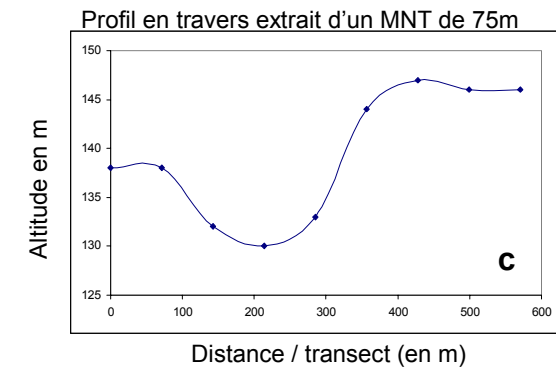
Nous avons pu extraire

- pour un tronçon donné : son profil en long,
- pour un transect : son profil en travers,
- pour un exutoire : le contours et les caractéristiques morphologiques du bassin versant.

Un exemple de résultat de ce test est donné sur la figure 2.16. Une étude est en cours pour valider ce type d'approche et sa généralisation sur l'ensemble du bassin de la Loire.



Extrait du réseau hydrographique **BDCarthage** de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Calcul réalisé sur l'ensemble du linéaire du bassin de la Loire (100.000km)



Extrait du réseau hydrographique **BDCarthage** de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne et du **MNT 75m** de Visual DEM. Calcul réalisé sur quelques tronçons du linéaire du bassin de la Loire.

Figure a : Rang de Strahler
 Figure b : Sinuosité calculée sur carte
 Figure c : Profil en travers sur un transect de 600m
 Figure d : Profil en long

Figure 2.16 : Extraction automatique des caractéristiques morphologiques des cours d'eau à partir d'un SIG réalisé sous ARCVIEW et AVENUE.

Partie 2.

Introduction.
anthropisation des cours d'eau.
Choix des thèmes.

INTRODUCTION.

Les spécificités physiques des cours d'eau et de leurs bassins versants présentées en première partie de cette étude ont influé depuis des millénaires sur leur mode d'exploitation et d'intensité de leur anthropisation. Il est donc logique que celle-ci présente une répartition spatiale, non pas aléatoire, mais guidée par la structuration physique des hydrosystèmes.

C'est ce que nous démontrons par le biais de l'analyse des interventions humaines sur les cours d'eau et les bassins versants du bassin de la Loire. De telles interventions, particulièrement anciennes et fortes, sont lourdes d'effets complexes.

La définition même de limite permettant de définir le seuil d'intervention et de modification de son environnement par l'homme est souvent assez floue. Pour cela, nous proposons au titre d'hypothèse de travail quelques postulats :

- le système "naturel", où l'homme n'intervient pas : cet état n'existe que rarement ou même pas du tout dans les pays industrialisés, les anglo-saxons vont jusqu'à utiliser le terme de "pristine" ou "aboriginal",

- le système "pseudo-naturel", où l'impact de l'homme sur le milieu est assez minime: relèvent de cette catégorie, les systèmes "renaturalisés", dans lesquels une modification d'origine anthropique a été patente lors d'une phase révolue au terme de laquelle le système est soit délaissé soit aménagé pour revenir à l'état naturel,

- le système "anthropisé", nous pouvons ranger dans cette catégorie toutes les interventions humaines qui conduisent à créer, à partir des systèmes naturels, des systèmes modifiés, voire artificiels, ainsi que ceux qui résultent de l'utilisation des écosystèmes et des ressources naturelles. Suivant cette approche, nous rangerons dans cette catégorie les problèmes associés aux activités humaines. Cet état est plutôt caractérisé par la destruction des équilibres initiaux (Bethemont, 1999).

L'influence humaine sur les écosystèmes aquatiques peut être considérée comme une perturbation sur une (ou plusieurs) des quatre dimensions de l'hydrosystème (Ward et Stanford, 1989 ; Amoros et Petts, 1995) : longitudinale, verticale, latérale et temporelle.

Les systèmes anthropisés, altérés par les interventions en rivière (aménagements directs ou induits par propagation dans leur bassin versant) conservent malgré tout certaines caractéristiques naturelles : en premier lieu les facteurs de contrôle globaux tels le climat, la géologie et le relief ainsi que la répartition de la végétation naturelle. Ensuite viennent d'autres variables morphologiques : le type de vallée, les caractéristiques des réseaux hydrographiques.

La notion d'artificialisation d'un cours d'eau met l'accent d'abord sur la discordance entre le fonctionnement originel/naturel et son état actuel ou récent, ensuite sur la réversibilité de cette discordance.

Il s'agira dans un premier temps d'identifier et de quantifier les types d'interventions humaines "directement ou indirectement" subies par les cours d'eau du bassin, en examinant notamment si des tendances se dessinent en fonction des hydro-écorégions et/ou des rangs proposés comme bases typologiques (cf. Partie 1). Notre objectif étant l'évaluation du degré d'artificialisation des cours d'eau par région qui tient compte du type de vallée, et de la position dans le gradient amont-aval. Nous essayons d'en définir un gradient d'intensité du "problème" par type de milieu. Nous envisageons à terme "une typologie des impacts consécutifs à l'action humaine, sur le système eau".

TYPOLOGIE DES OBJECTIFS D'INTERVENTIONS EN RIVIERE.

Les problèmes qui motivent une intervention dans un cours d'eau dépendent des caractéristiques naturelles de celui-ci et des activités humaines dans son bassin versant, sa vallée et son lit majeur.

Lalanne-Berdouticq (1985) montre qu'il existe une relation entre les caractéristiques morphologiques naturelles de la vallée et les types d'aménagements entrepris au fil des ans par les riverains. En effet, il a constaté que sur les petites rivières de plaine, l'objectif de lutte contre les inondations des terres est minime devant les contraintes de drainage. Ces petites rivières sont d'ailleurs souvent aménagées (rectification du lit) dans le cadre de travaux connexes au remembrement.

Tableau 1.1 : Types de cours d'eau et principaux objectifs d'aménagement (Lalanne-Berdouticq, 1985).

<i>Type des cours d'eau</i>	<i>Objectifs</i>
Cours d'eau pente faible	① Protection contre les inondations ② Assainissement (surtout sur les petits cours d'eau)
Cours d'eau pente moyenne	① Protection contre les inondations ② Stabilisation des berges et fond
Cours d'eau pente forte	① Stabilisation des berges et fond ② Protection contre les inondations

De même, Pols et Verne (1987) ont proposé une typologie régionale des cours d'eau de Rhône-Alpes et des problèmes motivant leur aménagement. Leur typologie est basée sur 3 paramètres majeurs: le relief (cours d'eau de plaine, de montagne), le régime hydrologique (pluvial, nival, ...) et la géologie du bassin versant (massif cristallin, marno-calcaire).

Indépendamment de l'aspect liant des objectifs d'aménagements à des types de cours d'eau, Malavoi et al. (1991) ont recensé globalement 6 types d'objectifs qui ne sont pas exclusifs les uns des autres : contrôle local des crues, assainissement des terres, contrôle de l'érosion des berges, contrôle de l'érosion du fond, amélioration piscicole, loisirs, amélioration de la navigabilité, éventuellement par soutien des étiages.

Au niveau national, Cacas et al. (1986) signalent, après enquête auprès de 62 Directions Départementales de l'Agriculture et des Forêts (DDAF), que la lutte contre les inondations des terres agricoles et l'assainissement en milieu rural sont les deux principales causes d'interventions. Les autres objectifs sont : la protection contre les débordements en zone urbaine, l'amélioration de la qualité de l'eau, la protection des berges et des parcelles riveraines contre l'érosion, l'utilisation à des fins touristiques et récréatives.

Il est possible de résumer comme suit mais de façon non exhaustive, les phénomènes susceptibles d'affecter les caractéristiques des milieux aquatiques :

- les usages domestiques,

- l'urbanisation et l'imperméabilisation consécutive des surfaces imperméables,
- les usages industriels,
- les usages agricoles : irrigation et élevage,
- les pratiques en matière de sylviculture, et le déboisement,
- le contrôle de l'érosion et de la végétation riveraine,
- la fourniture d'énergie hydraulique et hydroélectrique,
- les techniques de refroidissement (géothermie, thermoélectricité),
- les barrages d'écrêtement de crue et de soutien d'étiage, les seuils, les moulins,
- l'amélioration de l'habitat aquatique,
- la navigation,
- la récréation, la pêche,
- exploitation des granulats,
- la protection des zones humides.

Wasson et Bethemont (1993) proposent un inventaire des grandes familles de pression sur le bassin versant et les cours d'eau, les trajectoires et les compartiments impliqués (Figure II.1).

Figure II.1 : Relations écosystème/socio-système.

Notons que la plupart des interventions en rivière ont des fonctions multiples associant par exemple énergie, navigation, protection des berges et irrigation (cas du bassin rhodanien, Bethemont 1999). Et qu'il serait difficile d'analyser indépendamment les uns des autres les impacts induits par chacun des phénomènes ou pour chacun des types d'ouvrages.

TYPOLOGIE DES IMPACTS DES INTERVENTIONS EN RIVIERE.

Naturellement, les différents usages auront différents impacts sur le milieu aquatique, biotique et abiotique et provoqueront une modification des processus et des réponses au niveau des compartiments de l'écosystème aquatique.

Les effets des aménagements de cours d'eau peuvent se diviser en 2 types : (i) ceux qui se développent au sein même du segment directement touché, (ii) ceux qui apparaissent dans les segments situés en aval ou en amont de ces derniers. Malavoi et al. (1991) énumèrent les problèmes pouvant être rencontrés dans une analyse des impacts liés aux aménagements de cours d'eau :

- l'intensité de l'aménagement caractérise le type d'intervention effectué,
- la fréquence des aménagements illustre particulièrement le cumul d'aménagements.

Il importe donc de recenser l'ensemble des interventions réalisées au niveau d'un tronçon ou d'un segment de cours d'eau en renseignant :

- la longueur du linéaire perturbé (cumul dans l'espace) en distinguant les aménagements à impact linéaire court de ceux à impact plus long.
- la rémanence de l'impact et des phénomènes de réajustement (répétition dans le temps). Cette rémanence est exprimée par l'ancienneté de l'intervention et la maintenance des ouvrages.

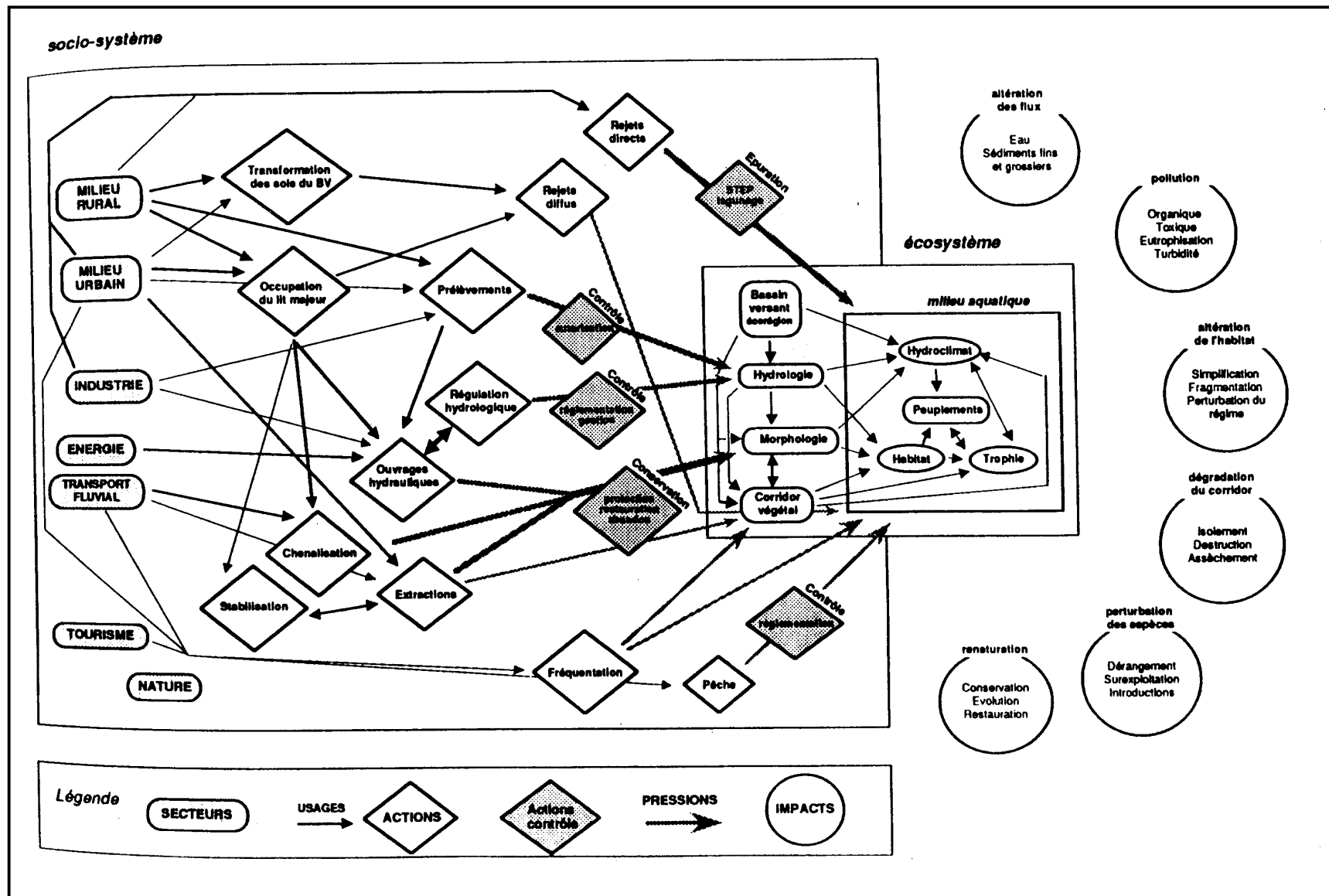


Figure II.1 : Relations écosystème / socio-système selon Wasson et Bethemont (1993).

Toutefois, la classification de Malavoi (1990), n'est pas uniquement basée sur les techniques d'aménagement mais aussi sur les objectifs des interventions et sur une estimation de leurs impacts sur la dynamique et la diversité du milieu. L'auteur répertorie, outre les objectifs des interventions, l'état du cours d'eau au moment de l'intervention. Ensuite trois catégories principales d'interventions, pas nécessairement exclusives les unes des autres, ont été identifiées à partir des objectifs primaires visés : (i) conservatrices, (ii) modificatrices, (iii) réparatrices.

L'ouvrage du Cemagref (1983) intitulé "L'étude d'impact des aménagements de cours d'eau" présente une classification des interventions. Nous notons simplement lieu la différenciation faite par les auteurs concernant les aménagements doux (cité aussi par Bravard, 1991) et les aménagements durs (Allee al., 1981).

Certains auteurs globalisent souvent les types d'aménagement, leurs objectifs ainsi que leurs impacts sur le milieu. Par exemple, Bravard (1991) cite quelques principaux types d'ouvrages majeurs ainsi que leurs impacts sur les cours d'eau :

- les endiguements contre les crues qui ont des effets sur les transits et les dépôts de charge de fond,
- la réduction ou l'augmentation des flux hydriques et minéraux générés par les défrichements et le reboisement, ainsi que l'exode rural qui a induit d'autres problèmes tels que le recul des labours, le boisement,
- l'extraction des granulats qui détourne les flux entrant dans le système fluvial,
- l'hydroélectricité et les réservoirs qui ont pour effet de bloquer les charges de fond.

Ward et Stanford (1989) mentionnent :

- les méthodes d'exploitation agricole et forestière qui mènent à une augmentation de l'intensité de la lumière, des teneurs en bioéléments,
- les barrages bloquent les routes migratoires et modifient les conditions de l'habitat aval,
- la chenalisation des rivières, redressement et dragage, la rétention des eaux par des digues pour la navigation, l'acquisition des terres agricoles,
- la régularisation du débit et la déviation du cours.

Les impacts des aménagements peuvent aussi, par exemple, être uniquement interprétés en terme biologique (EPA, 1995) :

1. perte et dégradation d'habitat,
2. barrages, développement de la navigation, transferts, chenalisation, régulation de débits,
3. facteurs de bassin versant tels que pollution diffuse, changements d'utilisation de la terre, agriculture, changement de zone riparienne,
4. introductions et invasions d'espèces exotiques,
5. cultures intensives,
6. pollution chimique et organique,
7. changement de climat.

APPLICATION AU BASSIN DE LA LOIRE.

Nous avons donné dans cette introduction un aperçu global de la typologie des objectifs d'aménagement et de la typologie de leurs impacts sur les cours d'eau. Nous avons montré qu'à chaque type d'aménagement correspond un ou plusieurs objectifs et induit différents types d'impacts vis-à-vis du milieu aquatique. Nous n'avons pas abordé la typologie des aménagements proprement dit. La classification des types d'aménagements est une méthode qui, filtrée par un découpage régional, permettra d'estimer les pressions exercées par l'homme sur les milieux. C'est ce cadre d'étude appliqué au bassin de la Loire que constitue cette deuxième partie.

Il serait donc nécessaire, dans l'interprétation de ce qui suit, de relier un type d'aménagement à son(es) objectif(s) et ses impacts, même si nous n'avons pas abordé ces deux derniers thèmes dans cette étude.

Compte tenu des diverses approches de classification des interventions sur les cours d'eau, nous proposons une classification simplifiée basée sur 3 catégories de causes majeures d'altération et d'artificialisation des cours d'eau :

- les aménagements des cours d'eau,
- la modification des régimes hydrologiques,
- l'utilisation du sol.

Ce choix est dicté par trois critères :

- les données disponibles actuellement sur l'ensemble du bassin de la Loire, ne permettent pas de faire un inventaire exhaustif de l'anthropisation des cours d'eau, de plus seules les données concernant ces trois types d'aménagement qui nous ont été fournies "gratuitement" dans cette étude.
- l'objectif de donner uniquement des exemples sur l'ensemble de l'approche, sachant que le même travail peut être fait sur d'autres types d'aménagement,
- le temps qui nous est imparti pour collecter d'autres sources de données et réaliser cette étude.

Nous avons donc étudié 3 thèmes correspondant aux trois chapitres de cette partie :

Chapitre 3 : Les aménagements directs des cours d'eau. Les données disponibles concernant ce type d'aménagement proviennent des Schémas Piscicoles (SDVP). Elles sont disponibles sur l'ensemble des Départements du bassin de la Loire. Nous avons pu rencontrer dans les SDVP trois catégories d'aménagement : les ouvrages transversaux (composés particulièrement des barrages mais des seuils, des épis), l'entretien et la chenalisation des cours d'eau. Nous avons caractérisé 496 individus-trançons issus de l'étude de type de vallée dans le Chapitre 2. Une autre source de données provenant de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne concerne les barrages. Elle donne des caractéristiques plus détaillées sur la localisation, la hauteur, le volume, la nature et la vocation des ouvrages. Nous avons pu analyser ainsi les caractéristiques de 1250 barrages recensés dans le bassin de la Loire.

Chapitre 4 : La modification des régimes hydrologiques. Les données utilisées proviennent de la banque de données nationale HYDRO (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). Nous avons retenu 355 stations hydrologiques dont 240 sont réputées en écoulement "naturel" et 95 en écoulement "influencé". Nous avons étudié 45 caractéristiques de débit. Elles sont réparties en deux catégories principales : les variables classiques décrivant les tendances centrales et extrêmes des écoulements et les

caractéristiques plus orientées vers la description de la variabilité hydrologique dans ses domaines fréquents et moins fréquents de fluctuation. Les variables hydrologiques étudiées sont estimées à partir des chroniques de débit journalier.

Chapitre 5 : L'utilisation du sol. Les données traitées dans ce chapitre sont de 2 origines : INSEE (Recensement Général de l'Agriculture-RGA et Recensement Général de la Population-RGP) et CORINE Land Cover de l'IFEN (institut Français de l'Environnement). Nous avons étudié trois catégories d'utilisation du sol : la population, l'élevage et l'occupation du sol. Cette dernière est regroupée en 5 classes : l'espace urbain, la culture, la forêt, la prairie et les eaux. Deux échelles sont pris en compte, l'une considère la globalité du bassin versant, l'autre uniquement des zones tampons liées longitudinalement au tracé des cours d'eau.

Chapitre 3.

Les aménagements directs : barrages, chenalisation et entretien.

III.1. INTRODUCTION.

Outre le problème lié à l'approche du fonctionnement complexe des écosystèmes aquatiques, l'insuffisance des informations sur la situation actuelle des interventions humaines et directes sur les cours d'eau induit souvent des incohérences à l'intérieur d'un projet de protection, de réhabilitation de ces cours d'eau au sein même de son bassin versant.

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état actuel de l'artificialisation directe des cours d'eau à l'échelle de tout le bassin de la Loire. Pour y parvenir, nous nous sommes posé plusieurs questions:

Sur les méthodes et les données :

- quels documents peuvent contenir des informations homogènes concernant les aménagements directs des cours d'eau sur l'ensemble du bassin de la Loire ?
- quelle est la fiabilité de ces documents ?
- quels types d'aménagements peut-on y trouver ?

Sur les analyses et les résultats :

- vis-à-vis de ces données, quels types d'analyses sont les plus adéquats ?
- existe-t-il des caractéristiques spécifiques d'aménagement directs de cours d'eau par hydro-écorégion ? Ce qui reviendrait à valider le découpage d'expert.
- Existe-t-il des liens statistiques entre les caractéristiques morphologiques des cours d'eau et les types d'aménagement rencontrés ?

III.2. LES DONNEES DISPONIBLES.

Les principales sources d'information utilisées pour cette première approche sont :

- les Schémas Départementaux de Vocation Piscicole (SDVP),
- les cartes IGN à l'échelle du 1:25.000ème et 1:100.000ème,
- le fichier des ouvrages hydrauliques de l'Agence de Bassin Loire-Bretagne.

D'autres données d'origines diverses viennent s'ajouter à celles-ci. Elles proviennent de l'EPALA, des Délégations Régionales du Conseil Supérieur de la Pêche (Centre-Auvergne / Limousin-Rhône), et de l'Agence de Bassin Loire-Bretagne.

Pour chaque source d'information, nous listons les différents paramètres et aménagements disponibles, les limites et les ambiguïtés de leur recueil, ainsi que leur fiabilité.

III.2.1. LES SCHEMAS DE VOCATION PISCICOLE.

Le recueil de données nécessaires à l'établissement d'un schéma piscicole a été standardisé par le Cemagref en collaboration avec les géographes du CNRS/Université (Souchon et al., 1985) dans l'ouvrage "document de travail des SDVP". Ceux-ci sont constitués de 4 documents de base:

- un document de synthèse générale,
- un document de synthèse par bassin élémentaire,
- des cartes de dossiers administratifs, 1:50 000ème
- des cartes de connaissance du milieu, 1:50 000ème.

Les SDVP étaient établis sur l'ensemble du bassin de la Loire depuis 1984. Tous les Départements ont quasiment fini l'approbation de leurs schémas. Il faut remarquer que nous travaillons sur les données SDVP qui ont maintenant 10 à 15 ans, depuis leur élaboration. Et qu'il n'y a pas eu d'actualisation. Les interprétations des résultats devraient donc tenir compte de ce contexte.

III.2.1.1. LES DONNEES MORPHOLOGIQUES

Les données morphologiques contenues dans le SDVP concernent :

- la classe de largeur des cours d'eau, calculée en général sur des secteurs rectilignes avec des berges verticales (radiers, plats). Elle n'apporte pas une précision suffisante pour les classes retenues dans le rapport cité ci-dessus. Certains schémas piscicoles donnent des valeurs précises (mais pas forcément exactes),
- la classe de pente, elle est toujours présente sur chaque schéma. L'étude de Paredes (1992) confirme la précision de ces valeurs,
- la sinuosité n'est pas toujours décrite,
- la granulométrie et l'état de végétation sont déterminés sur quelques schémas piscicoles.

III.2.1.2. LES DONNEES HYDROLOGIQUES

Chaque tronçon est caractérisé par un numéro de code hydrologique. Diverses valeurs de débits sont reportées dans le schéma piscicole. Excepté le débit moyen annuel, les autres débits (débits moyens annuels de fréquence quinquennale sèche de 5 ou 10 ans, débits de crue) ne sont pas uniformément et systématiquement recensés dans tous les schémas.

III.2.1.3. LES DONNEES CONCERNANT LES AMENAGEMENTS.

Compte tenu de la très forte hétérogénéité de l'information existant entre les différents SDVP, nous n'avons retenu que 3 grandes catégories d'aménagement :

- les ouvrages transversaux : sur les cartes des schémas piscicoles, ils regroupent les barrages (quelle qu'en soit le volume et la hauteur), les seuils, les radiers. Leur franchissabilité n'est pas systématiquement renseignée. Par contre, les données sur leur présence/absence sont vraisemblablement exactes, et proches de l'exhaustivité dans la mesure où l'information était directement collectée par les garde-pêches.

- l'entretien : aucun paragraphe spécial n'est consacré à l'entretien. Les renseignements sont souvent déduits de l'état de végétation, ou de l'accessibilité des berges, avec une vision la plupart du temps très halieutique.

- "l'aménagement" : Des indices concernant l'aménagement des cours d'eau peuvent exister dans les SDVP, mais ceci est très variable d'un schéma à l'autre. Le type d'intervention n'est pas toujours défini, en revanche la date de sa réalisation est souvent précisée. Une sous-catégorie est mise en place concernant les tronçons où la chenalisation (terrassement, recalibrage, rectification) est bien définie.

III.2.2. LE FICHER "BARRAGES" DE L'AGENCE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE.

Dernière source importante de données concernant l'artificialisation des hydrosystèmes, ce fichier recense la plupart des barrages existant sur le bassin de la Loire, en 1991. Il a été réalisé par l'Agence de Bassin Loire-Bretagne.

Quelques aspects de ces ouvrages sont retenus dans le cadre de notre analyse :

- sa localisation (commune d'implantation)
- sa hauteur,
- le volume retenu,
- sa fonction,

Ce fichier recense 1261 ouvrages repartis sur tout le bassin de la Loire, dont 129 sont caractérisés par le volume de stockage des retenues. Ne sont, a priori, recensés que les ouvrages transversaux importants et sont donc exclus les petits seuils de stabilisation ou de dérivation, souvent amalgamés dans les SDVP.

III.3. LES DONNEES UTILISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.

III.3.1. LES INTERVENTIONS DIRECTES.

III.3.1.1. LES AMENAGEMENTS TRANSVERSAUX. LES BARRAGES.

Nous rappelons que sont inclus dans cette catégorie tous les ouvrages transversaux pérennes entravant localement l'écoulement des eaux : ouvrages de retenue, seuils de dérivation, de stabilisation, radiers, les moulins, barrages vrais. Il est bien évident que les impacts potentiels de ces différents types d'ouvrages transversaux sont très différents et qu'il s'agit là d'un biais lié aux données recueillies sur les Schémas Piscicoles qui ne font pas toujours la différence.

NB : ne sont interprétées dans ce paragraphe que les données des SDVP. Le paragraphe III.6.3 fournira les informations disponibles dans les fichiers de l'Agence de l'Eau. Nous avons considéré les fréquences kilométriques ou décakilométriques moyennes de barrages.

Nous pourrions aussi distinguer :

- **Les grands barrages.**

Ils regroupent les ouvrages de retenue. Ils sont considérés comme infranchissables pour les espèces de poissons migrateurs. Nous pouvons établir :

- la fréquence kilométrique des ouvrages,
- la hauteur de l'ouvrage, la hauteur des chutes qui vont compartimenter le cours d'eau, et influencer la circulation des poissons,
- la capacité du volume retenu, les volumes stockés dans chaque bassin élémentaire étant comparés au volume écoulé, et qui vont influencer la forme des hydrogrammes,
- la fonction de l'ouvrage (hydroélectricité, régulation hydrologique- étiages et crues, service de distribution, industries, navigation et loisirs),
- les perturbations hydrologiques induites en aval ou sur le tronçon même (éclusées et débits réservés). Nous pouvons noter l'existence des apports (affluents) en aval.

- **Les petits ouvrages.**

Ils regroupent les petits barrages et les seuils de dérivation (seuils de moulins par exemple) :

- la fréquence kilométrique d'ouvrages,
- la hauteur de l'ouvrage,
- la franchissabilité en hautes eaux pour une espèce donnée (bonne, moyenne, mauvaise),
- la fonction (hydroélectricité ou autres).

III.3.1.2. LES AMENAGEMENTS LONGITUDINAUX.

Ils sont caractérisés généralement par les travaux de chenalisation, incluant outre les dragages ,épis, digues, enrochements..., notons que les travaux d'entretien en font partie.

Les méthodes de classification les plus fréquemment employées en chenalisation (*channelisation* en anglais) sont énumérées par Brookes et al. (1985,1988). Dans la majorité des cas, ces méthodes ne sont pas employées séparément mais de façon combinée, aboutissant à des interventions composites. Ils distinguent 5 types majeurs d'interventions : (i) Recalibrage, (ii) realignement, (iii) endiguement, (iv) protection des berges, (v) entretien.

- **L'entretien.**

Les renseignements proviennent principalement des SDVP. L'entretien ayant généralement pour vocation d'améliorer l'écoulement des eaux, et donc de lutter contre les crues, ce type d'intervention douce peut être mis en relation avec la forte occupation (agricole ou urbaine) des terres riveraines. Il concerne l'élimination de la végétation riveraine, le faucardage, le nettoyage, voire l'élimination de la végétation rivulaire (ripisylve, prairie). Il peut être décrit par le rapport entre tronçons entretenus et non entretenus (pourcentage des longueurs, présence / absence, ...). Nous avons pris en compte 3 catégories d'entretien des rivières :

- les cours d'eau non entretenus,
- les cours d'eau peu entretenus,
- les cours d'eau entretenus régulièrement.

- **La chenalisation.**

Nous avons choisi de traiter ce type d'intervention à part dans la mesure où nous disposons d'un nombre conséquent de cours d'eau pour lesquels cette donnée était

explicitement fournie. Les valeurs produites correspondent au pourcentage de tronçons chenalisés.

Elle pourrait aussi être décrite par :

- l'importance du linéaire touché,
- l'intensité de l'effet de l'aménagement par rapport à la forme originelle (peu chenalisé, très chenalisé, totalement chenalisé),
- l'ancienneté de l'ouvrage (date de réalisation),
- les objectifs ayant déterminé la construction de l'ouvrage (protection contre les inondations des terres agricoles, des lieux habités, ou protection d'autres ouvrages hydrauliques en aval).

III.3.1.3. LES ACTIONS D'AMENAGEMENT AU SENS LARGE.

Elles recensent tous les types d'interventions humaines directes sur les cours d'eau, incluant les barrages. Elles englobent les actions de chenalisation, qui sont traitées à part dans le paragraphe précédent. Elles peuvent éventuellement englober des actions d'entretien, de restauration, des digues que le chargé d'étude du SDVP a classées dans la rubrique "aménagement".

On emploiera ici les termes de cours d'eau "touchés" ou "non touchés". Les valeurs analysées correspondent au pourcentage de tronçons "touchés".

III.3.2. LES TRONÇONS RENSEIGNES.

III.3.2.1. NOMBRE TOTAL DE TRONÇONS RENSEIGNES.

Le Tableau 3.1 représente la distribution des tronçons individuels selon leur appartenance à une hydro-écorégion et à un rang. Sur les schémas piscicoles, 496 individus appartenant à des hydro-écorégions (les individus appartenant aux vallées alluviales ne sont pas traités dans cette étude), ayant au moins une information, ont pu être pris en compte.

Tableau 3.1 : La répartition des individus par hydro-écorégion et par rang pour le calcul de l'anthropisation.

<i>Hydro-écorégions</i>	<i>RANG au 1:100.000ème</i>					Total
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	
Massifs Armoricaux	8	24	21	19	6	78
Massif Central Bassin Loire Allier	2	18	15	10	3	48
Massif Central Dépressions Sédimentaires	4	7	11	5	4	31
Massif Central Plateau Limousin	18	52	42	26	11	149
Tables Calcaires	20	60	52	34	24	190
Total Loire	52	161	141	94	48	496

*Les cases grisées ne sont pas analysées du fait du manque d'individus dans notre effort d'échantillonnage.

III.3.2.2. QUELQUES CONSIDERATIONS SUR LE RECUEIL DE DONNEES.

La première interprétation de ces données porte sur le pourcentage d'information.

Si nous comparons le Tableau 2.2 du Tableau 3.1, nous pouvons remarquer que seulement 63% des tronçons recueillis lors des études sur la morphologie des cours d'eau ont pu être renseignés, i.e. trouvés dans les schémas piscicoles.

Les origines des données indéterminées peuvent provenir de 3 facteurs non exhaustifs :

3.2.2.1. L'inadéquation du recueil de données.

Pour cette approche, nous avons choisi de compléter les tronçons-individus recueillis pour les analyses de la typologie morphologique des cours d'eau. Cette méthode n'est pas totalement appropriée pour les raisons suivantes :

- la localisation de ces tronçons-individus dans les schémas piscicoles est difficile,
- la présence de ces tronçons-individus dans le SDVP n'est pas systématique.

3.2.2.2. Les petits cours d'eau.

Nombre de petits cours d'eau et ruisseaux de rang 1 et 2 ne sont pas pris en compte dans les schémas piscicoles, pour les 2 raisons suivantes :

- quand ils n'ont pas d'intérêt piscicole,
- quand ils se situent dans des bassins de très forte densité du réseau hydraulique.

Dans ces cas, les études portent généralement sur les cours d'eau de rang supérieur à 3.

3.2.2.3. Les problèmes liés aux dossiers des schémas piscicoles.

Les données concernant les SDVP du Bassin de la Loire sont recueillies dans les délégations du CSP de Poitiers principalement, de Lyon et de Clermont-Ferrand. La qualité est assez disparate entre sites. Parmi ces Schémas, certains sont réduits à des documents de synthèse, certains volets "administratif" ou "connaissances du milieu" des cartes thématiques font défaut. Plusieurs de nos tronçons, quels que soient leur rang, correspondent à des documents manquants. Ceci explique le fort pourcentage de lacunes auquel nous avons été confronté, malgré l'effort de standardisation mise en œuvre au lancement de la démarche.

Il sera indispensable de continuer l'effort entrepris par ces délégations régionales (particulièrement la Délégation du CSP Poitiers pour l'ensemble du bassin de la Loire) afin de compléter ces documents, les actualiser et les concentrer dans un lieu donné.

3.2.2.4. Les aménagements non représentés dans un SDVP.

Le niveau de finesse et de précision avec lequel ont été traités les différents thèmes est fortement dépendant de la culture initiale du chargé d'étude. Ainsi certains aménagements ne sont pas répertoriés ou mêmes pas représentés. Ces derniers concernent souvent les digues, les extractions, et les chenalizations. Aucune spécification n'est alors donnée à propos de leur nature (linéaire touché, objectifs, ...).

Rappelons que les SDVP étaient principalement orientés vers les aspects qualitatifs de l'eau, les problèmes de franchissement des ouvrages hydrauliques, et les gestions de peuplement piscicole. Les aspects liés aux aménagements ne sont généralement traités qu'en tant que paramètres complémentaires, susceptibles d'altérer ces peuplements.

Les Tableaux 3.2 à 3.4 indiquent le nombre de tronçons étudiés pour chaque type d'aménagement. Il en ressort que

1) seuls 62% des tronçons étudiés pour leur morphologie ont pu être renseignés sur le critère des aménagements directs.

2) l'entretien présente le pourcentage des individus-tronçons "non renseignés" le plus élevé quels que soient les hydro-écorégions ou les rangs considérés. Seulement 30% environ des tronçons étudiés pour leur morphologie ont pu être renseignés sur ce type d'action.

3) ce sont toujours les petits cours d'eau de rangs inférieurs à 2 qui montrent des forts pourcentages des tronçons "non informés" quelle que soit l'hydro-écorégion prise en compte. En effet, il existe une relation, assez logique, entre les grands cours d'eau et le taux d'informations renseigné sur leurs aménagements dans les SDVP.

Les cases grisées des tableaux 3.1 à 3.4 montrent le nombre d'individus inférieur à 5, seuil en deçà duquel nous n'avons pas fait d'analyse statistique.

- Nombre total de tronçons renseignés pour les barrages.

Tableau 3.2 : La répartition des individus par hydro-écorégion et par rang pour le calcul de la fréquence de barrages.

<i>Hydro-écorégions</i>	RANG					Total
	1	2	3	4	5	
Massif Armoricaïn	2	13	13	12	6	46
Massif Central Bassin Loire Allier	2	11	13	10	3	39
Massif Central Dépressions Sédimentaires	2	5	9	4	3	23
Massif Central Plateau Limousin	12	36	37	26	10	121
Tables Calcaires	11	30	31	26	24	122
Total Loire	29	95	103	78	46	351

*Les cases grisées ne sont pas analysées du fait du manque d'individus dans notre effort d'échantillonnage.

- Nombre total de tronçons renseignés pour les actions d'entretien.

Tableau 3.3 : La répartition des individus par hydro-écorégion et par rang pour le calcul des actions d'entretien.

<i>Hydro-écorégions</i>	RANG					Total
	1	2	3	4	5	
Massif Armoricaïn	1	14	12	15	6	48
Massif Central Bassin Loire Allier		7	6	9	3	25
Massif Central Dépressions Sédimentaires		4	6	3		13
Massif Central Plateau Limousin	6	16	22	18	1	63
Tables Calcaires	9	22	32	22	15	100
Total Loire	16	63	78	67	25	249

*Les cases grisées ne sont pas analysées du fait du manque d'individus dans notre effort d'échantillonnage.

- Nombre total de tronçons renseignés pour la chenalisation.

Tableau 3.4 : La répartition des individus par hydro-écorégion et par rang pour le calcul de la chenalisation.

<i>Hydro-écorégions</i>	RANG					Total
	1	2	3	4	5	
Massif Armoricaïn	5	16	19	14	6	60
Massif Central Bassin Loire Allier	2	12	13	10	3	40
Massif Central Dépressions Sédimentaires	2	5	10	5	4	26
Massif Central Plateau Limousin	12	37	29	26	10	114
Tables Calcaires	11	33	38	24	21	127
Total Loire	32	103	109	79	44	367

*Les cases grisées ne sont pas analysées du fait du manque d'individus dans notre effort d'échantillonnage.

III.4. METHODES D'ANALYSE.

Malgré un nombre global de tronçons individus conséquent, leur partition en région/rang conduit à une certaine faiblesse des échantillons de base, ne permettant pas une analyse statistique poussée. Quelques traits marquants peuvent être toutefois identifiés.

Compte tenu de la très forte hétérogénéité des données explicitée précédemment, nous avons opté, en premier lieu, pour une analyse simplifiée. Nous essayons de définir la fréquence ou la présence (en pourcentage) des tronçons-individus sur chaque catégorie d'aménagement.

Nous examinerons les résultats des distributions des interventions selon la logique de validation et quantification des hydro-écorégions :

- leur distribution en fonction des rangs uniquement,
- leur répartition en fonction des couples : hydro-écorégion et rang,
- les relations entre les variables morphologiques et la fréquence des aménagements selon les hydro-écorégions.

Nous analyserons ensuite les relations entre les variables morphologiques et chaque catégorie d'aménagement selon une méthode de typologie par arbre de régression (Sonquist et Morgan, 1964, Breinman et al., 1984, Ciampi et al., 1987, Hastie et Pregibon, 1990). Cette deuxième analyse ne prend pas en compte le découpage a priori en hydro-écorégion.

III.5. RESULTATS A PARTIR DES SDVP.

Nous avons choisi dans ce chapitre :

- de prendre en compte les données des Schémas Piscicoles,
- de prendre la solution de quantifier, en fréquence de présence ou absence, en valeur moyenne (en %) du nombre de tronçon, mais pas sur le linéaire.

III.5.1. ANALYSE DE LA REPARTITION DES INTERVENTIONS EN FONCTION DES RANGS UNIQUEMENT.

L'objectif de cet angle d'analyse est l'identification des tendances d'aménagement par rang. Savoir, autrement dit, si tel ou tel type d'aménagement est-il plus fréquent sur les petits ou les grands cours d'eau ?

III.5.1.1. LA FREQUENCE DES BARRAGES.

La fréquence de barrages est une fonction croissante avec le rang : les "grands" cours d'eau (ordre égal à 5) sont les plus touchés avec un mode de distribution indiquant en moyenne plus de 2 barrages tous les kilomètres. Par contre les petits cours d'eau (ordre inférieur à 2) présentent un mode de distribution d'environ 1 barrage tous les 3 km (Tab 3.5).

Tableau 3.5 : Fréquence moyenne des fréquences décakilométriques de barrages suivant le rang.

<i>RANG</i>	<i>DMB* (Nbre par 10 km)</i>
1	2.8
2	4.0
3	4.9
4	4.6
5	5.7
Moyenne Loire	4.5

*DMB : Fréquence Moyenne de Barrages.

III.5.1.2. LES ACTIONS D'ENTRETIEN.

Le résultat le plus marquant du tableau 3.6 est qu'environ 50% des tronçons étudiés sont entretenus (peu ou régulièrement). Contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer, le Tableau 3.6 montre très clairement que ce sont les plus grands cours d'eau (rang ≥ 4) qui sont les plus régulièrement entretenus (fréquences moyennes variant de tronçons peu entretenus et entretenus régulièrement). Tout le problème est de savoir précisément de quel type d'entretien il s'agit : faucardage, essartage de la végétation riveraine, curage "doux" du lit. Cette gamme d'actions d'entretien est large mais n'est pas systématiquement précisée dans les SDVP.

Tableau 3.6 : Fréquence moyenne des présence ou absence d'entretien suivant le rang.

<i>Rang / % entretenus</i>	<i>Pas entretenus</i>	<i>Peu entretenus</i>	<i>Entretien régulièrement</i>
1	56%	25%	19%
2	57%	38%	5%
3	58%	27%	15%
4	34%	34%	31%
5	27%	46%	27%
Moyenne Loire	48%	34%	18%

Cela signifie cependant que les petits cours d'eau (rangs inférieurs à 3 : 55% à 58% pas entretenus, cf. Tableau 3.6) généralement non domaniaux ne sont pas (ou ne sont plus) entretenus par les propriétaires riverains. Ce désintéressement des riverains par rapport à leur rivière est constaté par de nombreux auteurs (CACAS, 1986). Cette tendance apparaît grossièrement après la seconde guerre mondiale, elle est expliquée en grande partie par l'abandon du chauffage individuel au bois, qui motivait l'entretien des forêts riveraines et son remplacement progressif par le charbon puis par d'autres types d'énergie.

III.5.1.3. LES ACTIONS DE CHENALISATION.

Il est difficile de tirer des conclusions vu la quasi proportionnalité des conditions sur les différents rangs. (de 15% à 40% chenalisés, Tab. 3.7). Tous les rangs sont touchés par les actions de chenalisation, avec ce qui est assez logique des interventions plus fortes sur les rangs 5.

Tableau 3.7 : Fréquence moyenne des présences ou absences de chenalisation suivant le rang.

Rang / % Chenalisés	Absence	Présence
1	75%	25%
2	70%	30%
3	72%	28%
4	86%	14%
5	60%	40%
Moyenne Loire	73%	27%

III.5.1.4. LES ACTIONS D'AMENAGEMENT AU SENS LARGE.

On observe un fort pourcentage des tronçons "touchés" (plus de 80%) quel que soit le rang considéré, même pour les cours d'eau en amont du bassin. Et ce pourcentage augmente avec le rang : plus le cours d'eau est grand, plus on y observe la présence humaine (Tab. 3.8).

Tableau 3.8 : Fréquence moyenne des présences ou absences des cours d'eau "touchés" suivant le rang.

Rang / % Aménagés	Non "touchés"	"Touchés"
1	19%	81%
2	16%	84%
3	9%	91%
4	6%	94%
5	5%	95%
Total	12%	88%

III.5.2. ANALYSE DE LA REPARTITION DES INTERVENTIONS EN FONCTION DES HYDRO-ECOREGIONS ET DES RANGS.

La question ici est de savoir comment ces tendances amont-aval observées dans le paragraphe précédent se déclinent en fonction des régions.

III.5.2.1. LA FREQUENCE DES BARRAGES.

Les cours d'eau de toutes les hydro-écorégions et rangs analysés comportent des ouvrages transversaux avec une fréquence moyenne comprise entre 0 (MCBLA et MA, rang 1) et 6.5 (TC, rang 3) tous les 10 km (Tab. 3.9).

Tableau 3.9 : Valeurs moyennes des fréquences de barrages sur 10 km.

Hydro-écorégion	DMB* (Nbre par 10 km)					Moyenne
	Rang	1	2	3	4	
MA	<i>n.d.</i>	2.2	5.4	5.2	5.7	4.3
MCBLA	<i>n.d.</i>	6.1	4.1	4.5	<i>n.d.</i>	4.4
MCDS	<i>n.d.</i>	5.2	4.7	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4.5
MCPL	0.9	2.2	3.6	4.3	5.7	3.3
TC	5.5	5.9	6.5	4.7	6.4	5.8
Moyenne Loire	2.8	4.0	4.9	4.6	5.7	4.5

*n.d. : couple région/rang non analysé dans cette étude.

C'est dans la région TC qu'on rencontre la fréquence maximale de barrages (ce qui est assez logique, c'est une région sèche et de plus formée de calcaire). En effet, quelque soit le rang, la fréquence de barrages dépasse plus d'un barrage tous les 2 km et atteint la valeur de 3 barrages tous les 2 km. Les petits cours d'eau de cette région sont plus utilisés par rapport aux petits cours d'eau de la région MCPL et MA. Par contre, les grands cours d'eau de rang 4 et 5 ont le même profil de fréquence que le type limousin et armoricain.

Globalement les petits cours d'eau dans les petits bassins d'altitude de la région du MCPL sont moins utilisés. Les cours d'eau du type MCPL commencent à être "fortement aménagés" à partir du rang 4, ce qui correspond plutôt aux micro-centrales qui sont d'ailleurs très concentrées dans cette région. Nous pouvons déduire donc que dans cette région la forte fréquence du barrage augmente avec la taille des rivières

Les petits cours d'eau de type MCBLA sont plus utilisés, avec une fréquence la plus forte que dans les autres hydro-écorégions (particulièrement dans les rang 2).

Les cours d'eau des Dépressions Sédimentaires du Massif Central n'ont été interprétées que sur les rangs 2 et 3 ; ils ont respectivement des fréquences de barrages de 5.2 et 4.7 tous les 10 km.

Et enfin, la région Massif Armoricain présente des forts pourcentages pour les aménagements transversaux dans les cours supérieurs (rangs ≥ 3). Les petits cours d'eau de cette région semblent moins utilisés que les autres régions du bassin de la Loire (particulièrement dans les rangs 2, avec une fréquence de 2 barrages tous les 10 km)

Notes :

1. Il est intéressant de noter aussi que ces fréquences de barrage associées aux pentes des vallées (ou de la ligne d'eau) et aux débits réservés (ou éclusées) entreront dans la définition des indices de contrôle de l'écoulement des cours d'eau (en amont et aval du tronçon). Nous verrons cette approche dans la troisième Partie (Chapitre 6) de la thèse.

2. Ne connaissant pas le type et la vocation précise de ces ouvrages avec cette analyse, il semble difficile d'aller plus loin dans l'interprétation. Néanmoins, quelques commentaires sont avancées au paragraphe III.6.4.

III.5.2.2. LES ACTIONS D'ENTRETIEN

Les résultats sont donnés dans le Tableau 3.10 :

Tableau 3.10 : Valeurs des pourcentages moyens des tronçons entretenus par hydro-écorégion et par rang.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Rang</i>	<i>Pas entretenus</i>	<i>Peu entretenus</i>	<i>Entretiens réguliers</i>
MA	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	71%	29%	0%
	3	83%	8%	8%
	4	73%	27%	0%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MA</i>		73%	22%	4%
MCBLA	2	71%	29%	0%
	3	50%	50%	0%
	4	22%	78%	0%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCBLA</i>		44%	56%	0%
MCDS	2	50%	50%	0%
	3	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	4	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCDS</i>		54%	46%	0%
MCPL	1	50%	33%	17%
	2	56%	38%	6%
	3	68%	14%	18%
	4	17%	22%	61%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCPL</i>		48%	24%	29%
TC	1	56%	22%	22%
	2	45%	45%	9%
	3	38%	41%	22%
	4	32%	23%	45%
	5	13%	53%	33%
<i>Moyenne TC</i>		36%	38%	26%
<i>Moyenne Loire</i>		48%	34%	18%

*n.d. : couple région/rang non analysé dans cette étude.

Dans la région du Massif Armoricain, les cours d'eau étudiés sont en majorité non (avec des fréquences supérieures à 70%) ou peu entretenus par rapport aux autres cours d'eau de l'ensemble du bassin de la Loire. Et les cours d'eau de rang 3 sont les plus concernés, avec 83% des tronçons étudiés. La mention de cours d'eau régulièrement entretenus est faiblement représentée (8% pour le rangs 3 et 0% pour le rang 2 et 4). Les tendances suivant le rang ne sont pas décelables.

Aucune mention de cours d'eau entretenus régulièrement n'est faite dans la région Haute Loire-Allier et cela quel que soit le rang. La proportion des rivières non entretenue dans cette région diminue avec la taille des cours d'eau.

Les grands cours d'eau (domaniaux ?) de rang 4 de type Limousin sont entretenus plus régulièrement (le pourcentage atteint 60%). A l'inverse, les petits cours d'eau de rang inférieur à 3 ne sont plus (supérieur à 50%) ou peu (14% à 38%) entretenus.

Les cours d'eau de la région Tables Calcaires sont manifestement plus régulièrement entretenus que les autres régions, quelle que soit la taille des cours d'eau considérés. 56% des cours d'eau de rang 1 ne le sont pas. Alors que 33% des cours d'eau de rang 5 le sont régulièrement.

III.5.2.3. LES ACTIONS DE CHENALISATION.

Globalement, les cours d'eau des hydro-écorégions du Massif Central (MCBLA, MCPL et MCDS) sont les moins touchés par ce type d'aménagement (fréquence d'intervention inférieure à 20% sur les tronçons étudiés, Tab. 3.11). Ces tronçons se trouvent principalement dans des régions de montagne (cela s'explique par l'encaissement).

Les cours d'eau de la région Massif Armoricaire ont une fréquence de présence de chenalisation de 20% à 30%. Seule exception, les cours d'eau de rang 4 où la fréquence est de 7%.

La région Tables Calcaires ressort toujours comme la plus touchée par les aménagements, la proportion de cours d'eau chenalisés étant particulièrement forte dans les rangs 2 et 5 (58% et 67%).

Notes :

1. Nous remarquons que les rivières de faible pente (Massif Armoricaire et Tables Calcaires) sont les plus chenalisées. L'impact de ces artificialisations dans ces régions tend à être de plus en plus irréversible (Brookes, 1988), Cf. étude dans la Partie 3, Chapitre 6.

2. Il est intéressant de noter aussi que dans la région Tables Calcaires, les cours d'eau d'ordre 1 et 2, qui ne sont pas entretenus pour 47% et 50% d'entre eux sont quand même chenalisés pour 45% et 68%. Cela pourrait signifier, mais cela reste à vérifier, que l'absence durable d'entretien peut parfois conduire à des actions d'aménagement relativement dures (curages, chenalisations) pour pallier en urgence aux problèmes d'inondation ou "d'aménagement" à but agricole.

Tableau 3.11 : Valeurs des pourcentages moyens des tronçons chenalisés par hydro-écorégion et par rang.

% Chenalisés			
Hydro-écorégion	Rang	Absence	Présence
MA	1	80%	20%
	2	63%	38%
	3	68%	32%
	4	93%	7%
	5	67%	33%
<i>Moyenne MA</i>		73%	27%
MCBLA	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	83%	17%
	3	100%	0%
	4	100%	0%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCBLA</i>		93%	8%
MCDS	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	80%	20%
	3	90%	10%
	4	80%	20%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCDS</i>		81%	19%
MCPL	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	92%	8%
	3	83%	17%
	4	100%	0%
	5	100%	0%
<i>Moyenne MCPL</i>		92%	8%
TC	1	55%	45%
	2	42%	58%
	3	50%	50%
	4	63%	38%
	5	33%	67%
<i>Moyenne TC</i>		48%	52%
Total Loire		73%	27%

*n.d. : couple région/rang non analysé dans cette étude.

III.5.2.4. LES ACTIONS D'AMENAGEMENT AU SENS LARGE.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.12,

Les principales remarques sont :

- 88% des cours d'eau étudiés sur l'ensemble du bassin de la Loire présentent au moins un aménagement, ce qui signifie, qu'aucun tronçon de cours d'eau (de 5km de longueur) n'est exempt d'intervention humaine,

- tous les cours d'eau appartenant aux couples hydro-écorégions et rangs considérés dépassent la proportion de 65% des tronçons "touchés" par des aménagements. Une forte majorité de ces couples ont des proportions de 90% ,

- les deux régions du Massif Central (MCPL et MCBLA) présentent une anthropisation croissante avec le rang de cours d'eau,

- les cours d'eau de l'hydro-écorégion MCPL ont des proportions d'individus "aménagés" moins grandes que les autres hydro-écorégions (78% en moyenne), et cela particulièrement dans les rangs 1 et 2 où 33% des tronçons apparaissent comme "naturels",

- dans la région Massif Armoricaïn les cours d'eau ont des fréquences de tronçons aménagés de 10% (rang 5) à 25% (rang 1),

- les petits cours d'eau (de rang 1 à 3) des Tables Calcaires sont tous "aménagés" à hauteur de 100%. C'est d'ailleurs dans cette région où au moins 90% des tronçons étudiés, quel que soit le rang, présentent une intervention humaine. C'est la plus forte proportion observée dans toutes les hydro-écorégions du bassin de la Loire.

Tableau 3.12 : Moyenne des tronçons aménagés par hydro-écorégions et par rang.

Hydro-écorégion	Rang	% Aménagés	
		Non touchés	Touchés
MA	1	25%	75%
	2	17%	83%
	3	19%	81%
	4	16%	84%
	5	10%	90%
<i>Moyenne MA</i>		17%	83%
MCBLA	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	22%	78%
	3	13%	87%
	4	0%	100%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCBLA</i>		17%	83%
MCDS	1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	2	14%	86%
	3	9%	91%
	4	0%	100%
	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>Moyenne MCDS</i>		6%	94%
MCPL	1	33%	67%
	2	33%	67%
	3	14%	86%
	4	4%	96%
	5	9%	91%
<i>Moyenne MCPL</i>		21%	79%
TC	1	0%	100%
	2	0%	100%
	3	0%	100%
	4	6%	94%
	5	4%	96%
<i>Moyenne TC</i>		2%	98%
Moyenne Loire		12%	88%

III.5.3. ANALYSES DE LA RELATION DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES COURS D'EAU ET DES FREQUENCES D'INTERVENTIONS. TYPOLOGIE.

Deux types d'approche ont été conduits :

Approche 1. La première analyse consiste à vérifier l'hypothèse suivante : la présence ou l'absence de chenalisation, par exemple, est-elle fonction de la pente des cours d'eau ou d'une des variables morphologiques caractéristiques du cours d'eau ? Ceci, sans tenir compte de leur appartenance à une région.

Pour répondre à cette question, dans le cadre de cette étude, nous avons pris comme exemple l'existence ou non de la relation entre la chenalisation et la pente de la vallée pour tous les cours d'eau de rang 2 du bassin de la Loire.

Figure 3.1 : Relation entre le pourcentage de tronçons chenalisés et la pente de la vallée.

Nous ne donnons ici qu'un exemple de ce type d'approche. Evidemment, il pourrait s'appliquer aux relations entre les autres types d'aménagement et les caractéristiques morphologiques des cours d'eau et cela sur l'ensemble des rangs.

Approche 2. L'objectif de cette deuxième approche est de relier l'ensemble des caractéristiques morphologiques des cours d'eau (combinaison linéaire) définis dans le Chapitre 2, type de vallée, avec les aménagements directs. Par exemple, mettre en valeur les liens entre la composition de la pente de la vallée, la sinuosité pour expliquer la distribution des barrages. Nous avons effectué notre analyse sans a priori régional.

Dans cette approche, nous avons utilisé la méthode de Classification par arbre de régression (Cluster Tree) qui est en simplification statistique une combinaison régression multiple et classification hiérarchique. Cette méthode s'applique aussi bien sur des variables discrètes et/ou continues, donc correspond bien à notre jeu de données.

Nous avons encore pris un exemple de l'application de cette analyse pour établir la relation entre la fréquence kilométrique de barrage en fonction des cinq variables : pente de la vallée, sinuosité, pente des versants, largeur du lit, et largeur du fond de vallée et cela pour les cours d'eau de rang du bassin de la Loire.

Figure 3.2 : Relation entre fréquences de barrages et les variables morphologiques.

Dans ces deux approches, nous avons pris des exemples d'analyse possibles par rapport aux jeux de données et que la méthodologie pourrait s'appliquer à d'autres questions moins triviales.

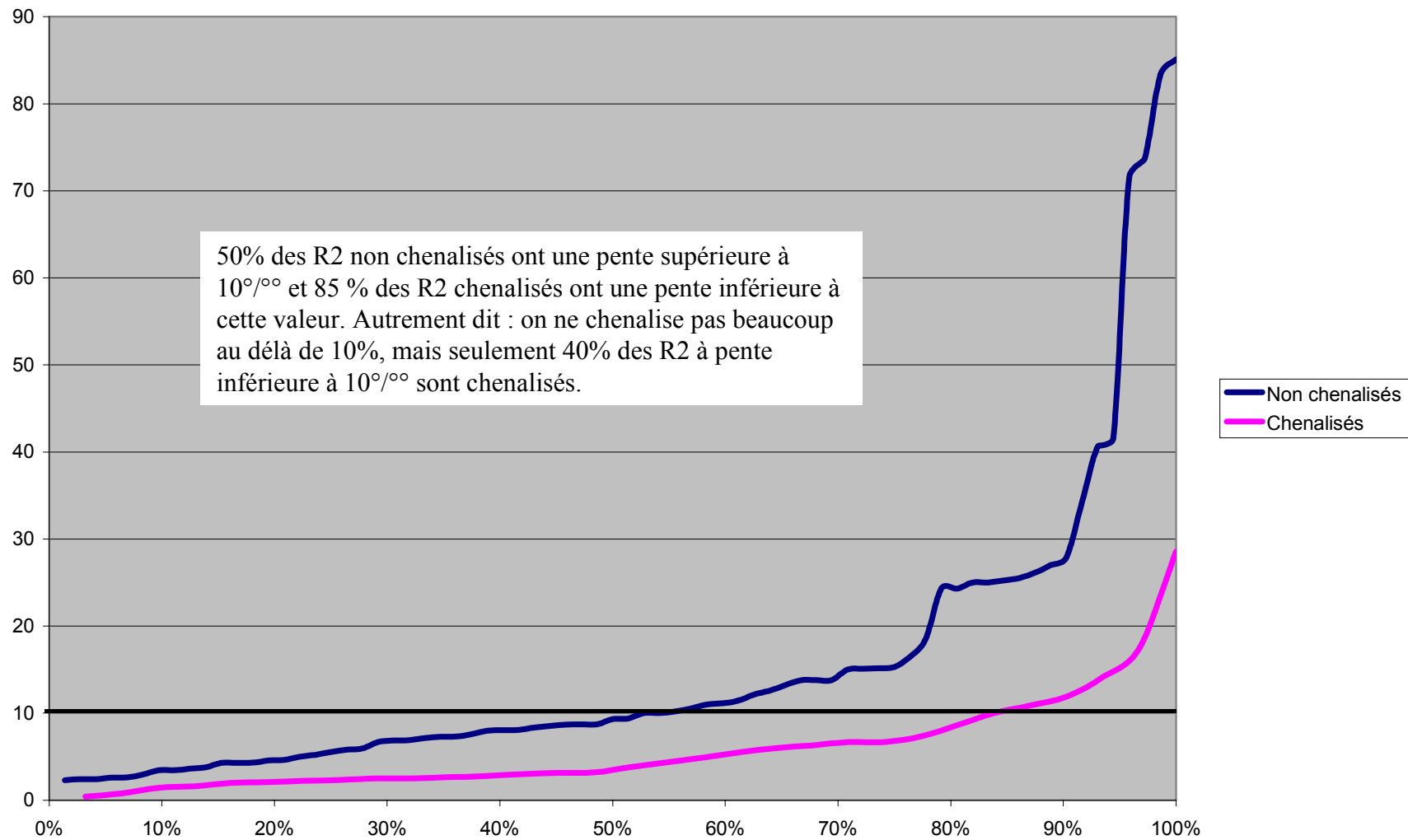


Figure 3.1 : Distribution des pentes da la vallée des cours d'eau chenalisés (échantillons sur les rangs 2 du bassin de la Loire).

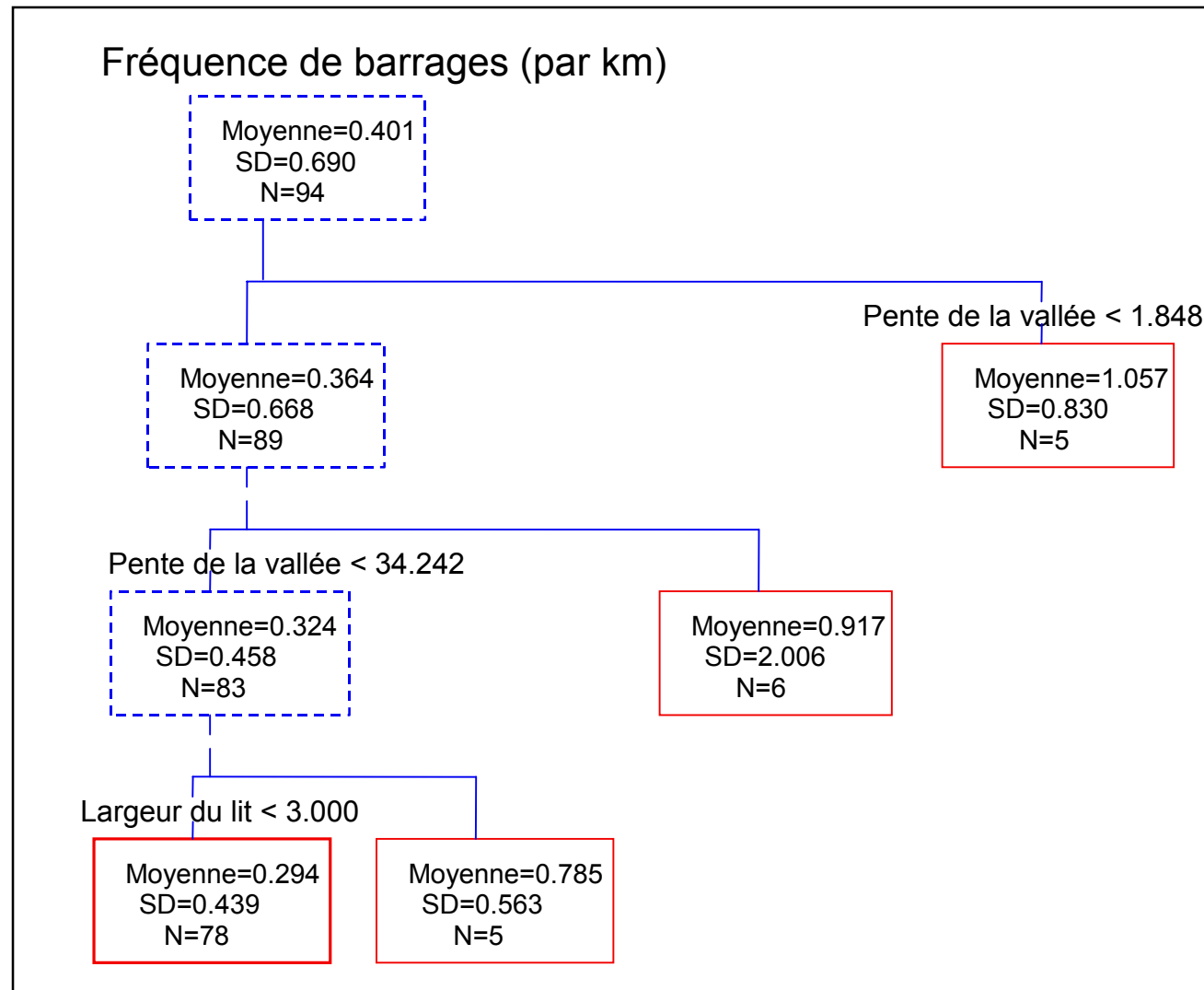


Figure 3.2 Exemple de classification en 4 GROUPES de la densité de barrage en fonction des 5 variables morphologiques pour les cours d'eau de rang 2.

Seules les deux variables pente de la vallée (PENDEV) et largeur du lit (LARLIT) expliquent la répartition des densités de barrage (DB).

SD : Ecart-type.

III.6. LES RESULTATS DU FICHER "BARRAGES" DE L'AGENCE LOIRE-BRETAGNE.

Cette autre source de données permet de travailler sur des caractéristiques complémentaires sur la distribution des barrages et leur type.

Remarque : dans le cadre de notre étude, les tronçons analysés dans le paragraphe III.5.1.1 sont indépendants du fichier "barrage" de l'Agence. Néanmoins, quelques redondances d'informations sur ces ouvrages pourraient survenir, dont nous ne tenons pas compte.

Nous avons pu extraire de ce fichier des barrages du bassin de la Loire les propriétés suivantes : localisation et densité, distribution des hauteurs et des volumes de retenues, vocation ainsi que la présence de dispositif de franchissement des poissons et débit réservé aval.

III.6.1. LOCALISATION ET DENSITE DES OUVRAGES.

Le fichier "barrages" de l'Agence de l'Eau a permis de faire rapidement une cartographie de la localisation des ouvrages transversaux importants. Leur répartition dans l'espace est représentée par la Figure 3.3.

Figure 3.3 : Les répartitions des barrages sur le bassin de la Loire.

Le Tableau 5.13 nous montre que c'est la région Tables Calcaires qui est la plus densément couverte en barrages (569), suivie des deux régions du Massif Central : la région MCPL (281) et la région MCBLA (155).

Tableau 3.13 : Nombre de barrages par hydro-écorégions.

Nombre de Barrage	<i>Nombre</i>	<i>Densité</i>
<i>Hydro-écorégion</i>		<i>Nbre/100</i>
		<i>km²</i>
Massif Armoricaïn	93	0.52
Massif Central Bassin Loire Allier	155	0.83
Massif Central Dépressions Sédimentaires	47	0.58
Massif Central Plateau Limousin	281	1.56
Tables Calcaires Ligériennes	569	1.15
Vallées Alluviales	109	1.96
Total Loire	1254	1254

Au niveau de la densité des barrages, c'est la région MCPL qui détient la plus forte concentration (1,56 barrages sur une surface de 100 km²), suivie de la région Tables Calcaires (1.15). Inversement la région Massif Armoricaïn possède la plus faible densité de barrages (1 barrage sur une surface de 200 km²).

N.B. : Il serait intéressant de rapporter la valeur de la densité surfacique de barrages à la densité du réseau hydrographique.

Ces résultats confortent ceux obtenus dans le paragraphe concernant les données des Schémas Piscicoles (§ III.5.1.1).

III.6.2. DISTRIBUTION DES HAUTEURS DE BARRAGE.

La figure 3.4 montre la distribution des hauteurs de barrage sur les 455 données renseignées du fichier de l'Agence où la valeur de cette hauteur est supérieure à 0 m. La hauteur médiane des barrages correspond à la valeur de 3 m.

Figure 3.4 : Les répartitions des hauteurs de barrages sur le bassin de la Loire.

Le Tableau 3.14 nous montre que les barrages les plus hauts (en moyenne) se trouvent dans le Massif Central Plateau Limousin (15 m). Par contre, dans les Tables Calcaires, ces ouvrages transversaux correspondent plus à des seuils de hauteur moyenne de 2m50.

Tableau 3.14 : Hauteur moyenne de barrages par hydro-écorégion.

Hauteur moyenne des retenues		
<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nombre</i>	<i>Hauteur Moyenne*</i>
Massif Armoricain	12	1055
Massif Central Bassin Loire Allier	86	1282
Massif Central Dépressions Sédimentaires	20	1236
Massif Central Plateau Limousin	87	1464
Tables Calcaires Ligériennes	164	265
Vallées Alluviales	25	279
Total	394	826

* en cm

III.6.3. VOLUMES RETENUS.

La Figure 3.5 représente la localisation et la capacité des ouvrages dont le volume est indiqué dans le fichier, quelle que soit leur fonction.

Figure 3.5 : Les répartitions des volumes retenus des barrages sur le bassin de la Loire.

La plus forte densité et les volumes les plus importants sont localisés dans le Massif Central (hydro-écorégions: Gorges des Haut-Allier, Limousin) et dans ses contreforts (axe Loire jusqu'à Nevers) ainsi que dans le massif du Morvan. Quelques ouvrages importants sont signalés dans le Val d'Anjou et dans un rayon de 100 km autour de ce secteur.

Tableau 3.15 : Volume retenu moyen de barrages par hydro-écorégions.

Volume moyen des retenus		
<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nombre</i>	<i>Volume moyen</i>
Massif Armoricain	9	4718
Massif Central Bassin Loire Allier	45	8468
Massif Central Dépressions Sédimentaires	5	13788
Massif Central Plateau Limousin	50	7320
Tables Calcaires Ligériennes	12	4285
Vallées Alluviales	3	4467
Loire	124	7446

* en millier de m³

En tête de bassin, le taux de régulation hydrologique (rapport entre le volume stocké et le volume écoulé ; Staron, 1990) dépasse 10% sur certains bassins.

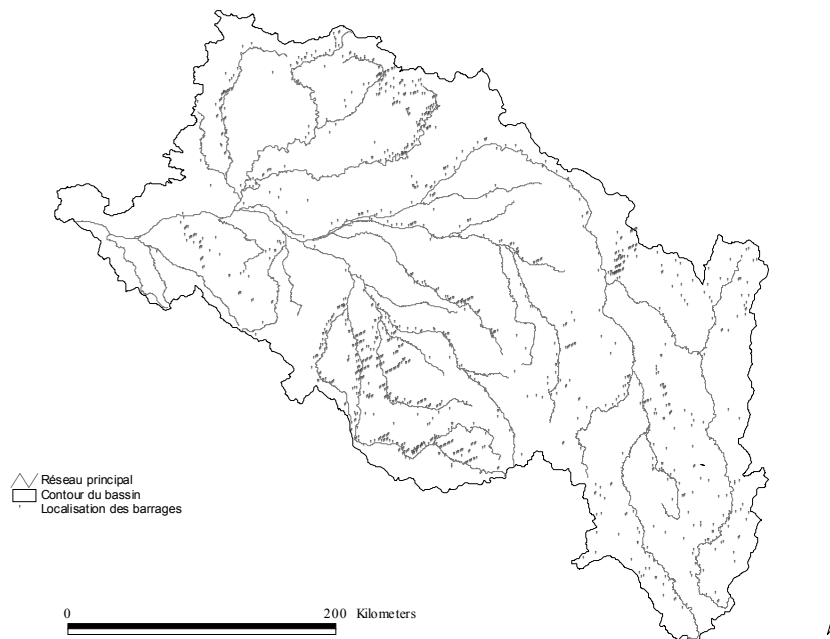


Figure 3.3 : Localisation des barrages sur le bassin de la Loire (Fichier Source : AELB, 1995).

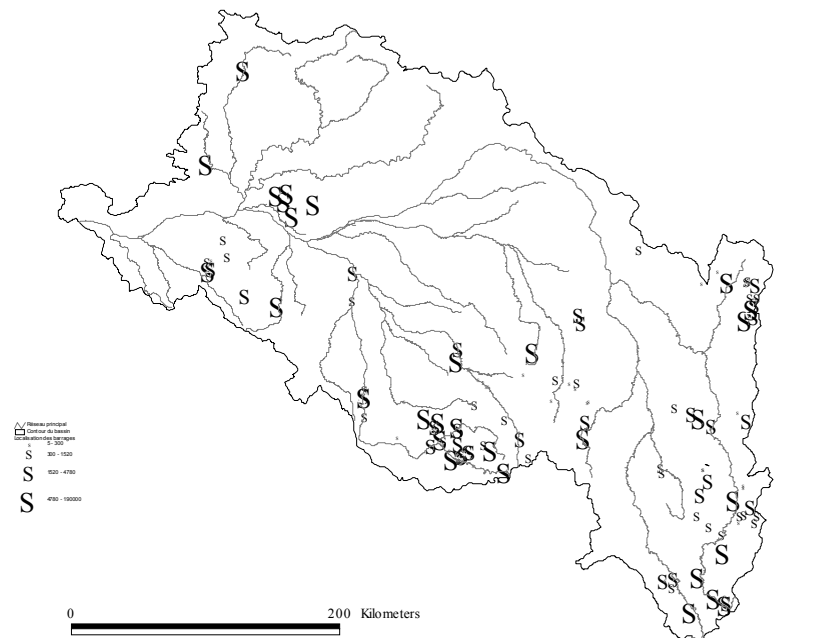


Figure 3.5 : Les répartitions des volumes retenus des barrages sur le bassin de la Loire (Fichier Source : AELB, 1995).

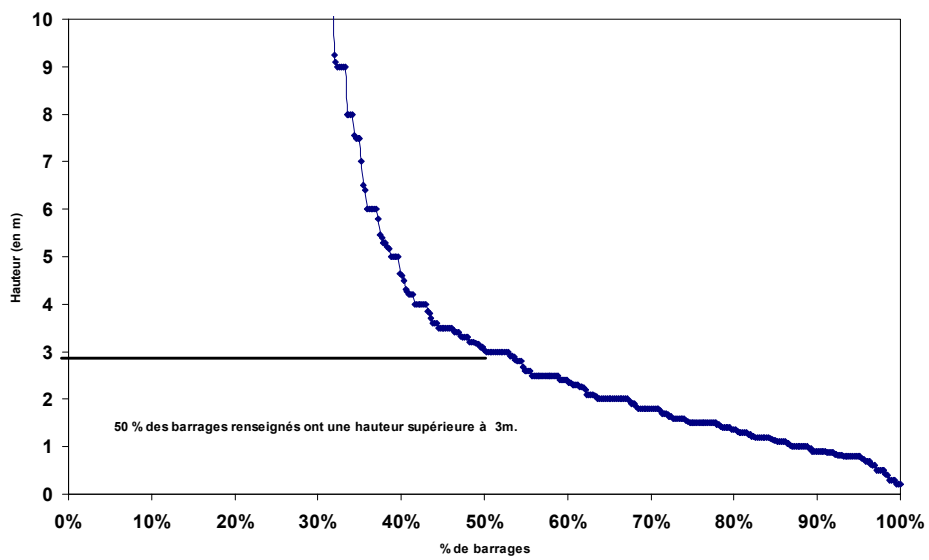
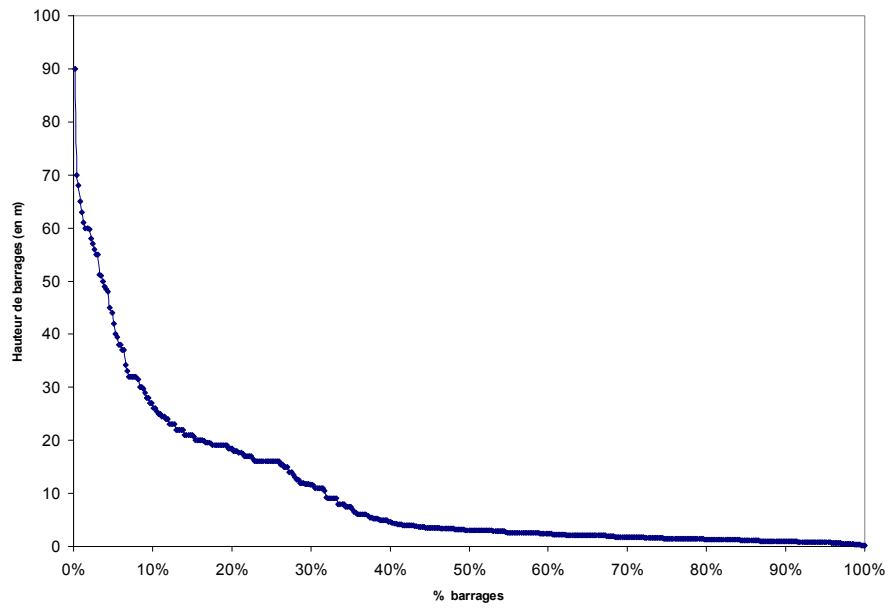


Figure 3.4 : Distribution des hauteurs barrages.
(Source AELB)

III.6.4. VOCATION DES OUVRAGES.

Nous avons décompté le même ouvrage à plusieurs rubriques.

Tableau 3.16 : Vocation des ouvrages par hydro-écorégion.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Défense contre les crues</i>	<i>Soutien d'Etiage et Irrigation</i>	<i>Hydroélect ricité</i>	<i>Distribution d'Eau Potable</i>	<i>Navigation et Industrie</i>	<i>Pêche et loisirs</i>
Massif Armoricaïn		5		8	8	3
Massif Central Bassin Loire Allier	4	3	73	22	13	11
Massif Central Dépressions Sédimentaires		2	15	4	4	1
Massif Central Plateau Limousin	1	5	66	20	7	21
Tables Calcaires Ligériennes	2	7	41	3	30	6
Vallées Alluviales	2	3	21		8	4
Total Loire	9	25	216	57	70	46

* en nombre de barrages.

6.4.1.1. la régulation hydrologique.

Elle concerne une trentaine d'ouvrages dont les plus importants sont localisés sur la Loire (Villerest) et l'Allier (Naussac). Une forte concentration est observée dans le val angevin.

6.4.1.2. l'irrigation.

Cette vocation est importante dans le val Angevin, le bocage Poitevin et la plaine du Forez, régions où le maïs irrigué occupe une place importante.

6.4.1.3. L'hydroélectricité.

Vocation dominante du Massif Central et sur ses contreforts (ce qui semble logique pour des raisons de hauteur de chute et de productivité), elle se propage cependant vers les basses vallées de la Vienne, de la Creuse et du Cher.

Les micro-centrales sont souvent rencontrées dans les régions où les grands barrages (de gros volume de stockage) ne sont pas installés.

6.4.1.4. Alimentation en eau potable.

Localisée pour l'essentiel dans le Massif Central limousin et dans le Morvan cette vocation est corrélée à deux facteurs majeurs qui sont la géologie et la densité de population (présence d'agglomérations importantes).

Les barrages à vocation d'AEP sont en effet localisés dans les terrains cristallins (Massif Central, Morvan, secteur Armoricaïn, Vendée) où les nappes sont de faible puissance ou inexistantes et à l'amont des grands centres urbains (St Etienne, Roanne, Clermont, Autun, Châteauroux, Nantes). La grande région sédimentaire est suffisamment pourvue de nappes phréatiques pour ne pas avoir besoin de barrages à vocation d'AEP.

6.4.1.5. Industries et navigation.

L'absence d'informations détaillées sur cette vocation ne permet pas d'interpréter finement la répartition des ouvrages.

6.4.1.6. Loisirs.

Signalée pour mémoire, cette vocation est rarement la seule à avoir déterminé la construction d'un barrage. Elle est souvent associée à une vocation première d'hydroélectricité, ce qui explique une répartition grossièrement calquée sur celle des centrales hydroélectriques, hormis pour le val Angevin et la Sèvre Nantaise où elle est indiquée pour des retenues ayant avant tout une vocation de régulation hydrologique.

III.6.4.2. AUTRES CARACTERISTIQUES.

Tableau 3.17 : Nombre de dispositifs de franchissement sur les barrages par hydro-écorégion.

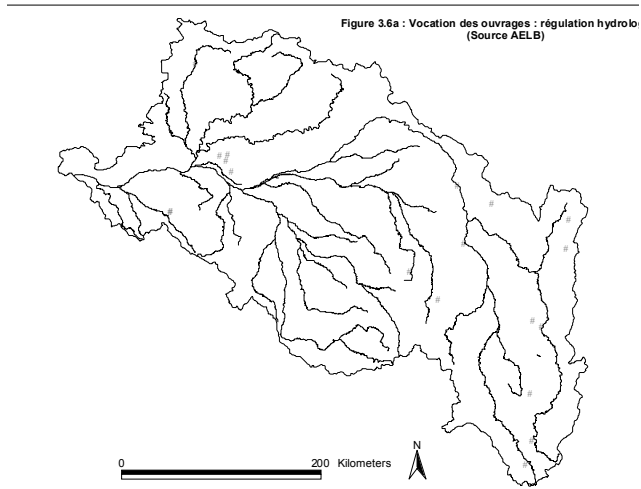
Dispositif de franchissement des poissons	
<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nombre</i>
Massif Armoricaïn	0
Massif Central Bassin Loire Allier	26
Massif Central Dépressions Sédimentaires	6
Massif Central Plateau Limousin	6
Tables Calcaires Ligériennes	1
Vallées Alluviales	1
Total Loire	40

Tableau 3.18 : Nombre de tronçons en débits réservés sur les barrages par hydro-écorégion.

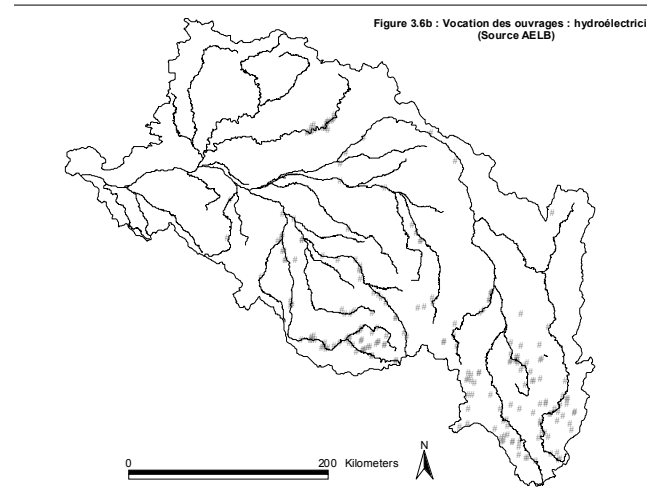
Ouvrage en débit réservé	
<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nombre</i>
Massif Armoricaïn	1
Massif Central Bassin Loire Allier	48
Massif Central Dépressions Sédimentaires	12
Massif Central Plateau Limousin	38
Tables Calcaires Ligériennes	5
Vallées Alluviales	6
Total Loire	110

La Figure 6.6 permet de localiser les ouvrages en fonction de leur vocation principale.

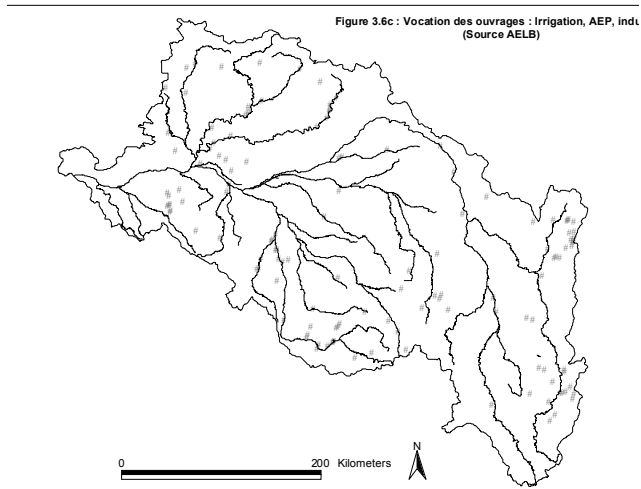
Figure 3.6 : Les vocations des ouvrages sur le bassin de la Loire.



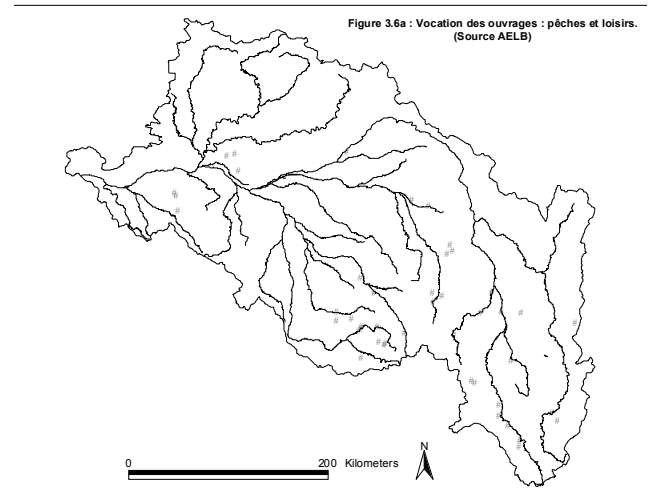
a. Régulation hydrologique



b. Hydroélectricité



c. Irrigation, AEP, industrie



d. Pêche et loisir

Figure 3.6 : Vocations des ouvrages (Source, AELB).

III.7. CONCLUSION.

Le but de ce chapitre était d'ébaucher les caractéristiques régionales des aménagements directs du bassin de la Loire et de son hydrosystème. Quelques traits marquants ont pu être identifiés :

- 90% des tronçons de 5 kilomètres linéaires étudiés présentent au moins une intervention humaine au sens des documents de travail SDVP,
- la fréquence moyenne des barrages sur l'ensemble du bassin de la Loire est de 0,45 par tronçon-individu, soit 1 à 2 barrages en moyenne par tronçon de 5km,
- plus de la moitié des tronçons étudiés ne sont pas entretenus, et ce sont les petits cours d'eau qui sont les plus concernés,
- plus du quart des tronçons-individus sont touchés par des interventions humaines de type chenalisation,

Ces différentes caractéristiques ont une composante régionale marquée :

- les hydro-écorégions Sédimentaires, TC et MCDS sont les plus touchées ; elles présentent le plus fort cumul d'impacts du fait de leurs caractéristiques morphologiques,
- la plus forte densité et les volumes les plus importants sont localisés dans le Massif Central MCPL, MCBLA et dans ses contreforts.

La pertinence de ces résultats est limitée par :

- la disponibilité des données qui ne permettent pas d'identifier et surtout de quantifier aisément les types d'interventions humaines directes subies par les cours d'eau,
- l'existence de documents homogènes couvrant la totalité du bassin. Les SDVP restent incomplets sur certaines rubriques.

Il est nécessaire pour la prochaine étape :

- de compléter le nombre de cours appartenant aux couples hydro-écorégions et rangs, ainsi que les nombres d'échantillons renseignés dans ces couples afin d'enrichir l'analyse des données et l'interprétation des résultats,
- de compléter les schémas piscicoles, si possible, par des enquêtes approfondies auprès d'organismes : la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts ou le Conseil Supérieur de la Pêche.
- de préconiser pour une actualisation des données majoritairement acquises entre 1985 et 1990. La comparaison entre 1985/90 et les autres données à venir (2000/2002) pourra s'avérer très riche, car elle permettrait de réaliser un début d'approche diachronique des interventions humaines.

Figure 3.7 : Résultat synthétique des caractéristiques des aménagements directs des cours d'eau par hydro-écorégion.

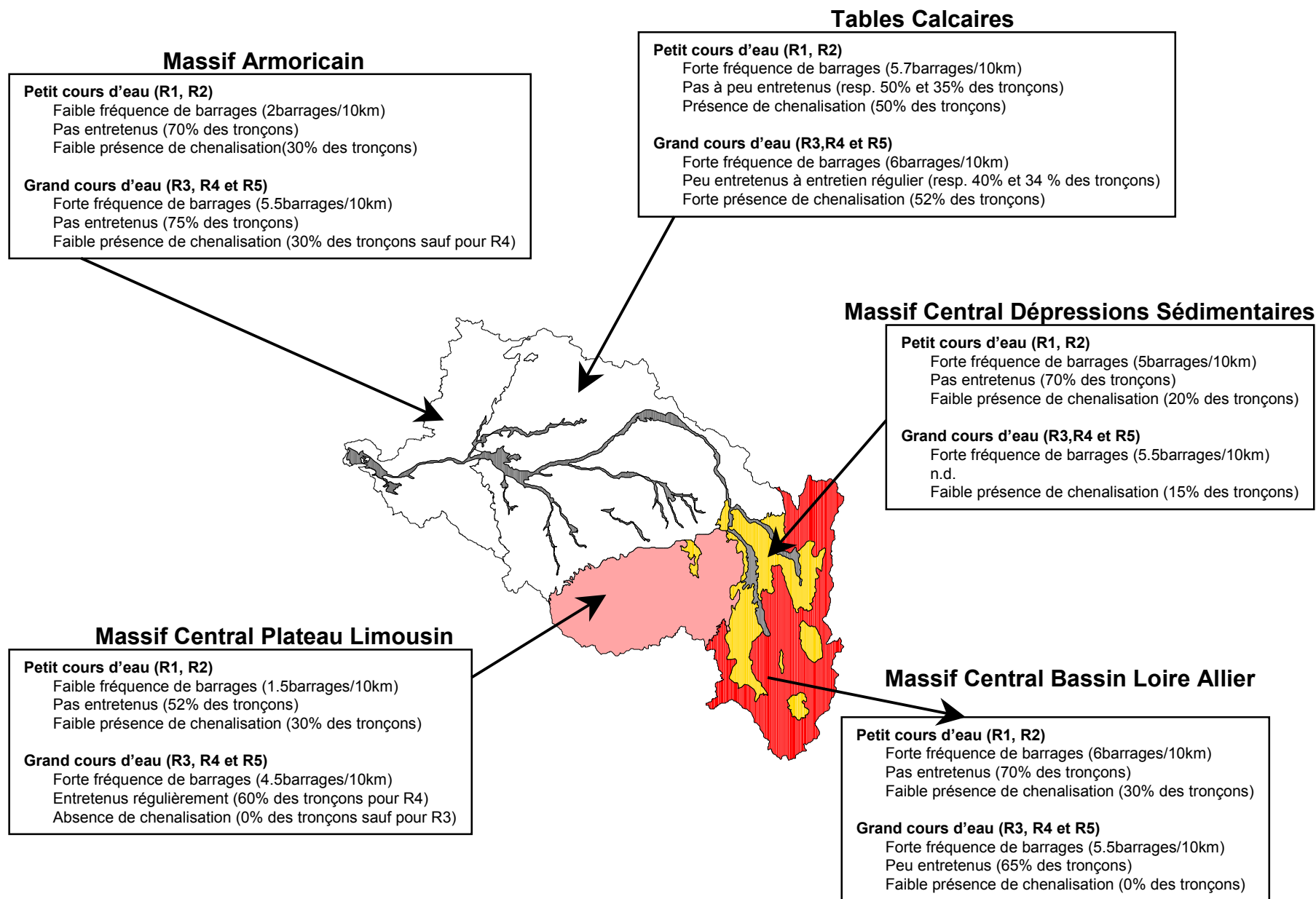


Figure 3.7 : Synthèse des caractéristiques des aménagements directs, par hydro-écorégion, des cours d'eau du bassin de la Loire.

Chapitre 4. Les modifications des régimes hydrologiques.

IV.1. INTRODUCTION.

La variabilité spatiale et la typologie des régimes ont été souvent étudiées en hydrologie. Dans le cadre du bassin de la Loire, des études ont été menées sur la typologie des régimes hydrologiques (Pardé, 1968 ; Dacharry, 1990). Une autre étude a été réalisée par le Cemagref (1995) sur la variabilité spatiale de débits minima en vue de l'application de l'article L.232-5 sur les débits réservés de la loi Pêche (1984). Galea et al. (1998) ont établi 7 modèles de synthèse de référence en débit-durée-fréquence, dits Qdf, de crues et d'étiages, sur l'ensemble du bassin de la Loire. Récemment, l'Agence de l'Eau Loire Bretagne a commandé une étude sur la variabilité spatiale des débits minimums biologiques sur le bassin de la Loire (AREA, 1997). Cette dernière est basée sur les hydro-écorégions de Wasson et al.; (1993). D'autres études sont en cours sur les débits biologiques de référence dans le cadre du SDAGE Loire Bretagne.

Il faut rappeler que l'Agence de l'Eau Loire Bretagne tient à jour les valeurs de débit sur les différentes stations du bassin de la Loire et la Bretagne (AELB, 1997). Plusieurs caractéristiques d'écoulement y sont indiquées pour chaque station : débits moyens inter-annuels, débits moyens mensuels, les débits saisonniers de basses et de hautes eaux, les débits spécifiques, les caractéristiques des crues, les caractéristiques des étiages. Néanmoins, à notre connaissance, il n'existe pas de travail de synthèse dans une optique de couplage avec l'hydroécologie sur les caractéristiques d'écoulement au niveau du bassin versant de la Loire.

Une des caractéristiques des débits des cours d'eau est leur extrême variabilité dans le temps. C'est ce constat qui nous amène à étudier les caractéristiques d'écoulement dites "éco-hydrologiques" exprimant au mieux cette variabilité temporelle. D'après la littérature, ces caractéristiques hydrologiques semblent influencer la structuration des écosystèmes lotiques dans leurs dimensions physique, biologique et écologique, d'où le vocable de caractéristiques "éco-hydrologiques" des cours d'eau. Cette variabilité se situe, dans la définition, en approximatif entre les quantiles 20% et 80% des débits d'une station. Nous avons donc délibérément choisi dans le cadre de cette thèse d'étudier plus particulièrement les caractéristiques d'écoulement auxquelles la biologie et l'écologie sont censées répondre. Les objectifs et hypothèses ont été fixés dans l'introduction générale.

Nous n'incluons dans ce travail ni l'étude des valeurs extrêmes de débit (fréquence de retour décennale ou plus), que ce soit en crue ou en étiage, ni leurs valeurs centrales. Les vocables de crue et d'étiage utilisés dans ce travail correspondent seulement aux valeurs des débits de crue et d'étiage récurrents dans le temps.

Le nombre des stations hydrométriques s'élève à 335, réparties en 2 catégories : naturelles et influencées. Le nombre des descripteurs est de 44, en se référant à la littérature avec pour objectif de caractériser les traits régionaux de cette variabilité éco-hydrologique.

La première étape du travail consiste à analyser ces tendances les caractéristiques éco-hydrologiques dans le cas des écoulements perturbés par une gestion humaine selon la base du découpage en hydro-écorégions.

Ensuite, nous établissons les grands traits régionaux de ces caractéristiques éco-hydrologiques (synthèse typologique) à partir des stations naturelles, et analysons les tendances des traits éco-hydrologiques définis dans le cas des écoulements perturbés par une gestion humaine.

Dans un second temps, cette abondance d'informations a permis une analyse régionale fondée sur les méthodes de classification statistique, faisant abstraction de l'a priori du découpage régional à base d'expertise. Il a donc été recherché une validation croisée des deux découpages, sachant que les méthodes statistiques de classification peuvent conduire à des résultats différents selon le choix des méthodes de discrimination entre familles d'indicateurs.

IV.2. BASES METHODOLOGIQUES.

Les principales théories écologiques appliquées aux écosystèmes lotiques (Southwood, 1977 ; Hortwitz, 1978 ; Connell, 1978 ; Ward & Standford, 1983 ; Hildrew & Townsend, 1987 ; Resh et al., 1988) font état du rôle de la variabilité temporelle des écoulements sur la structuration, les types d'association et les stratégies des espèces aquatiques. C'est en particulier la notion d'état biologique développée par Blandin et Lamotte (1985) qui nous a inspiré le découpage en domaines de fréquence de la variable d'état qu'est le débit en fonction du temps. Cette variable d'état est précisée par le travail de thèse de Malafosse (1996) qui nous a amené à distinguer deux domaines de réalisation des débits : (i) le domaine des réalisations fréquentes et (ii) le domaine des réalisations peu fréquentes des débits. Le domaine fréquent, qui correspond aux tendances centrales des distributions, est pratiquement toujours résumé par les paramètres statistiques classiques comme les modes, moyennes et indicateurs de dispersion. Le domaine peu fréquent est rarement caractérisé de manière indépendante. Cela nécessite donc une analyse par sous-échantillons des valeurs inférieures et supérieures des réalisations de débit. C'est ce que transcrit le choix des caractéristiques d'écoulement « originales » qui ont été rajoutées aux caractéristiques plus classiques.

Différents auteurs, dont Poff & Ward (1989), Jowett & Duncan (1990), Poff & Allan (1995) et Clausen & Biggs (1997) ont contribué à mettre en évidence un lien statistique entre certaines caractéristiques d'écoulement et des états de communautés aquatiques de milieux courants. En ce qui concerne l'altération des écosystèmes lotiques sous l'effet d'une modification des débits, Richter et al. (1996) proposent une méthode d'évaluation basée sur l'analyse de certaines caractéristiques hydrologiques. Nous avons donc extrait pour chacune des 335 chroniques hydrologiques un peu plus de quarante caractéristiques d'écoulement qui présentent un intérêt présumé pour les peuplements piscicoles et les organismes benthiques.

IV.3. PRESENTATION DES DONNEES HYDROMETRIQUES.

Les données utilisées sont extraites de la banque de données nationale HYDRO (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). Toutes les variables hydrologiques sont estimées à partir des chroniques de débit journalier.

Les stations retenues correspondent à deux critères :

- les stations ont une taille de bassin-versant inférieure à 2000 km² car d'une part, au-delà il est constaté une homogénéisation des comportements hydrologiques, et d'autre part, il est difficile d'isoler des bassins au fonctionnement hydrologique naturel. De même la taille inférieure est limitée à 10 km² pour éviter une trop grande sensibilité des écoulements à des prélèvements locaux non répertoriés,
- des chroniques de durée supérieure ou égale à 5 années pour assurer une bonne représentativité des variables échantillonnées.

Parmi les 335 stations retenues, 240 sont réputées en écoulement naturel et 95 en écoulement influencé. Leur répartition par hydro-écorégions (Wasson et al., 1993) est donnée dans le Tableau 4.1. La répartition géographique des stations est représentée sur la figure 4.1 et permet de constater la bonne représentativité spatiale de cet échantillon. A noter que les "zones blanches" sur la carte du bassin Ligérien sont le reflet de la réalité car la densité de drainage peut y être faible.

Tableau 4.1 : Répartition des stations par hydro-écorégion et des régimes hydrologiques.

Régions	Naturelles	Influencées	Total
Massif Armoricaïn (MA)	44	27	71
Massif Central Haut Bassin Loire Allier (MCBLA)	53	13	66
Massif Central Dépressions Sédimentaires (MCDS)	27	10	37
Massif Central Plateau Limousin (MCPL)	38	11	49
Tables Calcaires Ligériennes (TC)	73	27	100
Vallées Alluviales (VA)	5	7	12
Total	240	95	335

En grisé, région non étudiée dans ce travail.

IV.3.1. QUALIFICATION DES STATIONS EN REGIMES NATUREL OU INFLUENCE.

Les différentes causes de modification des régimes d'écoulement sont signalées pour l'ensemble du bassin de la Loire dans les documents "Caractéristiques hydrologiques du bassin Loire Bretagne" édités par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (1995).

Selon les causes, les stations sont réparties en trois catégories d'influences :

- naturelles (absence d'influence sensible sur les débits),
- naturelles reconstituées (les débits naturels sont reconstitués à partir de données d'usine comme la production d'énergie hydro-électrique journalière),
- naturelles influencées (la station subit l'influence d'une action sensible sur l'écoulement naturel, comme un barrage, des pompages).

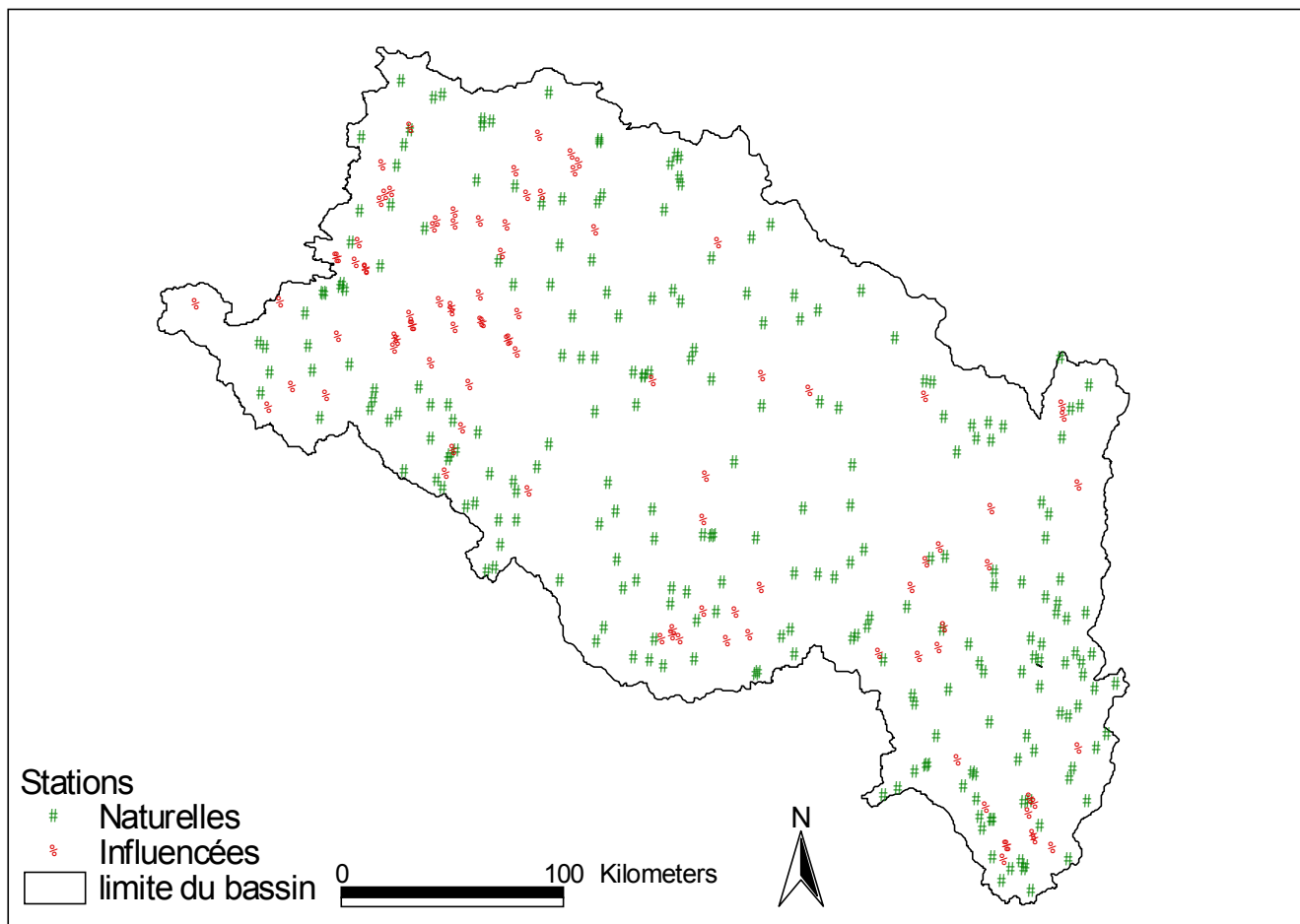


Figure 4.1 : Distribution spatiale des stations hydrométriques naturelles et influencées.

La deuxième catégorie est peu rencontrée sur l'ensemble du bassin de la Loire. Afin de conserver une référence aussi naturelle que possible dans notre approche de la variabilité éco-hydrologique, nous avons associé les catégories «débits reconstitués» et «débits influencés». Des types d'influences sont précisés dans les documents de l'Agence tels les barrages, moulins, vannages, prélèvements amont ou aval. Nous considérons que ces caractéristiques ne sont pas assez précises (taille des ouvrages, débit de fonctionnement) pour être subdivisées en sous catégories.

IV.3.2. ECHELLES DE TEMPS DES VARIABLES HYDROLOGIQUES.

Un découpage au pas de temps minimum d'un mois a été retenu pour le calcul d'un certain nombre de caractéristiques d'écoulement. Un pas mensuel permet de décrire l'évolution saisonnière des caractéristiques d'écoulement, toujours calculées à partir de débits journaliers, et de considérer les périodes infra-annuelles sensibles pour le développement de certains stades des espèces biologiques (poissons et invertébrés par exemple). Nous avons aussi défini, pour le régime essentiellement pluvial de la Loire et de ses affluents, deux saisons plus "synthétiques" : une saison de hautes eaux, de décembre à mai, et une saison de basses eaux, de juin à novembre. Dans ce cas nous avons retenu la moyenne des valeurs des caractéristiques mensuelles. Enfin nous avons aussi travaillé à l'échelle de l'année pour le calcul des caractéristiques d'écoulement classiques, tels que le module ou les débits classés.

IV.4. LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ETUDIEES.

Nous avons étudié les caractéristiques de débit réparties en deux catégories principales. L'une concerne des variables classiques décrivant les tendances centrales et extrêmes des écoulements. L'autre concerne des caractéristiques plus orientées vers la description de la variabilité hydrologique dans ses domaines fréquents et moins fréquents de fluctuation.

IV.4.1. LES CARACTERISTIQUES DE DEBITS.

Nous avons retenu 3 caractéristiques de débits :

- le module est le débit moyen inter-annuel d'un cours d'eau. C'est le descripteur le plus utilisé et le plus robuste (moins sujet à manipulation et biais de mesure). C'est à partir de sa valeur qu'on fixe par exemple les débits réservés légaux fixés $1/10^{\text{ème}}$ ou $1/40^{\text{ème}}$,
- pour les étiages, de nombreuses variables existent. Il est fait souvent référence aux quantiles relatifs au non-dépassement : biennaux, quinquennaux. Nous prenons en compte dans cette étude le QMNA5 qui est le débit mensuel le plus faible de chaque année de fréquence quinquennale sèche appelé aussi "débit de référence d'étiage". Ce débit est souvent utilisé pour les études d'impact (DIREN/SEMA). C'est aussi à partir de cette valeur de débit que sont fixés les objectifs de qualité de cours d'eau,
- pour les crues, nous avons choisi le débit de crue de période de retour égale à 2ans, le QJXA2 (qu'on appelle aussi "débit dominant" ou "efficace" des cours d'eau) qui caractérise le débit dominant ou débit de plein bord ou débit morphologique.

Plusieurs études (Léopold et al., 1964 ; Tricart, 1977 ; Petit et Daxhelet, 1989 ; Bravard, 1997) ont montré que cette fréquence est très variable (en moyenne de 1.58, Dury, 1976) selon les cours d'eau, mais pour une raison de commodité de calcul, nous avons retenu, la fréquence de 2 ans.

Ces trois caractéristiques ont été normalisées par la surface du bassin versant (variable la plus utilisée) pour les rendre comparables.

IV.4.2. CHOIX D'UN DEBIT DE STANDARDISATION POUR LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ECO-HYDROLOGIQUES.

Pour rendre comparables les valeurs des caractéristiques d'écoulement sur les différentes stations de la Loire, nous avons choisi le débit médian pour les normaliser. Ceci pour deux raisons.

Premièrement, dans la mesure où les distributions des surfaces (résumées par leur moyenne dans le Tableau 4.2) sont peu différentes entre les quatre grandes régions (les vallées alluviales et dépressions sédimentaires ne sont pas des entités régionales à proprement parler), nous considérons que la standardisation par la surface n'est pas pertinente. Cela est d'ailleurs cohérent avec le choix affiché de ne travailler qu'avec des bassins dont la taille est inférieure à 3000 km², les grandes surfaces tendant à atténuer la variabilité hydrologique.

Tableau 4.2 : Répartition des surfaces des bassins versants dans chaque hydro-écorégion.

<i>Moyenne des surfaces BV (km²)</i>	<i>Massif Armoricain</i>	<i>Massifs Central Bassin Loire-Allier</i>	<i>Massif Central Dépressions Sédimentaires</i>	<i>Massif Central. Plateau Limousin</i>	<i>Tables Calcaires</i>
Surface moyenne bv naturels	224	196	474	376	454
Surface moyenne bv influencés	472	409	958	898	461

Nous avons, alors, recherché une valeur de débit représentative de la capacité d'accueil d'une rivière. Cela revient à rechercher un débit dominant sur le long terme, c'est-à-dire représentatif des conditions de débit les plus fréquemment rencontrées au niveau de chaque station étudiée. Le mode (la valeur la plus fréquente dans l'absolu) des distributions de fréquence asymétriques des débits journaliers est peu pratique à déterminer. Nous lui avons préféré la médiane des débits journaliers. Nous avons vérifié que 60 % des débits centrés autour de la médiane représentaient en moyenne, et pour l'ensemble des 240 stations naturelles étudiées, environ 5 % de la variance totale des débits. La médiane inter-annuelle a donc été retenue comme référence du domaine des débits.

Deuxièmement, si nous prenons comme exemple le module inter-annuel, les deux figures 4.2.a et 4.2.b montrent assez clairement, que le débit médian inter-annuel donne un résultat plus satisfaisant que la surface du bassin versant.

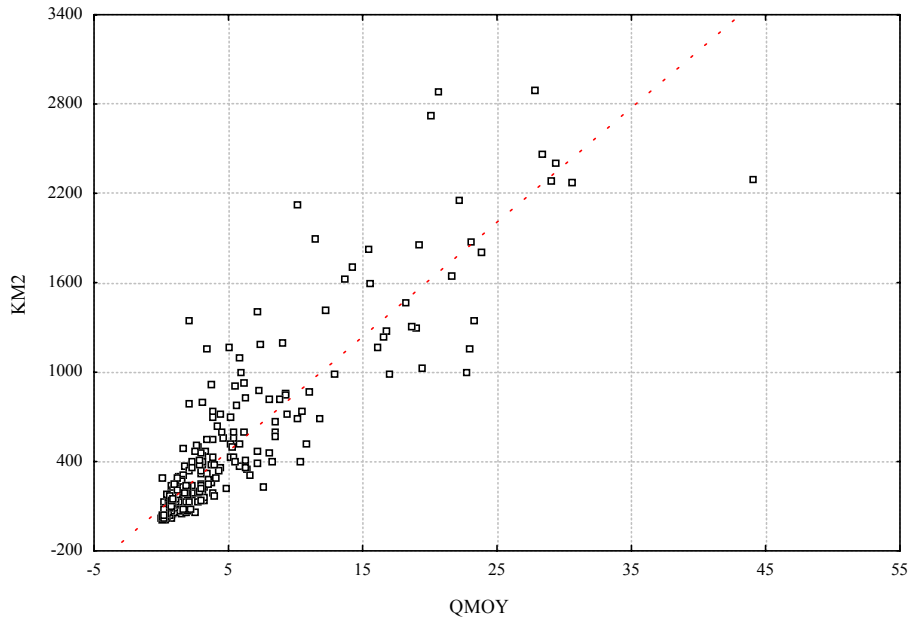


Figure 4.2.b : Graphe de corrélation entre le module Q_{moy} et la surface du bassin versant km^2

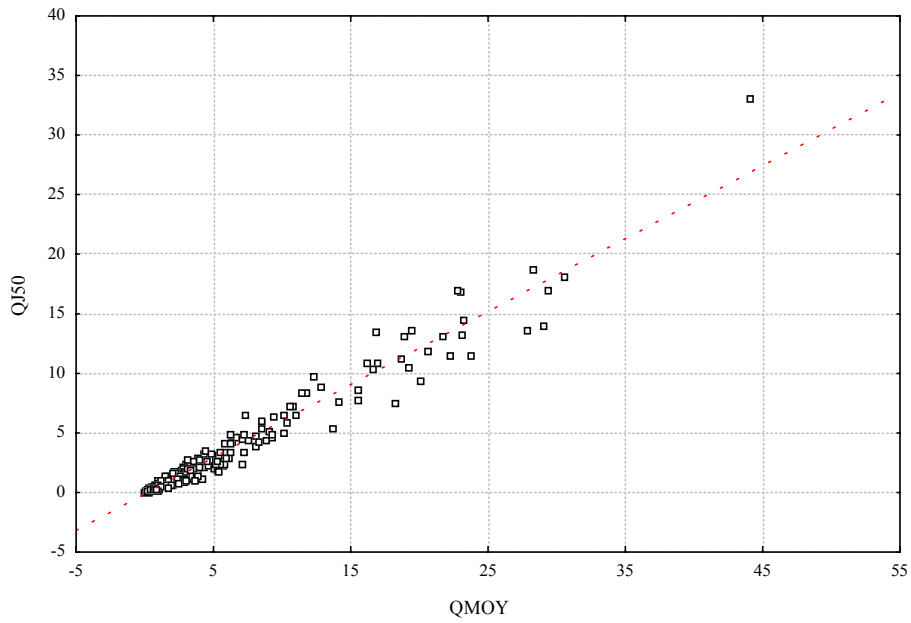


Figure 4.2.b : Graphe de corrélation entre le module Q_{moy} et le débit médian Q_{50}

Figure 4.2 : Graphe de corrélation entre le module Q_{moy} , le débit médian Q_{50} , et la surface du bassin versant Km^2 . Choix du débit de standardisation.

IV.4.3. LES CARACTERISTIQUES ECO-HYDROLOGIQUES.

Nous pouvons classer, suivant la littérature, les caractéristiques d'écoulement en 7 grandes catégories :

- la durée
- l'intensité
- la fréquence
- la prévisibilité
- la variabilité
- le changement d'état
- la période

La liste complète des caractéristiques d'écoulement étudiées est donnée au Tableau 4.3. La plupart des caractéristiques d'écoulement non centrales, ou encore descriptives des valeurs extrêmes, sont normées à la médiane des débits, représentative des débits fréquents (cette question est abordée dans le paragraphe précédent), quand cela a un sens.

Nous pouvons voir dans le tableau en Annexe 4, quelques exemples des rôles de chaque catégorie des caractéristiques d'écoulement dans l'écosystème aquatique (Richter, comm. pers., 1999).

IV.4.3.1. LES DEBITS CLASSIQUES.

On peut les classer en deux catégories : ceux qui représentent, pour l'essentiel, les débits fréquents comme le débit moyen, le débit médian et ceux qui bornent les débits moins fréquents l'écart-type de débit et le nombre d'état.

IV.4.3.2. LES DESCRIPTEURS "CEMAGREF".

Breil et Malafosse (1994 a,b), Malafosse (1996) ont développé des caractéristiques particulières d'écoulement basées sur les variations de débit et non plus les débits eux-mêmes. Les chroniques de débit journalier sont transformées en chroniques de variations de débit en soustrayant systématiquement au débit du jour le débit médian des 30 jours précédents. Nous effaçons ainsi l'effet cyclique saisonnier des conditions fréquentes de débit auxquelles les écosystèmes en place sont logiquement adaptés. C'est l'opération de « désaisonnalisation » du signal de débit.

Nous pouvons résumer les caractéristiques éco-hydrologiques définies par le Cemagref par :

- la variabilité hydrologique peu fréquente VHpF qui représente la capacité des écoulements à s'éloigner fortement (i.e. rapidement) du domaine de variabilité fréquente des débits journaliers,
- la variabilité hydrologique fréquente VHf qui décrit la limite du domaine des variations de fréquence annuelle,
- le rapport R des médianes mensuelles de débit à la médiane interannuelle pour une station donnée. La variable R mesure la 'distorsion' saisonnière des débits fréquents par rapport à la médiane interannuelle des débits d'une station. C'est une mesure complémentaire de celles des variables VHpF et VHf.

L'exploitation des chroniques dérivées de variations de débit nécessite de résumer le signal résultant de la « désaisonnalisation » sous la forme de coefficients descripteurs. L'échantillonnage des n variations maxima de débit journalier par saison mensuelle (dQ_{jxm}), permet de constituer des échantillons que l'on peut décrire par une loi exponentielle à deux paramètres (V_{hf} et V_{hpf}) qui sont liés par la relation :

$$dQ_{jxm} = V_{hf} + V_{hpf} \ln(T).$$

où T est la période moyenne de retour exprimée en années. V_{hf} représente la limite des variations de fréquence annuelle et V_{hpf} caractérise l'intensité et indirectement la dynamique des variations. Plus V_{hpf} est grand, plus le régime d'écoulement est à même de générer des variations de débit éloignées des conditions fréquentes.

IV.4.3.3. LES CARACTERISTIQUES D'ÉCOULEMENT DE PREVISIBILITE ET DE SAISONNALITE.

Le caractère saisonnier des conditions de débit joue aussi un rôle important dans la structuration des écosystèmes en raison des stades de développement plus ou moins sensibles des espèces au cours de l'année. C'est par exemple le cas des poissons en phase d'émergence. Colwell (1974) a proposé une méthode de calcul de ce caractère saisonnier de certains états. L'adaptation de cette méthode à l'étude des écoulements est proposée par Stearn (1981), Poff et Allan (1995) entre autres auteurs. Cette méthode est reprise ici.

IV.4.3.4. LES CARACTERISTIQUES D'ÉCOULEMENT DITES "ECO-HYDROLOGIQUES" DES ESPECES AQUATIQUES.

Ce sont des caractéristiques d'écoulement supposées influencer la dynamique des espèces d'eau courante. Leurs statistiques nous renseignent sur leur stabilité et par là même sur leur importance dans un processus de structuration sur le long terme pour l'écosystème en place. Certaines d'entre elles ont prouvé leur rôle discriminant dans la structuration spatiale des peuplements piscicoles (Poff et Allan, 1995) ou encore sur les diversités et abondances des communautés benthiques (Clausen et Biggs, 1997).

IV.4.3.5. LES CARACTERISTIQUES D'ÉCOULEMENT POUR ESTIMER L'ALTERATION HYDROLOGIQUE.

Richter et al. (1996, 1997, 1998) proposent une série de caractéristiques d'écoulement pour évaluer l'altération hydrologique liée à une gestion hydraulique. Ils distinguent cinq groupes d'indices d'altération hydrologique basés sur des traits hydrologiques souvent énoncés dans la littérature. Il s'agit de **l'amplitude des débits**, de leur **caractère saisonnier**, des **durées des conditions extrêmes**, des **fréquences** et **amplitudes des variations**. Le principe est alors d'observer les écarts entre conditions naturelles et influencées en considérant le domaine des réalisations probables en écoulement naturel.

Tableau 4.3 : Résumé des caractéristiques éco-hydrologiques étudiées.

	Code	Définitions
Signalétique de station	STA	Code de la station
	NAT	Nature du régime
	KM²	Surface du Bassin versant
	XLamb2	Position en X lambert 2 de la Station (Longitude)
	YLamb2	Position en Y lambert 2 de la Station (Latitude)
	NAN	Nombre d'années de la série hydrologique
Classique	QMOY/Q50 ou QMOY/KM²	Rapport de la moyenne inter-annuelle à la médiane (indice d'asymétrie de la distribution des débits journaliers)
	QMNA5/KM²	Moyenne inter-annuelle de fréquence de retour de 5 ans sec
	QJXA2/KM² ou QJXA2/Q50*	Débit journalier maximum d'occurrence moyenne 2 ans (proche du débit de plein bord)
	ECTQJ	Ecart-type des débits journaliers
	S	Nombre d'état des débits journaliers
Variabilité (Breil)	AHE	Variabilité hydrologique peu fréquente en hautes eaux (décembre à mai)
	ABE	Variabilité hydrologique peu fréquente en basses eaux (juin à novembre)
	AA	Variabilité hydrologique peu fréquente en valeurs annuelles
	BHE	Variabilité hydrologique fréquente en hautes eaux
	BBE	Variabilité hydrologique fréquente en basses eaux
	BA	Variabilité hydrologique fréquente en valeurs annuelles
	RHE	Rapport moyen Hautes Eaux de distorsion des débits fréquents (QJ50 HE (i=12..5)/ QJ50)
	RBE	Rapport moyen Basses Eaux de distorsion des débits fréquents (QJ50 BE / QJ50)
	RA	Rapport moyen Annuel de distorsion des débits fréquents (QJ50 annuel / QJ50 annuel)
	Prévisibilité (Colwell)	P
M		Contingence : probabilité d'observer une gamme de débit à certaine saison
C		Constance : probabilité de rester dans une gamme de débit indifféremment des saisons
Eco-hydrologiques (Poff et allan)	CV	Coefficient de variation des débits journaliers (S/QJMOY)
	FQS	Fréquence des « Spates » : nombre moyen par an de débits journaliers supérieurs à QJXA2
	BS	Indice de stabilité du débit de base = moyenne des rapports annuels DCN1/QMOY
Invertébrés Benthiques (Clausen et Biggs)	CRUAN	Nombre moyen de dépassement par an du seuil de débit égal à 3 fois QJ50
	Q10	Rapport entre les débits non dépassés 10% et 50% du temps. Plus l'indice est faible plus le creux de l'étiage est prononcé.
Altération hydrologique (Richter et al.)		
<i>Intensité et Période</i>	QMHE	Moyenne des débits mensuels de Hautes Eaux (décembre à mai)
	QMBE	Moyenne des débits mensuels de Basses Eaux (juin à septembre)
	QMA	Moyenne des débits moyens mensuels (1 à 12 mois)
<i>Intensité et Durée</i>	DCX1, DCX3, DCX7, DCX30, DCX90	Valeur du Débit Classé dépassé en moyenne n jours par an
	DCN1, DCN3, DCN7, DCN30, DCN90	Valeur du Débit Classé non dépassé en moyenne n jours par an
<i>Période</i>	JJDCX1	Moyenne des Jours Juliens (1..365) du DCX1 de chaque année
	JJDCN1	Moyenne des Jours Juliens (1..365) du DCN1 de chaque année
<i>Intensité, Période et Durée</i>	NHIP	Nombre moyen de hautes impulsions (High Pulse = débit supérieur à QMOY+2(ECTQJ)) par an.
	NLOP	Nombre moyen de basses impulsions (Low Pulse = débit inférieur à QMOY-2(ECTQJ)) par an.
	DHIP	Durée cumulée des hautes impulsions
	DLOP	Durée cumulée des basses impulsions
<i>Fréquence et Changement d'état</i>	ACCQJ	Moyenne des ACCroissements des débits journaliers
	DECQJ	Moyenne des DECroissances des débits journaliers
	NACC	Nombre des ACCroissements des débits journaliers
	NDEC	Nombre des DECroissances des débits journaliers

IV.5. METHODE D'ANALYSE COMPARATIVE DES DECOUPAGES REGIONAUX A BASE STATISTIQUE ET A BASE D'AVIS D'EXPERTS.

La première analyse consiste à comparer les stations naturelles et les stations influencées d'une même hydro-écorégion d'experts. Cette étape est réalisée à partir de tests statistiques non paramétriques de rang : le test U de Mann-Whitney.

Cette comparaison est réalisée pour chaque hydro-écorégion afin de :

- mesurer l'existence d'une différence entre les deux groupes (naturel et influencé) d'une hydro-écorégion ;
- sortir à partir de ce type d'analyse les caractéristiques d'écoulement les plus sensibles aux modifications des régimes hydrologiques.

La deuxième analyse consiste à valider la pertinence du découpage en régions d'experts sur les stations hydrométriques en régime non influencé.

Les différentes étapes de l'analyse comparative sont (figure 4.3 et 4.4) :

IV.5.1. ANALYSE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ENTRE LES STATIONS NATURELLES ET LES STATIONS INFLUENCEES.

- 1 - Analyse comparative entre les caractéristiques d'écoulement simples des stations influencées et non influencées dans chacune des hydro-écorégions ;
- 2 - Analyse comparative pour chaque caractéristique d'écoulement éco-hydrologique entre les stations influencées et non influencées dans chacune des hydro-écorégions ;

IV.5.2. DEFINITION DES TRAITES ECO-HYDROLOGIQUES A PARTIR DES STATIONS NATURELLES. ANALYSE COMPARATIVE AVEC LES STATIONS INFLUENCEES.

- 3 - Analyse des corrélations entre les caractéristiques d'écoulement calculées pour les stations naturelles, dans le but d'éliminer les redondances ;
- 4 - Analyse en Composantes Principales Normalisée (ACPN) pour définir des groupes de caractéristiques et les traits hydrologiques qu'elles représentent ;
- 5 - Comparaison des traits éco-hydrologiques entre les stations naturelles et influencées dans chacune des hydro-écorégions ;
- 6 - Analyse des effets des ouvrages hydrauliques sans a priori d'appartenance à une région ;

IV.5.3. PERTINENCE DES HYDRO-ECOREGIONS ET ESSAI DE REGIONALISATION DES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES A PARTIR DES STATIONS NATURELLES.

7 - Analyse discriminante pour quantifier la pertinence du découpage en hydro-écorégions à partir des caractéristiques d'écoulement éco-hydrologiques retenues dans l'étape 2 ;

8 – Comparaison inter-région des caractéristiques d'écoulement ;

9 - Typologie des stations hydrométriques basée sur une Classification, Ascendante Hiérarchique (CAH) des axes de l'ACPN ; répartition des types de régime dans les hydro-écorégions "experts".

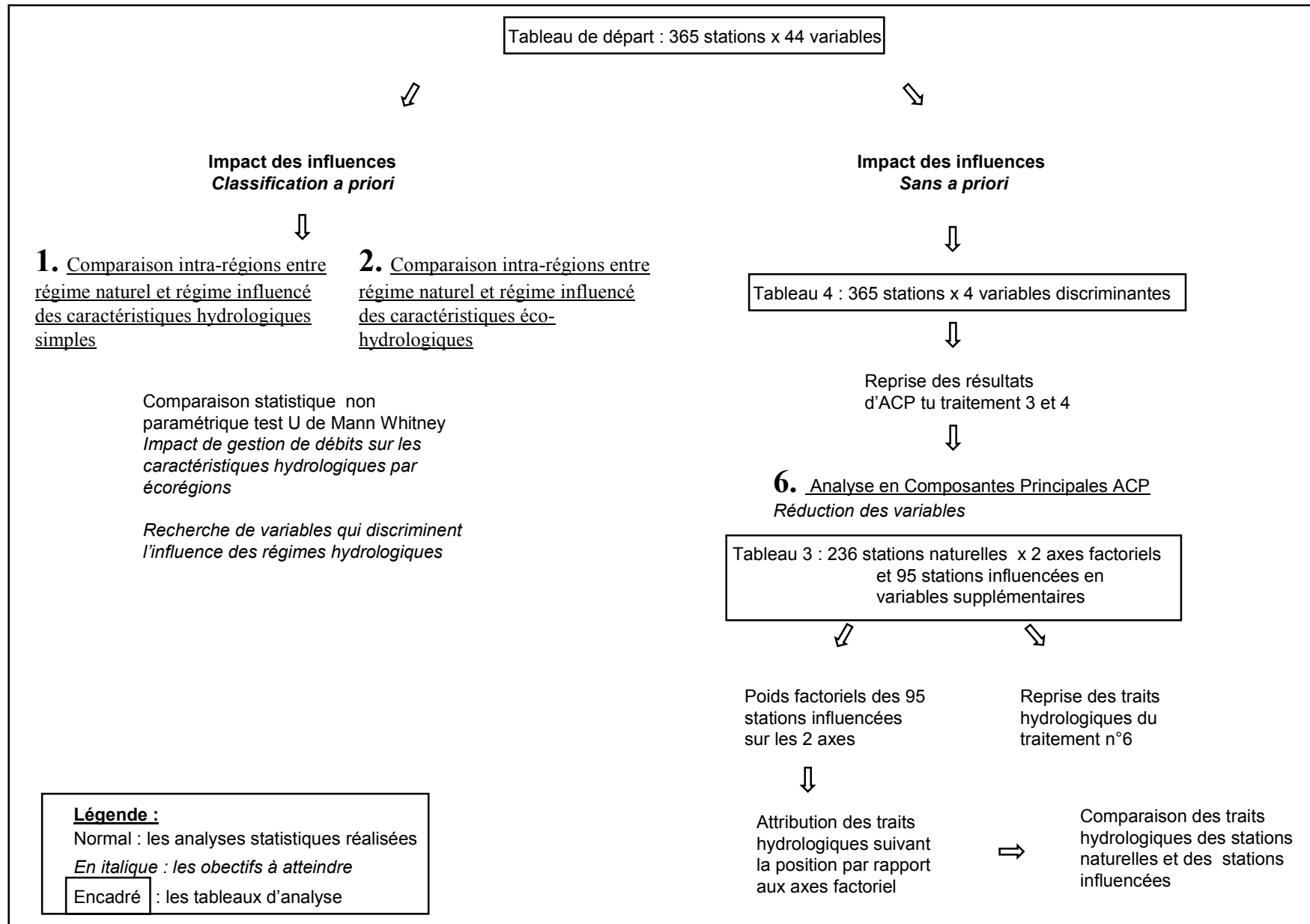


Figure 4.3 : Résumé des procédures d'analyse sur les caractéristiques hydrologiques. Stations hydrologiques en **régime naturel et en régime influencé**.

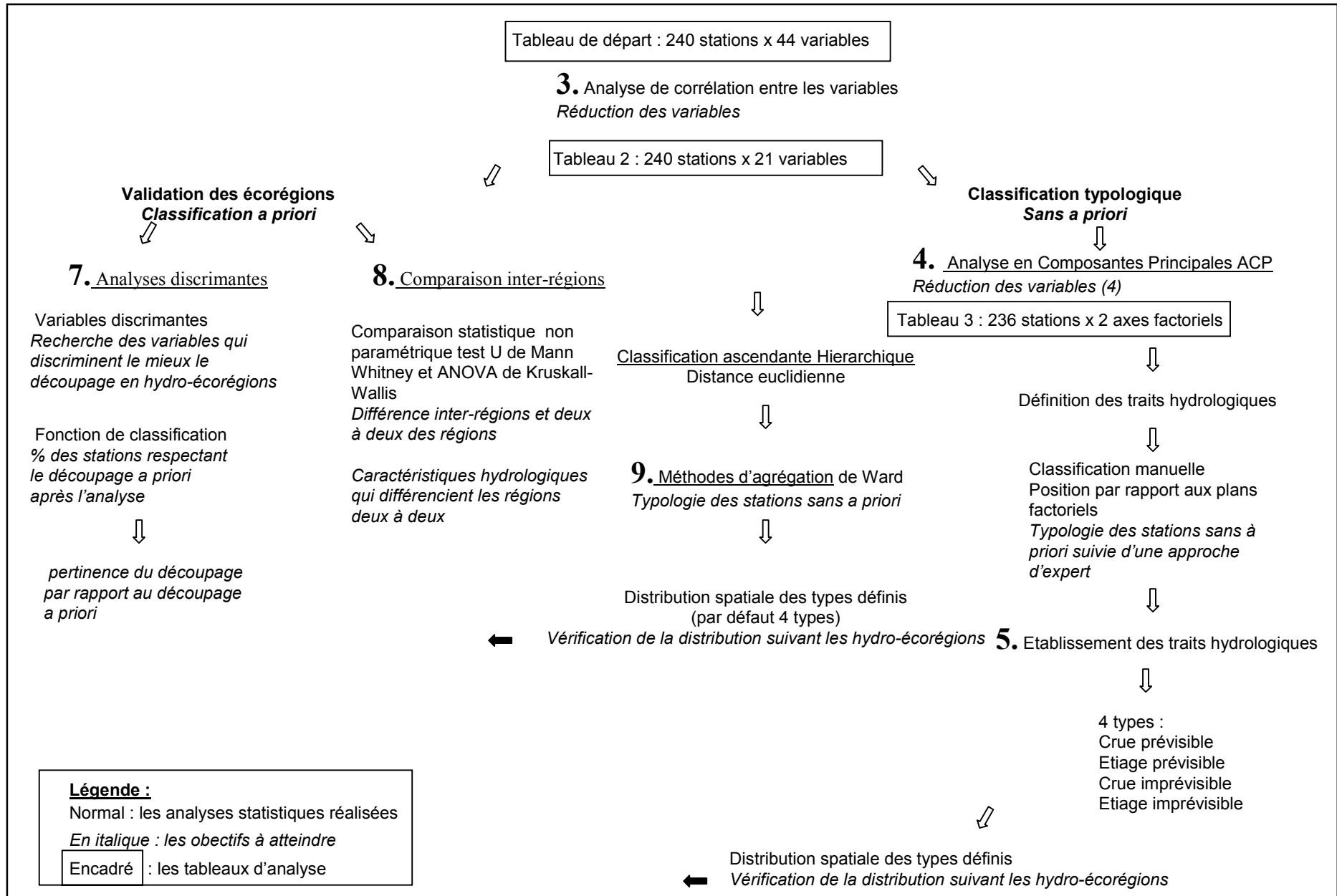


Figure 4.4 : Résumé des procédures d'analyse sur les caractéristiques hydrologiques. Stations hydrologiques en **régime naturel**.

IV.6. LES RESULTATS.

IV.6.1. UNE ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT.

Les principaux résultats sont illustrés par le Tableau 4.4, 4.5 et la Figure 4.5. Si l'on prend en compte l'ensemble des stations du bassin de la Loire, aucune différence statistique n'est observée entre les stations naturelles et influencées. Par contre, si nous prenons en compte les découpages régionaux, 3 régions sur 5 étudiées présentent au moins une différence statistique sur les trois caractéristiques étudiées. En effet, dans les régions MCDS et TC les stations hydrologiques étudiées ne présentent aucune différence au seuil statistique de 5% entre les deux cas de gestion des débits.

Dans la région MCBLA, les valeurs de QJXA2 et QMNA5 ont tendance à augmenter sous l'influence de la gestion des débits. Ceci pourrait provenir des éclusées des usines hydro-électriques.

Dans les TC, à l'inverse, les valeurs de QJXA2 des stations influencées sont inférieures aux valeurs des stations naturelles.

Dans le MCPL, les modules spécifiques augmentent sous l'influence de la gestion humaine.

Tableau 4.4 : Caractéristiques des stations naturelles et les stations influencées pour les caractéristiques d'écoulement.

	QMOY				QJXA2				QMNA5			
	Naturel		Influencé		Naturel		Influencé		Naturel		Influencé	
HER	Moy.	Ecart	Moy.	Ecart	Moy.	Ecart	Moy.	Ecart	Moy.	Ecart	Moy.	Ecart
MA	0.0074	0.0025	0.0070	0.0030	0.1051	0.0475	0.1032	0.0484	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001
MCBLA	0.0166	0.0074	0.0172	0.0061	0.1671	0.1344	0.2280	0.1082	0.0007	0.0015	0.0013	0.0014
MCDS	0.0120	0.0043	0.0100	0.0040	0.1161	0.0490	0.1118	0.0706	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
MCPL	0.0142	0.0056	0.0175	0.0068	0.1196	0.0395	0.1158	0.0415	0.0005	0.0006	0.0013	0.0019
TC	0.0062	0.0024	0.0054	0.0022	0.0726	0.0397	0.0499	0.0329	0.0004	0.0005	0.0006	0.0006

Tableau 4.5 : Résultats des comparaisons entre les stations naturelles et les stations influencées pour les caractéristiques d'écoulement.

HER	QMOY	QJXA2	QMNA5
MA	n.s.	n.s.	n.s.
MCBLA	n.s.	**	*
MCDS	n.s.	n.s.	n.s.
MCPL	*	n.s.	n.s.
TC	n.s.	**	n.s.
LOIRE	n.s.	n.s.	n.s.

HER	QMOY	QJXA2	QMNA5
MA	-5%	-2%	-111%
MCBLA	4%	27%	44%
MCDS	-19%	-4%	-22%
MCPL	19%	-3%	60%
TC	-15%	-46%	26%

** différence très significative ; * différence significative, n.s. pas de différence.

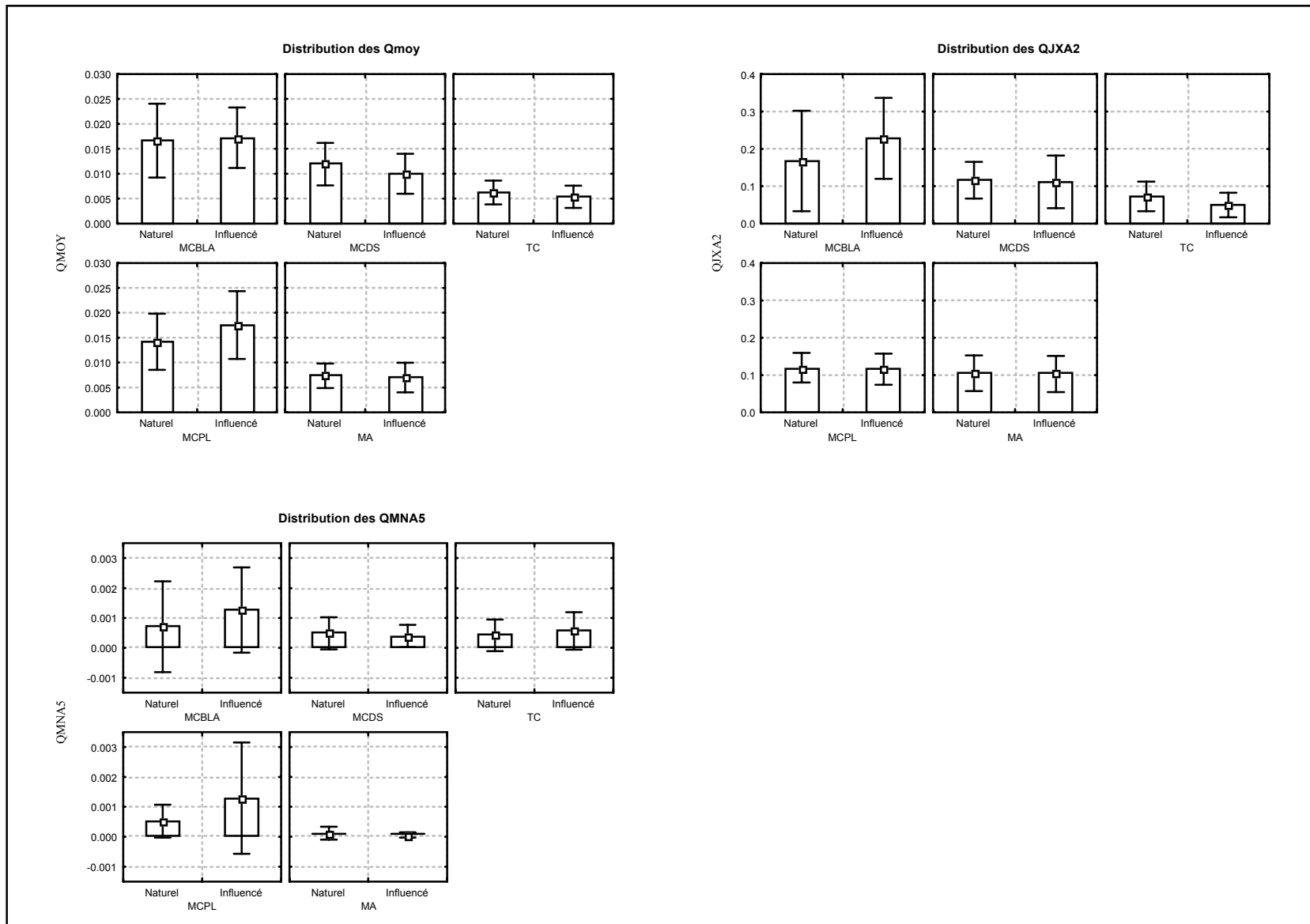


Figure 4.5 : Comparaison entre les stations naturelles et les stations influencées sur les 3 caractéristiques d'écoulement.

IV.6.2. UNE ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES STATIONS NATURELLES ET INFLUENCEES SUR LES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT ECO-HYDROLOGIQUES.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.6 et 4.7. Nous donnons ici quelques résultats marquants.

Les NACC (nombre d'accroissement des débits journaliers) ressortent comme les caractéristiques d'écoulement qui différencient le mieux les régimes influencés des régimes non influencés, basés sur le découpage en hydro-écorégion. Les Q_{moy} , le V_{Hf} en HE et BE, V_{Hpf} en BE, le QJXA2, le DCX1 et le DCN30 discriminent les deux groupes pour 3 régions sur 6.

Le Massif Central Plateau Limousin (MCPL) compte 26 (sur les 44 étudiées) caractéristiques d'écoulement qui différencient statistiquement les stations naturelles des stations influencées.

Dans le Massif Armoricaïn (MA), les V_{Hpf} ne sont pas affectés par les modifications des régimes, ce qui peut signifier la présence d'ouvrages de petite capacité ou de petites structures (seuil de moulin,...).

L'effet des aménagements hydrauliques semble affecter de manière sensible le régime des crues en hautes eaux (V_{Hpf} en HE, QJXA2, DCXn), ce qui peut traduire l'existence de grosses capacités de stockage. Pour les régions MCDS et MA, d'autres caractéristiques différencient les deux groupes. Pour cette dernière, les caractéristiques sensibles reflètent plus l'existence de petites retenues à même d'agir sur des débits de crues intermédiaires.

Nous ne pouvons avancer dans nos interprétations tant que nous ne connaissons pas les types d'aménagement qui génèrent les influences des régimes hydrologiques. Nous ne donnons que ces quelques hypothèses sur la sensibilité des caractéristiques étudiées aux influences des ouvrages hydrauliques.

Tableau 4.6 : Comparaison entre les stations naturelles et les stations influencées par hydro-écorégion.

		MCBLA	MCDS	MCPL	TC	MA	LOIRE	rang de discrimination (sur 6)
	<i>Naturel</i>	53	27	38	71	44	235	
	<i>Influencé</i>	13	10	11	27	27	88	
Classique	QMOY_Q50	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	ECTQJ	n.s	n.s	**	**	n.s	n.s	2
	S	n.s	n.s	**	n.s	n.s	n.s	1
Variabilité (Breil)	AHE	*	n.s	**	**	n.s	n.s	3
	ABE	n.s	n.s	**	*	n.s	*	3
	AA	n.s	n.s	***	**	n.s	n.s	2
	BHE	n.s	n.s	***	*	n.s	n.s	2
	BBE	n.s	n.s	*	*	n.s	*	3
	BA	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	RHE	n.s	n.s	**	n.s	n.s	n.s	1
	RBE	n.s	n.s	**	n.s	n.s	n.s	1
	RA	n.s	n.s	*	n.s	n.s	n.s	1
Prévisibilité (Colwell)	P	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
	M	n.s	*	n.s	n.s	*	n.s	2
	C	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
Eco-hydrologiques (Poff et allan)	CV	n.s	n.s	**	**	n.s	n.s	2
	FQS	n.s	n.s	n.s	n.s	*	*	2
	BS	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
	QJXA2	**	n.s	**	**	n.s	n.s	3
Invertébrés Benthiques (Clausen et Big)	CRUAN	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
	Q10	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité et Période	QMHE	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	QMBE	n.s	n.s	n.s	*	n.s	n.s	1
	QMA	n.s	n.s	*	*	n.s	n.s	2
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité et Durée	DCX1	*	n.s	**	**	n.s	n.s	3
	DCX3	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	DCX7	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	DCX30	n.s	n.s	**	*	n.s	n.s	2
	DCX90	n.s	n.s	*	*	n.s	n.s	2
	DCN1	**	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	1
	DCN3	*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	1
	DCN7	*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	1
	DCN30	n.s	*	n.s	n.s	**	**	3
	DCN90	n.s	n.s	n.s	n.s	*	**	2
	Altération hydrologique (Richter et al.) Période	JJDCX1	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
JJDCN1		n.s	n.s	n.s	**	n.s	*	2
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité, Période et Durée	NHIP	n.s	n.s	n.s	n.s	*	*	2
	NLOP	n.s	n.s	*	n.s	n.s	n.s	1
	DHIP	n.s	n.s	n.s	**	n.s	n.s	1
	DLOP	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0
Altération hydrologique (Richter et al.) Fréquence et Changement d'état	ACCQJ	n.s	n.s	***	**	n.s	n.s	2
	DECQJ	n.s	n.s	*	**	n.s	n.s	2
	NACC	n.s	n.s	**	***	***	***	4
	NDEC	n.s	n.s	*	n.s	n.s	n.s	1
Nombre de variables discriminantes (sur 44)		6	2	26	22	6	8	

Test non paramétrique
de Mann Whitney

***	<0.0005	Très significatif
**	<0.005	Significatif
*	<0.05	Peu significatif
n.s	>0.05	Pas significatif

Tableau 4.7 : Evolution des caractéristiques hydrologiques entre les stations naturelles et les stations influencées par hydro-écocorégion.

		MCBLA	MCDS	MCPL	TC	MA	Loire
Classique	QMOY_Q50	3%	-7%	-16%	-70%	-11%	-36%
	ECTQJ	14%	-11%	-34%	-94%	-15%	-75%
	S	5%	1%	-8%	-7%	1%	-2%
Variabilité (Breil)	AHE	27%	-15%	-48%	-51%	6%	-4%
	ABE	24%	9%	-43%	-50%	-13%	-15%
	AA	26%	-6%	-46%	-51%	2%	-7%
	BHE	7%	-23%	-42%	-47%	-3%	-8%
	BBE	9%	1%	-28%	-47%	-19%	-17%
	BA	8%	-15%	-38%	-48%	-6%	-11%
	RHE	-2%	-5%	-13%	-14%	-13%	-5%
	RBE	14%	1%	20%	11%	2%	7%
RA	2%	-4%	-6%	-8%	-11%	-2%	
Prévisibilité (Colwell)	P	10%	-7%	0%	7%	-8%	2%
	M	-6%	-19%	-18%	13%	-10%	0%
	C	25%	6%	19%	1%	-5%	5%
Eco-hydrologiques (Poff et allan)	CV	-18%	4%	34%	25%	-2%	5%
	FQS	-12%	-15%	-2%	23%	-10%	-1%
	BS	10%	12%	25%	21%	-7%	9%
	QJXA2	39%	2%	-40%	-47%	0%	-1%
Invertébrés Benthiques (Clausen et Biggs)	CRUAN	-3%	-16%	-16%	-17%	6%	-8%
	Q10	48%	0%	27%	18%	13%	16%
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité et Période	QMHE	0%	-12%	-25%	-29%	-10%	-8%
	QMBE	10%	6%	-2%	-11%	-6%	-3%
	QMA	3%	-7%	-19%	-26%	-9%	-7%
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité et Durée	DCX1	33%	-3%	-43%	-50%	-12%	-8%
	DCX3	15%	-17%	-36%	-46%	-16%	-12%
	DCX7	5%	-20%	-32%	-43%	-16%	-12%
	DCX30	-5%	-19%	-26%	-36%	-15%	-12%
	DCX90	-5%	-4%	-17%	-19%	-5%	-5%
	DCN1	73%	28%	-14%	-6%	28%	4%
	DCN3	61%	21%	-11%	-2%	14%	4%
	DCN7	60%	13%	-7%	-2%	50%	8%
	DCN30	28%	59%	1%	6%	93%	21%
DCN90	15%	3%	0%	9%	43%	11%	
Altération hydrologique (Richter et al.) Période	JJDCX1	5%	2%	-2%	-4%	-2%	-1%
	JJDCN1	1%	4%	6%	-18%	-9%	-8%
Altération hydrologique (Richter et al.) Intensité, Période et Durée	NHIP	-12%	-15%	-2%	23%	-10%	-1%
	NLOP	-11%	-8%	19%	26%	10%	6%
	DHIP	-20%	9%	8%	35%	-4%	7%
	DLOP	-19%	-4%	-3%	-1%	6%	-3%
Altération hydrologique (Richter et al.) Fréquence et Changement d'état	ACCQJ	-10%	-18%	-44%	-64%	-35%	-31%
	DECQJ	-5%	-9%	-31%	-68%	-28%	-27%
	NACC	7%	4%	21%	17%	13%	14%
	NDEC	-4%	-2%	-10%	7%	2%	-1%

IV.6.3. ANALYSE DE CORRELATION DES CARACTERISTIQUES D'ECOULEMENT A PARTIR DES STATIONS NATURELLES.

L'objectif de cette analyse est de réduire les 44 caractéristiques d'écoulement de départ selon leur degré de corrélation. Le seuil retenu pour le coefficient de corrélation entre les différentes caractéristiques d'écoulement est de 80%. Ce choix est arbitraire. A partir de ce tri entre variables fortement corrélées, nous retiendrons préférentiellement celles qui sont les plus classiquement manipulées et les plus facilement calculables par les hydrologues. La perspective opérationnelle de ces corrélations fortes est de pouvoir utiliser des caractéristiques hydrologiques classiques pour déterminer les fonctionnements éco-hydrologiques. Il existe en effet de nombreux travaux sur la régionalisation des variables classiques, ce qui permettra d'extrapoler la typologie éco-hydrologique aux bassins non pourvus de stations hydrométriques.

Pour les 44 caractéristiques d'écoulement retenues au départ, 23 ont un degré de corrélation supérieur à 80% (avec une probabilité inférieure à 1/1000 que cela soit le fait du hasard) avec les autres variables. Les 21 caractéristiques d'écoulement restantes vont servir dans les analyses pour les étapes suivantes. Le Tableau 4.8 montre les corrélations entre ces différentes caractéristiques d'écoulement.

IV.6.4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMALISEES.

Nous avons effectué une ACPN sur les 240 stations naturelles et les 21 caractéristiques d'écoulement sélectionnées. L'objectif de cette analyse est de réduire, en les groupant au mieux, les caractéristiques d'écoulement de toutes les stations hydrométriques. Cette opération aboutit à des combinaisons linéaires des caractéristiques qui définissent des axes factoriels. On retient en général de l'ACPN le nombre d'axes minimum nécessaire pour expliquer au mieux la variance totale des valeurs des caractéristiques de l'échantillon des individus (ici les stations hydrométriques). Dans notre cas les 3 premiers axes expliquent 53 % de la variance totale (Tableau 4.9). Les axes factoriels de rang supérieur ne sont pas considérés compte tenu du faible gain de variance expliquée apporté par chaque axe. Le premier plan factoriel (F1/F2, sur la figure 4.6), le plus porteur de signification, est exploité dans les analyses suivantes.

Tableau 4.9 : Variances expliquées par les axes factoriels (240 stations naturelles * 21 variables).

Axes factoriels	Valeur Propre	% variance	% cumulé
F1	5.8	27.6	27.6
F2	3.0	14.3	41.9
F3	2.3	10.9	52.8

Tableau 4.8 : Résultats de l'analyse des corrélations entre variables.

	QJXA2	QMOY	ECTQJ	S	AHE	ABE	AA	BHE	BBE	BA	RHE	RBE	RA	CRUAN	Q10	P	M	C	CV	FQS	BS	JJDCX1	JJDCN1
QMOY	POS	POS	POS		POS		POS	POS	POS	POS	POS		POS										
ECTQJ	POS	POS	POS		POS		POS	POS	POS	POS	POS		POS										
S				POS																			
AHE		POS	POS		POS		POS	POS		POS													
ABE						POS	POS		POS														
AA		POS	POS		POS		POS	POS		POS													
BHE		POS	POS		POS		POS	POS		POS													
BBE									POS														
BA		POS	POS		POS		POS	POS		POS													
RHE			POS								POS		POS										
RBE												POS											
RA													POS										
CRUAN														POS									
Q10															POS								
P																POS							
M																	POS						
C																		POS					
CV																			POS				
FQS																				POS			
BS																					POS		
QJXA2	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS													
CRUAN														POS									
Q10															POS								
QMHE	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS	POS		POS										
QMBE																							
QMA	POS	POS	POS		POS	POS	POS	POS		POS	POS		POS										
DCX1	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS	POS		POS										
DCX3	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS	POS		POS										
DCX7	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS	POS		POS	POS									
DCX30	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS	POS		POS	POS									
DCX90																							
DCN1																							
DCN3																							
DCN7																							
DCN30																							
DCN90																							
JJDCX1																						POS	
JJDCN1																							POS
NHIP																							
NLOP																							
DHIP																							
DLOP																							
ACCCQJ	POS	POS	POS		POS		POS	POS		POS													
DECQJ	NEG	NEG	NEG		NEG		NEG	NEG		NEG													
NACC																							
NDEC																							

En gras : les caractéristiques d'écoulement qui n'ont aucun coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

En gras et italique : les caractéristiques d'écoulement retenues qui ont un coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

En grisé : les caractéristiques d'écoulement éliminées qui ont un coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

Tableau 4.8 (suite) : Résultats de l'analyse des corrélations entre variables.

	NACC	NDEC	NHIP	NLOP	DHIP	DLOP	DCX1	DCX3	DCX7	DCX30	DCX90	DCN1	DCN3	DCN7	DCN3 0	DCN9 0	ACCQ J	DECQ J	QMHE	QMBE	QMA
QMOY							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
ECTQJ							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
S																					
AHE							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
ABE																					POS
AA							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
BHE							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
BBE																					
BA							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
RHE									POS	POS									POS		POS
RBE																					
RA									POS	POS										POS	POS
P																					
M																					
C																					
CV																					
FQS			POS																		
BS																					
QJXA2							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
CRUAN																					
Q10												POS	POS	POS	POS						
QMHE							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
QMBE																				POS	
QMA							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DCX1							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DCX3							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DCX7							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DCX30							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DCX90											POS										
DCN1												POS	POS	POS							
DCN3												POS	POS	POS	POS						
DCN7												POS	POS	POS	POS						
DCN30													POS	POS	POS						
DCN90																POS					
JJDCX1																					
JJDCN1																					
NHIP			POS																		
NLOP				POS																	
DHIP					POS																
DLOP						POS															
ACCQJ							POS	POS	POS	POS							POS	NEG	POS		POS
DECQJ							NEG	NEG	NEG	NEG							NEG	POS	NEG		NEG
NACC	POS																				
NDEC		POS																			

En gras : les caractéristiques d'écoulement qui n'ont aucun coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

En gras et italique : les caractéristiques d'écoulement retenues qui ont un coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

En grisé : les caractéristiques d'écoulement éliminées qui ont un coefficient de corrélation plus de 80% avec les autres variables

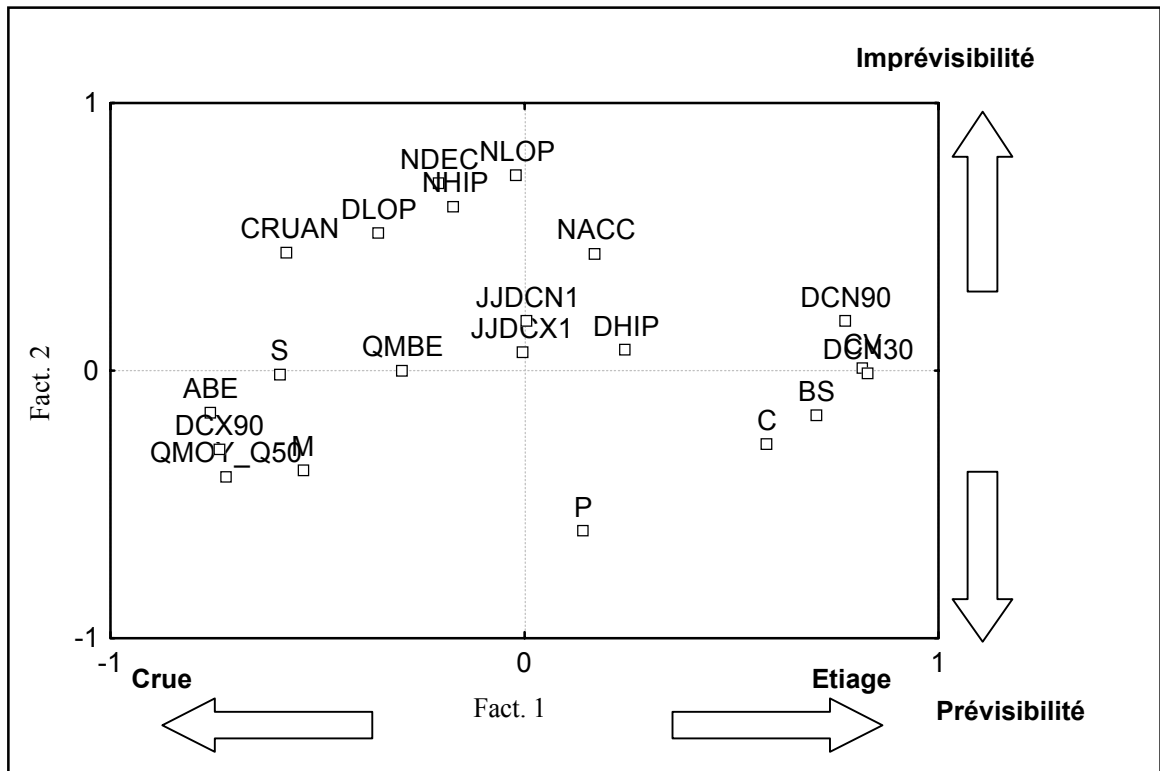


Figure 4.6 : Résultat de l'ACP fact.1 vs. Fact.2 (240 stations naturelles et 21 variables).

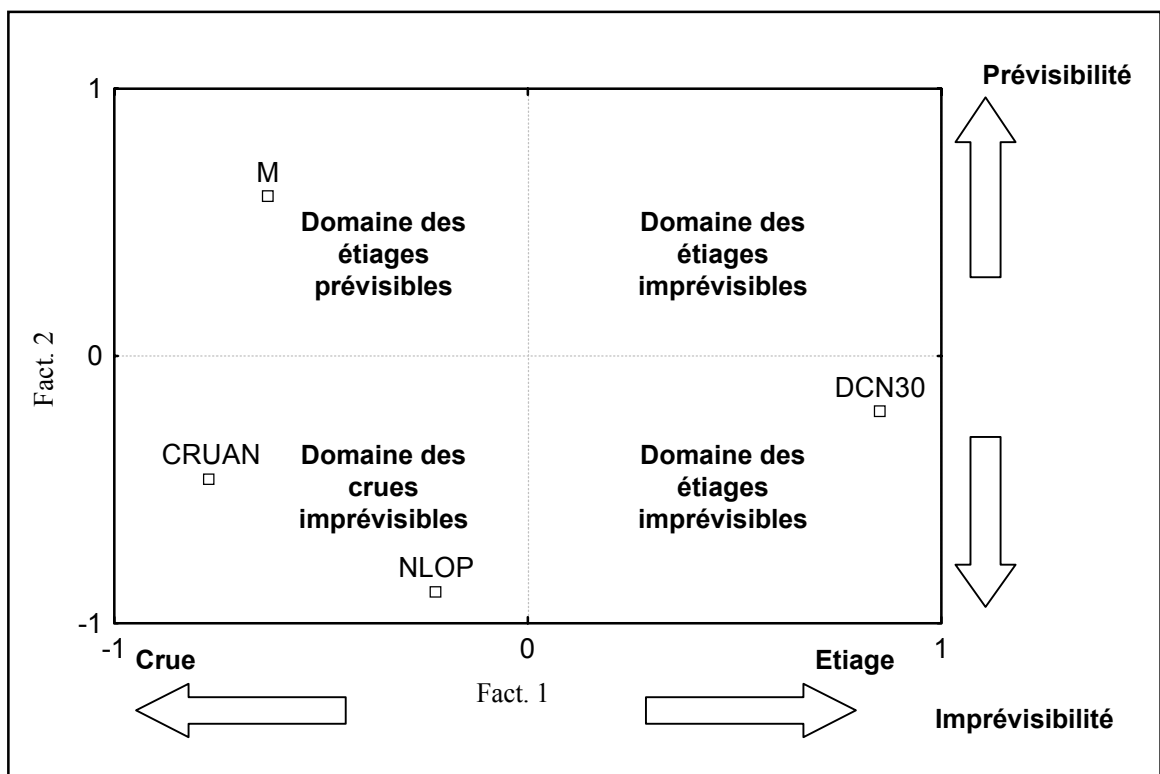


Figure 4.7 : Résultat de l'ACP fact.1 vs. Fact.2 (240 stations naturelles et 4 variables).

Des caractéristiques synthétiques ont été définies en fonction (i) de leur forte signification par rapport aux axes factoriels F1 et F2 ; Autrement dit, elles sont sélectionnées pour leur part de variance expliquée, de manière isolée ou comme représentation d'un groupe de caractéristiques dont les variations sont corrélées. (ii) à leur signification pour les traits éco-hydrologiques (étiage, crue, prévisibilité) (Breil, 1999, comm. pers.), (iii) et de l'objectif de réduction du nombre des variables, pour une lecture facilitée des résultats et la mise en œuvre ultérieure d'un modèle prédictif. Nous avons ainsi retenu 4 caractéristiques d'écoulement représentatives après ACP :

- la variabilité des crues représentée par CRUAN,
- la valeur du débit classé non dépassé en moyenne 30 j par an, exprimant l'étiage - DCN30,
- la prévisibilité par contingence M,
- le nombre de "Low Pulses" siglé NLOP, représentant l'imprévisibilité.

Nous avons refait une ACPN sur ces caractéristiques d'écoulement synthétiques (figure 4.7) :

Tableau 4.10 : Variances expliquées par les axes factoriels sur l'ACP sur les caractéristiques synthétiques d'écoulement (tableau de 240 stations * 4 variables synthétiques).

Axes factoriels	Valeur Propre	% variance	% cumulé
F1	1.77	44.2	44.2
F2	1.396	34.6	78.8

IV.6.5. DETERMINATION DE TRAITS ECO-HYDROLOGIQUES.

L'analyse des caractéristiques associées au premier plan factoriel de l'ACP (fig. 4.6 et 4.7) permet d'attribuer une signification aux axes F1 et F2. Les groupes peuvent s'interpréter au travers de la signification des caractéristiques qui les composent. Nous définissons ainsi des traits hydrologiques qui traduisent des aspects fonctionnels des régimes d'écoulement.

Le groupe de droite (axe F1) associe des caractéristiques de débit essentiellement représentatives aux mesures d'étiage DCN30 et DCN90 . Les poids forts correspondent cependant à des caractéristiques relatives aux conditions fréquentes de débit, telles CV (=S/QMOY) ou encore BS. Le groupe contient aussi la caractéristique C représentative de la constance des gammes de débit, indépendamment des saisons (mensuelles dans cette étude). Les stations de ce groupe présentent un régime hydrologique dominé par la stabilité des débits d'étiage.

Le groupe de gauche (axe F1) associe toutes les caractéristiques relatives aux crues situées en dehors du domaine fréquent des réalisations de débit. Nous trouvons ainsi dans ce groupe Vhpf_BE, DCX90, et CRUAN. Nous trouvons aussi S et QMOY/Q50 qui mesurent la dispersion et la distorsion des débits et enfin M qui représente la prévisibilité des débit par contingence avec certaines saisons. Ce groupe est représentatif d'une mesure d'instabilité hydrologique essentiellement liée aux crues de certaines saisons. Les stations de ce groupe présentent un régime hydrologique dominé par la variabilité des crues à certaines saisons. Ce groupe s'oppose logiquement sur l'axe F1 à celui des régimes stables dominés par les étiages.

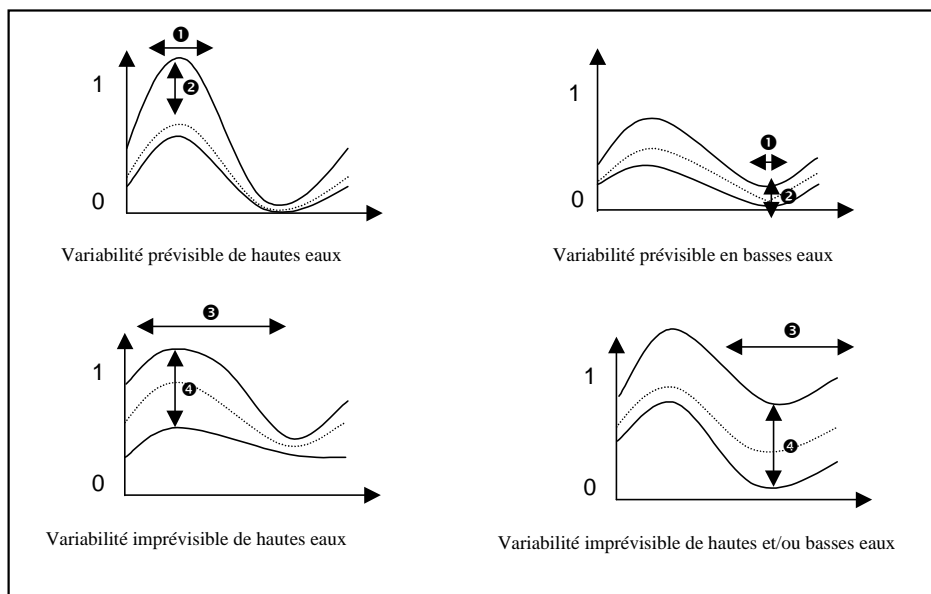
Le groupe du haut (axe F2) associe toutes les caractéristiques qui traduisent les incursions des réalisations de débit hors du domaine des débits fréquents. Nous trouvons ainsi DLOP, NLOP, NACC et NHIP. Ce groupe est représentatif d'une mesure d'instabilité hydrologique qui s'oppose logiquement sur l'axe F2 à celui de la stabilité ou prévisibilité. Il définit donc le trait de l'instabilité hydrologique.

Enfin, le groupe du bas (axe F2) associe des caractéristiques représentatives de la constance inter-annuelle des réalisations de débit dans le domaine des débits fréquents et la prévisibilité des débits par contingence avec certaines saisons. La caractéristique de prévisibilité P, qui leur est associée, confirme cette interprétation. Ce groupe est représentatif d'une mesure de stabilité hydrologique. Il définit le trait de la prévisibilité des écoulements.

L'axe F3 (fig. en Annexe 4) est marqué la prédominance des caractéristiques de position dans l'année (JJ signifie Jour Julien) et Qmoy. Qmoy est une caractéristique des réalisations fréquentes de débit. JJDCX1 est un indicateur de saison des plus fortes crues. Ces deux aspects ne départagent pas les stations hydrométriques en priorité. Nous pouvons en conclure que la variance de leurs valeurs est limitée pour le jeu de stations naturelles utilisées.

Rappelons que selon la classification de Pardé (1933), basée sur la succession des débits moyens mensuels, le bassin de la Loire est caractérisé par un régime d'écoulement essentiellement pluvial. Cela est en partie confirmé par la position de JJDCX1, discutée dans l'alinéa précédent. Les 30 caractéristiques d'écoulement introduites dans notre analyse font apparaître une sous classification qui prend en compte essentiellement la variabilité non fréquente des débits moyens journaliers.

Les quatre grands types de régime d'écoulement issus des traits éco-hydrologiques sont schématisés dans la figure 4.8.



- ❶ l'occurrence saisonnière des hautes et des basses eaux est restreinte dans le temps.
- ❷ la variabilité des valeurs faibles (inv. fortes) de débits en hautes eaux (inv. basses eaux) est minimale.
- ❸ l'occurrence saisonnière des hautes et des basses eaux s'étale sur une longue période.
- ❹ les débits peuvent fluctuer aussi bien dans des valeurs faibles que dans les valeurs fortes.

Figure 4.8 : Les traits dominants des régimes d'écoulement de la Loire : variabilité stable (prévisible) ou instable (imprévisible) des débits de hautes et de basses eaux et traits éco-hydrologiques.

Afin de vérifier l'existence de traits éco-hydrologiques régionaux, nous avons utilisé comme base de classification la typologie des axes. Nous avons ainsi classé en 4 groupes les stations en fonction de leur position dans le plan F1/F2. La partition a utilisé les 4 cadrans du plan factoriel. Les quatre groupes principaux représentent les régimes d'écoulement dominés par la stabilité ou prévisibilité des basses eaux, respectivement des hautes eaux, l'instabilité ou imprévisibilité des basses eaux, respectivement des hautes eaux (Figure 4.7).

IV.6.6. INFLUENCE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES SUR LES TRAITES ECO-HYDROLOGIQUES.

IV.6.6.1. RESULTATS DES TRAITES HYDROLOGIQUES. ANALYSE DES EFFETS DES OUVRAGES HYDRAULIQUES SELON L'APPARTENANCE A UNE REGION.

Nous analysons maintenant la répartition des traits-écohydrologiques dans les régions d'experts. Cette information est portée dans la figure 4.9. Il ressort de cette typologie une distribution spatiale organisée (fig. 4.9 et 4.10) des traits éco-hydrologiques sur le bassin de la Loire. Nous trouvons un caractère d'imprévisibilité marqué de la variabilité hydrologique dans les zones à relief du Limousin, du haut Limousin, du Haut Allier et de la Haute Loire ainsi que dans la région du Morvan. La stabilité ou prévisibilité des étiages dans les tables calcaires nord Loire. Un régime de hautes eaux prévisible en variabilité, c'est-à-dire à certaines époques de l'année dans le massif armoricain (MA). La localisation de ces régions concorde assez bien avec les régions d'experts et les régions liées aux types définis par les classifications hiérarchiques ascendantes.

Le pourcentage des stations ayant un caractère de crue prévisible, en Massif Armoricain a diminué de 65% (pour les stations naturelles) en 40% (pour les stations influencées). Nous avons remarqué aussi, dans cette région, une légère augmentation des étiages imprévisibles.

Les stations naturelles du Massif Central Dépressions Sédimentaires sont, en majeure partie, composées des étiages imprévisibles (70%). Ce pourcentage atteint les 20% pour les stations naturelles, qui elles, dominées par des crues imprévisibles (50%). Nous n'observons plus de stations influencées en crue prévisible, alors qu'elles étaient environ 20% pour les stations naturelles.

Dans le Massif Central Plateau Limousin, de la même manière que la région MCDS, nous n'avons plus observé des stations influencées en crue prévisible. Elles étaient environ 15% en stations naturelles.

Aucune différence majeure n'est constatée pour les pourcentages des traits hydrologiques entre les stations naturelles et influencées.

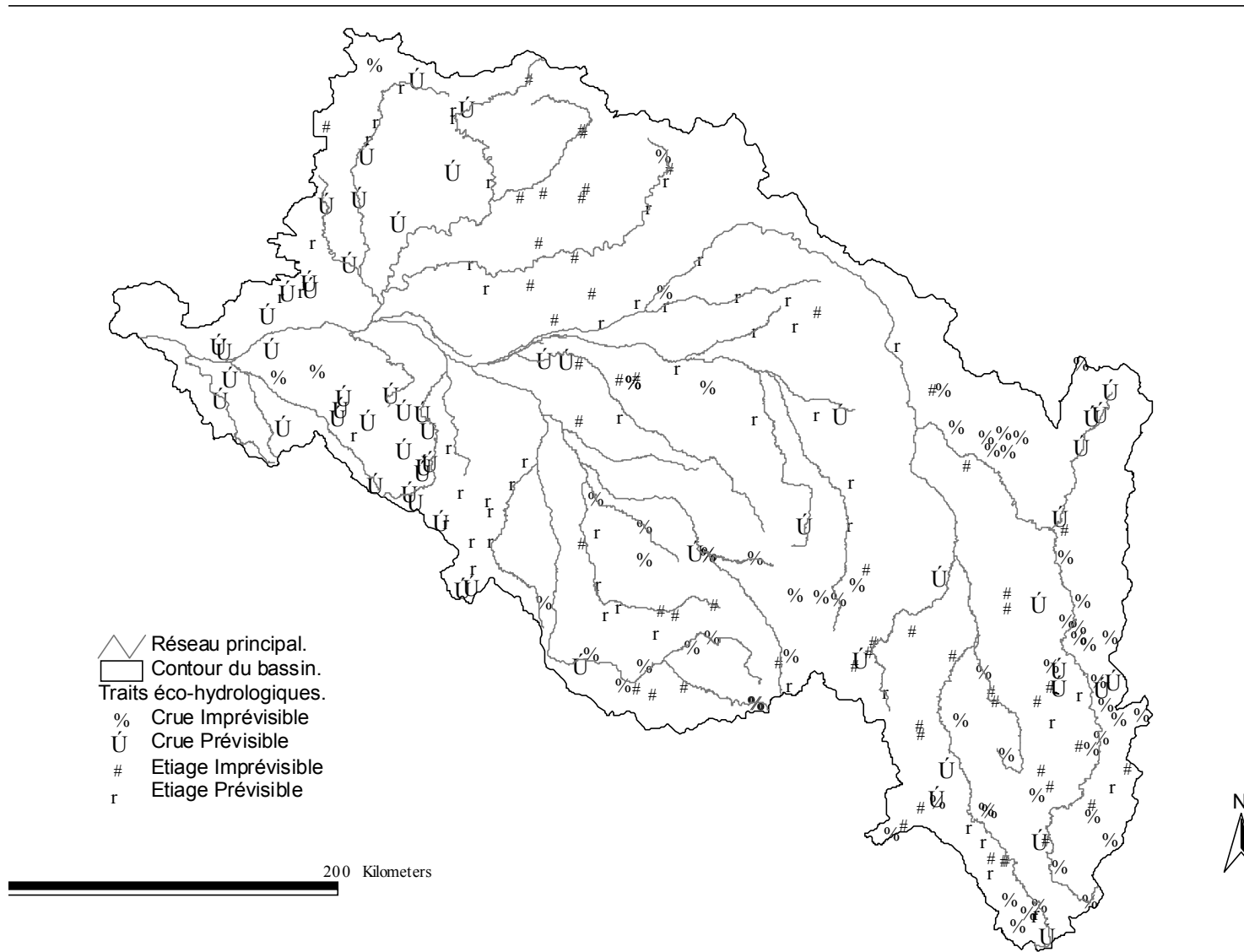


Figure 4.9 : Répartition spatiale des traits éco-hydrologiques. Stations naturelles.

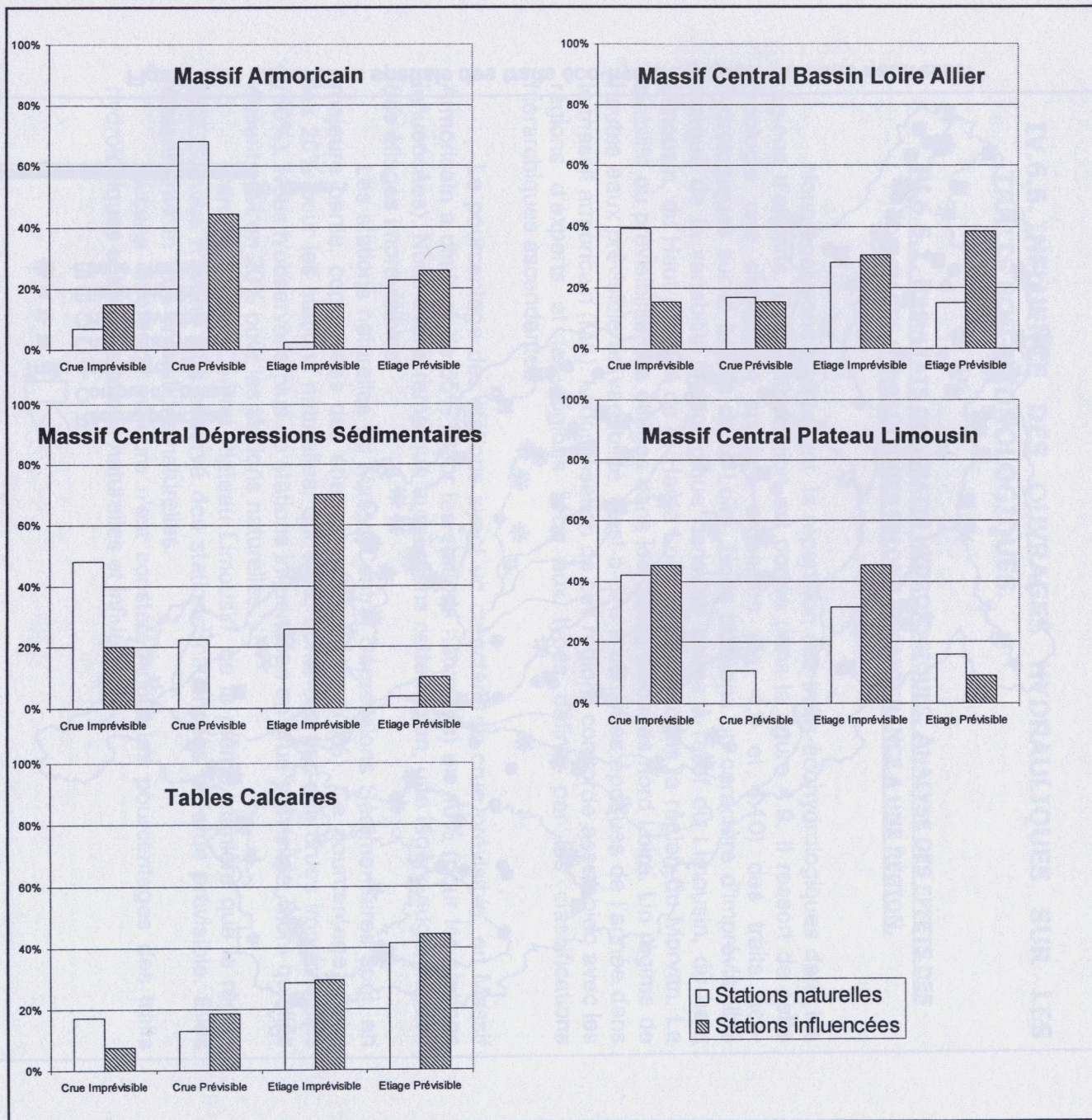


Figure 4.10 : Pourcentages des stations appartenant à un trait éco-hydrologique par hydro-écocoréon. Stations naturelles et influencées.

IV.6.6.2. ANALYSE DES EFFETS DES OUVRAGES HYDRAULIQUES SANS A PRIORI D'APPARTENANCE A UNE REGION.

Une comparaison sur la répartition spatiale a été réalisée entre les stations naturelles et les stations influencées. Nous avons retenu comme démarche :

- une comparaison sur des zones homogènes de traits-écohydrologiques ;
- une comparaison de l'évolution des traits éco-hydrologiques de l'amont, en station naturelle, vers l'aval, en station influencée.

- **Comparaison sur des zones homogènes des stations naturelles de traits-écohydrologiques.**

Dans cette analyse, nous calculons les coordonnées des axes factoriels des individus-stations influencés pris comme individus supplémentaires par rapport à l'analyse de l'ACPN sur les stations naturelles (Cf § IV.6.4). Nous projetons ces coordonnées sur le plan factoriel où les traits éco-hydrologiques ont été définis (Cf § IV.6.5), pour attribuer aux stations influencées un trait hydrologique. Nous reportons ces individus selon leur position spatiale dans le bassin de la Loire.

Deux cas de figure se présentent : celui où les stations influencées présentent le même trait éco-hydrologique que les stations naturelles environnantes. Cela peut s'expliquer soit par des ouvrages hydrauliques de faible influence (faible capacité, fil de l'eau, seuil de moulin, ...), soit par l'insensibilité des caractéristiques hydrologiques à ce type d'influence (figure 4.11). Le second cas de figure montre des changements de traits éco-hydrologiques des stations influencées par rapport à leur contexte de stations naturelles.

- **Comparaison de l'évolution des traits éco-hydrologiques de l'amont, en station naturelle, vers l'aval, en station influencée.**

Nous illustrons le cas du passage de la crue prévisible à l'amont vers une crue imprévisible à l'aval (fig. 4.12). Dans cet exemple tiré du Massif Armoricaïn, est clairement mis en évidence le passage d'un régime d'écoulement de crues naturelles à celui d'un régime géré par des éclusées hydro-électriques. Le glissement de trait éco-hydrologique est facilement compréhensible car les éclusées ne sont pas aussi bien délimitées dans le temps que la saison des crues dans le cas présent.

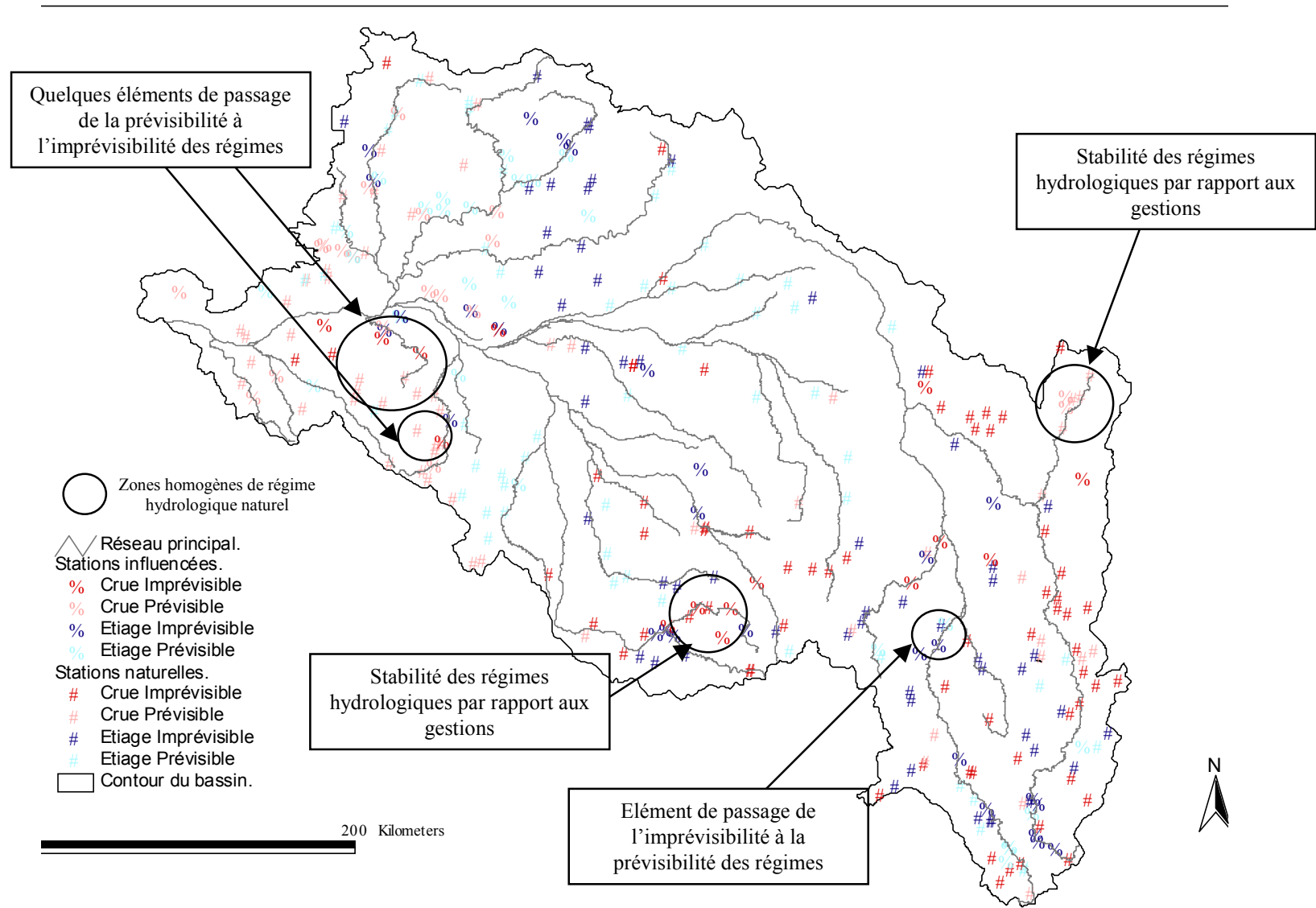


Figure 4.11 : Répartition spatiale des traits éco-hydrologiques. Stations naturelles et influencées.

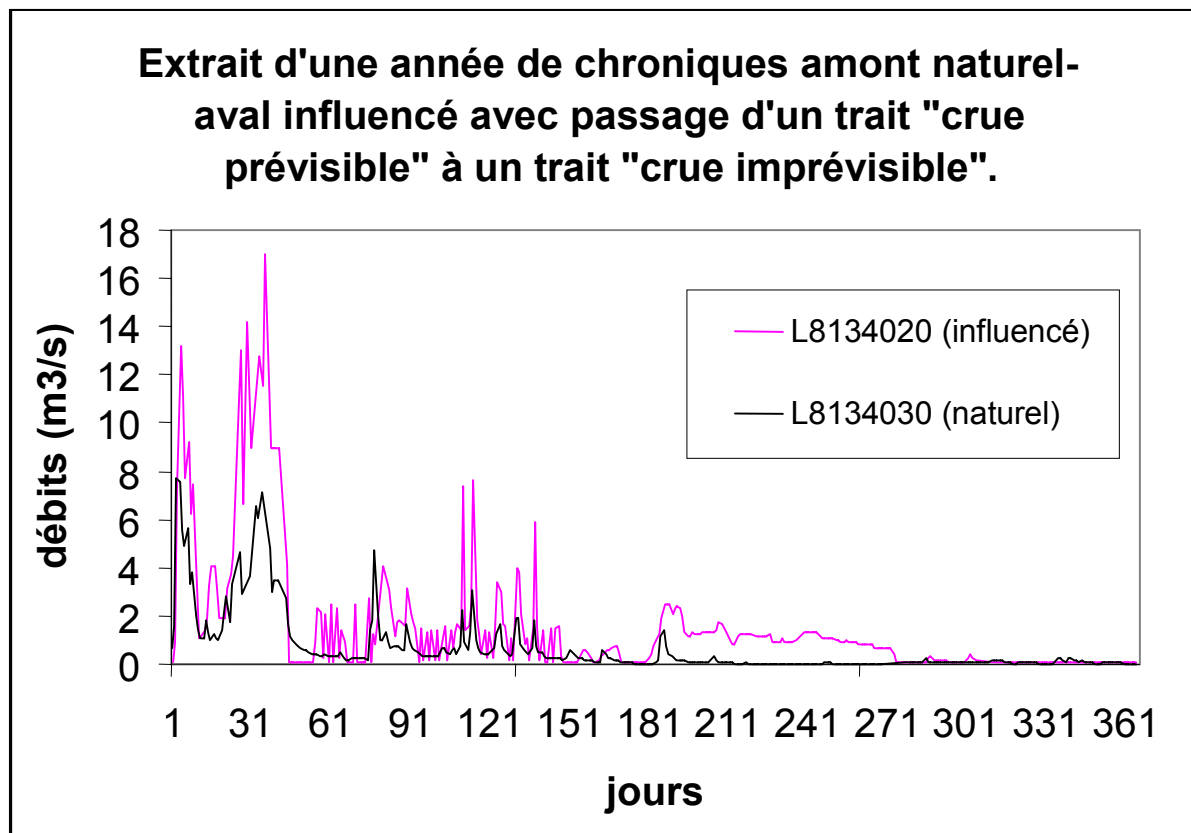


Figure 4.12 : Distribution spatiale des stations hydrométriques naturelles et influencées.

IV.6.7. PERTINENCE DU DECOUPAGE EN HYDRO-ECOREGIONS A PARTIR D'UNE ANALYSE DISCRIMINANTE.

L'objectif de cette analyse est d'évaluer dans quelle mesure le pré-découpage en hydro-écorégions du bassin de la Loire réalisé par les experts est validé par les 30 caractéristiques éco-hydrologiques retenues.

En général, l'Analyse Discriminante est un outil très utile, (i) pour détecter les variables permettant de discriminer différents groupes (ici il s'agit de groupes géographiques), et (ii) pour hiérarchiser les variables les plus discriminantes.

La procédure d'analyse consiste à prendre tous les individus d'une région, puis à calculer les statistiques centrales des caractéristiques d'écoulement. Il est alors possible de comparer chaque individu par rapport aux statistiques centrales de son groupe et d'évaluer la probabilité de l'appartenance statistique ou non de cet individu à la région.

Pour une probabilité inférieure à 1/10000 que l'appartenance à un groupe soit le fait du hasard, 19 caractéristiques sur 21 sont considérées comme significativement discriminantes. Ces caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Rang de discrimination des caractéristiques d'écoulement.

<i>Synthèse de l'Analyse Discriminante</i>				
Étape19, Var. dans Modèle: 19; Classemt: hydro-écorégions (5 grps avec $p < 0.0000$)				
Caractéristiques	Étape	niveau p	1-Tolér.(R ²)	
QMOY	1	0.002	0.79	
DCN30	2	0.127	0.70	
NLOP	3	0.034	0.75	
JJDCN1	4	0.016	0.17	
M	5	0.001	0.41	
NACC	6	0.000	0.51	
CRUAN	7	0.000	0.65	
NDEC	8	0.000	0.60	
ABE	9	0.001	0.82	
QMBE	10	0.306	0.52	
C	11	0.000	0.75	
DCX90	12	0.080	0.59	
S	13	0.000	0.72	
CV	14	0.000	0.84	
NHIP	15	0.004	0.72	
DHIP	16	0.069	0.47	
DLOP	17	0.104	0.60	
DCN90	18	0.241	0.62	
JJDCX1	19	0.244	0.27	
Variables absentes du modèle				
P		0.96	1.00	
BS		0.79	0.50	

La matrice de classification (Tableau 4.12), fournie par l'analyse discriminante, nous donne le nombre de stations hydrologiques qui ont été correctement classées (sur la diagonale de la matrice en gras) et celles qui ont été mal classées. Cela permet d'évaluer la pertinence statistique de l'appartenance d'un individu (station

hydrométrique) à une hydro-écorégion, à partir des valeurs de ses 19 caractéristiques d'écoulement. Les scores par région sont donnés dans la deuxième colonne.

Tableau 4.12 : Matrice de classification après Analyse Discriminante.

	Total Correct(en %)	Nombre de stations	MCBLA	MCDS	TC	MCPL	MA
			p=.23	p=.12	p=.30	p=.16	p=.19
MCBLA	79(*3)	53	42 (*1)	2	1	7	1
MCDS	19	27	15(*2)	5	3	4	0
TC	77	73	2	1	53	4	9
MCPL	78	38	5	1	2	29	0
MA	63	44	1	1	10	4	27
%	68	235	65(*4)	10	69	48	37

Lignes : classifications observées.

Colonnes : classifications prévues.

(*1) = 42 des stations (sur les 53 au départ) "méritent statistiquement" d'appartenir à la région MCBLA

(*2) = 15 des stations prévues dans le MCDS sont observées dans le MCBLA

(*3) = 79% des stations appartenant au MCBLA sont bien classées

(*4) = 65 stations sur les 240 étudiées devraient être classées en MCBLA

Sur l'ensemble de la Loire, 68% des individus sont correctement classés. Ce résultat montre la cohérence générale du découpage en hydro-écorégions. A noter aussi que le score est faible pour les dépressions sédimentaires (MCDS), qui ne sont pas des entités géographiques régionales à proprement parler. Elles ont des rôles fonctionnels qui ne sont pas caractéristiques d'une signature hydrologique particulière, mais de plusieurs traits éco-hydrologiques. Si nous considérons maintenant les quatre « vraies » régions, le score de prévision moyen est de 74%. C'est un très bon résultat si l'on observe que le découpage en hydro-écorégions d'experts repose sur une hypothèse globale de fonctionnement des écosystèmes aquatiques où le compartiment hydrologique est un élément parmi d'autres. Cela peut aussi indiquer que le maillon hydrologique est un facteur prépondérant du fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

IV.6.8. CARACTERISATION ECO-HYDROLOGIQUE ET VALIDATION DU DECOUPAGE D'EXPERTS EN HYDRO-ECOREGIONS. COMPARAISON INTER-REGIONS.

L'analyse consiste en une analyse statistique non paramétrique où l'on compare les 240 stations hydrométriques naturelles.

L'analyse statistique est conduite en deux étapes. La première utilise un test d'analyse de variance non-paramétrique pour voir s'il existe une différence inter-régionale par caractéristique. La deuxième étape utilise une comparaison deux à deux (test de Mann Whitney) des 10 couples de régions possibles. Les comparaisons portent sur les 21 caractéristiques éco-hydrologiques retenues après l'analyse des corrélations (§ IV.6.3). La probabilité d'admettre une différence entre hydro-écorégions du seul fait du hasard est fixée à 5/100.

Ces deux tests fournissent trois informations :

- le premier permet de détecter si au moins une des régions diffère des autres sur les valeurs des 21 caractéristiques d'écoulement retenues,

- le second permet d'identifier les caractéristiques d'écoulement qui différencient le mieux les régions entre elles, dans le cas d'une différence,
- les deux tests permettent de déterminer quelles sont les caractéristiques prépondérantes de différenciation sur l'ensemble du bassin de la Loire.

Du Tableau 4.13, sur les 21 caractéristiques étudiées, seules 2 d'entre elles (JJDCX1, DHIP) indiquent l'absence de différences inter-régionales. Les stations traitées dans les cinq hydro-écorégions ont donc des valeurs moyennes statistiquement identiques sur ces deux caractéristiques. Par contre, les 19 autres caractéristiques d'écoulement, des différences existent ($p < 0.05$), i.e. au moins une des régions se différencie des quatre autres sur les valeurs des rangs.

Du même Tableau 4.13, nous pouvons dire qu'en prenant les régions deux à deux, nous retrouvons toujours au moins une région qui diffère de l'autre sur une variable. Les grandes différences statistiques se situent entre les régions du Massif Central (MCBLA; MCDS; MCPL) et le massif armoricain (MA), où au moins 12 à 13 caractéristiques discriminent les régions deux à deux. Nous retrouvons une bonne différenciation des régions du Massif Central avec les Tables Calcaires Ligériennes (respectivement 12, 10 et 14 variables discriminent ces régions). Notons également que 12 caractéristiques différencient les Tables Calcaires Ligériennes (TC) du Massif Armoricaire (MA).

L'ordre des variables qui discriminent le plus les régions est donné par le même Tableau 4.13. Il suffit de comptabiliser sur chaque ligne le nombre de fois où une variable discrimine un couple de régions. Dans l'ordre de pouvoir discriminant décroissant, nous trouvons les caractéristiques d'écoulement suivantes avec leur score d'apparition : "NLOP" nombre moyen du signal de basses impulsions (8 combinaisons sur 10 possibilités), "Qmoy" débit moyen, "BS" et "DCN30" moyenne des valeurs de débit non dépassé de durée de 30 j chaque année (7/10), "CRUAN", P, CV, "JJDCN1" moyenne du jour julien du DCN1 de chaque année, NACC, DCN90 " moyenne des valeurs de débit non dépassé de durée de 90 j chaque année (6/10).

Tableau 4.13 : Résultats de l'ANOVA de Kruskal-Wallis de différence inter-régionale par caractéristique et de comparaison deux à deux des régions par le test de Mann-Whitney.

niveau p	Test de Kruskall Wallis	Test U de Mann-Whitney										Rang de discrimination (sur 10)	en %
	Toutes les régions	MCBLA MCDS	MCBLA TC	MCBLA MCPL	MCBLA MA	MCDS TC	MCDS MCPL	MCDS MA	MCPL MA	TC MCPL	TC MA		
QMOY_Q50	***	*	***	n.s	***	n.s	n.s	***	***	*	***	7	70%
S	*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	**	1	10%
ABE	**	n.s	n.s	n.s	*	*	*	n.s	**	n.s	***	5	50%
P	***	n.s	***	n.s	***	**	n.s	***	***	***	n.s	6	60%
M	***	n.s	n.s	n.s	***	n.s	n.s	***	***	n.s	***	4	40%
C	**	n.s	**	n.s	n.s	*	n.s	n.s	n.s	**	**	4	40%
CV	***	n.s	*	n.s	***	n.s	n.s	***	***	*	***	6	60%
BS	***	n.s	***	n.s	**	*	n.s	**	***	*	***	7	70%
CRUAN	***	n.s	***	n.s	n.s	***	*	*	n.s	***	**	6	60%
QMBE	*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	*	n.s	n.s	*	n.s	2	20%
DCX90	***	n.s	n.s	n.s	***	n.s	n.s	***	***	n.s	***	4	40%
DCN30	***	n.s	***	n.s	***	**	n.s	*	***	***	***	7	70%
DCN90	***	n.s	***	n.s	**	n.s	n.s	**	**	**	***	6	60%
JJDCX1	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	*	n.s	n.s	n.s	n.s	1	10%
JJDCN1	***	n.s	***	***	***	***	***	***	n.s	n.s	n.s	6	60%
NHIP	***	n.s	n.s	**	n.s	n.s	n.s	n.s	***	***	n.s	3	30%
NLOP	***	n.s	**	**	***	**	*	***	***	***	n.s	8	80%
DHIP	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0	0%
DLOP	***	*	n.s	***	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	**	n.s	3	30%
NACC	***	n.s	***	**	*	*	n.s	n.s	n.s	*	*	6	60%
NDEC	***	n.s	***	n.s	**	*	n.s	n.s	*	***	n.s	5	50%
												Nombre de variables discriminantes (sur 21) en%	
		2	12	5	13	10	6	11	12	14	12		
		10%	57%	24%	62%	48%	29%	52%	57%	67%	57%		

IV.6.9. TYPOLOGIE BASEE SUR UNE CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH) DES CARACTERISTIQUES ECO-HYDROLOGIQUES.

Nous rappelons que l'objectif de cette analyse est de former des groupes statistiques définis par proximité de valeurs des différentes caractéristiques d'écoulement, est de ne pas biaiser l'analyse des tendances régionales.

Nous prenons comme tableau d'analyse les 240 stations, et comme variables les poids des individus sur les 6 premiers axes factoriels qui représentent 62% (pour les 21 variables) de la variance totale après une ACPN. Nous calculons ensuite une distance euclidienne entre les individus. La méthode d'agrégation de Ward a été utilisée.

Nous avons retenu une partition en quatre groupes ou classes d'individus qui sont caractérisés par la proximité de leurs valeurs de caractéristiques d'écoulement. Ces classes représentent des types de régime d'écoulement au sens des 4 caractéristiques retenues pour l'analyse. La figure 4.13 représente la distribution spatiale des caractéristiques d'écoulement obtenue pour les stations de la Loire à partir de la méthode de partition de Ward. Chacune des quatre classes est représentée par un symbole.

La classification selon Ward (fig. 4.13) permet de délimiter, sur la base des dominantes de symbole par secteur, 3 régions : les tables calcaires au nord de la Loire, le sud du Massif armoricain et le haut bassin du Massif Central.

Les caractéristiques d'écoulement dominantes des 4 types de régime hydrologique, définis par la CAH, sont étudiées à partir des statistiques de répartition des distributions de valeur des 4 caractéristiques d'écoulement retenues pour définir les traits éco-hydrologiques.

A partir des "boîtes à moustaches" de la figure 4.14, nous pouvons associer aux quatre types les caractéristiques d'écoulement.

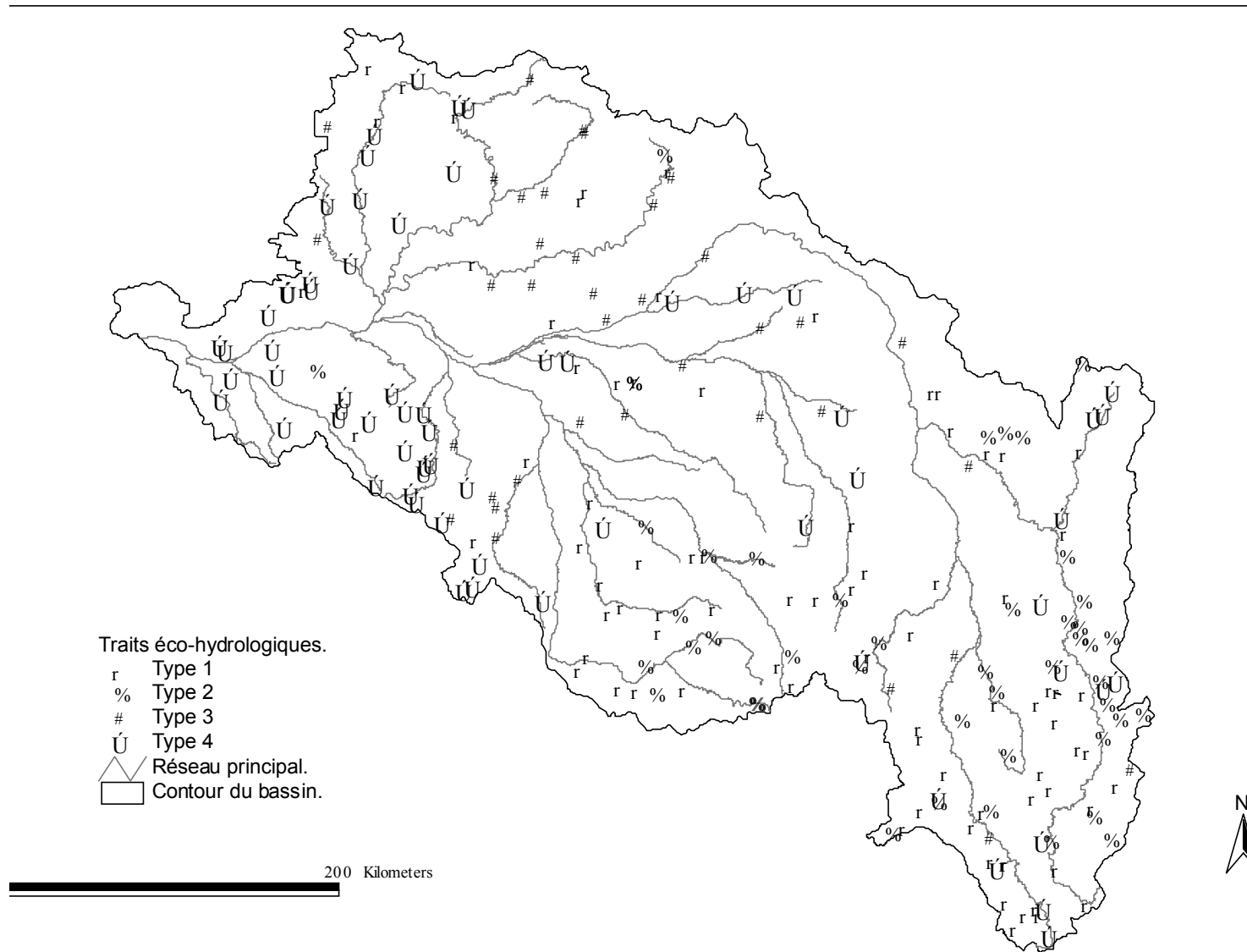


Figure 4.13 : Répartition spatiale des régimes hydrologiques à partir d'une classification statistique. Stations naturelles.

Type 1 : Il est plutôt dans la moyenne des moyennes pour quatre caractéristiques d'écoulement. C'est en quelque sorte un type de régime moyen. Il garde néanmoins des valeurs assez élevées de ces 4 variables.

La distribution spatiale du type 1 n'est pas organisée au contraire des 3 autres types. Nous verrons dans la figure 4.15 ci-après que le type 1 concerne essentiellement les dépressions sédimentaires. Cette région n'est pas organisée au sens géographique, ce qui explique la répartition du type 3. Néanmoins ce type est présent dans toutes les régions. Il subit de toute évidence l'effet de la surface du bassin et ce malgré une certaine homogénéité des valeurs entre les régions.

Type 2 : Il est caractérisé par une moyenne des CRUAN et de NLOP les plus fortes. Cela traduit un régime d'écoulement à forte variabilité de crue et aussi le caractère imprévisible des débits.

C'est assez représentatif du régime hydrologique du haut bassin de la Loire, plutôt ruisselant, sous influence de précipitations continentales avec effets orographiques et un réseau de drainage naturel très dense.

Type 3 : Il est caractérisé par une valeur moyenne de DCN30 la plus forte et une moyenne de CRUAN la plus faible. Cela traduit un régime d'écoulement aux étiages soutenus, sans creux prononcé, et aux crues modérées.

C'est assez représentatif des tables calcaires (TC) qui sont caractérisées par de bonnes nappes d'alimentation qui jouent aussi le rôle de tampon vis-à-vis des crues.

Type 4 : Il est caractérisé par une valeur moyenne de DCN30 la plus faible, et par une moyenne des M les plus fortes.

Cela correspond bien à la région granitique du Massif Armoricaïn (MA).

Nous retrouvons bien au travers des localisations spatiales des 4 types régionaux les valeurs moyennes des caractéristiques d'écoulement qui concordent avec les traits fonctionnels (présence ou absence de nappe consistantes, influences géologique et climatique) des régions du bassins de la Loire.

- **Distribution des types de régime par hydro-écorégions**

La première analyse consiste à étudier la fréquence des types de régimes hydrologiques à l'intérieur d'une hydro-écorégion d'experts sans tenir compte de la taille des bassins versants. La figure 4.15 présente l'histogramme pour chaque hydro-écorégion et la proportion relative des types rencontrés.

TC et MCBLA présentent une diversité des proportions des types de régimes ; on y retrouve pour les deux régions les 4 types de régime (à faible proportion pour le type 4 dans le MCBLA). Le massif armoricaïn **MA** est composé principalement du type 2, associé à une faible proportion de type 1.

MCDS ; MCBLA ; MCPL sont dominées par un seul type de régime (type 1). La région MCBLA comporte une faible proportion du type 4. En résumé, le Massif Central est lui majoritairement composé de type 1 (à plus de 60% pour ce type de régime).

Les tables calcaires ligériennes **TC** quant à elles présentent une proportion plus élevée de type 4 par rapport aux autres régions.

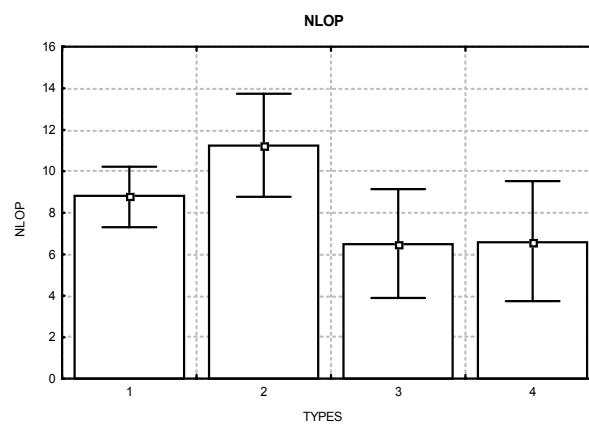
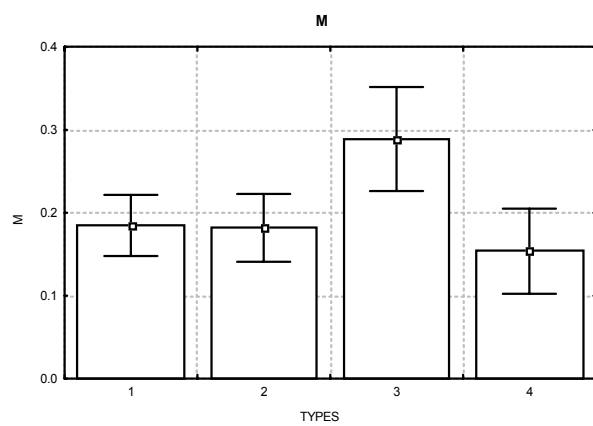
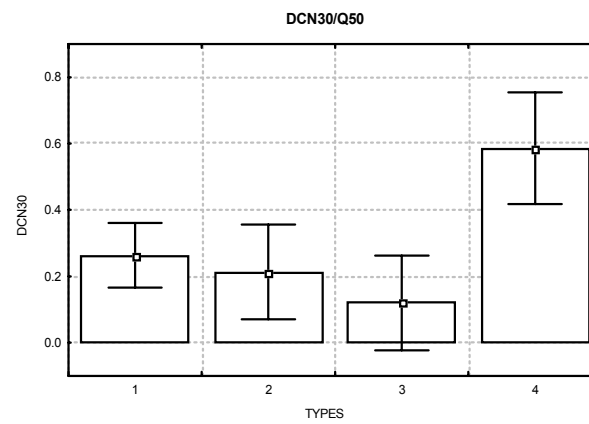
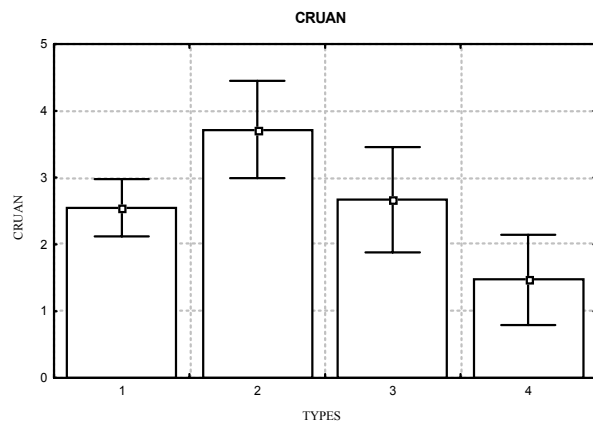


Figure 4.14 : Caractéristiques d'écoulement de synthèse par type de régime.

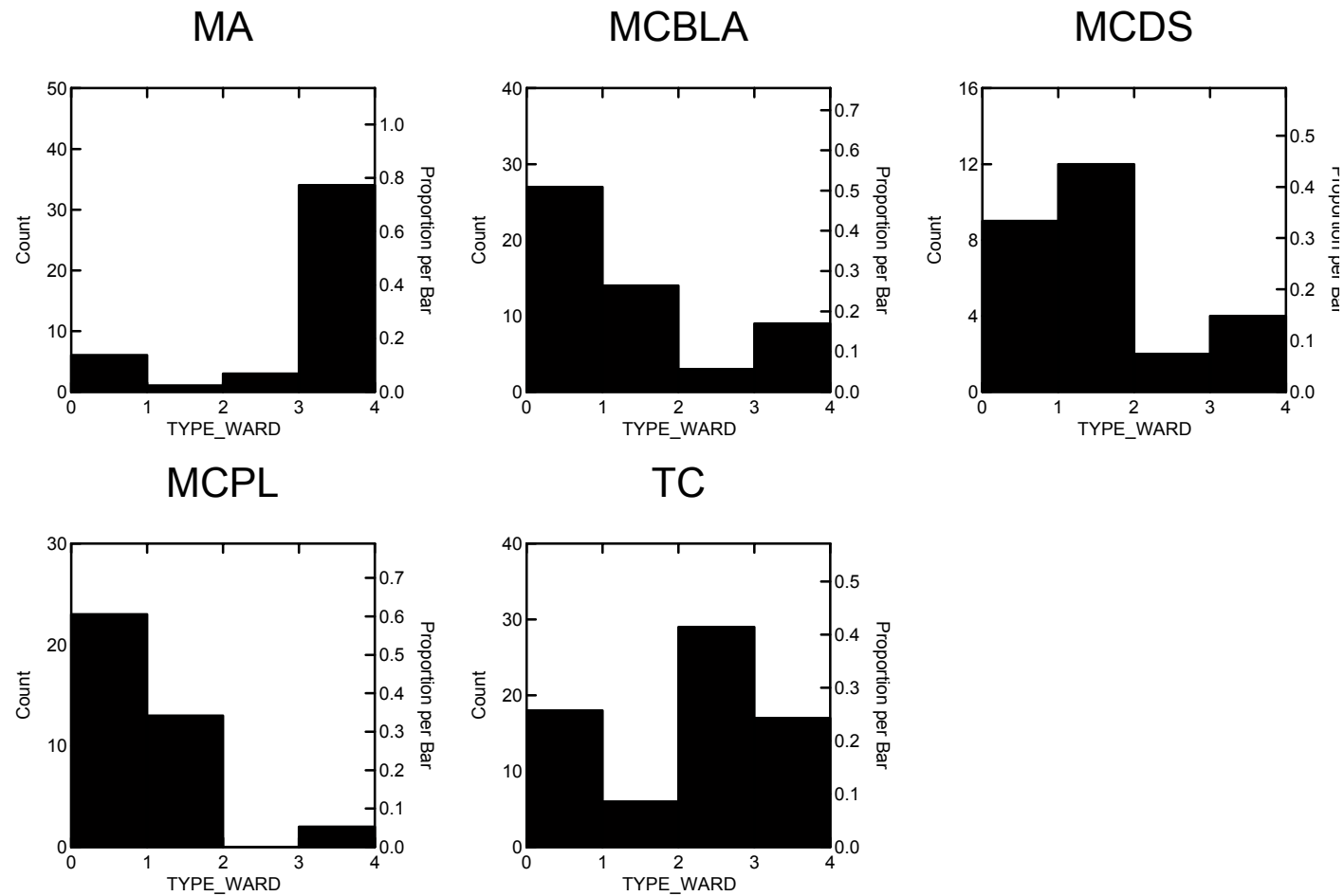


Figure 4.15 : Fréquence des types de régimes selon Ward dans les hydro-écorégions d'experts.

CONCLUSIONS

L'objectif de cette partie était la mise en évidence d'un lien statistique entre les descripteurs de la variabilité hydrologique et certaines caractéristiques physiques du bassin de la Loire.

Les principaux résultats :

L'effet des ouvrages hydrauliques est le plus sensible sur la NACC (Nombre d'accroissement des débits journaliers) qui peut soit diminuer (hypothèse émise de petite capacité d'ouvrage), soit augmenter comme c'est le cas dans le Massif Central Bassin Loire Allier MCBLA (hypothèse émise d'une grosse capacité d'ouvrage). Nous retiendrons cependant que la dynamique d'un écosystème aquatique est le résultat d'un équilibre avec l'ensemble des caractéristiques hydrologiques. Par conséquent, il nous semble préférable de travailler sur la notion de trait éco-hydrologique plutôt que sur une caractéristique particulière (figure 4.16).

Nous avons pu définir 5 traits éco-hydrologiques à partir des 240 stations naturelles : les régimes dominés par des crues prévisibles, des crues imprévisibles, des étiages prévisibles, des étiages imprévisibles et un régime intermédiaire par rapport à ces dominantes.

La répartition des traits éco-hydrologiques concorde en grande partie avec la Classification statistique et du découpage en hydro-écorégions d'experts. La spécificité de ces caractéristiques d'écoulement est de décrire les réalisations statistiques peu fréquentes des débits.

68% du découpage d'experts en hydro-écorégions s'avèrent pertinents pour les valeurs régionales des 30 caractéristiques éco-hydrologiques retenues après analyse de corrélation. Ce pourcentage est tout à fait tolérable. La notion d'hydro-écorégion se justifie donc comme premier découpage d'investigation d'un grand bassin versant avec pour objectif d'affiner l'acquisition d'informations sur un maillage plus fin. Rappelons que son principal avantage repose sur des caractéristiques spatiales largement disponibles.

Le résultat de la Classification Ascendante Hiérarchique CAH nous a montré 3 grandes zones homogènes dans lesquelles nous retrouvons l'entité Tables Calcaires (TC) au nord de la Loire, l'entité granitique du Massif Armoricaire (MA) sud intérieur, et une entité haut bassin composée du Limousin (MCPL) et du Haut bassin Loire-Allier (MCBLA).

Les principales perspectives :

Les fortes corrélations relevées lors de la réduction du nombre de caractéristiques de 44 à 21 laissent supposer la possibilité de développer des relations mathématiques qui seraient basées sur des caractéristiques répandues. Ainsi, les nombreux travaux qui ont porté sur la régionalisation de caractéristiques d'écoulement plus classiques permettraient d'extrapoler les traits hydrologiques à des bassins non suivis.

La mise en évidence que ces descripteurs éco-hydrologiques ont un lien, compris ou supposé, avec certaines caractéristiques physiques reste à faire dans une

prochaine étape. On s'appuiera pour cela sur des analyses statistiques de corrélation entre types de traits éco-hydrologiques et des grandeurs physiques répertoriées ou mesurables telles :

- la taille du bassin versant, densité de drainage dans le bassin versant, morphologie du bassin versant,
- le bassin versant homogène à un descripteur ou non,
- la géologie, le climat, le relief, l'occupation du sol,
- la géométrie hydraulique des cours d'eau

Ce travail est désormais possible. Le tracé des contours de bassin versant topographique vient d'être automatisé. De là, il est possible d'extraire les caractéristiques physiques internes à cette limite. Cette méthode avait besoin des outils et des données de la base SIG-Loire. Il devient possible d'analyser l'ensemble des deux informations disponibles au niveau du bassin versant (physiques et éco-hydrologiques).

En terme de gestion, si l'on fait l'hypothèse que les régimes à caractéristiques d'écoulement prévisibles ont permis l'installation d'écosystèmes aquatiques spécialisés, a contrario les régimes à caractéristiques d'écoulement imprévisibles devraient avoir permis l'installation d'écosystèmes ubiquistes et tolérants, voire à des successions fragiles et localisées d'écosystèmes spécialisés. L'influence des gestions hydrauliques, compte tenu de leur importance relative au regard des écoulements naturels, sera probablement plus dommageable sur les systèmes spécialisés que sur les systèmes ubiquistes. Si l'on considère les spécificités régionales de ces deux types d'adaptation, il semble que les linéaires de rivière connaîtront des durées de retour plus courtes à un état naturel aux régimes d'écoulement imprévisibles. En effet, les régions au relief chahuté présentent un réseau de drainage naturel très ramifié aux multiples confluences. Par contre, les régions à relief estompé présentent une gradation amont aval de leur réseau de drainage naturel.

On peut supposer un lien de ces caractéristiques régionales avec la morphologie locale des rivières et par conséquent avec le régime d'écoulement des eaux. Ce type de relation entre la morphologie, les ouvrages hydrauliques, leur impact sur la biologie (poissons, invertébrés) pourra être abordé dans un contexte écorégional. Nous espérons ainsi établir un modèle prédictif régionalisé des caractéristiques d'écoulement éco-hydrologiques, c'est une des voies prometteuses d'approfondissement du présent travail.

Nous rappelons que nous ne pouvons pas avancer dans nos interprétations tant que nous n'avons pas assez d'informations sur la nature des aménagements qui génère les influences des régimes hydrologiques. En effet, la typologie des aménagements apporterait des éléments d'interprétation quant aux modifications de traits hydrologiques sensibles ou peu sensibles. Il sera nécessaire de distinguer dans l'avenir :

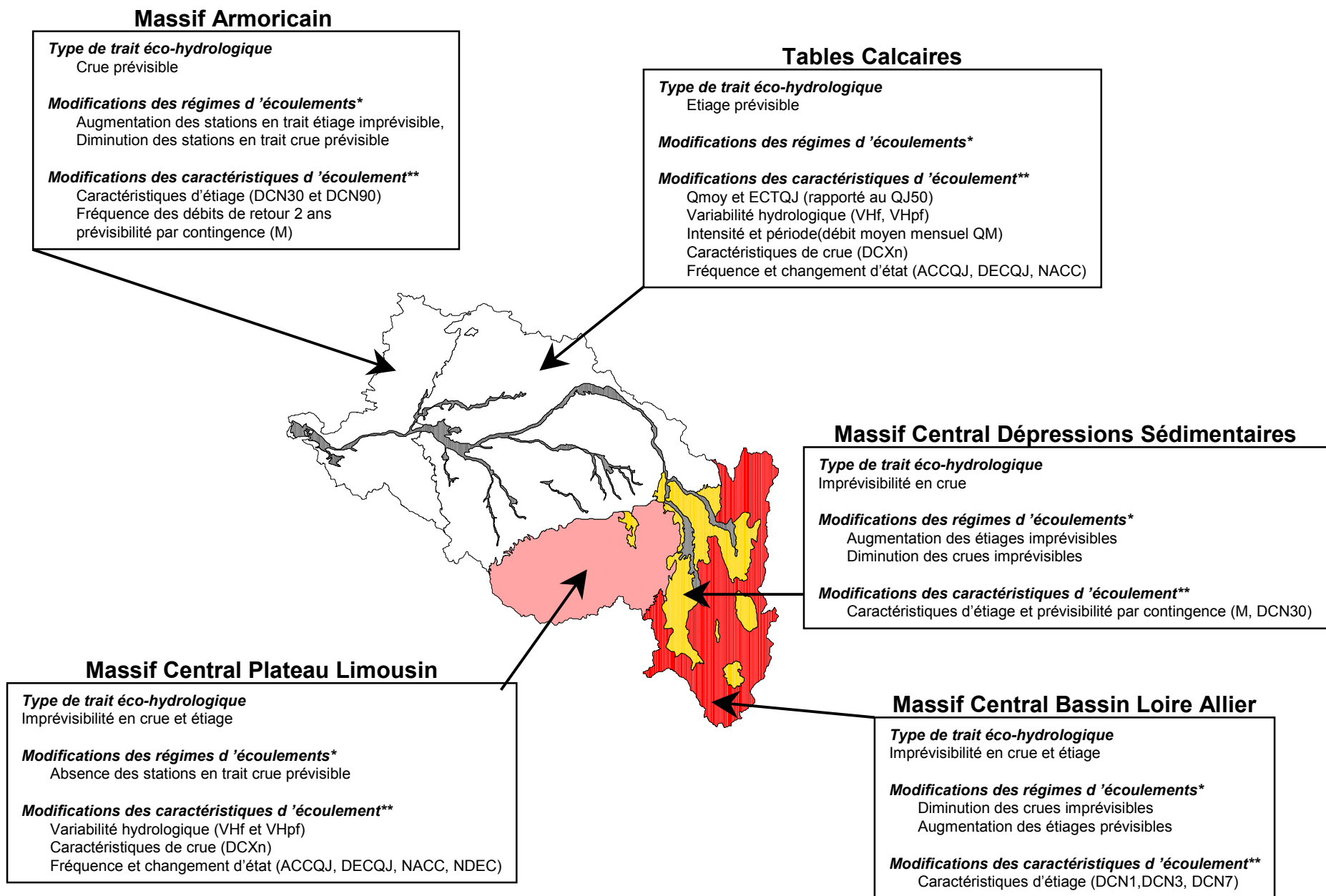
- les prélèvements sans restitution, attribués à l'irrigation,
 - les prélèvements à restitution différée, cas de l'hydroélectricité,
- Ainsi qu'une typologie des usages de l'eau i.e. type de prélèvement destiné à
- l'alimentation en eau potable,
 - l'industrie,
 - l'agriculture, l'irrigation,
 - le maintien en eau des voies navigables,
 - les piscicultures, les loisirs,
 - la production d'énergie hydroélectrique, qui se distingue en installation :
 - + au fil de l'eau, sans réservoir amont,
 - + au fil de l'eau, avec réservoir amont, fonctionnement par éclusées,
 - + avec dérivation sans réserve amont,

+ avec dérivation avec réserve amont, fonctionnement par éclusées.

Cette typologie est fonction :

- des modes d'exploitation des ouvrages,
- de la nature des ouvrages,
- des caractéristiques des cours d'eau récepteurs, type naturel,
- ainsi que des autres actions anthropiques influençant le milieu aquatique.

Naturellement, ces différents usages auront différents impacts sur le milieu aquatique, biotique et abiotique et provoqueront une modification différente des régimes et des traits hydrologiques.



* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure 4.16 : Synthèse des caractéristiques hydrologiques, par hydro-écorégion, des cours d'eau du bassin de la Loire.

Chapitre 5. L'utilisation du sol.

V.1. INTRODUCTION

L'utilisation du sol et son évolution liée aux activités humaines sont de bons indicateurs pour l'analyse et l'étude du fonctionnement des écosystèmes terrestres ou aquatiques. Certains types spécifiques de cette utilisation du sol par l'homme tels que certaines pratiques agricoles, la construction de routes et de bâtiments, le drainage des zones humides, la sylviculture, peuvent exercer une pression sur les écosystèmes aquatiques. En acquérir une bonne connaissance et bien comprendre la distribution géographique de cette occupation sont par conséquent nécessaires.

L'objectif de cette étude est de développer une méthode d'aide à l'interprétation de l'utilisation du sol couplée avec un système d'information géographique (SIG). *Ce travail serait utile par la suite pour établir une relation de causalité avec l'écosystème aquatique.*

La mesure des processus surfaciques d'utilisation du sol nécessite le développement de méthodes d'analyse et d'intégration de données à plusieurs échelles spatiales et de méthodes d'interprétation en termes d'attributs biophysiques de la surface. En effet, l'espace naturel ou anthropisé est un système hiérarchique et emboîté, de la région au niveau local, et son étude doit se faire à plusieurs échelles et niveaux de précision. L'occupation du sol est un thème qui suit cette logique.

Les classifications des modes d'utilisation du sol pour les milieux naturels, agricoles et urbains que l'on a choisi d'étudier sont :

- la population,
- l'élevage, et
- l'occupation du sol.

L'analyse de l'occupation du sol du bassin de la Loire s'effectue sur deux séries de données qui ne sont pas collectées à la même échelle :

- la première provient de l'INSEE concernant le Recensement Général de la Population (RGP en 1990) et le Recensement Général de l'Agriculture (RGA en 1988),
- la deuxième source de données émane de l'IFEN (Institut Français de l'Environnement). Elle s'applique uniquement à l'occupation du sol.

Deux échelles sont prises en compte, l'une considère la globalité du bassin versant (variabilité spatiale de l'utilisation du sol sur l'ensemble du bassin), l'autre uniquement des zones tampons liées longitudinalement au tracé des cours d'eau (quantification de l'utilisation du sol au bord des rivières).

V.2. MATERIELS ET METHODES.

V.2.1. LES DONNEES.

V.2.1.1. LES DONNEES INSEE/RGA - RGP.

Les données de l'INSEE proviennent du Recensement Général de l'Agriculture (RGA) réalisé en 1988. Chaque commune, qui est la cellule territoriale de base de la France, est renseignée (environ 5600 communes sur le bassin de la Loire) selon les trois catégories d'utilisation du sol :

- la démographie : le nombre d'habitants, la densité de la population, des caractéristiques démographiques (enclavement, capacité d'accueil, indice de jeunesse),
- l'élevage : bovins, ovins, caprins, porcins, et volailles,
- l'occupation du sol :
 - + la terre labourée renseigne principalement : les céréales, les cultures industrielles et les cultures irriguées,
 - + la surface toujours en herbe,
 - + la surface agricole utile, qui est la somme de la terre labourée, de la surface toujours en herbe et des cultures permanentes,
 - + la forêt sans distinction majeure.

Ces variables sont exprimées suivant les points communaux, représentés par le chef-lieu de la Commune. Cela représente effectivement le lieu de résidence des chefs d'exploitation pour chaque entité représentée.

Remarque : La plupart des variables comprises dans cette base de données (population, élevage, culture) ont été déjà analysées lors de l'étude Phase I de la Loire (Wasson et al., 1993).

V.2.1.2. LES DONNÉES CORINE LAND COVER.

CORINE Land Cover est une source de données de l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), inscrite dans le cadre d'un grand projet de la Commission de l'Union Européenne (Agence Européenne de l'Environnement). Un des objectifs de CORINE Land Cover est l'inventaire cartographique de l'occupation des terres essentiellement pour la constitution d'un système d'information environnementale. La source principale d'information est l'utilisation de la télédétection (Spot et Landsat). La surface minimale **des unités spatiales** cartographiées est de **25 ha**.

La nomenclature de l'occupation du sol est classée en 44 postes de troisième niveau, qui peuvent être divisés en 15 rubriques de second niveau et finalement en 5 grandes classes (Tableau 5.1).

Remarque : Les données nous ont été fournies - exception faite du département de l'Orne - pour les 28 départements concernés dans le bassin de la Loire. Les fichiers sont fournis sous le format d'exportation d'Arcinfo ®. La dimension des fichiers CORINE est de 130 Mégaoctets sur l'ensemble du bassin de la Loire.

V.2.2. CHOIX METHODOLOGIQUES.

Ce travail examine trois catégories d'utilisation du sol :

- **La population.**

Dans la classification des relations entre le sociosystème et les fleuves, Bethemont (1999) établit comme premier critère, le nombre de population. Au-delà de cet effet du nombre sur l'environnement, il faut aussi compter avec les conséquences de la distribution spatiale de la population. Plusieurs paramètres peuvent exprimer ces deux facteurs et seront analysés :

- l'effectif de la population à une certaine date,
- la densité de population,
- la population urbaine et le développement des zones urbaines,
- d'autres indices démographiques ont été calculés sur les données INSEE.

L'indice d'enclavement a été défini par l'INSEE à partir de la distance d'accès à certains services. La valeur négative de cette variable reflète l'isolement de certaines communes.

L'indice de Jeunesse est le rapport entre l'effectif des moins de 20 ans et celui des plus de 60 ans dans la population. Cet indice reflète la dynamique de la population et le pourcentage d'actifs.

La fragilité démographique a été estimée selon Wasson et al. (1993) à partir des combinaisons par commune des variables précédentes ainsi que d'autres. La fragilité démographique par hydro-écorégion est ensuite déduite par la valeur moyenne de l'ensemble des communes contenues dans l'hydro-écorégion :

- Indice de jeunesse < 0.6 (i.e. les moins de 20 ans représentent moins de 60% des plus de 60 ans),
- % de population en ZPIU $< 20\%$,
- densité de population faible < 30 hab.. au km²,
- moyenne de l'indice d'enclavement > 8 km,
- diminution de la population sur la période de 1975-1982 et 1982-1990.

L'eau est le support de nombreuses activités, qui engendrent des impacts potentiellement négatifs vis-à-vis des écosystèmes naturels. L'augmentation de la population (souvent concentrée aux abords des milieux riverains) constitue certainement la cause principale de la pression subie par le milieu. La majorité des infrastructures urbaines se trouve en bordure de cours d'eau ou de plans d'eau. Cette pression consiste en :

- l'augmentation du rejet,
- l'augmentation de l'urbanisation, donc de l'imperméabilisation,
- l'augmentation des infrastructures,
- l'augmentation de besoin de protection,
- l'augmentation de la fréquentation des milieux riverains.

- **L'élevage.**

L'étude de la répartition de l'élevage par hydro-écorégion se fait par le rapport entre le nombre de bétail et de volailles et la surface agricole utile (SAU), afin d'estimer la pression de l'élevage sur le milieu aquatique.

Ce paramètre sera exprimé par le nombre de :

- bovins,
- porcins,
- ovins et caprins,
- volailles,

- ils peuvent être agrégés par communes en un paramètre UGB (Unité Gros Bétail), rapporté aux surfaces fourragères principales (SFP). La combinaison de paramètre UGB/SFP permet de distinguer l'élevage extensif de l'élevage intensif ainsi que l'élevage hors sol. Toutefois, le seuil entre extensivité et intensivité des pratiques d'élevage reste très fluctuant.

Le développement de l'élevage a pour conséquence vis-à-vis des écosystèmes aquatiques une augmentation essentiellement des charges de pollution.

- **L'occupation du sol.**

Nous avons gardé dans notre analyse les 44 nomenclatures de CORINE et les catégories disponibles dans la base INSEE. Pour l'ensemble des problématiques et des objectifs concernant les milieux aquatiques, nous avons opté pour une re-classification des nomenclatures données par les bases d'origine. Nous avons choisi de modifier la nomenclature de base donnée par les deux sources de données (Cf. Tableau 5.1) en cinq grands types qui peuvent être énumérés globalement comme suit :

- zone urbanisée
- culture
- forêt
- prairie
- cours d'eau et plan d'eau, marais et tourbières

Ces cinq grands types sont ensuite redistribués en quatorze types pour les données CORINE (Cf. Tableau 5.1).

Remarque : A propos de l'occupation du sol, nous avons choisi de ne présenter dans cette étude que les résultats concernant les 5 grandes classes d'occupation du sol, ceci dans un objectif pour faciliter la lecture. Les résultats des autres nomenclatures d'occupation du sol (14 niveaux, CORINE 1, 2 et 3 niveaux) se trouvent en Annexe 5.

Tableau 5.1 : Nomenclatures Corine et les types associés.

Code Corine niveau 1		Code Corine niveau 2		Code Corine niveau 3		Code cinq types		Code quatorze types	
1	Urbains	11	Tissu urbain	111	Tissu urbain continu	1	Urbains	11	Tissu urbain continu
				112	Tissu urbain discontinu	1		11	
		12	Zone urbain et réseaux	121	Zones industrielles et commerciales	1		11	
				122	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés	1		12	Tissu urbain discontinu
				123	Zones portuaires	1		12	
				124	Aéroports	1		12	
		13	Chantiers	131	Extraction des matériaux	1		12	
				132	Décharges	1		12	
				133	chantiers	1		12	
		14	Espace urbain	141	Espace verts urbains	1		12	
				142	Equipement sportifs et de loisirs	1		12	
2	Cultures et prairies	21	Irrigation	211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	2	Cultures	21	Cultures
				212	Périmètres irrigués en permanence	2		23	Périmètres irrigués
				213	Rizières	2		23	
		22	Culture permanente	221	Vignobles	2		22	
				222	Vergers et petits fruits	2		22	Cultures permanentes
				223	Oliveraies	2		22	
		23	Prairies	231	Prairies	4	Prairies	41	Prairies
		24	Cultures	241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	2		21	
				242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	2		21	
				243	Territoire principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante	2		21	
				244	Territoires agro-forestiers	2		21	
3	Forêts et divers	31	Forêt	311	Forêts de feuillus	3	Forêts	31	Forêts de feuillus
				312	Forêts de conifères	3		32	Forêts de conifères
				313	Forêts mélangées	3		33	Forêts mélangées
		32	Pelouses et broussailles	321	Pelouses et pâturages naturels	4		42	Pâturages
				322	Landes et broussailles	3		33	
				323	Végétation sclérophylle	3		33	
				324	Forêts et végétation en mutation	3		33	
		33	Divers	331	Plages, dunes, sables	5	Eaux	54	Divers Eaux
				332	roches nues	5		54	
				333	Végétation clairsemée	3		33	
				334	Zones incendiées	5		54	
				335	Glaciers et neiges éternelles	5		54	
4	Zones humides	41	Marais continentaux	411	Marais intérieurs	5		51	Marais et tourbières
				412	tourbières	5		51	
		42	Marais maritimes	421	Marais maritimes	5		51	
				422	Marais salants	5		51	
				423	Zones intertidales	5		51	
5	Eaux	51	Cours et plan d'eau	511	Cours et voies d'eau	5		52	Cours et voies d'eau
				512	Plans d'eau	5		53	Plans d'eau
		52	Littorales	521	Lagunes littorales	5		54	
				522	Estuaires	5		54	
				523	Mer et océan	5		54	

V.3. LES TRAITEMENTS

La première analyse consiste à caractériser l'utilisation du sol pour chaque hydro-écorégion, l'analyse s'effectue aussi bien sur l'ensemble du bassin versant considéré que sur des zones tampons autour du tracé fluvial (figure 5.1).

La deuxième analyse consiste à valider la pertinence du découpage en régions d'experts en prenant comme Unités Spatiales d'Intégration les bassins versants unitaires (596 individus) définis en Introduction Générale :

- les centres communaux qui se trouvent à l'intérieur du bassin versant sont rattachés directement à celui-ci,
- les polygones de CORINE sont découpés selon les limites des bassins versants.

V.3.1. LES TRAITEMENTS SURFACIQUES.

Ce type de traitement a pour objectif de couvrir l'ensemble du bassin versant de la Loire. Le niveau de perception correspond à un grain fin (bassin versant de la Loire dans son ensemble) d'où la nécessité d'une approche plus surfacique.

Elles sont exprimées en deux catégories :

- Le pourcentage de surface affecté à chacune des classes d'occupation sur chacune des zones d'étude,
- le pourcentage d'occupation du sol dominant sur chacune des unités spatiales considérées.

V.3.1.1. TRAITEMENT DES DONNEES INSEE.

Les points communaux des données INSEE-RGA ont été gardés en premier lieu comme une base d'Unité Spatiale d'Intégration (King, 1993), afin de visualiser directement la répartition spatiale de l'occupation du sol sans traitement de type krigeage (Wasson et al., 1993 ; Bessenay et al., 1997). Ensuite, la méthode de calcul pour chaque bassin versant utilise le cumul de la superficie pour chaque classe d'occupation du sol par centres communaux se trouvant à l'intérieur de chaque bassin versant (King ; 1993).

Il faut noter que les données correspondant à une commune sont relatives à la résidence du chef d'exploitation. D'où la possibilité de rencontrer des parcelles qui sont déclarées dans une commune mais qui se trouvent en réalité dans une autre commune,

V.3.1.2. TRAITEMENT DES DONNEES CORINE.

Les données Corine Land Cover sont établies par département. Dans un premier temps, il est nécessaire de les découper aux limites du bassin de la Loire pour les départements limitrophes du contour. Ensuite, il suffit de les agréger, pour les avoir sur la surface totale du bassin versant de la Loire. Il est alors possible de croiser ces informations avec le découpage en hydro-écorégions et en bassin versant unitaire.

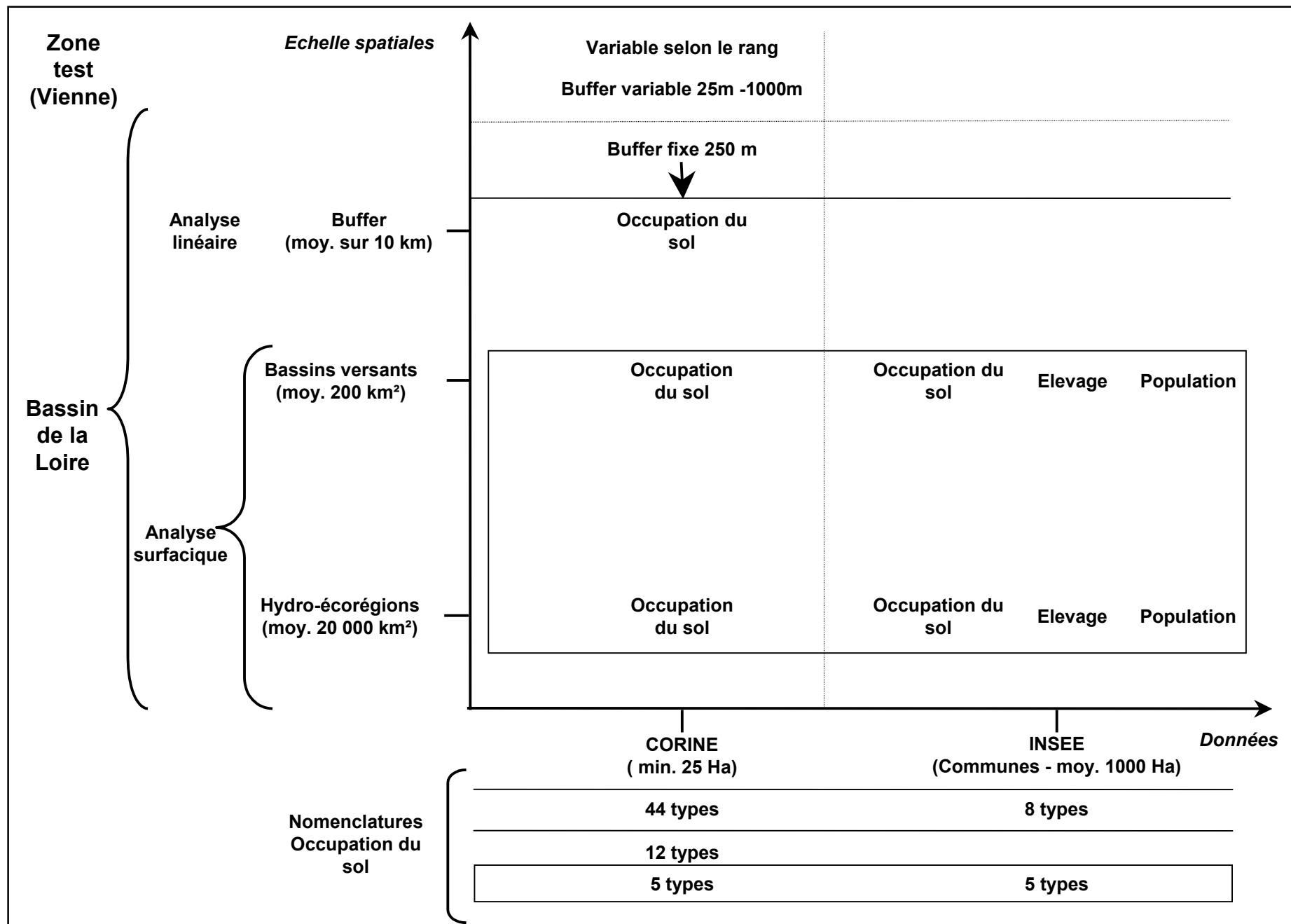


Figure 5.1 : Méthodologie de traitement des données de l'utilisation du sol sur le bassin de la Loire.

V.3.2. LES TRAITEMENTS LINEAIRES.

Ce type d'approche nous permet d'évaluer le taux d'occupation des corridors fluviaux à partir des données Corine Land Cover. Deux méthodes d'estimation des couvertures d'occupation de sol ont été utilisées dans ce cadre :

- en premier lieu, nous avons essayé de varier la taille de buffer sur une zone test de 25 m à 1000 m. En dessus de 250 m, nous avons appelé l'occupation du sol "paysage global" des corridors rivulaires. Ce paysage donne une certaine idée du "potentiel" d'occupation de cet espace. En dessous de cette valeur, nous l'avons appelé "ripisylve potentielle" parce qu'il reflète le potentiel de ce qui existe aux bords des cours d'eau.

- ensuite nous avons choisi un buffer fixe sur l'ensemble des cours d'eau du bassin quelle que soit leur taille, nous n'avons considéré dans cette approche qu'une taille de buffer de 250m.

Nous rappelons l'importance de ces zones pour le bon fonctionnement des cours d'eau : zone de rétention de pollution diffuse, zone de fourniture de matières trophiques, ou dans un autre sens, zone à forte sensibilité à l'érosion ou à la fourniture de matériaux solides et de bois morts. C'est également une zone de prédilection pour les emprises urbaines, bien qu'il s'agisse d'une zone d'inondation, etc.

Remarque : Seule sur les données CORINE (occupation du sol) a été réalisée cette approche. Nous estimons que l'agrégation des données et le non-référencement géographique sur les données INSEE ne permettent pas d'obtenir une bonne évaluation. Il n'est pas possible de quantifier la population et l'élevage, à partir des données INSEE mises à notre disposition.

V.3.2.1. TRAITEMENT DES DONNEES BD CARTHAGE (1:50 000^{EME}).

- Le réseau hydrographique et les traitements préalables.

A partir du réseau hydrographique de la Loire, fourni par convention pour cette étude par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (fichier BD Carthage de l'IGN), nous avons créé des zones tampons (ou buffer) de trois types :

- un buffer variable de 25, 50, 100, 250, 500 et 1000 m du linéaire du cours d'eau (sur une région test),
- un buffer constant de 250m de part et d'autre de chaque rive de la rivière (sur l'ensemble du réseau hydrographique de la Loire),

V.3.2.2. LA SUPERPOSITION ENTRE LE BUFFER ET L'OCCUPATION DU SOL.

Selon les trois types de buffer choisis, un croisement (ou overlay) a été réalisé sur la couche d'occupation du sol :

- sur l'ensemble du bassin de la Loire, afin d'affecter par ailleurs une variabilité inter-régionale de l'occupation du sol,
- sur chaque hydro-écorégion pour analyser la variabilité intra-régionale de l'occupation du sol.

V.4. LES RESULTATS.

Les tableaux des catégories d'utilisation du sol, quels que soient les problèmes considérés et la classification ainsi que les échelles retenues, fournissent généralement des données significatives. Tant pour les interprétations scientifiques que pour des bases d'information pour les gestionnaires.

V.4.1. LES RESULTATS. CARACTERISATION DES HYDRO-ECOREGIONS.

V.4.1.1. LA POPULATION DU BASSIN DE LA LOIRE.

Au recensement général de la population de 1990, le bassin de la Loire comptait 7,755 millions d'habitants (Tableau 5.2). Le taux annuel d'accroissement était globalement évalué à 0.125% lors du recensement de 1982. Il s'agit donc d'une population qui *n'évolue pas* rapidement par rapport à la moyenne nationale (Sources INSEE, 1990).

La population ligérienne est très inégalement répartie sur le territoire. Wasson et al. (1993) ont mis en évidence deux seuils de densités pour différencier les zones fortement urbanisées (valeurs supérieures à 200 habitants au km²) et les zones de faible densité (30 habitants au km²) : Le tableau 4.2.d traduit les structures de conurbation. Cette disposition fait percevoir que la population se répartit inégalement aussi entre les villes (6 % des communes en 1990) et les campagnes (60 % des communes en 1990).

Cette inégalité varie régionalement. Les trois quarts de la population restent concentrés dans les grandes vallées des régions Tables Calcaires. La densité moyenne est de 76 hab./km² sur l'ensemble du bassin. Toutefois, comme le tableau 4.2.c l'indique, les densités varient de moins de 40 hab./km² dans les régions Massif Central Plateau Limousin où vivent 9 % des habitants du bassin, à 127 hab./km² dans celle de Massif Central Dépressions Sédimentaires (pour 11% de la population en 1990) (figure 5.2).

Remarque : Dans les Vallées Alluviales, la densité de la population atteint jusqu'à 196 hab./km².

La répartition de la population par commune montre une nette variabilité entre les hydro-écorégions. Dans ce calcul, nous avons retenu les seuils indiqués par Bethemont dans le rapport Loire Phase I. Nous avons passé en 5 classes de quantiles le nombre de population par commune : <200 ; 200-350 ; 350-600 ; 600-1250 ; 1250-50000 et >50000 hab.

30% des communes de la région Massif Central Bassin Loire Allier comptent moins de 200 habitants, alors que plus du tiers des communes de la région Massif Armoricaïn a plus de 1.000 habitants. C'est aussi dans cette dernière, que le pourcentage de commune plus de 50000 habitants est le plus fort du bassin de la Loire.

Le Tableau 5.2.e montre l'évolution démographique du bassin de la Loire. Cette évolution est calculée sur la période de 1975 à 1982 ainsi qu'entre 1982 et 1990 :

- elle révèle les régions dynamiques aux bilans continuellement positifs: Massif Armoricaïn, Massif Central Dépressions Sédimentaires et Tables Calcaires (entre les 3 dates de recensement),
- le dépeuplement ancien et constant de la partie Massif Central du bassin (Massif Central Bassin Loire Allier et Massif Central Plateau Limousin).

Les résultats concernant des divers indices démographiques confirment les résultats cités ci-dessus. S'agissant de la distribution régionale de la population du bassin de la Loire, nous pouvons opérer la distinction entre :

- la région Massif Armoricaïn où résident 20% de la population du bassin de la Loire avec une densité de 90 hab./km². Constituée par des communes de grande taille, avec plus 5.000 habitants pour 33% des leurs. L'évolution de la population est positive sur les 15 dernières années. L'indice de fragilité et l'indice d'enclavement sont les plus faibles du bassin. L'indice de jeunesse y est très fort.

- la région Massif Central Bassin Loire Allier comporte 13% des habitants de la Loire avec une densité de 62 hab./km². Elle est constituée par des communes de faible taille : 35% d'entre elles ont une population de moins de 200 habitants. L'évolution de la population est constamment négative sur les deux périodes. Les indices de fragilité et d'enclavement sont les plus forts du bassin. L'indice de jeunesse tombe à 0.90.

- la région Massif Central Dépressions Sédimentaires compte 11% de la population du bassin, les tailles des communes sont assez bien réparties, la densité de population est forte, soit 127 hab./km² (plus de 10% des communes ont une densité de plus 5000 hab./km²). L'évolution de la population est positive sur les deux périodes de recensement (5%). Les indices d'enclavement et de fragilité sont assez faibles. L'indice de jeunesse est moyennement fort

- la région Massif Central Plateau Limousin cumule le plus faible effectif de population du bassin de la Loire, soit 9%, une densité de 40 habitants au km², la plus faible des régions étudiées, sachant que 75% des communes ont une densité de moins de 30 habitants au km². Un dépeuplement constant de -3% sur les deux périodes. Des indices de fragilité et d'enclavement très forts et un indice de jeunesse très faible (0.68).

- la région Tables Calcaires rassemble 30% de la population du bassin de la Loire. La taille des communes est assez bien répartie. La densité de population assez faible, soit 56 hab./km², mais l'accroissement de la population est positif, environ 2% sur les deux périodes. Les indices de fragilité et d'enclavement ainsi que l'indice de jeunesse sont moyens.

Tableau 5.2 : Caractéristiques de la population par hydro-écorégions du bassin de la Loire.

Nombre d'habitants.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nombre</i>	<i>%</i>
Massif Armoricaïn	1446600	19%
Massif Central Bassin Loire Allier	981800	13%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	878700	11%
Massif Central Plateau Limousin	707700	9%
Tables Calcaires	2339600	30%
Vallees Alluviales	1400100	18%
Loire	7754300	100%

Pourcentage de communes en fonction du nombre d'habitants.

	<i><200</i>	<i>200-350</i>	<i>350-600</i>	<i>600-1250</i>	<i>1250-50000</i>	<i>>50000</i>
Massif Armoricaïn	8,8%	14,7%	17,7%	25,4%	33,1%	0,4%
Massif Central Bassin Loire Allier	30,7%	23,6%	18,8%	14,4%	12,4%	0,1%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	12,9%	20,8%	23,4%	22,5%	20,3%	0,2%
Massif Central Plateau Limousin	21,9%	25,6%	21,8%	19,0%	11,6%	0,1%
Tables Calcaires	20,2%	21,2%	22,2%	20,2%	16,1%	0,2%
Vallees Alluviales	3,2%	10,5%	16,6%	23,0%	45,9%	0,9%
Loire	18,8%	20,5%	20,7%	20,2%	19,6%	0,2%

Densité de population (au km²).

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Denspop</i>
Massif Armoricaïn	90
Massif Central Bassin Loire Allier	62
Massif Central Dépressions Sédimentaires	127
Massif Central Plateau Limousin	40
Tables Calcaires	56
Vallees Alluviales	196
Loire	76

Pourcentage de communes en fonction de la densité de population.

	<i><30</i>	<i>30-200</i>	<i>>200</i>
Massif Armoricaïn	38,9%	5,8%	55,3%
Massif Central Bassin Loire Allier	67,8%	4,6%	27,6%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	39,7%	11,4%	48,9%
Massif Central Plateau Limousin	77,0%	3,1%	19,9%
Tables Calcaires	62,3%	4,3%	33,5%
Vallees Alluviales	18,0%	16,6%	65,4%
Loire	56,8%	5,8%	37,3%

Evolution de la population

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Evp7582</i>	<i>Evp8290</i>
Massif Armoricaïn	6,2	2,5
Massif Central Bassin Loire Allier	-3,6	-3,4
Massif Central Dépressions Sédimentaires	5,4	5,3
Massif Central Plateau Limousin	-4,9	-4,8
Tables Calcaires	2,5	2,2
Vallees Alluviales	11,9	6,8
Loire	1,9	1,0

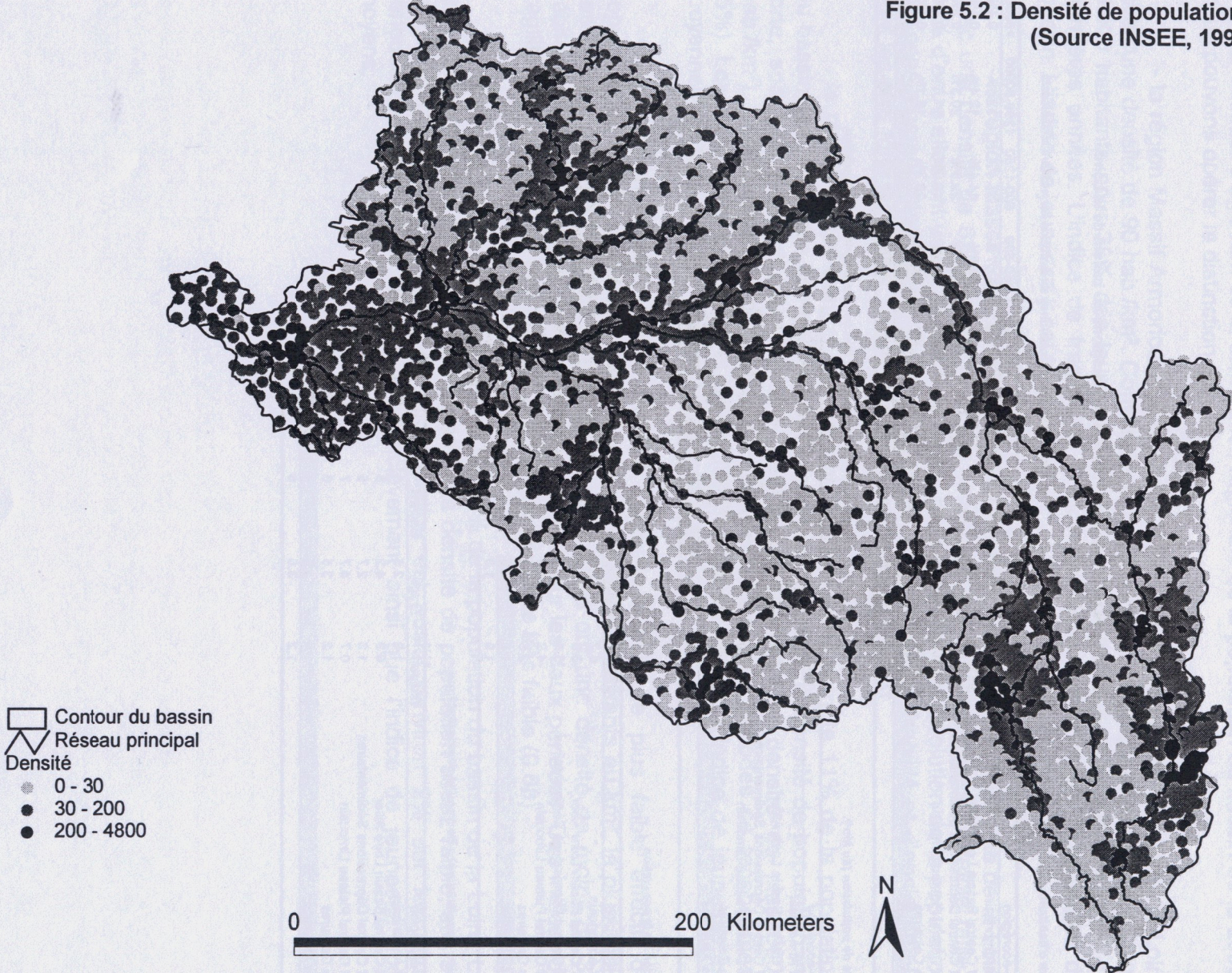
Légende.

Denspop : Densité de la population
Evp7582 : Evolution de la population entre 1975 et 1982
Evp8290 : Evolution de la population entre 1982 et 1990
IndJeun : Indice de jeunesse
Fragil : Indice de fragilité
Enclavt : Enclavement
Capackm : Capacité d'accueil
Pression : Indice de pression.

Quelques caractéristiques de fragilité démographique.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Indjeun</i>	<i>Fragil</i>	<i>Enclavt</i>	<i>Capackm</i>
Massif Armoricaïn	1,8	2,6	5	16
Massif Central Bassin Loire Allier	0,9	4,2	8	28
Massif Central Dépressions Sédimentaires	1,3	2,7	5	29
Massif Central Plateau Limousin	0,7	4,7	7	18
Tables Calcaires	1,2	3,5	6	16
Vallees Alluviales	1,5	1,8	4	39
Loire	1,2	3,5	6	21

Figure 5.2 : Densité de population par commune.
(Source INSEE, 1990)



V.4.1.2. LES ELEVAGES DU BASSIN DE LA LOIRE.

En 1990, le R.G.A. dénombre environ 6 millions de bovins, 1,5 millions de porcs, 36 millions de volailles sur les 120000km² du bassin de la Loire.

Dans cette première analyse, nous pouvons classer les régions selon le pourcentage des types d'élevage sur l'ensemble du bassin de la Loire. C'est dans les deux régions Massif Armoricaïn et Tables Calcaires que se concentrent plus de la moitié du bétail du bassin de la Loire (Tableau 5.3).

La deuxième analyse permet d'estimer, par région, l'élevage extensif de l'élevage intensif ainsi que l'élevage hors sol (Tableau 5.4).

Les valeurs moyennes des types d'élevages sur le bassin de la Loire sont données au Tableau 5.4. Il se pratique sur le bassin ligérien deux types principaux d'élevage :

- une région à élevage intensif et hors sol, la région Massif Armoricaïn où nous avons trouvé une très forte proportion quelque soit le type d'élevage, un rapport Ugb/Sfp de 2, une densité de 1.5 bovins à l'hectare, 0.42 porcs/ha et 12.8 volailles/ha,

Remarque : Les milieux agricoles fixent actuellement le seuil d'extensification à 1.5 UGB/ha, pour bénéficier les primes européennes.

- les autres régions, où les proportions sont à peu près équivalentes, sont orientées vers l'élevage "extensif". Cependant, quelques traits secondaires peuvent être remarqués.

- Les deux régions granitiques du Massif Central (Massif Central Bassin Loire Allier, Massif Central Plateau Limousin) ont une densité bovine assez élevée (1 bovin à l'hectare). La région Massif Central Plateau Limousin possède néanmoins un rapport Ugb/Sfp plus fort et un rapport volailles/sau plus faible que son voisin.

- Les Tables calcaires présentent une faible proportion de densité bovine par SAU (0.5 bovin/ha). Cette région dispose d'un faible rapport de porc/sau. Par contre, la proportion de l'Unité Gros Bétail avec la Surface Fourragère est forte.

Nous avons illustré dans la figure 5.3 la variabilité du rapport Ugb/Sfp par commune. A l'examen, la carte illustre bien le Massif Armoricaïn à l'Ouest plus intensif que les autres régions, plus extensives.

Tableau 5.3.abc : Nombre de bovins, ovins et volailles. Par hydro-écorégion du bassin de la Loire.

Tableau 5.3.a Bovins.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nbre de bovins (en M)</i>	<i>en % ens. Loire</i>
Massif Armoricaïn	2,1	33,4%
Massif Central Bassin Loire Allier	1,0	16,7%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	0,5	7,7%
Massif Central Plateau Limousin	1,1	18,1%
Tables Calcaires	1,3	20,7%
Vallees Alluviales	0,2	3,3%
Total	6,3	100%

Tableau 5.3.b Ovins.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nbre de porcs (en M)</i>	<i>en % ens. Loire</i>
Massif Armoricaïn	0,6	39,1%
Massif Central Bassin Loire Allier	0,2	10,8%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	0,1	7,3%
Massif Central Plateau Limousin	0,2	13,8%
Tables Calcaires	0,4	25,9%
Vallees Alluviales	0,0	3,1%
Total	1,6	100%

Tableau 5.3.c Volailles.

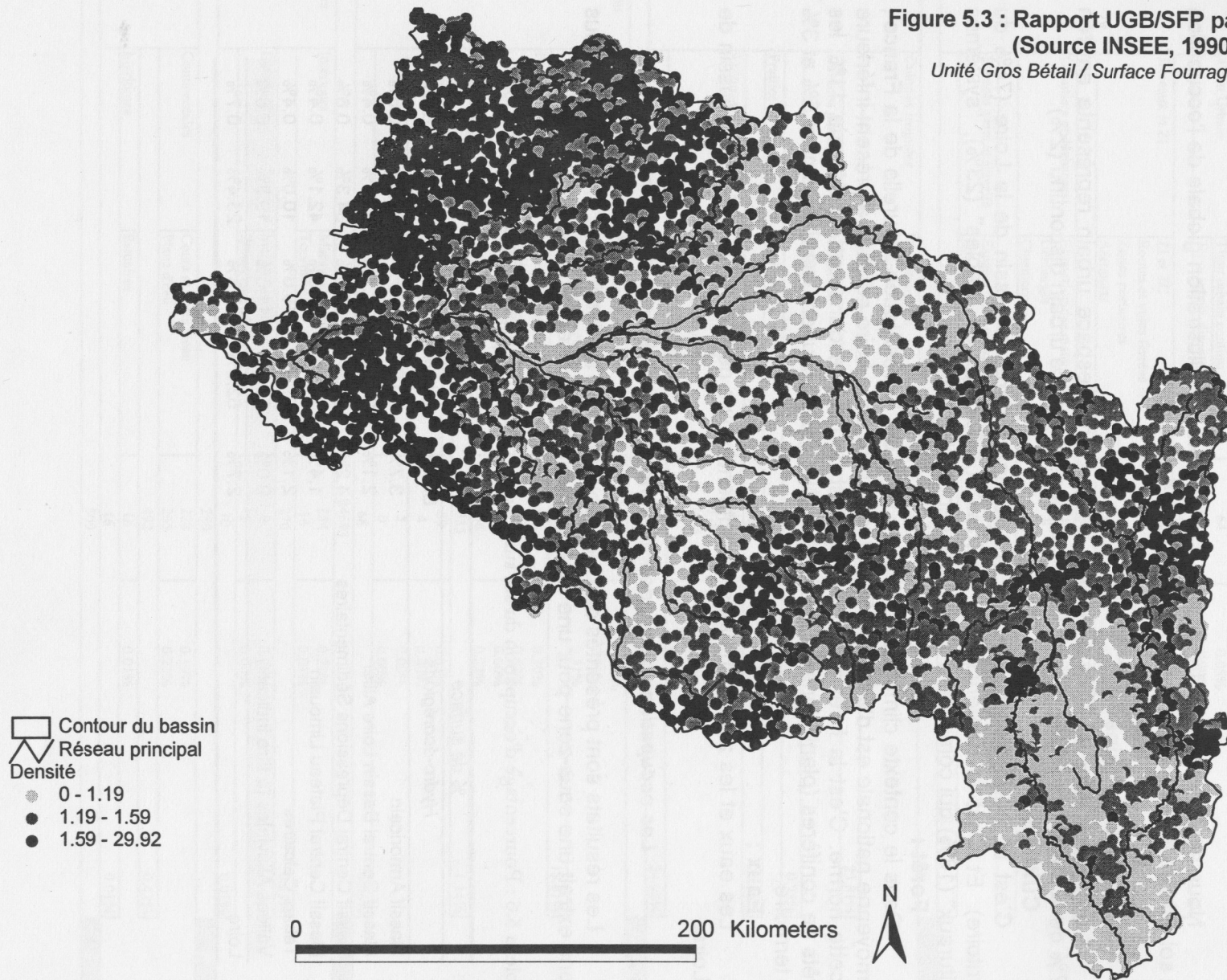
<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Nbre de volailles (en M)</i>	<i>en % ens. Loire</i>
Massif Armoricaïn	20,2	54,7%
Massif Central Bassin Loire Allier	2,8	7,7%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	1,8	4,8%
Massif Central Plateau Limousin	1,1	3,1%
Tables Calcaires	9,8	26,5%
Vallees Alluviales	1,2	3,1%
Total	36,8	100%

Tableau 5.4 : Pourcentage des rapports élevages et surfaces agricoles utiles.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Ugb/Sfp</i>	<i>Bov/Sau</i>	<i>Porcs/Sau</i>	<i>Caps/Sau</i>	<i>Vol/Sau</i>
Massif Armoricaïn	2,09	1,49	0,42	0,07	12,79
Massif Central Bassin Loire Allier	1,15	1,00	0,19	0,05	3,41
Massif Central Dépressions Sédimentaires	1,31	0,70	0,19	0,04	3,40
Massif Central Plateau Limousin	1,36	1,02	0,19	0,03	1,08
Tables Calcaires	1,45	0,47	0,13	0,09	3,55
Vallees Alluviales	1,16	0,45	0,14	0,05	3,28
Loire	1,45	0,80	0,20	0,07	4,50

Figure 5.3 : Rapport UGB/SFP par commune.
(Source INSEE, 1990)

Unité Gros Bétail / Surface Fourragère Principale



V.4.1.3. L'OCCUPATION DU SOL DU BASSIN DE LA LOIRE. ANALYSE SURFACIQUE.

- L'occupation du sol du bassin de la Loire. Données CORINE.

L'occupation du sol dans le bassin de la Loire.

Nous avons voulu montré dans le Tableau 5.5 une illustration globale de l'occupation du sol suivant les nomenclatures de CORINE (44 postes) :

Espaces urbains :

Sur l'ensemble du bassin versant de la Loire, l'espace urbain représente environ 2.7% de la superficie totale. Il est surtout composé d'espace urbain discontinu (2%).

Cultures :

C'est le mode d'occupation du sol dominant dans le bassin de la Loire (75% du territoire). Et c'est la nomenclature "**prairies**" (26%), "terres arables" (23%), "systèmes culturaux" (18%) qui composent essentiellement cette catégorie

Forêt :

Dans le contexte climatique actuel, la forêt est la végétation naturelle de la France ; la moyenne nationale est d'environ 25%, et le bassin de la Loire se situe à présent inférieure à cette norme. C'est la forêt de feuillus qui est dominante dans cette catégorie 11%, les forêts de conifères (plantations) et les forêts mélangées occupent respectivement 5% et 3% du territoire.

Eaux :

Les eaux et les zones humides constituent moins de 1% de la surface du bassin de la Loire.

Les occupations du sol pour 5 grands types à l'échelle de l'Hydro-écorégion.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.6 et sur les figures 5.5 et 5.6 (où nous avons extrait une sous-zone pour une illustration plus précise et détaillée de CORINE).

Tableau 5.6 : Pourcentage d'occupation du sol sur les cinq types sur l'ensemble du bassin de la Loire.

% de surface	5 types					
	Hydro-écorégions	Urbains	Cultures	Forêts	Prairies	Eaux
Massif Armoricaïn		3.7%	60.9%	5.0%	29.8%	0.6%
Massif Central Bassin Loire Allier		2.1%	21.0%	41.7%	34.7%	0.4%
Massif Central Dépressions Sédimentaires		4.2%	43.9%	17.0%	34.3%	0.6%
Massif Central Plateau Limousin		1.4%	35.6%	20.5%	42.1%	0.4%
Tables Calcaires		2.1%	67.9%	19.6%	10.0%	0.4%
Vallées Alluviales (à titre indicatif)		9.0%	53.3%	11.3%	19.8%	6.6%
Loire		2.7%	52.9%	20.3%	23.4%	0.7%

Tableau 5.5 : Occupations du sol du bassin de la Loire ; Données et nomenclatures CORINE.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	en km ²	% Niveau 3	% Niveau 2	% Niveau 1		
Urbain	Tissu Urbain	Tissu urbain continu	64	0,05%	2,04%			
		Tissu urbain discontinu	2336	1,99%				
			2400					
	Réseaux et ZI	ZI et ZC	373	0,32%				
		Routes et voies ferrées	40	0,03%				
		Zones portuaires	1	0,00%				
		Aéroports	57	0,05%				
			472				0,40%	
	Chantiers et décharges	Extraction des matériaux	107	0,09%				
		Décharges	9	0,01%				
Chantiers		15	0,01%					
		131		0,11%				
Espaces verts et sportifs	Espaces verts urbains	15	0,01%					
	Equipements sportifs et loisirs	177	0,15%					
		192		0,16%				
		3195			2,72%			
Cultures	Cultures irriguées	Terres arables	27981	23,80%	23,81%			
		Périmètres irrigués	7	0,01%				
		Rizières	5	0,00%				
			27993					
	Cultures permanentes	Vignobles	670	0,57%				
		Vergers	214	0,18%				
			884				0,75%	
	Prairies	Prairies	30637	26,06%				26,06%
			30637					26,06%
	Cultures	Cultures annuelles	12	0,01%				
Systèmes culturaux		21791	18,54%					
Végétation naturelle		7555	6,43%					
Territoires agro-forestiers		3	0,00%					
		29361		24,98%				
		88874			75,61%			
Forêts et sol nu	Forêts	Forêts de feuillus	13869	11,80%	19,81%			
		Forêts de conifères	6471	5,51%				
		Forêts mélangées	2949	2,51%				
			23290					
	Pâturages et landes	Pelouses et pâturages naturels	353	0,30%				
		Landes et broussailles	726	0,62%				
		Végétation sclérophylle	1	0,00%				
		Forêts et végétation arbustive	256	0,22%				
			1335				1,14%	
	Sol nu	Plages, dunes et sables	59	0,05%				
Roches nues		4	0,00%					
Végétation clairsemée		5	0,00%					
Zones incendiées		0	0,00%					
		68		0,06%				
		24693			21,01%			
Zones humides	Intérieures	Marais intérieurs	254	0,22%	0,23%			
		Tourbières	16	0,01%				
			270					
	Littorales	Marais maritimes	8	0,01%				
		Zones intertidales	2	0,00%				
		10		0,01%				
		280			0,24%			
Eaux	Continental	Cours et voies d'eau	228	0,19%	0,42%			
		Plans d'eau	265	0,23%				
			492					
	Maritimes	Estuaires	16	0,01%				
				16				0,01%
		509			0,43%			

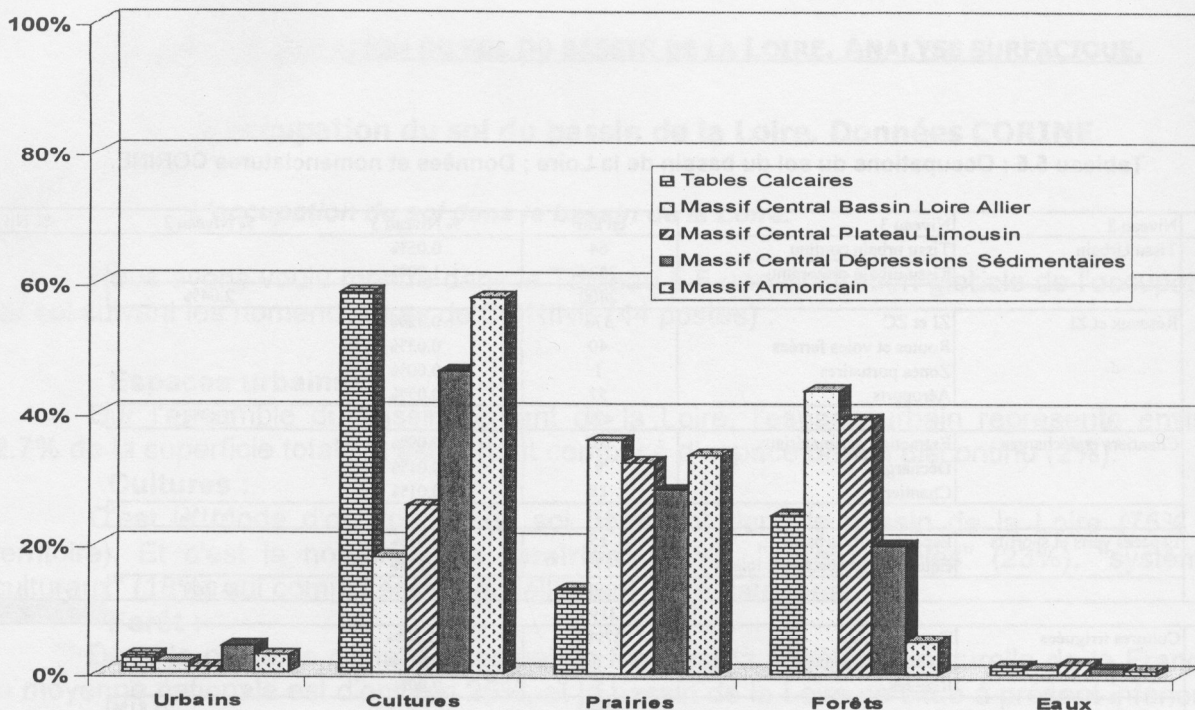


Figure 5.4a : Par type d'occupation du sol

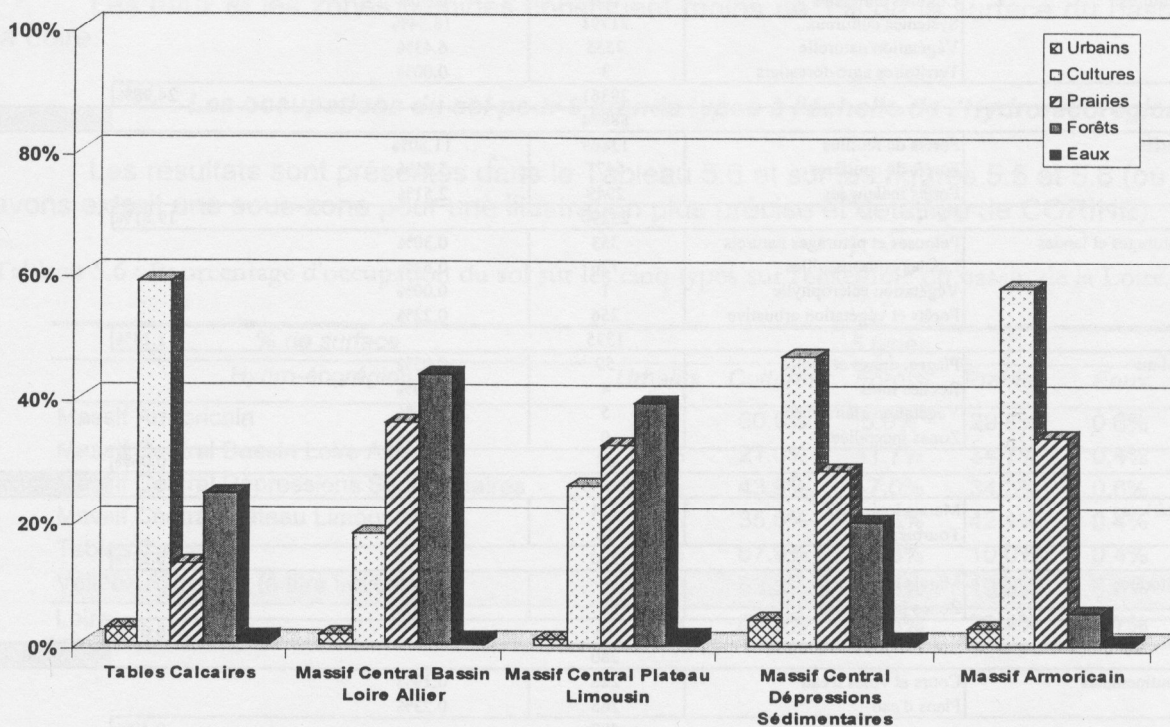


Figure 5.4b : Par hydro-écocoréon

Figure 5.4 : L'occupation du sol du bassin de la Loire, par hydro-écocoréon.

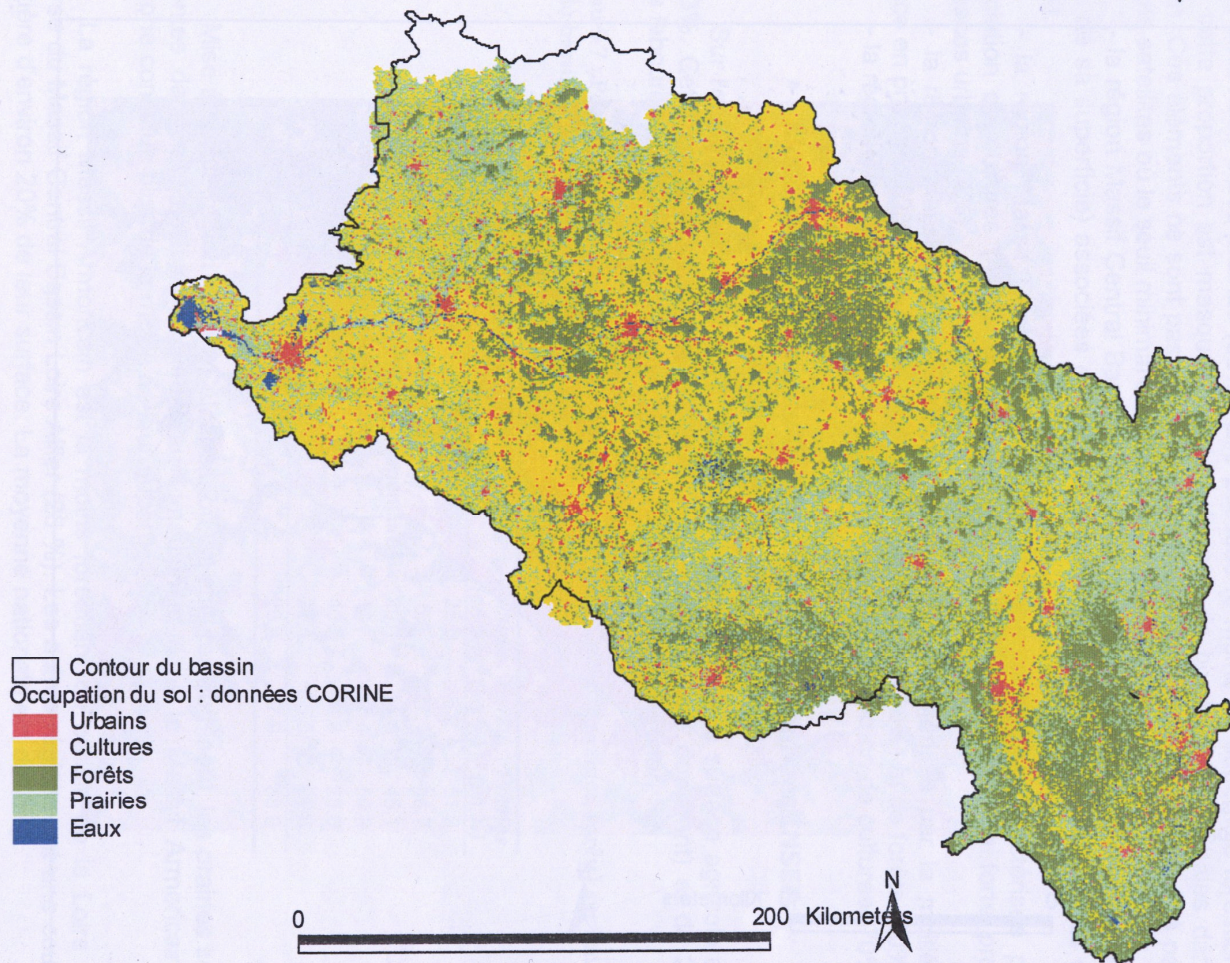
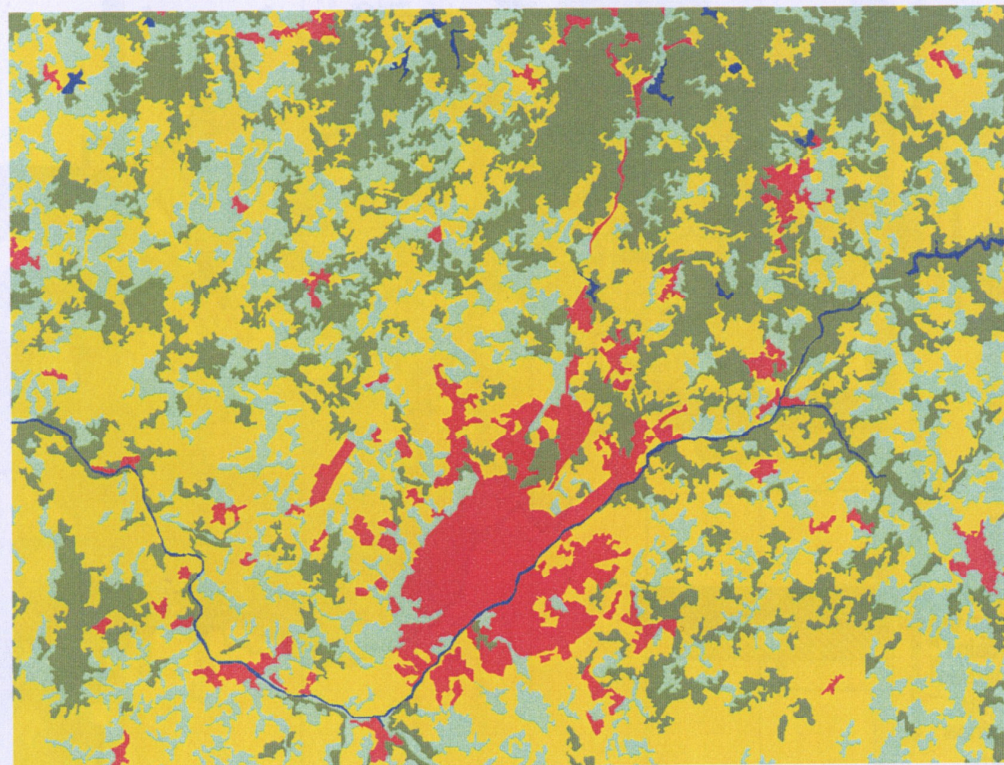


Figure 5.5 : Occupation du sol, données CORINE (Source IFEN).



- Contour du bassin
- Occupation du sol : données CORINE
- Urbains
- Cultures
- Forêts
- Prairies
- Eaux

0 10 Kilometers



Figure 5.6 : Occupation du sol du bassin de la Loire, données CORINE (zoom)(Source IFEN).

Dans cette donnée, nous rencontrons surtout une forte variabilité inter-régionale marquée par quelques traits majeurs Cf. (Tableaux 5.5) : les proportions d'occupation du sol varient fortement d'une région à l'autre. Dans les régions Massif Armoricaïn, Massif Central Dépressions Sédimentaires et Tables Calcaires, la proportion des prairies reste très faible par rapport aux cultures. Les deux autres régions Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier présentent les proportions inverses.

Nous pouvons résumer par hydro-écorégion les résultats des occupations du sol :

- la région Massif Armoricaïn est caractérisée par une forte dominance des cultures (60%) associées à des prairies (30%). Elle possède le moins de superficie forestière (5%), mais cette proportion est masquée par la présence de bocages et de haies dans cette région. Ces éléments ne sont pas pris en considération lors de la classification à partir des images satellites où le seuil minimal d'appréhension est de 25 ha,
- la région Massif Central Bassin Loire Allier présente une forte proportion de forêts (42% de sa superficie) associées en second lieu à des prairies (35%) puis à des cultures (20%),
- la région Massif Central Dépressions Sédimentaires est caractérisée par une association de cultures (44%) et de prairies (34%) ainsi que par une forte proportion d'espaces urbains (4%),
- la région Massif Central Plateau Limousin est caractérisée par la moitié de sa surface en prairies (42%) suivie d'une association de cultures (35%) et de forêts (20%).
- la région Tables Calcaires présente une très forte proportion de cultures (70%).

• L'occupation du sol du bassin de la Loire. Données INSEE.

Sur l'ensemble du bassin de la Loire, le pourcentage de la surface agricole utile est de 63%. Cette surface est constituée de 38% de prairies (type dominant) et de 25% de terres labourées. La forêt quant à elle occupe 18% du territoire ligérien.

Tableau 5.7 : Pourcentage d'occupation du sol sur les trois types (Cultures, prairies, forêts) sur l'ensemble du bassin de la Loire.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Cultures (en %)</i>	<i>Forêts (en %)</i>	<i>Prairies (en %)</i>
Massif Armoricaïn	25.6	6.2	51.6
Massif Central Bassin Loire Allier	5.5	27.1	48.7
Massif Central Dépressions Sédimentaires	20.1	14.5	45.1
Massif Central Plateau Limousin	8.4	17.4	54.8
Tables Calcaires	40.5	19.8	23.0
Vallées Alluviales	26.4	16.3	25.0
Loire	25.4	17.9	38.0

Mise à part la région Tables Calcaires, où les cultures dominent, les prairies sont très présentes dans le Massif Central Plateau Limousin et dans le Massif Armoricaïn, cette catégorie constitue plus de la moitié de leur superficie.

La région Massif Armoricaïn est la moins forestière du bassin de la Loire (6%) à l'inverse du Massif Central Bassin Loire Allier (26 %). Les autres régions ont une couverture forestière d'environ 20% de leur surface. La moyenne nationale est de 25%.

Les terres arables couvrent moins de 6% de la surface de la région Massif Central Bassin Loire Allier, contre 50% pour les prés et les pâturages. Les forêts couvrent 27% de ce territoire, en fonction des données du relief mais aussi de la déprise agricole,

La structure du paysage des plaines des Tables Calcaires est différente par rapport aux situations ci-dessus décrites - plus de 40% de la terre ont été travaillées sur le plan agricole et 23% de prairies, bien que le cinquième de la superficie de cette région est occupé par la forêt (20%).

La région Massif Armoricaïn présente un pourcentage de prairies de plus de 50%, une faible proportion de forêts (6%) et un quart de la superficie en labours(25%),

La région Massif Central Plateau Limousin est dominée par la prairie (55%) , avec une faible proportion de labours (moins de 10%) et un pourcentage de forêts de 17%,

La région Massif Central Dépressions Sédimentaires offre les mêmes traits que la région Massif Central Plateau Limousin.

En examinant le Tableau 5.8, nous retrouvons les résultats cités auparavant. Le résultat sur le rapport entre la terre labourée, la forêt, la surface toujours en herbe et la superficie communale correspond aux modes d'occupation du sol. Il met en valeur les régions dominées par les labours (Tables Calcaires) et les régions d'herbage (Massif Armoricaïn, et l'ensemble du Massif Central).

Tableau 5.8 : Rapport moyen d'occupation du sol rapportée à la superficie communale du bassin de la Loire.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Sau/S</i>	<i>Forets/S</i>	<i>Sth/S</i>	<i>Terlab/Sau</i>	<i>Sth/Sau</i>
Massif Armoricaïn	78%	6%	54%	31%	68%
Massif Central Bassin Loire Allier	55%	26%	49%	11%	89%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	67%	12%	40%	37%	62%
Massif Central Plateau Limousin	64%	17%	56%	13%	87%
Tables Calcaires	69%	17%	25%	61%	39%
Vallées Alluviales	54%	15%	24%	51%	46%
Loire	66%	16%	39%	39%	61%

Sau : Surface Agricole Utile ; *S* : Superficie de la commune ; *Sth* : Surface toujours en herbe ; *Terlab* : Surface de terres labourées.

- **Comparaison sur les résultats des deux données CORINE Land Cover et RGA-INSEE.**

Pour comparer les deux sources de données, nous avons calculé la différence de pourcentage entre régions des trois types d'occupation du sol (cultures, prairies, forêts).

Nous pouvons remarquer, à partir du Tableau 5.9, que le type d'occupation "Forêt" reste stable entre les deux sources de données. En effet, sur l'ensemble du bassin de la Loire, les deux données affichent seulement 2.5% en moyenne de différence. Seule dans la région Massif Central Bassin Loire Allier, cette différence atteint les 15%.

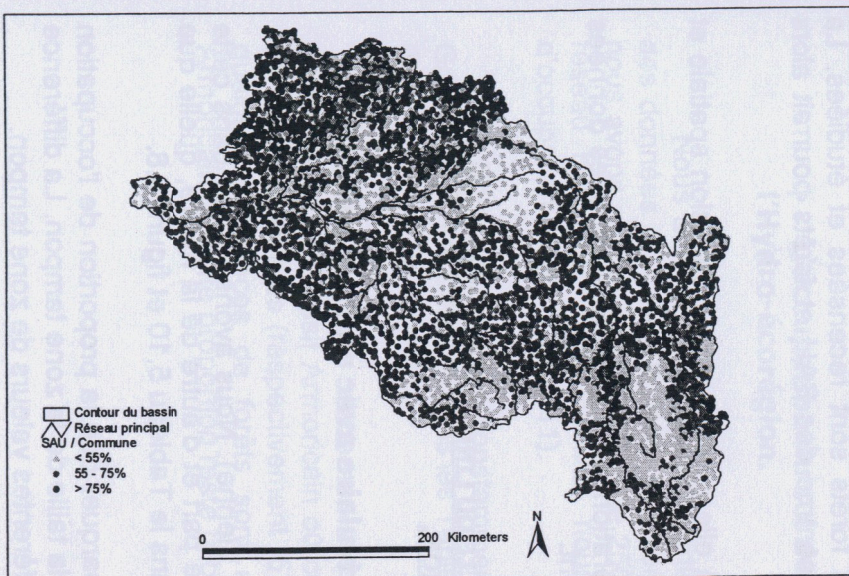


Figure 5.7a : Surface agricole utile

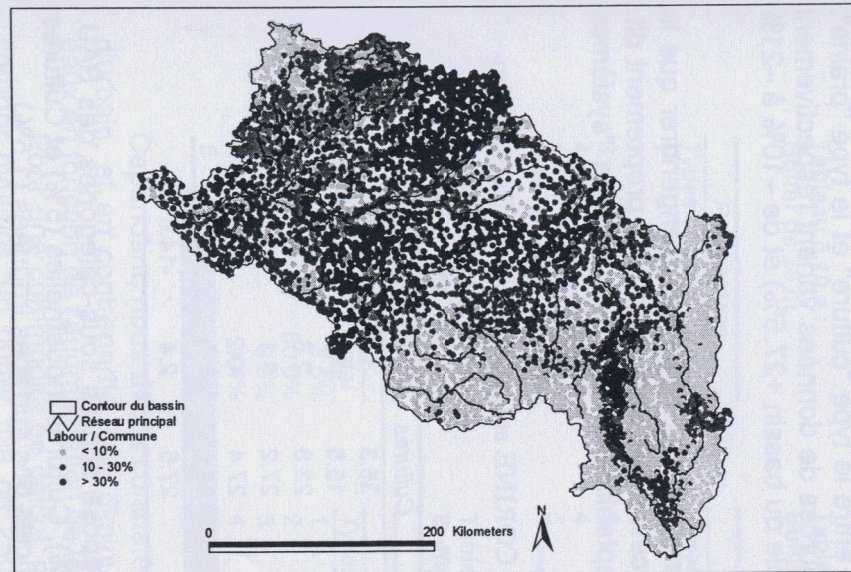


Figure 5.7b : Labour

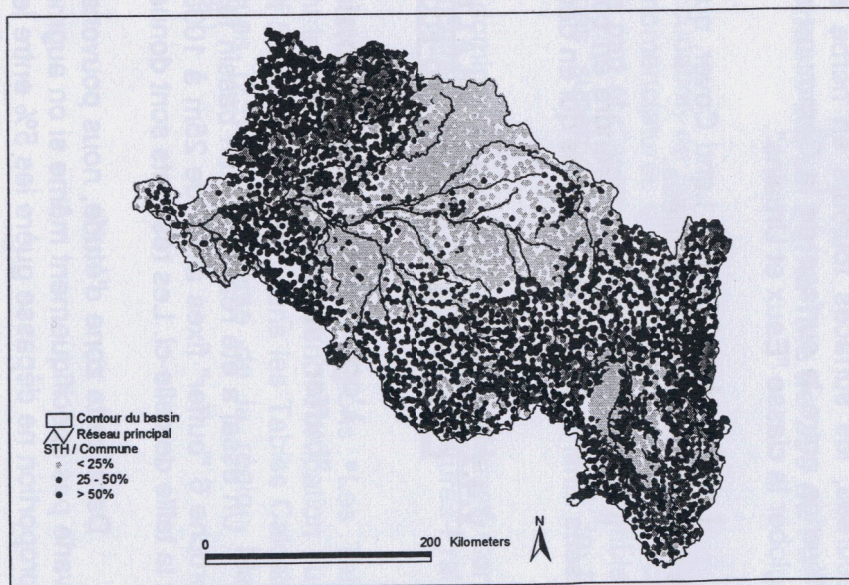


Figure 5.7c : Surface toujours en herbe

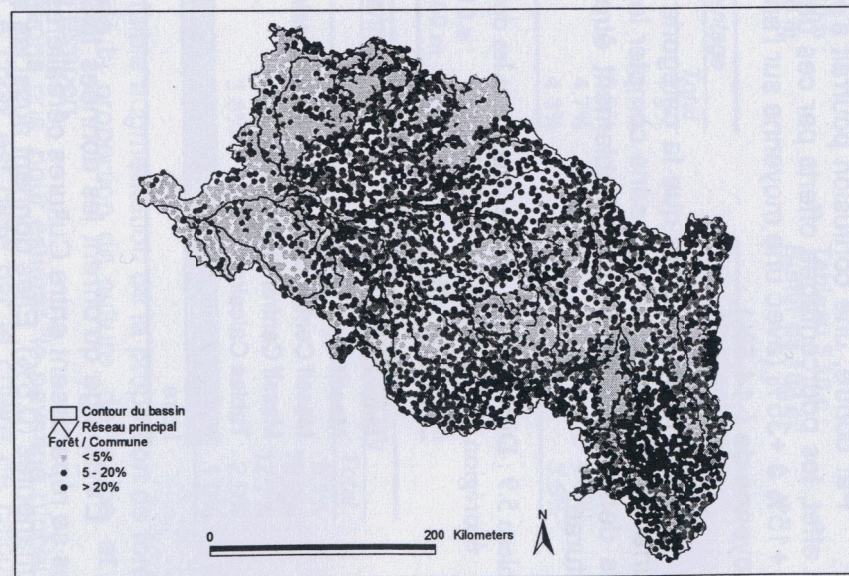


Figure 5.7d : Forêt

Figure 5.7 : Occupation du sol du bassin de la Loire, données INSEE (1988).

Par contre, une confusion pourrait s'établir entre le type "culture" et le type "prairie". En effet, les pourcentages offerts par ces deux sources de données varient respectivement de +15% à +35% (avec une moyenne sur l'ensemble du bassin +27.5%) et de -10% à -21% (moyenne de (-14.5%).

Nous pensons alors que la catégorie "prairie" de CORINE peut n'engendrer que la "surface toujours en herbe", sans compter les parcelles cultivées en prairie proprement dit. Ces dernières pourraient probablement être comptabilisées dans la catégorie "systèmes cultureux".

Tableau 5.9 : Différence de pourcentage entre les données CORINE et les données INSEE par hydro-écorégion (%CORINE - %INSEE).

<i>Hydro-écorégions</i>	<i>Cultures</i>	<i>Forêts</i>	<i>Prairies</i>
Massif Armoricaïn	35.3	-1.2	-21.8
Massif Central Bassin Loire Allier	15.5	14.6	-14
Massif Central Dépressions Sédimentaires	23.8	2.5	-10.8
Massif Central Plateau Limousin	27.2	3.1	-12.7
Tables Calcaires	27.4	-0.2	-13
Vallées Alluviales	26.9	-5	-5.2
Loire	27.5	2.4	-14.6

L'avantage qu'offrent les données INSEE repose sur les sous-catégories des SAU. Elles se répartissent entre Cultures céréalières (68%), Cultures industrielles (5%) et Cultures permanentes (0.5%). Elles donnent aussi les superficies des surfaces irriguées (1.5%).

Nous rappelons que dans les données INSEE/RGA, pour les grands types d'occupation du sol, seuls les "SAU" Surfaces Agricoles Utiles, qui regroupent les terres labourées, les surfaces toujours en herbe et les forêts sont recensées et étudiées. La différence entre la surface de la Commune et la somme des SAU et forêts pourrait alors englober la classe "Eaux et Urbains".

Les données CORINE Land Cover, quant à elles, donnent une précision spatiale et des nomenclatures plus détaillées.

Il est important alors de prendre en considération ces différences dans les données utilisées ainsi que les interprétations qui en découlent.

V.4.1.4. LES OCCUPATIONS DU SOL A L'ECHELLE DU LINEAIRE DES COURS D'EAU. CARACTERISATION PAR HYDRO-ECOREGION.

- L'occupation du sol du corridor rivulaire avec une largeur de "buffer" variable. Zone test.

Un essai a été réalisé sur un bassin test (la Vienne). Nous avons réalisé dans cette approche 6 "buffer" fixes allant de 25m à 1000m de part et d'autre de la rivière, quelle que soit la taille de celle-ci. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.10 et figure 5.8.

Dans cette zone d'étude, nous pouvons remarquer que la proportion de l'occupation ne varie pas spécifiquement même si on augmente la taille de la zone tampon. La différence de proportion ne dépasse guère les 5% entre les différentes valeurs de zone tampon.

Tableau 5.10 : Occupation du sol des rives, exemple de buffer fixe de 250 m.

Tableau 5.10.a :
Buffer de 25 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	1.8%
2	80.2%
3	9.0%
4	4.6%
5	4.5%

Tableau 5.10.b :
Buffer de 50 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	1.9%
2	80.2%
3	8.9%
4	4.7%
5	4.3%

Tableau 5.10.c :
Buffer de 100 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	2.4%
2	80.3%
3	9.0%
4	4.7%
5	3.5%

Tableau 5.10.d :
Buffer de 250 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	3.5%
2	80.0%
3	9.9%
4	4.4%
5	2.2%

Tableau 5.10.e :
Buffer de 500 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	4.4%
2	79.3%
3	11.0%
4	3.8%
5	1.5%

Tableau 5.10.f :
Buffer de 1000 m

<i>Pourcentage</i>	
<i>Types</i>	<i>Total</i>
1	5.1%
2	78.2%
3	12.7%
4	2.9%
5	1.0%

Cependant, nous avons constaté une faible augmentation de la proportion de forêt et d'urbain, et en contrepartie, une diminution de la proportion de culture, de prairie, et des eaux en fonction de l'augmentation de la zone tampon.

Pour une commodité de calcul, nous avons pris, pour estimer "le paysage global" du corridor rivulaire, un buffer fixe de 250 m. Ce choix est dicté par le critère de calcul de l'ordinateur, seuil minimal où le calcul ne génère plus des "polygones complexes" pour l'ensemble du bassin de la Loire.

- L'occupation du sol des corridors sur un buffer fixe de 250 m. Par l'Hydro-écorégion.

Nous analysons dans cette partie l'occupation du sol au bords de la rivière à partir des données de CORINE avec les mêmes nomenclatures que précédemment. Pour cela, nous avons réalisé un buffer fixe de 250m de part et d'autre de la rivière sur l'ensemble du réseau hydrographique. Ensuite, nous avons superposé ce buffer et extrait le type d'occupation du sol (Tab. 5.11).

- Nous remarquons constamment la dominance des Forêts dans le Massif Central Granitique et les Cultures dans les Tables Calcaires, ainsi que l'association Cultures-Prairies dans le Massif Armoricaïn.

- Nous pouvons discerner aussi deux grands groupes de régions : Les Tables Calcaires et les Massif Armoricaïn où ce sont les cultures qui dominent l'occupation du sol au bord des rivières (respectivement 57% et 58%). Cependant, dans les Tables Calcaires, quelques présences de forêts sont aperçues (25%), à l'inverse de la région Massif Armoricaïn où cette proportion reste faible (5%).

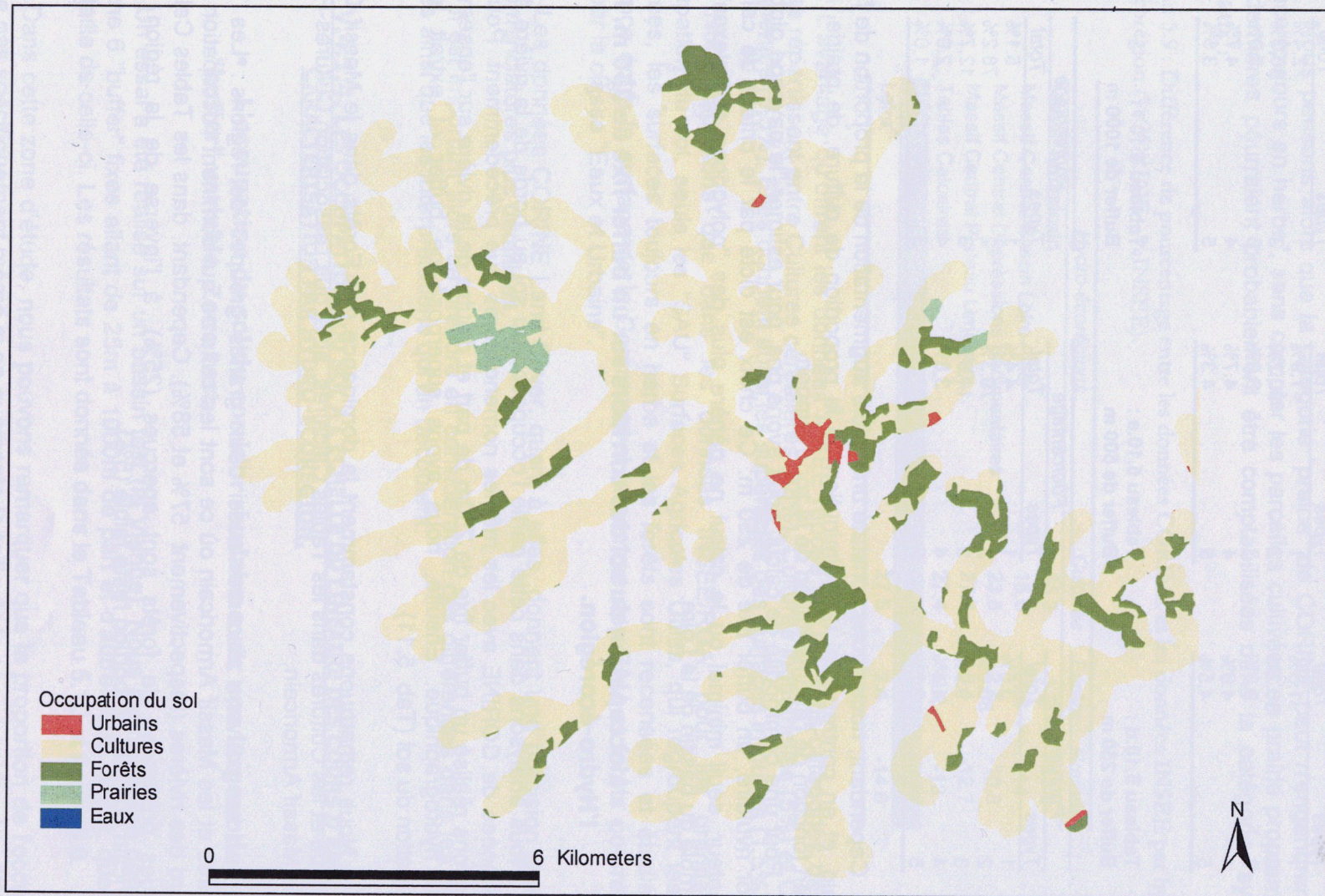


Figure 5.8 : Occupation du sol sur une zone tampon de 250m, données CORINE (Source IFEN).

- Les régions du Massif Central (Massif Central Bassin Loire Allier et Massif Central Plateau Limousin) où les cultures ne sont plus dominantes (18% et 27% respectivement). Elles sont remplacées par une forte proportion de forêts (40% en moyenne). Dans la région Massif Central Bassin Loire Allier, l'association prairies / forêts est dominante (80% de l'occupation riveraine).

- Dans la région Massif Central Dépressions Sédimentaires, la proportion des espaces urbains reste très élevée par rapport aux autres régions (4%). La pourcentage des forêts reste très faible (20%).

Tableau 5.11 : Occupation du sol des rives de 250 m par hydro-écorégion à partir des données Corine Land Cover.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Urbains</i>	<i>Cultures</i>	<i>Prairies</i>	<i>Forêts</i>	<i>Eaux</i>
Massif Armoricaïn	2.7%	57.8%	33.7%	5.1%	0.6%
Massif Central Bassin Loire Allier	1.6%	17.9%	35.8%	43.7%	0.9%
Massif Central Dépressions Sédimentaires	4.2%	46.6%	28.3%	19.9%	1.0%
Massif Central Plateau Limousin	0.9%	25.8%	32.5%	39.1%	1.6%
Tables Calcaires	2.6%	58.6%	13.0%	24.5%	1.2%
Vallées Alluviales	6.8%	48.5%	24.1%	11.1%	9.5%
Loire	2.6%	40.1%	28.4%	27.4%	1.5%

Une comparaison a été réalisée sur le rapport entre l'occupation du sol sur l'ensemble des bassin versants des régions étudiées dans le paragraphe précédent et l'occupation du sol des corridors rivulaires :

Tableau 5.12 : Rapport entre l'occupation du sol des rives de 250 m et du bassin versant par hydro-écorégion à partir des données CORINE Land Cover.

<i>Hydro-écorégion</i>	<i>Urbains</i>	<i>Cultures</i>	<i>Prairies</i>	<i>Forêts</i>	<i>Eaux</i>
Massif Armoricaïn	1.4	1.1	0.9	1.0	0.9
Massif Central Bassin Loire Allier	1.3	1.2	1.0	1.0	0.5
Massif Central Dépressions Sédimentaires	1.0	0.9	1.2	0.9	0.6
Massif Central Plateau Limousin	1.6	1.4	1.3	0.5	0.3
Tables Calcaires	0.8	1.2	0.8	0.8	0.3
Vallées Alluviales	1.3	1.1	0.8	1.0	0.7
Loire	1.0	1.3	0.8	0.7	0.5

La proportion des superficies forestières riveraines dans l'ensemble des Hydro-écorégions a augmenté par rapport à l'ensemble du bassin versant, sauf pour la région Massif Armoricaïn et le Massif Central Bassin Loire Allier où cette différence est moins visible.

La proportion de la surface urbanisée au bord des cours d'eau est plus forte par rapport à la proportion du bassin versant que dans la région Tables Calcaires.

Dans le Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Dépressions Sédimentaires, les proportions de prairies diminuent au bord des rivières, inversement aux régions Tables Calcaires et Massif Armoricaïn.

La surface du type d'occupation "eaux" augmente quelle que soit la région. Ce qui semble logique.

V.4.2. LES RESULTATS. ESSAI DE REGIONALISATION DE L'UTILISATION DU SOL SANS A PRIORI.

V.4.2.1. RESULTATS DES OCCUPATIONS DES SOLS CALCULEES A PARTIR DES DONNEES CORINE SUR DES BASSINS VERSANTS UNITAIRES.

- L'occupation du sol dominante par bassin versant.

Pour cette approche, nous avons choisi **un exemple** de typologie régionale d'occupation du bassin de la Loire. Nous proposons une typologie d'occupation du sol à partir de la représentation des classes dominantes par bassin versant sur des données CORINE Land Cover. Nous présentons dans la Figure 5.9 le résultat ainsi que le tracé des hydro-écorégions, pour une comparaison visuelle.

Nous pouvons voir de cette même figure que, la culture occupe la majeure partie du bassin de la Loire. Elle concerne l'ensemble du Massif Armoricaïn jusqu'à la limite du Massif Central Plateau Limousin, en englobant une importante surface des Tables Calcaires. Nous pouvons rencontrer aussi ce type d'occupation aussi dans la Limagne.

La prairie, quant à elle, occupe les versants Est du Limousin, le Morvan, l'Est Lyonnais et quelques petits bassins-versants du Massif Central.

La forêt domine le haut bassin de la Loire et de l'Allier, du Morvan, et de la Vienne. Nous remarquons aussi la région de la Sologne occupée dans son ensemble par cette classe.

- Validation des hydro-écorégions.

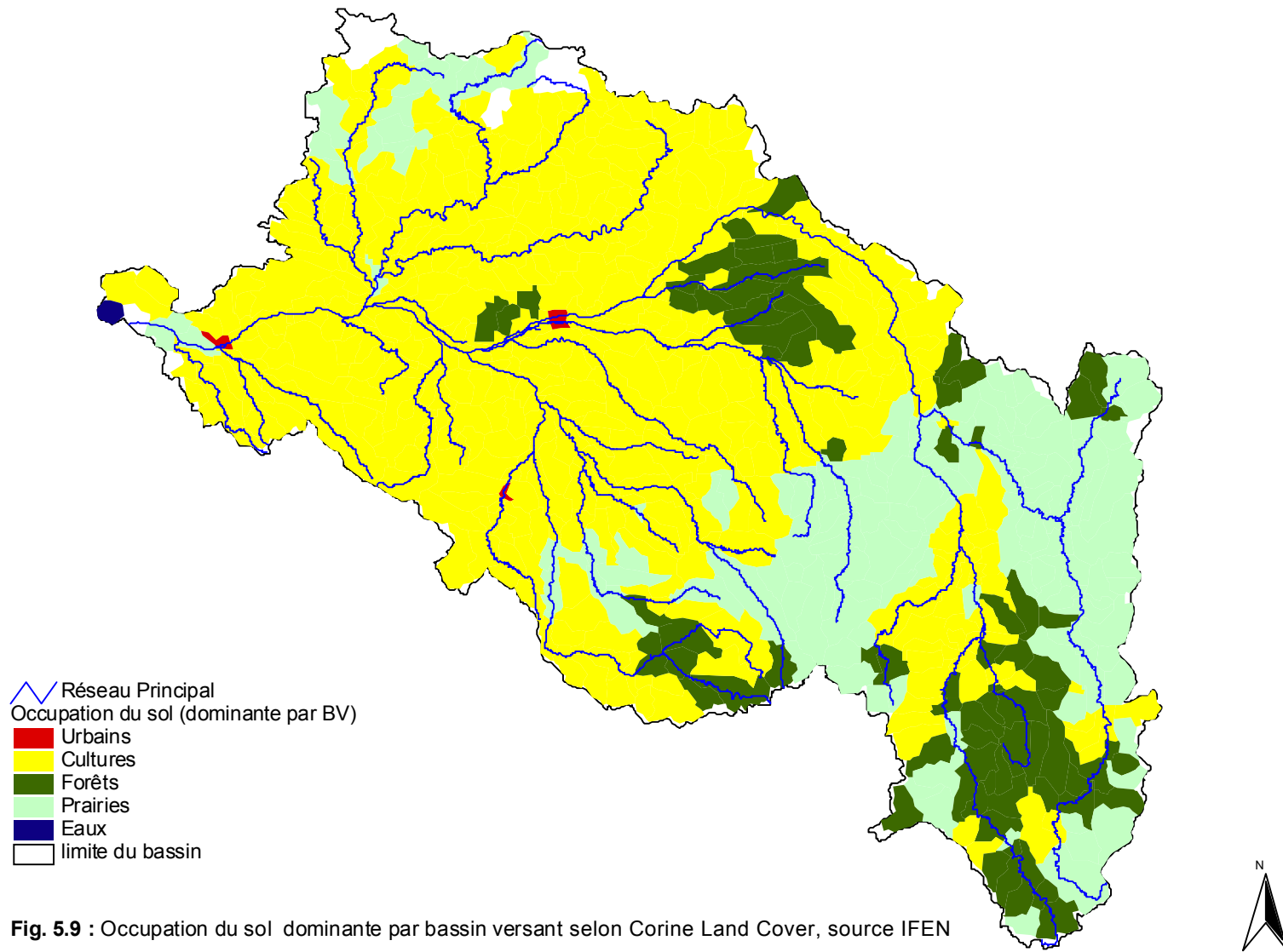
Le nord du Massif Armoricaïn est composé de bassins versants occupés par des mélanges de cultures et de prairies. Les autres sous-régions du Massif Armoricaïn ressemble fortement à la région Tables Calcaires, dominées par les cultures.

Comme nous l'avons précisé auparavant, une sous-région est rencontrée à l'intérieur des Tables Calcaires, il s'agit de la Sologne (Formations éluviales) dominée par la forêt, et considérée plutôt comme une hydro-écorégion de niveau 2 (Wasson et al., 1993).

De la même manière, le Massif Central Plateau Limousin est divisé géographiquement en deux, la partie Ouest à caractère variable, et la partie Est dominée par la prairie.

La région Massif Central Dépressions Sédimentaires est occupée par le type "culture" (particulièrement la Limagne)

Le Massif Central Bassin Loire Allier est une région où la forêt prédomine. Sauf dans la partie Morvan et Est Lyonnais où elle est remplacée par les prairies.



V.5. CONCLUSIONS.

L'objectif premier de cette partie de l'étude était de dresser un état des lieux de l'occupation du sol du bassin de la Loire à partir de cinq grandes classes : forêt, culture, prairie, urbain et eau à partir de plusieurs sources de données : Corine Land Cover et données INSEE RGA, et à plusieurs échelles : de la parcelle de 25 hectares minimum (Corine Land Cover), à l'échelle communale d'environ une dizaine de km² (RGA), en passant par une taille de bassin versant d'environ 200 km². Les modes d'occupation du sol sont aussi analysés par hydro-écorégion. L'étude de l'occupation du sol du bassin de la Loire nous a montré quelques traits caractéristiques :

- **Principaux résultats.**

De point de vue de la population, nous pouvons distinguer les régions à forte densité, des communes urbaines, de la population dynamique, en constante évolution et active (Massif Armoricaïn et Massif Central Dépressions Sédimentaires) ; une région intermédiaire, avec un dynamisme modéré, les Tables Calcaires ; et des régions à faible dynamisme, des communes rurales, une faible densité de population, un dépeuplement constant (Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier).

Au niveau de l'élevage, nous avons constaté deux types principaux : une région à élevage intensif (Massif Armoricaïn) ; et les autres régions à élevage extensif.

Pour l'occupation du sol, les premiers résultats sont d'ordre méthodologique : ils montrent une différence nette des pourcentages de type d'occupation du sol selon les données utilisées et l'échelle d'étude. Cette différence varie de 2 % pour la forêt à 28% pour les cultures entre les données Corine Land Cover et les données INSEE. Les autres résultats dépendent donc fortement de la validité de ces données. Étant donnée la taille de la zone d'étude (120 000 km²) aucune investigation sur le terrain n'a été réalisée pour valider ce constat.

En considérant les données CORINE Land Cover, ce sont les cultures qui dominent le bassin de la Loire avec 52.9 % de la surface totale du bassin suivies des prairies 23.4 %, des forêts 20.3 %, des zones urbanisées 2.7 %, et des zones humides de 0.7 %.

La moyenne ligérienne masque néanmoins quelques disparités régionales. L'Est et l'Ouest du bassin Ligérien se distinguent nettement : le Haut Bassin Loire Allier est dominé par la forêt (de feuillus) ; du plateau Limousin jusqu'au contour du Morvan, ce sont les prairies qui dominent. Dans les Tables Calcaires Ligériennes, l'occupation dominante est la culture ; alors que dans le Massif armoricaïn c'est une dominance de prairies et cultures. Ces grandes tendances d'occupation du sol coïncident fortement avec celles établies dans le cadre du découpage en hydro-écorégions établi par Wasson et al. (1993) (figure 5.10).

A partir de ces mêmes données CORINE, l'occupation du sol du corridor rivulaire avec une zone tampon de 250 m de part et d'autre de la rivière varie faiblement par rapport à l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant. Par exemple, pour le type "forêt", ce rapport varie en moyenne de 0.7 et pour le type "culture" de 1.3 pour l'ensemble du bassin de la Loire..

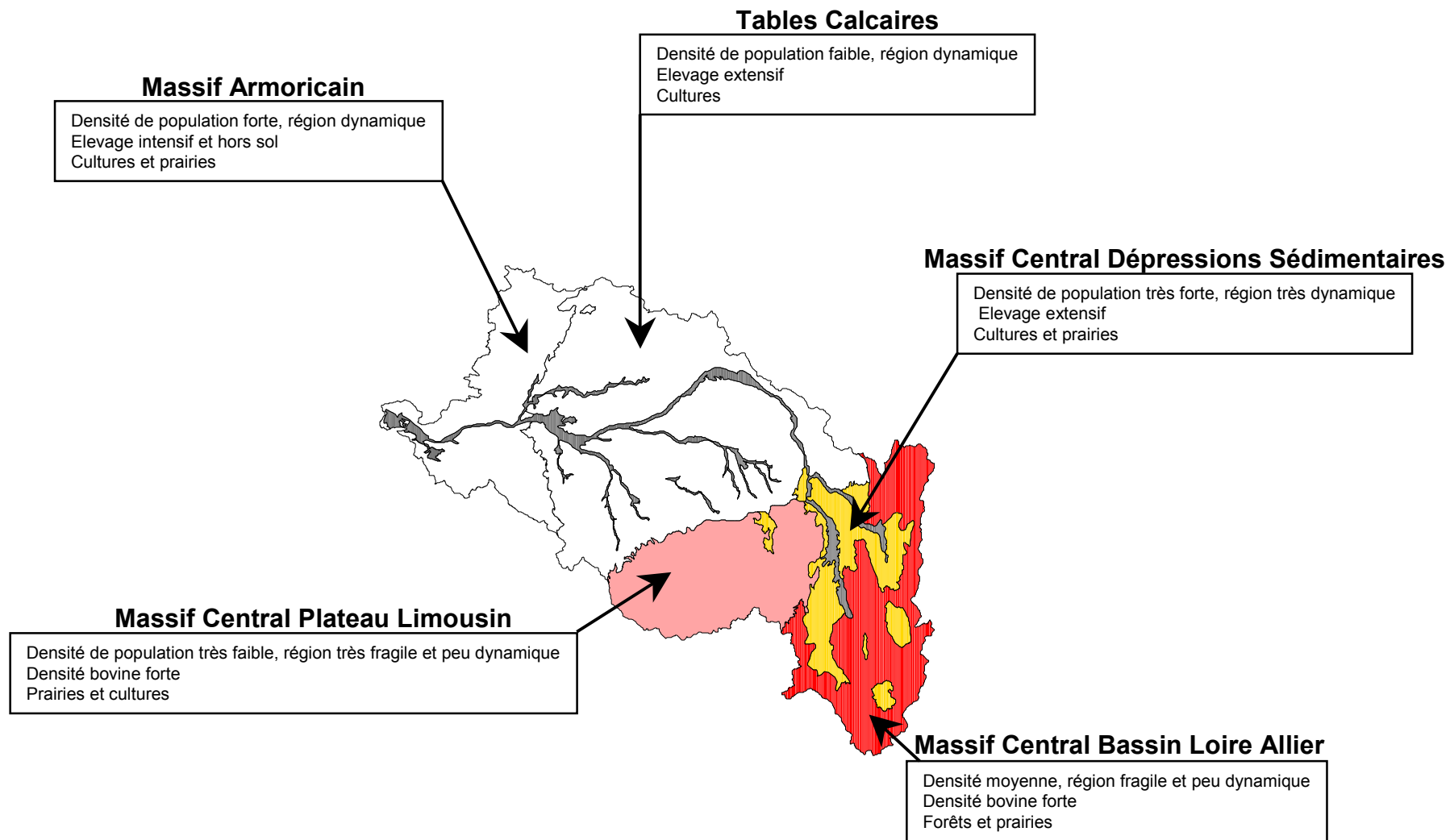


Figure 5.10 : Synthèse des caractéristiques d'utilisation du sol, par hydro-écorégion, des bassins versants du bassin de la Loire.

- **Limites.**

Le choix des types et des caractéristiques pertinentes pose quelques problèmes méthodologiques et suppose de prendre certaines précautions :

- d'analyse temporelle pour la caractérisation d'une parcelle car il existe des assolements annuels (champ, prairie, jachère de longue durée),
- d'identification des types d'occupations : faut-il garder un certain niveau de globalité, par exemple en considérant la forêt de façon unique ou différencier les feuillus des conifères.

- **Perpectives.**

Les classes d'occupation du sol peuvent être améliorées pour les interprétations au besoin des relations avec les milieux aquatiques :

- le repérage des zones humides,
- l'individualisation des céréales (culture irriguée),
- l'étude des emprises urbaines et leur évolution, particulièrement sur les lits majeurs,
- le pourcentage des surfaces remembrées,
- le pourcentage sur l'ensemble de la zone d'étude par :
 - l'évolution de l'occupation des sols,
 - l'évolution des pratiques culturelles.

Il serait par ailleurs intéressant pour l'élevage d'analyser l'évolution du cheptel et la proximité aux rivières des exploitations agricoles.

Il serait important dans l'avenir de compléter cette étude à partir des occupations du sol selon la source sous forme numérique BD CARTO de l'IGN. Cette couche a été réalisée en forme vectorielle. La table attributaire comporte 13 types de domaines homogènes dont une rubrique autre regroupant notamment aussi bien les cultures que les prairies.

Nous n'aborderons pas dans ce chapitre la compréhension des relations entre les utilisations de la terre, les pratiques en matière de réduction de pollution et les caractéristiques biologiques et écologiques des milieux aquatiques.

En comparant les rapports entre les caractéristiques biologiques et écologiques du cours d'eau et l'utilisation du sol du bassin versant, des modèles peuvent être développés pour prévoir la distribution des niveaux de biodiversité actuels dans les écosystèmes, et aident ainsi des priorités et des approches réglées de gestion de l'ensemble de la hiérarchie de l'écosystème aquatique.

Le système d'information géographique (SIG) peut nous aider dans ce domaine. Ce travail est désormais disponible. Le tracé des contours de bassin versant topographique vient d'être automatisé. De là, il est possible d'extraire les caractéristiques d'occupation internes à un bassin versant relatif à un exutoire (habitat local pour la biologie). Il devient alors possible d'analyser l'ensemble des informations disponibles au niveau du bassin versant (physiques, utilisation du sol et caractéristiques biologiques).

- Les occupations du sol du corridor rivulaire avec une largeur variable du "ripisylve " selon le rang du cours d'eau.

Il s'avère que la connaissance l'utilisation du sol au bord des rivières reste un des paramètres majeurs dans la gestion de l'écosystème aquatique. Une des améliorations possible actuellement concerne la méthode de construire une zone tampon variable selon la taille du cours d'eau et extraire l'occupation du sol à l'intérieur.

Nous avons choisi la taille de cours d'eau déterminée par la méthode de Strahler, pour la facilité d'analyse. Même si l'ordination a été réalisée sur l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de la Loire, nous n'avons pas pu réaliser la superposition avec CORINE pour une raison de "complexité" dans l'analyse. Nous présentons ici la méthodologie sur une zone test.

Nous supposons dans cette approche que la taille du "ripisylve" augmente potentiellement avec la taille de la rivière. Nous avons choisi un exemple de buffer évolutif avec le rang de la manière suivante :

Rang = 1	Buffer = 10 m
Rang = 2	Buffer = 50 m
Rang = 3	Buffer = 100 m
Rang = 4	Buffer = 250 m
Rang = 5	Buffer = 500 m

Tableau 5.13 : Occupation du sol du corridor rivulaire, taille variable selon le rang de la région test à partir des données CORINE Land Cover.

Pourcentage Types	Rang					Total
	1	2	3	4	5	
Urbains	0.9%	1.2%	2.2%	9.4%	33.1%	17.8%
Cultures	84.5%	82.1%	89.8%	72.2%	51.8%	66.9%
Forêts	10.0%	9.2%	1.1%	6.8%	2.1%	4.6%
Prairies	2.9%	6.6%	5.9%	7.4%	0.8%	3.8%
Eaux	1.7%	0.9%	1.0%	4.2%	12.2%	6.9%

A partir du Tableau 5.13, nous pouvons remarquer une forte variabilité des pourcentages des types d'occupation du sol. En effet, le pourcentage de la superficie de "culture" diminue avec le rang, et le pourcentage de la surface urbanisée, quant à lui, augmente fortement (de 1% pour le rang 1 à 33% pour le rang 5) avec la taille du cours d'eau.

Le couplage de l'occupation du sol du corridor rivulaire avec le type de vallée, (dans le contexte d'évolution amont-aval) serait un paramètre intéressant dans le fonctionnement des hydrosystèmes.

- Application : estimation de production et de transfert potentiels de nitrates dans le bassin de la Loire.

Une des applications directes de l'étude de l'utilisation du sol est l'estimation de pollution d'origine diffuse. Elle est souvent évaluée à partir de trois origines : domestique, agricole, élevage. Du point de vue de l'environnement, l'élevage pose le problème de l'élimination des effluents (lisiers, fumiers). Ce problème est d'autant plus aigu que l'élevage est intensif. Jusqu'à présent, c'est surtout l'azote (ammoniaque, nitrites, nitrates) qui a le plus retenu l'attention.

Nous donnons en Annexe 5, une étude sur le calcul sommaire de production et transfert potentiels de nitrates dans le bassin de la Loire. Nous évaluons les productions de nitrates par hydro-écorégion.

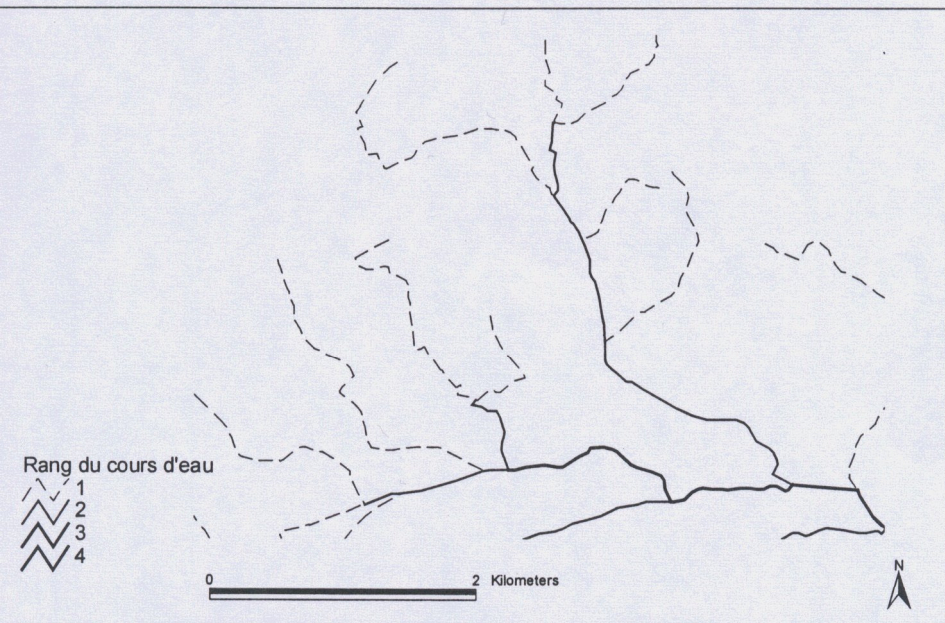


Figure 5.11a : Rand du cours d'eau.



Figure 5.11b : Occupation du sol.

Figure 5.11 : Occupation du sol sur une zone tampon variable selon le rang du cours d'eau (Source CORINE).

Partie 3.

Chapitre 6. Indice d'anthropisation des cours d'eau du bassin de la Loire.

VI.1. INTRODUCTION.

Les diverses activités humaines affectent les cours d'eau et leurs bassins versants. Afin d'éviter ou de minimiser les controverses subjectives sur la perception des hydrosystèmes, il est nécessaire de traduire les connaissances que l'on a en indicateurs d'état ou de processus, reposant sur des mesures fiables.

Bien choisis, ces indicateurs devraient constituer une aide précieuse pour le diagnostic des causes de dégradation de l'intégrité chimique, physique et biologique des cours d'eau et pour la prédiction des impacts potentiels des activités humaines.

En précisant les changements d'état des écosystèmes aquatiques et en identifiant leurs causes, les décisions de gestion pourraient gagner en pertinence.

Notre hypothèse d'étude est la suivante : une anthropisation de même nature et intensité sur deux cours d'eau de caractéristiques physiques et de caractéristiques de réversibilité différentes, n'aura pas les mêmes effets et séquelles.

Pour aller dans ce sens, ce chapitre rassemble les éléments de deux parties (écorégions et anthropisation des cours d'eau) de la thèse (Figure 6.1). Nous essayons de donner un ordre de grandeur pour **un indice d'anthropisation des cours d'eau régionalisés**. Cet indice a pour vocation de caractériser l'impact des différents types d'aménagement. Ensuite, nous essayons d'analyser les distributions de cet indice selon leurs caractéristiques régionales : morphologiques (type de vallée), géographiques (hydro-écorégions), évolution longitudinale (taille, pente, rang). Enfin, nous introduisons la notion de rémanence (capacité de réversibilité ou d'irréversibilité) de ces impacts.

Nous nous efforçons d'analyser et d'associer les deux éléments :

- le cadre physique général abordé lors de la première partie de cette thèse. Notre base pour une étude de variabilité régionale des indices d'anthropisation est le découpage en hydro-écorégions, ainsi que ses caractéristiques (Chapitre 1). Nous utiliserons aussi les caractéristiques morphologiques et morphodynamiques des cours d'eau étudiées au Chapitre 2,
- les pressions anthropiques régionalisées, étudiées dans la deuxième partie.

Dans cette logique, plusieurs indices d'anthropisation peuvent être mis en place en fonction du nombre de combinaisons entre les types d'anthropisation et les types de milieux récepteurs. Nous nous limiterons à 3 exemples. Ils tiennent compte de :

- la qualité de l'eau,
- la dynamique fluviale,
- l'habitat aquatique.

VI.2. INDICES D'ANTHROPIISATION : TERMINOLOGIE ET CADRE CONCEPTUEL.

VII.2.1. DEFINITIONS.

Notre construction d'indicateurs est bâtie sur le modèle Pression - Etat - Réversibilité (PER-modifié), développé au Canada et adopté par d'autres organisations (OCDE, WRI, EPA). La notion de réversibilité a été adaptée au contexte scientifique. Elle devient une "*réversibilité de l'environnement*" au lieu de "*réponse sociétale*", qui correspond plus à un contexte politique et institutionnel.

Le modèle PER-modifié (Figure 6.1) repose sur la notion de causalité : les activités humaines exercent des "pressions" sur l'environnement et modifient l'écosystème aquatique ("état"). Cet écosystème répond à ces changements selon des trajectoires plus ou moins définitives ("réversibilité"). Ces trois catégories sont nécessaires pour comprendre finement les changements qui se produisent au sein de l'écosystème, leurs causes, et par la suite l'efficacité de programmes spécifiques pour corriger des tendances à la dégradation.

- **Indicateurs.**

Les **indicateurs** sont des paramètres (c.-à-d., des mesures ou l'observation d'une propriété) ou leurs expressions statistiques qui offrent des informations significatives pour la gestion sur l'état, la condition d'un phénomène ou de ses tendances d'évolution. Ils sont choisis en fonction de leur signification synthétique et répondent à un besoin spécifique.

- **Indices**

Les indices sont un ensemble de paramètres ou d'indicateurs agrégés ou pondérés décrivant une situation. Il peut s'agir d'une valeur calculée à partir de paramètres décrivant l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique.

Remarque : Beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine des indicateurs de l'environnement (PIREN Rhône ; Bournaud, 1984 , entre autres) et des indices biologiques (IBI de Karr, 1991, par exemple), nous nous contentons simplement dans cette approche d'acquiescer le principe, ce qui nous a conduit de ne pas approfondir l'approche bibliographique.

VII.2.2. OBJECTIFS.

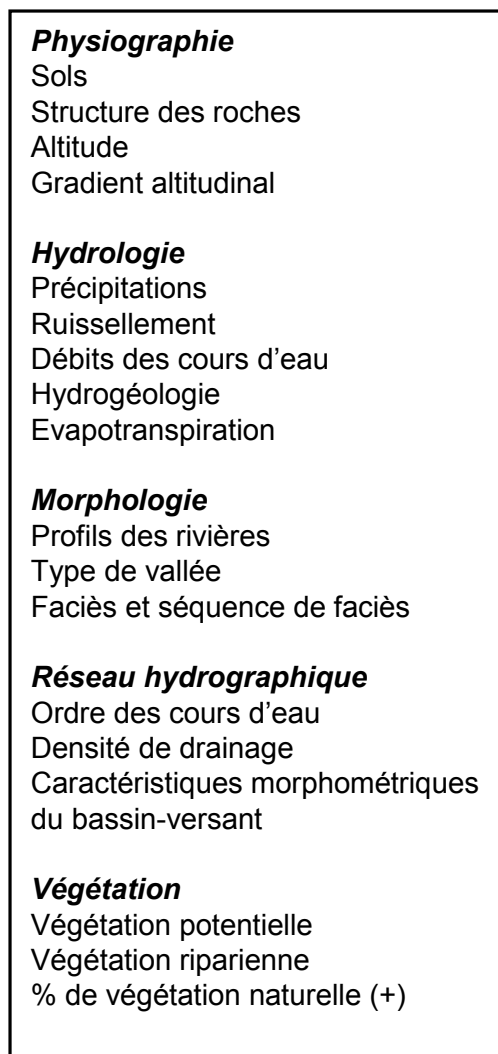
La mise au point, d'indices d'anthropisation est une méthode, dédiée le plus souvent aux gestionnaires pour les aider à apprécier l'état de santé des hydrosystèmes. Une fois établis et éprouvés, ces indices seront précieux pour apprécier les résultats réels de politiques de restauration.

Les principaux objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- proposer des indices d'anthropisation (quelques exemples),
- essayer de tenir compte dans leur construction des pressions sur le bassin versant et de pressions plus directes sur le cours d'eau lui-même au niveau du tronçon,
- "trier" dans leur réponse ce qui est imputable à une variabilité naturelle et à un impact réel,
- donner une représentation régionalisée des indices proposés.

PARTIE 1

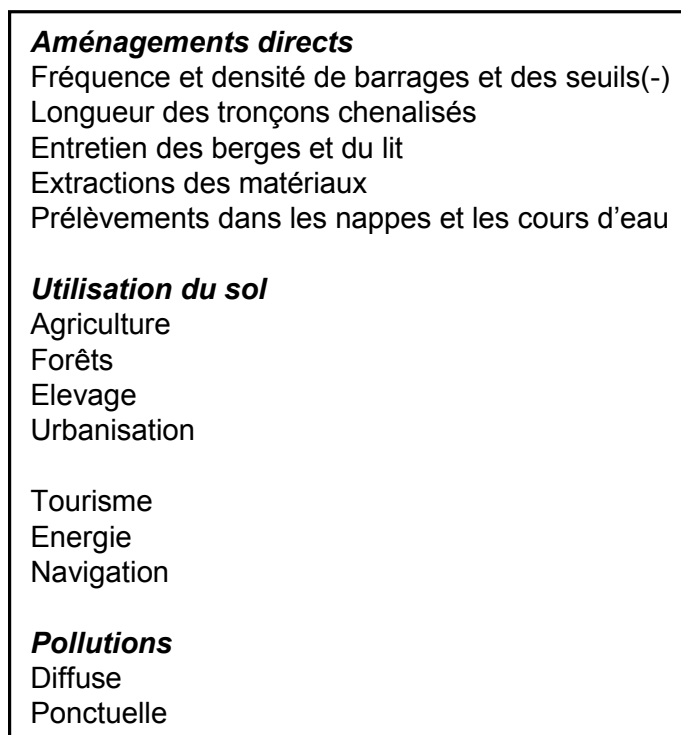
Etat Caractéristiques physiques



Ressources →

PARTIE 2

Pression Caractéristiques anthropiques



← Pression

Informations ↘

Réponse →

Réversibilité

Degré d'anthropisation rémanence

Figure 6.1 : Structure du modèle Pression -état- réversibilité.
Exemple de mise en place d'un indice d'anthropisation.
Application au bassin-versant de la Loire

VII.2.3. HYPOTHESES.

Ces différents objectifs nous conduisent à deux critères de construction des indices :

- réduction si possible du nombre de mesures et de paramètres qui seraient normalement nécessaires pour rendre compte d'une situation avec "exactitude",
- simplification du processus de communication permettant de fournir aux utilisateurs les résultats de mesures. Cette simplification et cette adaptation aux besoins des utilisateurs peuvent ne pas toujours répondre en toute rigueur à l'exigence scientifique de mise en évidence des relations de causalité.

VI.3. METHODES D'ESTIMATION DES INDICES D'ANTHROPISEMENT. VARIABILITE REGIONALE.

Les données analysées en entrée peuvent être soit agrégées, combinées ou rendues adimensionnelles pour créer des indices d'état des hydrosystèmes. Il est important de retenir que par sa construction, ils sont la résultante du rapport entre les niveaux de sensibilité du milieu et les niveaux de contraintes environnementales dues à l'anthropisation :

- nature et importance de l'anthropisation,
- spécificité du milieu aquatique : hydrologie, hydrobiologie et environnement,
- réversibilité face aux pressions.

Plus l'aménagement possède une irréversibilité prévisible importante avec un milieu aquatique qui semble sensible, plus l'indice d'artificialisation ou d'anthropisation devrait être conséquent. Ce qui peut être formulé comme suit :

Indice d'anthropisation (IA)=(Indice de pressions anthropiques) / (Indice d'état physique du cours d'eau ; Indice de réversibilité face aux pressions)

Nous proposons de développer quelques exemples possibles d'indices écologiques, qui reflètent l'état des hydrosystèmes et leurs processus, qui croisent les échelles spatiales, et qui sont applicables dans plusieurs écorégions. En outre, ces indices ne prennent en compte que l'information prête et accessible :

- l'utilisation du sol qui caractérise un indice de pressions anthropiques sur les bassins-versants,
- un indice qui met en relation la fréquence et la hauteur de barrages, la pente de la vallée, et les caractéristiques des faciès d'écoulement,
- un indice qui met en relation la fréquence de la chenalisation et la capacité de réversibilité des cours d'eau après un aménagement.

VI.4. EXEMPLE 1. UTILISATION DU SOL.

VII.4.1. METHODE.

Dans cet exemple, nous avons voulu associer deux termes : la qualité de l'eau en terme de pollution diffuse potentielle et l'utilisation du sol. Nous avons donc choisi de faire un rapport entre :

- un indice de pression qui représente des caractéristiques de susceptibilité à la pollution diffuse dans un bassin-versant. Elles sont de trois origines : les types d'occupation du sol, les types d'élevages et les rejets domestiques,
- un indice de réversibilité qui exprime les caractéristiques d'abattement de pollution diffuse dans le bassin versant grâce à ses propriétés de rétention/filtration. Elles sont décrites par le pourcentage en superficie de forêt dans le bassin versant :

$$IA1 = \log [(\text{Surfaces agricoles} * \text{Elevage} * \text{Population}) / (\text{Forêt})]$$

Cet indice sera calculé sur l'ensemble du bassin versant du bassin de la Loire, à partir des données RGA et CORINE du Chapitre 5. Pour faire une comparaison inter-régionale, nous avons opté pour un tri croissant des indices en fonction des pourcentages de bassin versant et poursuivi d'une comparaison des quantiles entre les hydro-écorégions.

VII.4.2. RESULTAT.

Le résultat est donné par la figure 6.2. Deux interprétations sont possibles :

- **Première interprétation.**

- Si nous considérons, par exemple, le quantile 20% de l'ensemble du bassin versant par hydro-écorégion. Nous pouvons ordonner les hydro-écorégions en fonction de leur l'indice. Ainsi, nous pouvons constater dans l'ordre les régions les plus à risque en terme de pollution diffuse décroissant :

- 1) Massif Armoricaïn,
- 2) Tables Calcaires,
- 3) Massif Central Dépressions Sédimentaires,
- 4) Massif Central Plateau Limousin,
- 5) Massif Central Bassin Loire Allier.

- **Deuxième interprétation.**

- Si nous prenons, par exemple, le seuil 0 de l'indice IA1. Cela indique un certain "équilibre" entre les charges productrices et les charges filtrées de pollution diffuse. Nous constatons que le pourcentage des bassins versants régionalisés correspondant à cette valeur est très variable. En effet, seuls 2% des bassins versants de la région Massif Armoricaïn équivalent à ce seuil. Inversement, 35% des bassins versants de la région Massif Central Bassin Loire Allier correspondent à cette valeur.

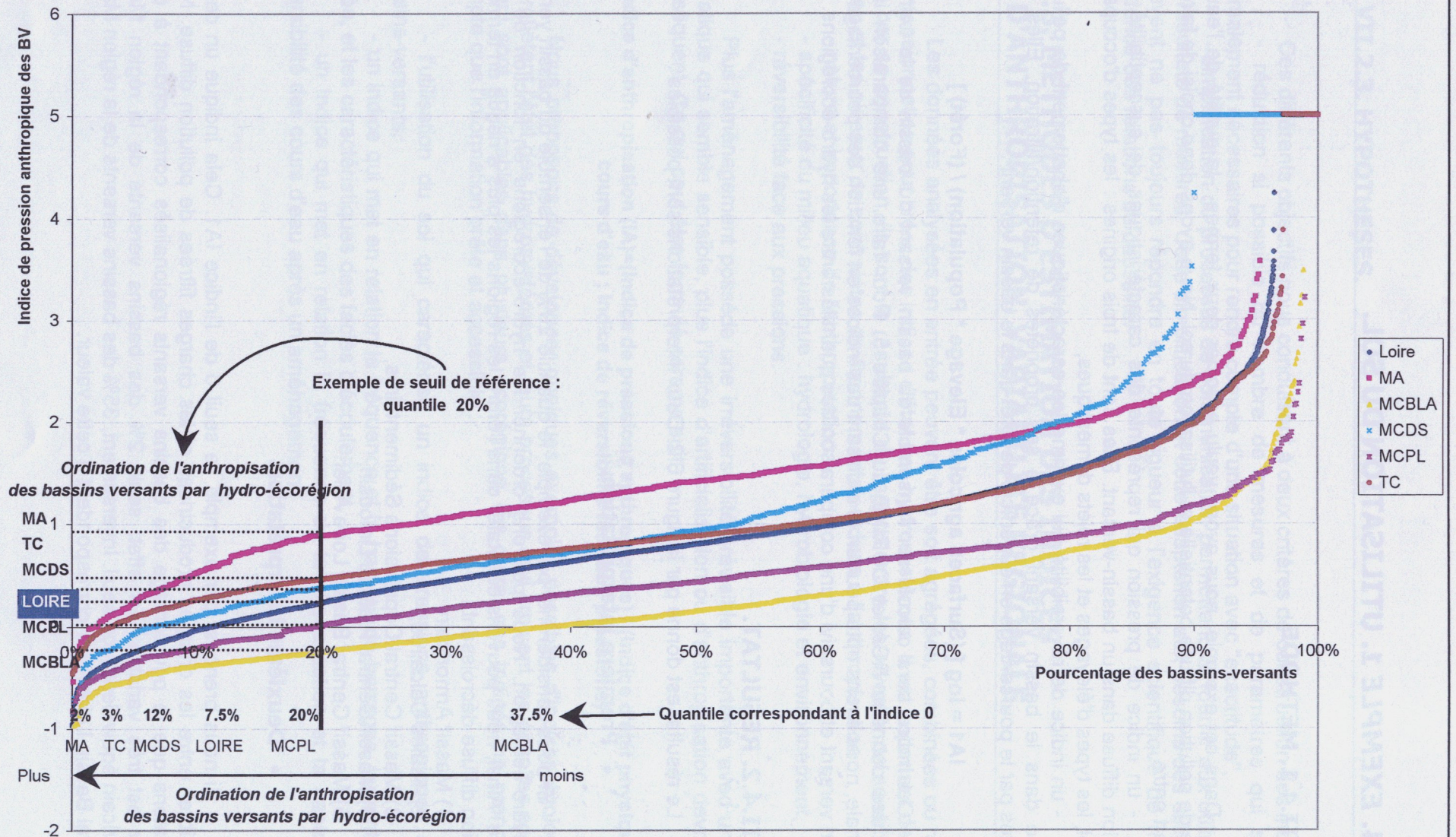


Figure 6.2 : Indice régionalisé des pressions anthropiques sur les bassins-versants.

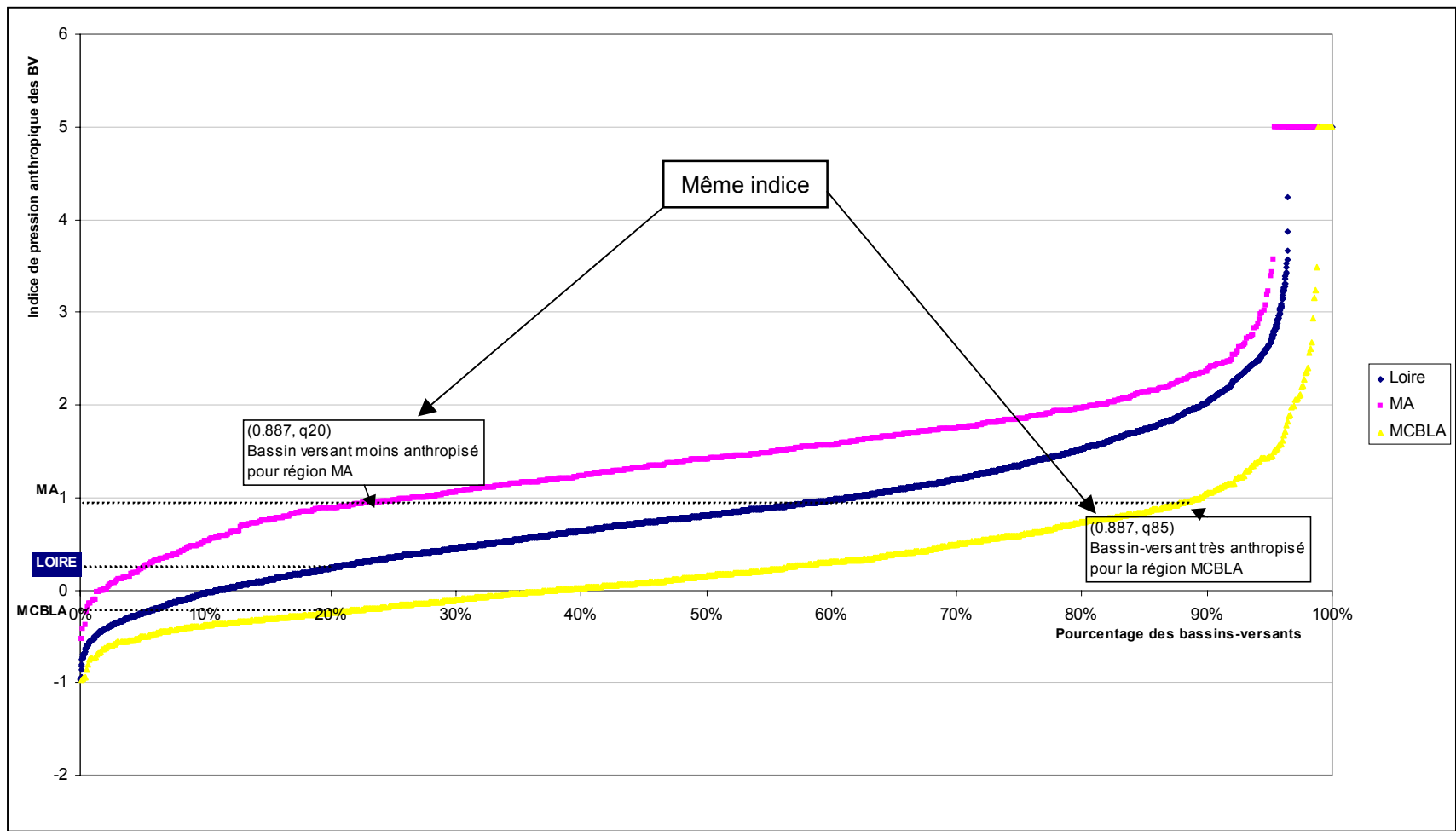


Figure 6.3 : Exemple de critère de choix des sites de «référence» régionalisées sur le bassin de la Loire.

L'interprétation se base alors sur le principe suivant : si nous appliquons une même valeur de référence pour l'ensemble des bassins versants de la Loire, la variabilité de l'indice anthropisation est masquée. Par contre, si nous prenons comme base les hydro-écorégions, nous montrons qu'une variabilité régionale existe. Ce qui conduit à considérer deux étapes dans l'illustration des résultats :

- *première étape : comparaison de bassins versants intra-région.* Cette première approche permet de situer "l'état" du bassin versant considéré par rapport aux autres bassins versants appartenant à la même région,

- *deuxième étape : comparaison de bassins versants inter-régions.* La comparaison d'un bassin versant BV1 de la région 1 à un autre bassin versant BV2 de la région 2 devrait être pondéré par un "filtre" d'appartenance régionale entre les régions 1 et 2 et la région de référence (dans notre cas, la Loire).

Une application possible qui découle de ces deux étapes concerne le choix de sites de "référence régionalisée". A l'intérieur du bassin de la Loire, par exemple, (figure 6.3)

- si nous prenons un bassin-versant de la région Massif Armoricaïn qui a un indice d'anthropisation de 0.887 (pour un minimal régional de -0.537 et un maximal de 3.575), cette valeur correspond au quantile 20% de cette région. Cette même valeur d'indice de 0.887 correspond au quantile 85% d'un bassin versant se trouvant dans le Massif Central Bassin Loire Allier (pour un minimal régional de -0.969 et un maximal de 3.48),

- si nous reprenons le quantile 20% comme un exemple de seuil d'indice régionalisé, cette valeur correspond à -0.25 dans le Massif Armoricaïn et 0.887 dans le Massif Central Bassin Loire Allier,

- si nous prenons un indice d'anthropisation de -0.75 sur l'ensemble des bassins-versants de la Loire, aucun bassin versant de la région Massif Armoricaïn ne correspondent pas à ce seuil.

Le constat est alors de dire :

- pour un même indice, les cours d'eau appartenant au bassin versant sont faiblement anthropisés dans le Massif Armoricaïn alors que les cours d'eau appartenant au bassin versant ayant cet indice dans la région Massif Central Bassin Loire Allier sont déjà fortement anthropisés par rapport aux autres bassins-versants,

- le choix des sites de "référence" devrait donc tenir compte de ces aspects régionaux des pressions anthropiques des bassins-versants.

VI.5. EXEMPLE 2. BARRAGE, PENTE DE LA VALLEE ET FACIES D'ÉCOULEMENT.

VII.5.1. METHODE.

Dans cet exemple, nous partons des résultats obtenus dans le Chapitre 2 et le Chapitre 3. Dans certains cours d'eau appartenant à un couple de région/rang donné, les pentes moyennes de la vallée sont relativement faibles. Pour une même hauteur de barrage et une même fréquence, le linéaire contrôlé par le barrage amont dépend de la pente du cours d'eau. Plus cette pente est forte, plus le linéaire contrôlé entre deux barrages est court. Ce qui implique que les barrages peuvent influencer une longueur significative en amont (calage de la ligne d'eau = formation des retenues).

Pour estimer cet ordre de grandeur, nous avons associé ce deuxième indice à la longueur d'une portion pouvant être influencée par un barrage de certaine hauteur pour une pente moyenne de la vallée. Ensuite, cette longueur est à comparer avec la fréquence de barrages. Nous avons vu aussi dans le chapitre 2 que la diversification de faciès diminue dans les grands cours d'eau (de rang supérieur à 4). Le résultat serait alors confronté avec le pourcentage des faciès lenticques et profonds pour chaque hydro-écorégion et rang.

[calage de la ligne d'eau = formation des faciès de type lenticque et profond]

IA2 = [(Densité linéaire et hauteur de Barrage) / (Pente des cours d'eau)]

Par exemple, la longueur d'une portion pouvant être influencée par un barrage de hauteur 2m pour une pente moyenne de vallée de 1°/°° est de 2 km calée en amont. Or cette distance correspond à l'espacement moyen des ouvrages transversaux fréquemment rencontré dans les parties aval (environ à partir de pK 20 de la source) dans chaque hydro-écorégion.

Nous avons vu aussi dans le chapitre 2 que la diversification de faciès diminue dans les grands cours d'eau (de rang supérieur à 4). Cette homogénéisation pourrait être une caractéristique régionale. Nous rappelons que nous avons essayé de mesurer les caractéristiques des faciès des cours d'eau supposés en équilibre morphodynamique.

Cette homogénéisation et la banalisation des types de faciès dans les grands cours d'eau pourraient aussi être déterminée par la forte pression anthropique, qui a une caractéristique régionale dans le bassin de la Loire (agriculture, moulins). La faible diversité de faciès ou la forte dominance du pourcentage de certains faciès peut résulter de certain type d'aménagements :

- le chenal lenticque peut être généré par des seuils ou des barrages,
- le plat ou plat lenticque en fort pourcentage par rapport à la moyenne globale du linéaire peut provenir de travaux de recalibrage ou/et de rectification (ancienne ou récente et non réversible).

Nous avons donc utilisé trois indices :

- un indice de pression caractérisé par la densité et la hauteur des barrages,
- un indice de réversibilité décrit par la pente du cours d'eau, et
- un indice de l'état morphologique du cours d'eau, tenant compte du pourcentage des faciès et de leur diversité sur un tronçon.

Nous avons pris dans cet exemple :

- la hauteur moyenne de barrages de 3 m correspondant à la médiane des barrages (450 renseignés) dans le fichier Agence de l'Eau (Chapitre 3),
- la fréquence de barrages issues des données CSP du Chapitre 2 par hydro-écorégion et par rang (355 tronçons),
- la pente de la vallée calculée sur les cartes IGN 1:25.000ème (Chapitre 2) par hydro-écorégion et par rang,
- les caractéristiques des faciès d'écoulement, pourcentage linéaire des faciès lenticques, développées dans le Chapitre 2.

De ces éléments, nous avons estimé l'indice d'anthropisation à partir :

- du calcul du linéaire contrôlé sur un tronçon, par un barrage de 3 m de hauteur, avec la pente de la vallée pour un couple hydro-écorégion/rang,
- du calcul de la différence entre ce linéaire contrôlé et la fréquence de barrages pour le couple hydro-écorégion et rang,

- de la comparaison entre cette différence et les caractéristiques des faciès d'écoulement observés,
- toutes les valeurs comparées dans ce calcul sont toutes des valeurs moyennes pour un couple hydro-écorégion et rang.

VII.5.2. RESULTAT.

Les résultats sont donnés dans la Figure 6.4, nous avons pour les 3 hydro-écorégions (où nous avons les données sur les faciès) :

- **Massif Armoricain.**

Réversibilité.

Cette région possède une pente de cours d'eau de pente faible, notamment dans les rangs supérieurs à 3.

Pressions.

Nous avons rencontré dans cette région une fréquence de barrages qui augmente avec le rang. Néanmoins, les petits cours d'eau possèdent une fréquence assez faible. Et cette valeur augmente rapidement à partir du rang 3, où nous avons observé une fréquence moyenne d'environ 1 barrage tous les 2 km.

Etat des cours d'eau.

L'indice de diversité de Shannon diminue fortement avec l'augmentation du rang, ce qui indique une faible diversité des faciès, donc une dominance des faciès lenticques type chenal lenticque CHE (97% pour le rang 4 et 94% pour le rang 5)

Indice d'anthropisation.

Cette région présente une caractéristique des cours d'eau fortement aménagés :, forte dominance des faciès indicateurs d'aménagements (chenal lenticque dans les cours d'eau 4 et 5). Ces résultats sont confirmés par la figure 6.4 où dans le rang 5, le linéaire contrôlé par un barrage en amont est supérieur à la distance entre deux barrages. Et dans le rang 4, cette différence reste faible (800m)

N.B. : En effet, lors de notre visite sur le terrain, nous avons eu du mal à trouver des stations de mesure des faciès d'écoulement dans cette région.

- **Massif Central Plateau Limousin.**

Réversibilité.

Les pentes de la vallée dans cette région restent fortes jusqu'au rang 4.

Pressions.

Les fréquences de barrages dans cette région sont inférieures à celles des deux autres régions étudiées. Cependant dans les cours d'eau de rang supérieur à 4, la fréquence de barrages atteint la valeur 1barrage/2km.

Etat des cours d'eau.

La forte hétérogénéité de faciès et le faible pourcentage des faciès lenticques dans cette région dans les rangs faibles montre que les tronçons dans cette région sont probablement naturels ou que l'impact des aménagements est faible.

Indice d'anthropisation.

En effet, aucun des cours d'eau appartenant à cette région, dans notre analyse, n'a une fréquence de barrage plus longue que le linéaire contrôlé par un barrage en amont. Même si cette différence est très faible pour les cours d'eau de rang 5 (700 m).

- **Tables Calcaires.**

Réversibilité.

Les pentes de la vallée dans cette région sont très faibles quel que le rang.

Pressions.

La fréquence de barrages, par contre, est très forte, elle atteint en moyenne la valeur de 1 barrage tous les 2 km quel que soit le rang considéré.

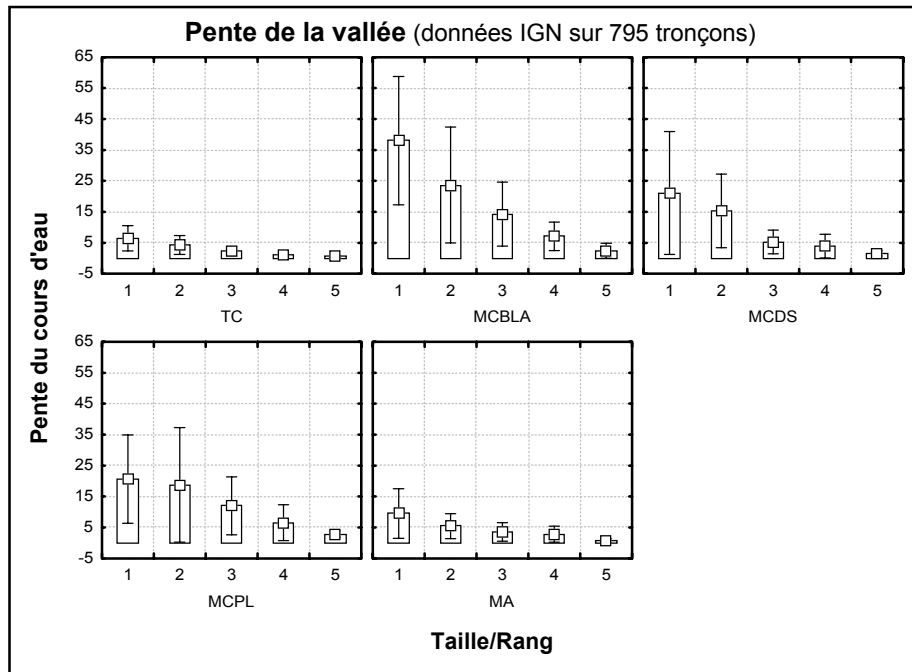
Etat des cours d'eau.

La diversité de l'habitat a une faible valeur dans les rangs 2 et 5. Les caractéristiques des faciès d'écoulement sont composées de chenaux lenticques (CLE) et plats (PLA).

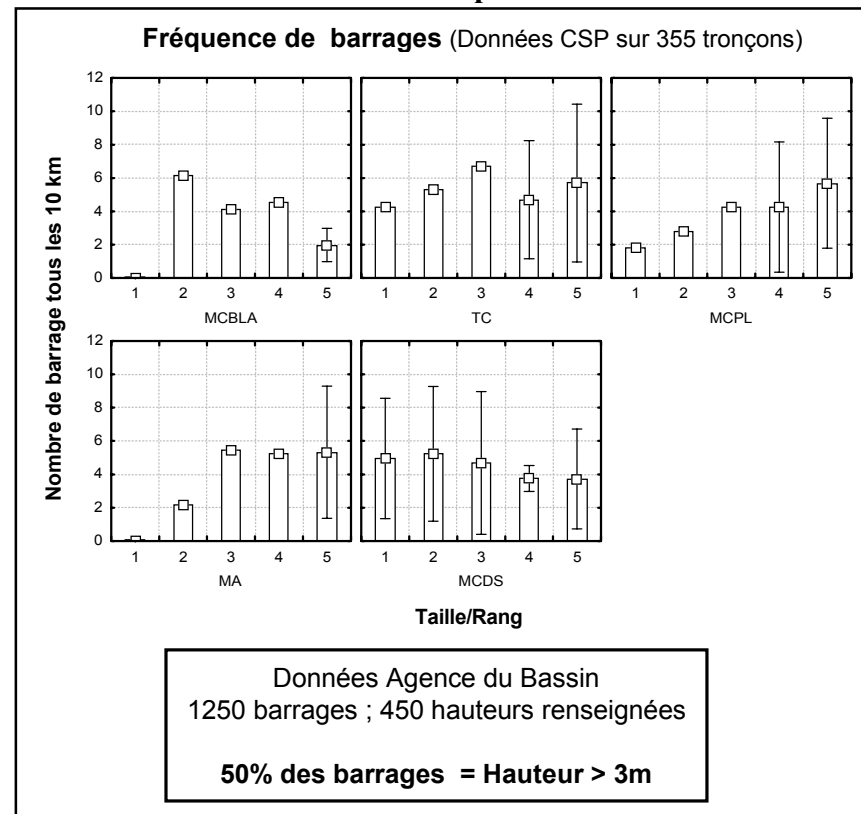
Indice d'anthropisation.

Dans cette hydro-écorégion, dans les rangs 4 et 5, la prépondérance des chenaux lenticques fait penser à un contrôle en aval par des ouvrages transversaux. En effet, le linéaire contrôlé par un barrage en amont est supérieur à la distance entre deux barrages dans ces deux rangs. Et dans le rang 3, cette différence est en moyenne de 100 m.

Etat et réversibilité des cours d'eau.



Indice de pression.



Indice d'anthropisation.

Linéaire contrôlé par un barrage

Différence (Fréquence de barrage <-> Linéaire contrôlé) en km					
Région	1	2	3	4	5
MA		4.0	1.0	0.8	-2.4
MCBLA		1.5	2.2	1.8	3.8
MCDS	1.9	1.7	1.6	1.9	0.7
MCPL	5.4	3.4	2.1	1.9	0.7
TC	1.9	1.2	0.1	-0.4	-3.2

Explication en terme d'habitat aquatique



Etat du cours d'eau.

Pourcentage de faciès lentique existant

Région/Rang	1	2	3	4	5
MA	7%	12%	73%	97%	94%
MCBLA					
MCDS					
MCPL	17%	32%	19%	12%	34%
TC	0%	50%	66%	73%	91%

Figure 6.4 : Barrage et morphologie (exemple 2).

VI.6. EXEMPLE 3. DYNAMIQUE DES COURS D'EAU ET CHENALISATION.

VII.6.1. METHODE.

Dans ce troisième exemple, nous avons voulu associer :

- l'indice de pression caractérisé par le pourcentage de linéaire chenalisé pour un cours d'eau appartenant à un couple région/rang
- et un indice de réversibilité caractérisé par la potentialité de réversibilité des cours d'eau.

Deux caractéristiques décrivant le cadre spatio-temporel de l'habitat aquatique et sa dynamique sont abordées pour estimer la potentialité de réversibilité des cours d'eau :

- l'énergie potentielle des cours d'eau pour un débit plein bord, qui doit permettre d'estimer la capacité de réajustement morphologique d'un cours d'eau et donc le degré de réversibilité des altérations physiques. L'énergie spécifique des cours d'eau permet d'apprécier un seuil hydrodynamique de la "réversibilité" des cours d'eau suite à une intervention humaine (Brookes, 1988). Le seuil défini par Brookes (1989) dans ses études sur les rivières danoises et anglaises se situe autour du 35W/m². Au-delà de ce seuil, les rivières aménagées ou plutôt chenalisées conserveraient un potentiel de réversibilité.

- des variables associées à ce débit de plein bord potentiellement intéressantes pour l'habitat aquatique : le ratio L/H et la granulométrie (Lamouroux, 1996 ; Rosgen, 1996).

$$IA3 = [(\text{Chenalisation}) / (\text{Puissance Spécifique ; ratio L/H ; Granulométrie})]$$

L'indice d'anthropisation résulte de la combinaison entre ces deux indices. Pour cela, nous avons calculé tout simplement le rapport entre le pourcentage de chenalisation et la puissance spécifique multiplié par la granulométrie pour chaque couple hydro-écorégion et rang.

Nous avons ensuite classé les valeurs obtenues en 4 classes de quantiles pour obtenir les quatre types d'indice d'anthropisation : allant de très faibles vers les très fortes.

VII.6.2. RESULTATS.

Les études sur la variabilité régionale des débits de plein bord, de la puissance spécifique et sur les caractéristiques hydro-morphologiques des cours d'eau sont données en Annexe 6 : "*Estimation des débits de plein bord et de la puissance spécifique à partir des caractéristiques géométriques simples des cours d'eau. Essai de typologie régionale.*" Nous ne donnons dans ce chapitre que les principaux résultats.

Les commentaires de la figure 6.5 ne concernent que les 3 régions : Massif Central Plateau Limousin, Massif Armoricaire et Tables Calcaires. Les 2 autres régions ne sont pas interprétées pour des raisons d'effort d'échantillonnage insuffisant.

- MA

Réversibilité.

L'hydro-écorégion MA a des énergies potentielles très faibles, inférieures au seuil de 35W/m² du moins, quelque soit le rang considéré (sauf quelques tronçons dans le rang 1). La granulométrie reste faible (< 50mm sauf dans les rangs 5).

Pressions.

Les pourcentages des tronçons chenalisés ne dépassent pas les 40%. Ils sont très faible dans les rang 4.

Indice d'anthropisation.

L'indice d'anthropisation augmente avec le rang dans la région Massif Armoricaïn. Il est faible dans le rang 1, où la valeur de l'énergie spécifique avoisine les 35W/m², et il devient très fort dans les rangs 5 où l'énergie spécifique est très faible alors que le pourcentage de tronçons chenalisé atteint les 40%.

- MCPL.

Réversibilité.

Cette région dispose d'une énergie spécifique nécessaire (effet pente, Brookes, 1989) pour revenir à son état "naturel" (Malavoi, 1991). Ces tronçons qui sont potentiellement réversibles sont d'ordre 3 dans cette région et de rangs épars allant de 2 à 5. Dans cette région, la granulométrie augmente du rang 1 à 3, elle reste très forte dans les rangs supérieurs à 3 (> 100 mm).

Pressions.

Cette région présente une faible fréquence des aménagements par rapport aux deux autres régions. En effet, le pourcentage des cours d'eau chenalisés ne dépassent pas les 20% des tronçons étudiés, et cela quel que soit le rang.

Indice d'anthropisation.

Le Massif Central Plateau Limousin possède une faible fréquence de chenalisation, une énergie spécifique assez forte. Par conséquent, quel que soit le rang considéré, le résultat de la figure 6.5 nous indique que l'indice d'anthropisation dans cette région varie de très faible à faible.

- TC.

Réversibilité.

La granulométrie dominante est très faible dans cette région (< 50 mm) et la puissance ne dépasse pas les 35 W/m² quel que soit le rang.

Pressions.

Cette région possède des pourcentages de tronçons chenalisés très élevés, dépassant constamment les 40%.

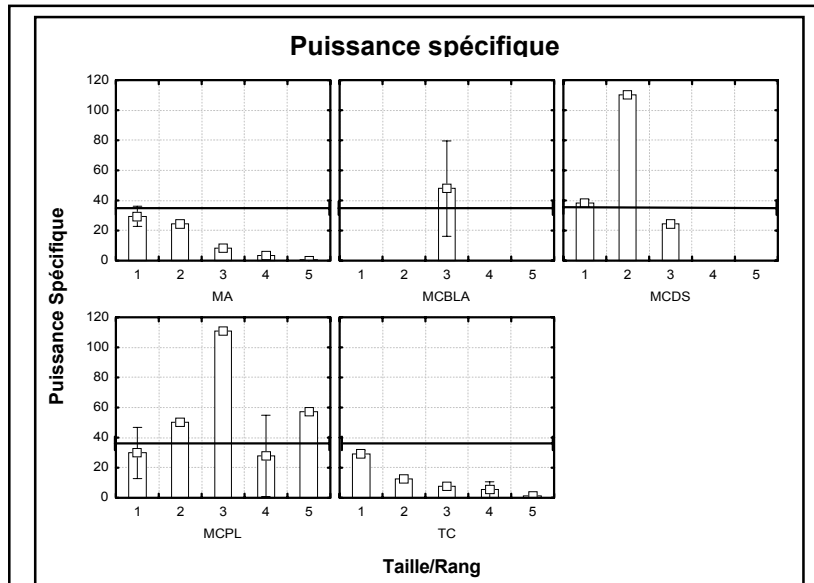
Indice d'anthropisation.

Cette région est fortement anthropisée. Les indices d'anthropisation sont classés dans les très fortes dans les rang 1 et 5, et dans les fortes dans les autres rangs.

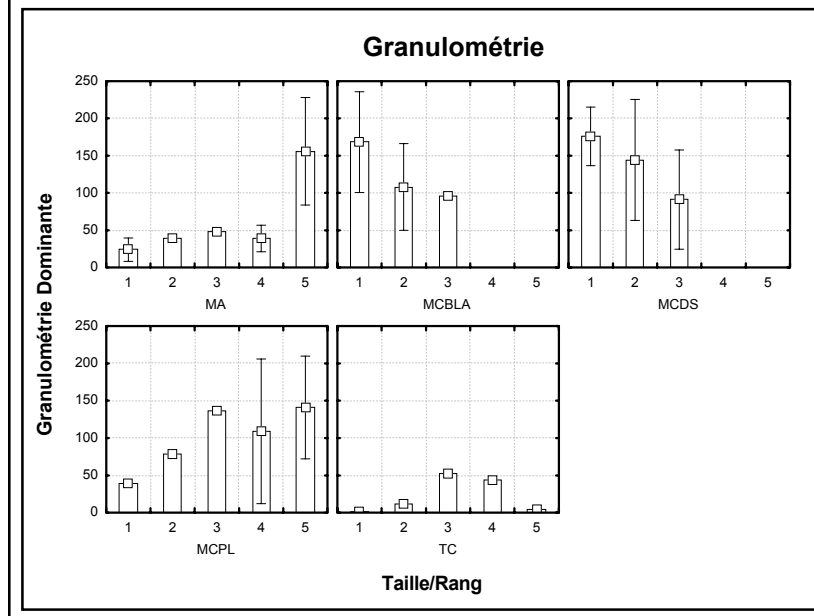
Remarque : En regardant les résultats sur l'ensemble du bassin de la Loire, le pourcentage des tronçons répondant au critère de Brookes (1989) est d'environ 20% de la totalité. Si on fait l'analyse par région, il s'avère que ces tronçons sont rencontrés généralement dans les Massifs Limousins.

Par conséquent, les rivières aménagées ou chenalisées dans le bassin Loire présentent un potentiel de réversibilité très faible donc d'indice d'anthropisation forte dans les régions où les cours d'eau sont chenalisés.

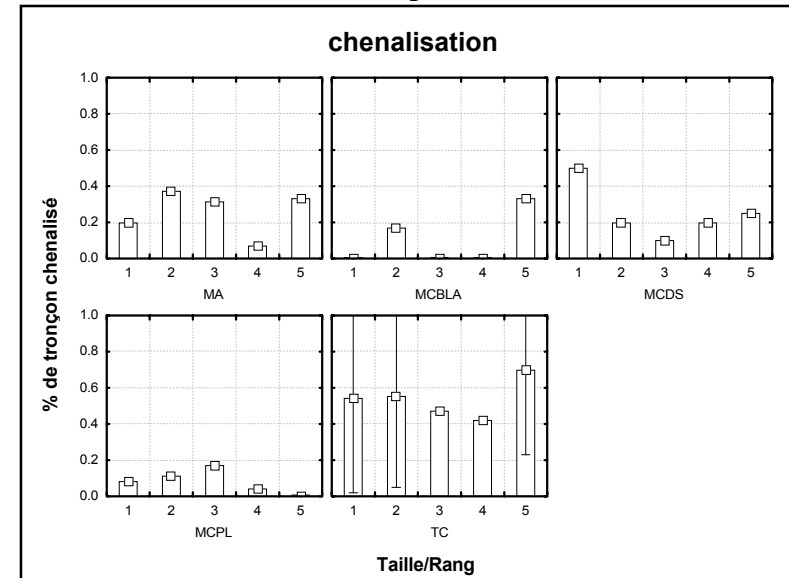
Potentiel de réversibilité des cours d'eau.



Capacité à revenir à l'état initial après chenalisation.



Indice de pression.



Indice d'anthropisation

Région/Rang	1	2	3	4	5
MA	Faible	Forte	Forte	Forte	Très Forte
MCBLA	Très Faible	Très Faible	Très Faible		
MCDS	Faible	Très Faible	Faible		
MCPL	Faible	Très Faible	Très Faible	Faible	Très Faible
TC	Très Forte	Forte	Forte	Forte	Très Forte

Figure 6.5 : Chenalisation et puissance spécifique (exemple 3).

VI.7. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS.

L'objectif de ce chapitre était de proposer quelques approches et de développer plusieurs exemples de la mise en place des indices d'anthropisation. En fait, il s'agissait d'une combinaison de plusieurs indices indiquant l'état des cours d'eau, les pressions, et la capacité de réversibilité face à un aménagement.

Ces indices qui croisent plusieurs échelles spatiales (tronçon, bassin versant) sont appliqués à travers le découpage en hydro-écorégions (Wasson et al., 1993). En outre, ils sont basés sur des informations obtenues dans les deux parties précédentes de cette thèse : le cadre physique global (Partie 1) et les caractéristiques anthropiques (Partie 2) des cours d'eau et bassins-versants.

1. Nous avons vu à travers ces exemples que l'utilisation simultanée de plusieurs informations est nécessaire pour avoir un aperçu global de "l'état actuel" des cours d'eau, état non seulement physique mais aussi anthropique. Il est donc possible d'établir un indice d'anthropisation qui reflète les processus de fonctionnement "actuel" de l'écosystème aquatique.

2. L'utilisation de ce type d'indice pourrait être précieux pour une politique de gestion écologique des cours d'eau. Il serait par exemple possible, dans le cadre d'une restauration des cours d'eau, de combiner ces différents éléments afin de choisir les sites à restaurer, ou encore dans le cadre de la mise en place d'un nouvel ouvrage, d'en prévoir les effets d'impact, ...

3. Ces éléments sont forts utiles pour interpréter des résultats biologiques (poissons ou invertébrés). Il serait probable que ces indices soient corrélables avec les autres indices biologiques ou écologiques des cours d'eau (IBI ou IBGN).

Peu de cours d'eau, de tronçons, dans le bassin de la Loire sont indemnes d'aménagements. Nous pouvons alors poser la question : Existe-t-il dans ces hydro-écorégions des cours d'eau en équilibre morphodynamique ou à morphologie "naturelle" ? (particulièrement dans les moyens cours d'eau de rang 4 et 5, et les deux hydro-écorégions Massif Armoricaïn et Tables Calcaïres). L'utilisation des indices d'anthropisation régionalisés pourrait nous être utile à la fois pour estimer le seuil de "référence" et en même temps choisir ces **cours d'eau de référence**. Enfin, ces derniers pourraient nous servir pour une comparaison avec la distribution actuelle de chaque variable morphologique et pour évaluer leur réponse par rapport aux influences des aménagements.

Nous avons pu remarquer aussi que ces indices ont un caractère régional. Ils varient fortement d'une région à l'autre mais aussi suivant la taille des cours d'eau. En effet, nous avons pu distinguer les cours d'eau de rang 4 et 5 des régions Massif Armoricaïn et Tables Calcaïres qui ont des indices d'anthropisation plus forts que les cours d'eau appartenant aux autres régions et cela quelque soit leur taille.

Une autre approche plus gestionnaire serait la prise en considération des influences des aménagements sur les variables de contrôle des caractéristiques morphologiques dans leur état actuel. Il pourrait alors être nécessaire de ne pas tenir compte de la notion de "naturel" ou "aménagé" et de réaliser la typologie en tenant compte de l'état actuel des cours d'eau (interprétation de la répartition régionale des peuplements de poissons actuels par exemple). Il serait donc nécessaire dans cette perspective de considérer en même temps la

variabilité naturelle des milieux et une typologie régionale des aménagements. Il serait possible d'intégrer ces deux éléments à partir d'utilisation des indices d'anthropisation.

Les résultats obtenus dans ce chapitre pourraient accroître la capacité des gestionnaires pour évaluer l'état des écosystèmes aquatiques, particulièrement dans des régions fortement anthropisées.

Les perspectives de cette approche sur les indices d'anthropisation sont :

- l'amélioration des mesures de la variation naturelle des indices en fonction des écorégions,
- l'amélioration de la capacité de distinguer cette variation ainsi que celle dérivée par des facteurs anthropogènes,
- l'amélioration des limites de fiabilité et l'évaluation de la transférabilité géographique, de l'échelle régionale à l'échelle locale, ceci afin d'évaluer la portée de ces indices au niveau de l'échelle locale i.e. au niveau du tronçon ou de l'habitat aquatique.

Conclusion générale.

1. RAPPEL DES OBJECTIFS.

La méthode des écorégions (régionalisation écologique ou hydro-écorégions) identifie des limites à travers l'analyse de régions écologiques basées sur la distribution spatiale des variables de contrôle de l'écosystème aquatique : géologie, relief, climat.

Une fois établies, ces écorégions sont validées à partir des caractéristiques physiques des cours d'eau, de quelques types d'aménagements et de leurs impacts sur le milieu aquatique.

Un exemple de question qui nous a motivé au début de cette étude est le test de l'hypothèse suivante : l'approche régionale sur le fonctionnement des cours d'eau à des échelles inférieures. Par exemple, existe-t-il des relations entre les types de vallées et la morphologie locale des cours d'eau à l'échelle de la séquence du faciès ? Ou bien est-ce la région qui, par sa nature géologique et son relief, modèle cette structure morphologique ? Dans ce cas, les différences morphologiques observables sont-elles uniquement dues aux différences de gammes de valeurs des variables de contrôle entre régions (régions pentues opposées aux régions plates) ? Ou bien la région apporte-t-elle un niveau d'information supplémentaire ?

L'ambition de ce travail était donc multiple. Il s'agissait de :

- constituer une multitude de plans d'information. Des approches thématiques de portée générale sont tout aussi légitimes et elles alimentent, par leurs résultats, les recherches régionales,
- mieux caractériser les hydro-écorégions à partir des structures physiques globales et des caractéristiques anthropiques des cours d'eau et des bassins-versants. Pour cela, nous avons analysé plusieurs thèmes :
 - les variables de contrôles de l'écosystème aquatique (géologie, climat, relief, réseau hydrographique),
 - la morphologie et la morphodynamique des cours d'eau,
 - l'hydrologie,
 - les aménagements directs (barrages, chenalisation et entretien),
 - l'utilisation du sol (population, élevage et occupation du sol).
- proposer d'autres méthodes objectives de régionalisation sur chaque compartiment étudié,
- valider ce découpage d'expert à partir des analyses statistiques obtenues dans les étapes précédentes.

2. VALIDATION DES HYDRO-ECOREGIONS.

Nous donnons dans ce paragraphe les principaux résultats de la pertinence et de la validation des hydro-écorégions, découpage d'expert réalisé par Wasson et al. (1993).

Les résultats concernant les caractéristiques physiques et anthropiques de chaque hydro-écorégion sont donnés dans les figures C.1 à C5.

2.1. CADRE PHYSIQUE GLOBAL.

- Les variables de contrôle.

Les régions définies se distinguent les unes des autres de point de vue relief, précipitation et géologie. Nous pouvons ainsi dissocier les régions du Massif Central des Tables Calcaires et Massif Armoricaïn. Ceci étant, aucune des régions définies n'a pas d'identité régionale forte. En effet, nous avons pu rencontrer sur l'ensemble des régions des altitudes faibles ou des précipitations moyennes.

La variabilité intra-régionale est aussi très forte. Nous pouvons ainsi rencontrer des altitudes allant de 100 m à 1200 m dans la région Massif Central Plateau Limousin.

En général, les ressemblances entre la carte de l'hydro-écorégion et la carte de la géologie ou la carte de la végétation naturelle (écorégions de Dupias et Rey, 1985) sont fortes.

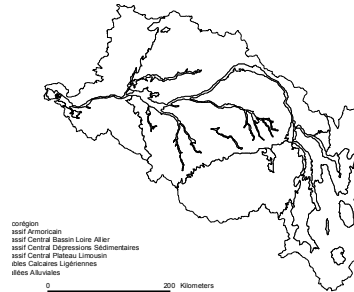
- La morphologie et la morphodynamique des cours d'eau.

L'analyse de la morphologie et morphodynamique des cours d'eau est consacrée au type de la vallée (composé de 5 variables : pente de la vallée, pente des versants, sinuosité, largeur du fond de vallée et largeur du lit) et au faciès d'écoulement (composé de type de faciès, de la diversité et des caractéristiques de vitesse et de profondeur).

L'analyse du type de vallée dans le bassin de la Loire a montré une tendance majeure : la distinction entre les régions montagneuses (Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier) s'opposant aux régions Tables Calcaires, Massif Central Dépressions Sédimentaires et Massif armoricaïn). C'est dans les deux premières régions que nous avons rencontrées les modalités de pente de la vallée forte et les versants en gorge. A l'opposé, la région Massif Armoricaïn est marqué par des vallées très peu incisées et l'élargissement des vallées est progressif avec la taille du cours d'eau. Les Tables Calcaires sont composées des vallées plates.

Nous avons aussi pu montrer que les situations morphologiques sont propres à certaines écorégions en termes de succession de faciès morphodynamiques à l'échelle du bassin de la Loire, tout au moins sur les trois régions testées. En effet, d'une part la région Massif Central Plateau Limousin où la pente de la vallée est très forte, le type de faciès rapide RAP n'est rencontré que dans cette région. D'autre part le Massif Armoricaïn, et dans une certaine mesure les Tables Calcaires, sont des régions de faible altitude et pente de la vallée faible, on trouve une diversité de faciès faible et une dominance des types faciès plats (PLA) pour les petits cours d'eau et chenaux lenticques (CLE) pour les grands cours d'eau, que dans la région Massif Central Plateau Limousin. Bien que prévisible, l'intérêt de l'étude repose plutôt sur la quantification de ces phénomènes.

Hydro-écorégion : MASSIF ARMORICAIN (MA)



Caractéristiques physiques

Variables de contrôle

Géologie : Infra-cambrien et roches granitiques
Sols : Lessivés
Climat : Précipitation moyenne (750 mm/an)
Altitude faible (100 m), pente des versants faible (0.59%)
Densité de drainage moyenne (0.91 km/km²)

Morphologie des cours d'eau

Petit cours d'eau (R1, R2)

Type de vallée

Pente moyenne, versant plat, rectiligne, très large fond de vallée

Faciès

Lotique (Plat), forte diversité,, peu profond

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Type de vallée

Pente forte, versant plat, rectiligne, très large fond de vallée

Faciès

Lentique (CLE), très faible diversité, profond

Hydrologie

Type de trait éco-hydrologique

Crue prévisible

Capacité de revenir à l'état initial (après aménagement)

Faible dans les petits cours d'eau
Très faible dans les grands cours d'eau

Caractéristiques anthropiques

Aménagements directs

Petit cours d'eau (R1, R2) :

Faible fréquence de barrages (2barrages/10km)
Pas entretenus (70% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (30% des tronçons)

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Forte fréquence de barrages (5.5barrages/10km)
Pas entretenus (75% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (30% des tronçons sauf pour R4)

Hydrologie

*Modifications des régimes d'écoulements**

Augmentation des stations en trait étiage imprévisible,
Diminution des stations en trait crue prévisible

*Modifications des caractéristiques d'écoulement***

Caractéristiques d'étiage (DCN30 et DCN90)
Fréquence des débits de retour 2 ans

Utilisation du sol

Densité de population forte, région dynamique
Elevage intensif et hors sol
Cultures et prairies

Indice d'anthropisation

Faible dans les petits cours d'eau
Très forte dans les grands cours d'eau

* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure C.1 : Synthèse des caractéristiques physiques et anthropiques de l'hydro-écorégion Massif Armoricain.

Hydro-écorégion : MASSIF CENTRAL BASSIN LOIRE ALLIER (MCBLA)



Caractéristiques physiques

Variables de contrôle

Variables de contrôle
Sols : Sur formations cristallines, bruns et lithosols
Géologie : Roches granitiques et basaltes
Climat : Très forte précipitation (850 mm/an)
Altitude forte (750 m), pente des versants forte (2.58%)
Densité de drainage forte (1 km/km²)

Morphologie des cours d'eau (faciès n.d.)

Petit cours d'eau (R1, R2)

Type de vallée

Pente très forte, versant en gorge, rectiligne à sinueux, fond de vallée étroit

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Type de vallée

Pente moyenne, versant en gorge (sauf R5), sinueux, large fond de vallée étroit (sauf R3)

Hydrologie

Type de trait éco-hydrologique

Imprévisibilité en crue et étiage

Capacité de revenir à l'état initial (après aménagement)

n.d.

Caractéristiques anthropiques

Aménagements directs

Petit cours d'eau (R1, R2) :

Forte fréquence de barrages (6barrages/10km)
Pas entretenus (70% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (30% des tronçons)

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Forte fréquence de barrages (5.5barrages/10km)
Peu entretenus (65% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (0% des tronçons)

Hydrologie

*Modifications des régimes d'écoulements**

Diminution des crues imprévisibles
Augmentation des étiages prévisibles

*Modifications des caractéristiques d'écoulement***

Caractéristiques d'étiage (DCN1, DCN3, DCN7)

Utilisation du sol

Densité moyenne, région fragile et peu dynamique
Densité bovine forte
Forêts et prairies

Indice d'anthropisation

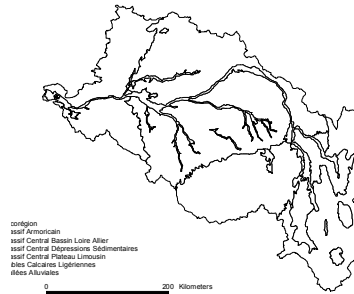
n.d.

* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure C.2 : Synthèse des caractéristiques physiques et anthropiques de l'hydro-écorégion Massif Central Bassin Loire Allier.

Hydro-écorégion : MASSIF CENTRAL DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES (MCDS)



Caractéristiques physiques

Variables de contrôle

Variables de contrôle
Sols : Lessivés, bruns calcaires
Géologie : Eocène/Oligocène
Climat : Forte précipitation (720 mm/an)
Altitude moyenne (370 m), pente des versants moyenne (1.3%)
Densité de drainage forte (0.96 km/km²)

Morphologie des cours d'eau (faciès n.d.)

Petit cours d'eau (R1, R2 et R3)

Type de vallée

Pente très forte, versant plat, rectiligne, très large fond de vallée

Grand cours d'eau (R4 et R5)

Type de vallée

Pente faible, versant plat, sinueux, très large fond de vallée (sauf R5)

Hydrologie

Type de trait éco-hydrologique

Imprévisibilité en crue

Capacité de revenir à l'état initial (après aménagement)

n.d.

Caractéristiques anthropiques

Aménagements directs

Petit cours d'eau (R1, R2) :

Forte fréquence de barrages (5barrages/10km)
Pas entretenus (70% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (20% des tronçons)

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Forte fréquence de barrages (4barrages/10km)
n.d.
Faible présence de chenalisation (15% des tronçons)

Hydrologie

Modifications des régimes d'écoulements*

Augmentation des étiages imprévisibles
Diminution des crues imprévisibles

Modifications des caractéristiques d'écoulement**

Caractéristiques d'étiage et prévisibilité par contingence (M, DCN30)

Utilisation du sol

Densité de population très forte, région très dynamique
Elevage extensif
Cultures et prairies

Indice d'anthropisation

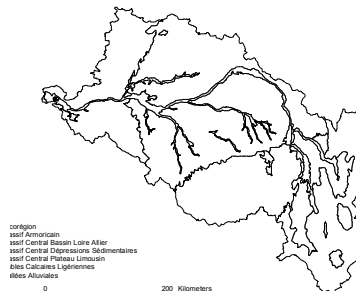
n.d.

* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure C.3 : Synthèse des caractéristiques physiques et anthropiques de l'hydro-écorégion Massif Central Dépressions Sédimentaires.

Hydro-écorégion : MASSIF CENTRAL PLATEAU LIMOUSIN (MCPL)



Caractéristiques physiques

Variables de contrôle

Géologie : Roches granitiques
Sols : Lessivés, sur formations cristallines
Climat : Précipitation très forte (940 mm/an)
Altitude moyenne (416 m), pente des versants moyenne (1.3%)
Densité de drainage forte (0.95 km/km²)

Morphologie des cours d'eau

Petit cours d'eau (R1, R2)

Type de vallée

Pente très forte, versant plat, sinueux, large fond de vallée

Faciès

Lotique (CLO, PLA, RAD), très forte diversité, peu profond

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Type de vallée

Pente moyenne, versant plat à pentu, sinueux, fond de vallée étroit

Faciès

Lotique (PLA, RAD, RAP), très forte diversité (sauf R5), peu profond

Hydrologie

Type de trait éco-hydrologique

Imprévisibilité en crue et étiage

Capacité de revenir à l'état initial (après aménagement)

Forte

Caractéristiques anthropiques

Aménagements directs

Petit cours d'eau (R1, R2) :

Faible fréquence de barrages (1.5 barrages/10km)
Pas entretenus (52% des tronçons)
Faible présence de chenalisation (30% des tronçons)

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Forte fréquence de barrages (4.5 barrages/10km)
Entretenus régulièrement (60% des tronçons pour R4)
Absence de chenalisation (0% des tronçons sauf pour R3)

Hydrologie

*Modifications des régimes d'écoulements**

Absence des stations en trait crue prévisible

*Modifications des caractéristiques d'écoulement***

Variabilité hydrologique (VHf et VHpf)
Caractéristiques de crue (DCXn)
Fréquence et changement d'état (ACCQJ, DECQJ, NACC, NDEC)

Utilisation du sol

Densité de population très faible, région très fragile et peu dynamique
Densité bovine forte
Prairies et cultures

Indice d'anthropisation

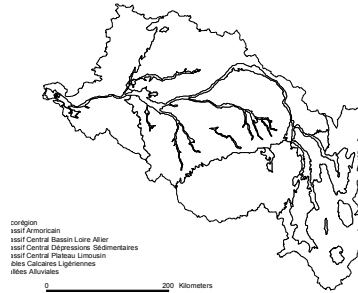
Faible à très Faible

* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure C.1 : Synthèse des caractéristiques physiques et anthropiques de l'hydro-écorégion Massif Central Plateau Limousin.

Hydro-écorégion : TABLES CALCAIRES (TC)



Caractéristiques physiques

Variables de contrôle

Géologie : Crétacé supérieur, Jurassique
Sols : Lessivés, rendzines
Climat : Précipitation faible (640 mm/an)
Altitude faible (138 m), pente des versants faible (0.5%)
Densité de drainage faible (0.83 km/km²)

Morphologie des cours d'eau

Petit cours d'eau (R1, R2 et R3)

Type de vallée

Pente faible, versant plat, rectiligne, très large fond de vallée

Faciès

Lotique (PLA), faible diversité, peu profond

Grand cours d'eau (R4 et R5)

Type de vallée

Pente très faible, versant plat, sinueux (sauf R5), très large fond de vallée

Faciès

Lentique (CLE) (sauf R3), très faible diversité, lotiques, profond

Hydrologie

Type de trait éco-hydrologique

Etiage prévisible

Capacité de revenir à l'état initial (après aménagement)

Très faible

Caractéristiques anthropiques

Aménagements directs

Petit cours d'eau (R1, R2) :

Forte fréquence de barrages (5.7barrages/10km)
Pas à peu entretenus (resp. 50% et 35% des tronçons)
Présence de chenalisation (50% des tronçons)

Grand cours d'eau (R3, R4 et R5)

Forte fréquence de barrages (6barrages/10km)
Peu entretenus à entretien régulier (resp. 40% à 34% des tronçons)
Forte présence de chenalisation (52% des tronçons)

Hydrologie

Modifications des caractéristiques d'écoulement**

Qmoy et ECTQJ (rapporté au QJ50)
Variabilité hydrologique (VHf, VHpf)
Intensité et période(débit moyen mensuel QM)
Caractéristiques de crue (DCXn)
Fréquence et changement d'état (ACCQJ, DECQJ, NACC)

Utilisation du sol

Densité de population faible, région dynamique
Elevage extensif
Cultures

Indice d'anthropisation

Forte à Très forte

* Comparaison entre les traits éco-hydrologiques des stations naturelles et influencées.

** Différence entre les stations naturelles et influencées significatives.

Figure C.1 : Synthèse des caractéristiques physiques et anthropiques de l'hydro-écorégion Tables Calcaires.

- **L'hydrologie**

Nous avons analysé particulièrement pour ce compartiment les caractéristiques dites "éco-hydrologiques" de l'écoulement. La spécificité de ces caractéristiques d'écoulement est de décrire les réalisations statistiques peu fréquentes des débits.

Nous avons pu définir 5 traits éco-hydrologiques à partir des 240 stations naturelles : les régimes dominés par des crues prévisibles, des crues imprévisibles, des étiages prévisibles, et des étiages imprévisibles.

La répartition des traits éco-hydrologiques concorde en grande partie avec la classification statistique et le découpage en hydro-écorégions d'experts. 68% du découpage d'experts en hydro-écorégions s'avèrent pertinents pour les valeurs régionales des 30 caractéristiques éco-hydrologiques retenues après analyse de corrélation. Ce pourcentage est tout à fait tolérable.

Le résultat de la Classification Ascendante Hiérarchique CAH nous a montré 3 grandes zones homogènes dans lesquelles nous retrouvons l'entité Tables Calcaires (TC) au nord de la Loire, l'entité granitique du Massif Armoricaïn (MA) sud intérieur, et une entité haut bassin composée du Limousin (MCPL) et du Haut bassin Loire-Allier (MCBLA).

2.2. CARACTERISTIQUES ANTHROPIQUES.

Nous avons considéré 3 grandes catégories d'anthropisation :

- **Les aménagements directs.**

Nous avons étudié 3 types d'aménagement direct : les ouvrages transversaux, la chenalisation et les entretiens des cours d'eau à partir des données Schémas Départementaux de Vocation Piscicole (SDVP). Quelques traits marquants ont pu être identifiés sur les analyses effectuées. 90% des tronçons de 5 kilomètres linéaires étudiés présentent au moins une intervention humaine au sens des documents de travail SDVP. La fréquence moyenne des barrages sur l'ensemble du bassin de la Loire est de 0,45 par tronçon-individu, soit 1 à 2 barrages en moyenne par tronçon de 5km. Plus de la moitié des tronçons étudiés ne sont pas entretenus, et ce sont les petits cours d'eau qui sont les plus concernés. Plus du quart des tronçons-individus sont touchés par des interventions humaines de type chenalisation.

Ces différentes caractéristiques ont une composante régionale marquée. D'une part, les hydro-écorégions Sédimentaires, Tables Calcaires et Massif Central Dépressions Sédimentaires sont les plus touchées ; elles présentent le plus fort cumul d'impacts du fait de leurs caractéristiques morphologiques; D'autre part, la plus forte densité et les volumes les plus importants sont localisés dans le Massif Central Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier et dans ses contreforts.

- **Modification des régimes hydrologiques.**

L'effet des ouvrages hydrauliques est plus sensible sur la NACC (Nombre d'accroissement des débits journaliers) qui peut soit diminuer (hypothèse émise de petite

capacité d'ouvrage), soit augmenter comme c'est le cas dans Massif Central Bassin Loire Allier MCBLA (hypothèse émise d'une grosse capacité d'ouvrage).

Nous avons étudié plus particulièrement l'impact de la gestion humaine sur la notion de trait éco-hydrologique plutôt que sur une caractéristique particulière. Ainsi dans le Massif Central Bassin Loire, nous avons une diminution des crues imprévisibles et en contrepartie une augmentation des étiages prévisibles. Dans le Massif Central Plateau Limousin, quelques stations naturelles sont classées en crue prévisible alors que nous n'avons trouvé ce trait pour les stations influencées. Dans le Massif Armoricaïn, les stations ont tendance à présenter plus de traits en étiage imprévisible.

- **L'utilisation du sol.**

De point de vue de la population, nous pouvons distinguer les régions à forte densité, des communes urbaines, de la population dynamique, en constante évolution et active (Massif Armoricaïn et Massif Central Dépressions Sédimentaires) ; une région intermédiaire, avec un dynamisme modéré, les Tables Calcaires ; et des régions à faible dynamisme, des communes rurales, une faible densité de population, un dépeuplement constant (Massif Central Plateau Limousin et Massif Central Bassin Loire Allier).

Au niveau de l'élevage, nous avons constaté deux types principaux : une région à élevage intensif (Massif Armoricaïn) ; et les autres régions à élevage extensif.

La moyenne ligérienne masque néanmoins quelques disparités régionales. L'Est et l'Ouest du bassin Ligérien se distinguent nettement : le Haut Bassin Loire Allier est dominé par la forêt (de feuillus) ; du plateau Limousin jusqu'au contour du Morvan, ce sont les prairies qui dominent. Dans les Tables Calcaires Ligériennes, l'occupation dominante est la culture ; alors que dans le Massif armoricaïn c'est une dominance de prairies et cultures. Ces grandes tendances d'occupation du sol coïncident fortement avec celles établies dans le cadre du découpage en hydro-écorégions établi par Wasson et al. (1993).

L'amélioration du découpage d'expert passe par la considération des approches réalisées dans le cadre de cette thèse. Ces approches proposaient des découpages régionaux sur les différentes caractéristiques étudiées (physique et anthropique) selon une méthode statistique objective. Ces découpages régionaux pourraient alors affiner les limites des découpages d'expert. Ces deux approches qualitatives et quantitatives nécessitent des validations. Les validations serviraient de cadre final pour retracer les limites des découpages en hydro-écorégion d'expert.

Les deux caractéristiques étudiées, nous pouvons donner des exemples sur la "pathologie" majeure régionale des cours d'eau. Actuellement cette "pathologie" n'est pas encore hiérarchisée, donc cela induit qu'il n'existe pour le moment un pas d'ordre de priorité dans les actions de gestion. L'approfondissement de nos résultats pourraient améliorer cette démarche (figure C.6).

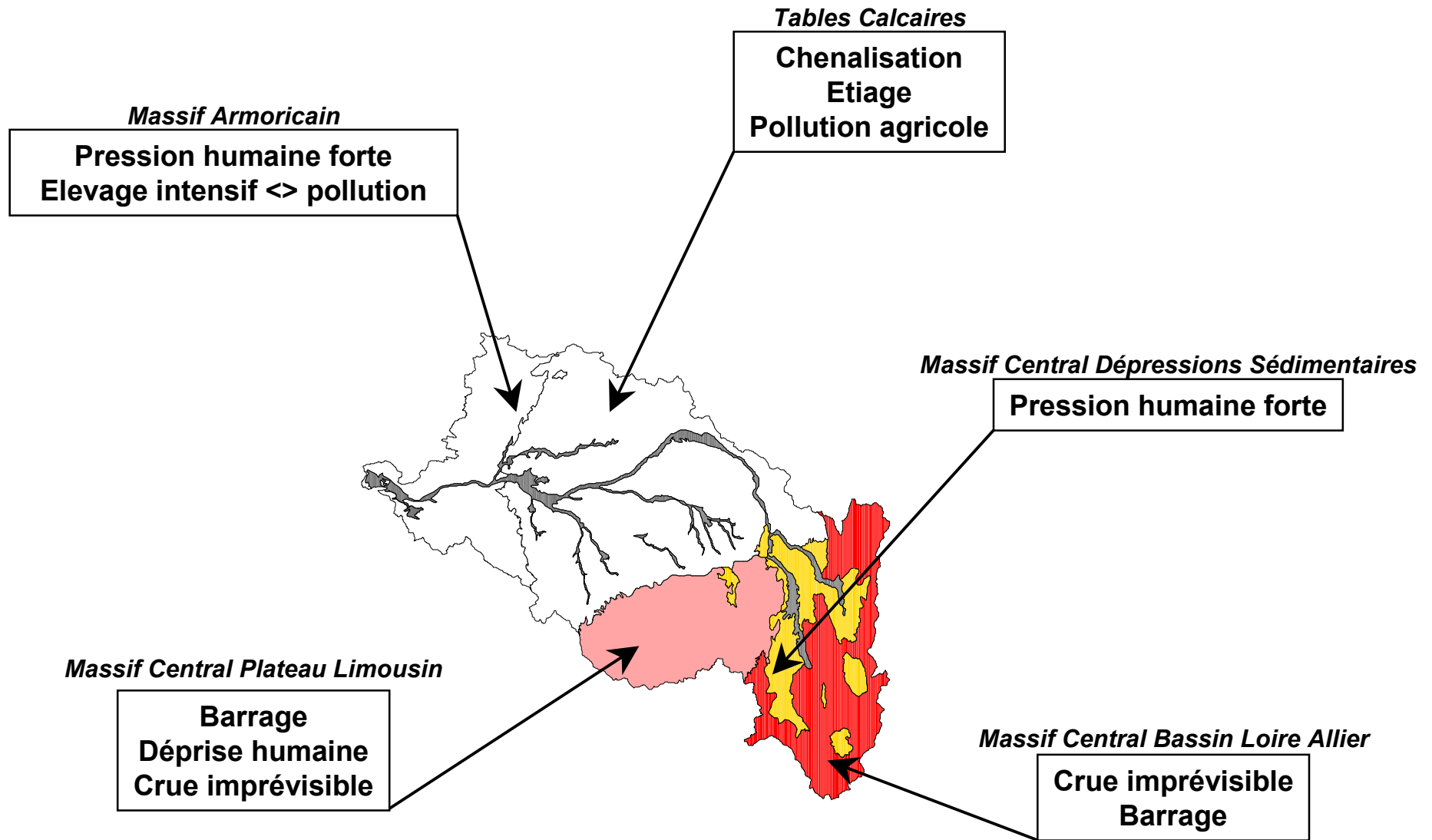


Figure C.6 : Synthèse des problèmes d'anthropisation majeurs sur les cours d'eau et les bassins-versants de la Loire.

3. LES ECOREGIONS (après validation) : UN CADRE DE GESTION.

D'une délimitation grossière de ce qui devrait tomber dans la catégorie de "région" l'écorégion est devenue un corpus d'informations. Par le terme "région" sont signifiés, avant tout, des contenus par ressemblances ou champs interactifs à une certaine identité physique et anthropique.

La notion d'hydro-écorégion se justifie comme premier découpage d'investigation d'un grand bassin versant avec pour objectif d'affiner l'acquisition d'informations sur un maillage plus fin. Rappelons que son principal avantage repose sur des caractéristiques spatiales largement disponibles.

- **Outils d'information.**

Les écorégions fournissent des informations de base pour la planification et la gestion des écosystèmes aquatiques, et de la ressource naturelle en général. Elles permettent de recueillir des données écologiques pour

- les inventaires,
- la surveillance,
- le contrôle de la qualité biologique, physique, chimique et écologique des cours d'eau.

- **Outils de gestion.**

Nous avons pu constater que la méthode de régionalisation a la faculté d'intégrer plusieurs échelles, de l'habitat aux bassins-versants, de par son approche descendante. Les gestionnaires peuvent ainsi obtenir des informations sur les configurations géographiques (spatialisées) des écosystèmes aquatiques pour chaque unité dans la hiérarchie emboîtée (Frissel, 1986).

Ils peuvent aussi concevoir des réseaux de prélèvement efficaces pour les contrôles et les suivis des cours d'eau. Nous avons pu démontrer que la méthode des écorégions peuvent être précieux dans l'échantillonnage des sites représentatifs ou des sites de références.

Il est alors possible d'extrapoler les résultats et les informations des écosystèmes sur des sites analogues non échantillonnés (à l'intérieur de son cadre régional), réduisant de ce fait le coût et le temps dans le contrôle et le suivi de la qualité physique et biologique des cours d'eau (Bailey 1991). Les résultats du contrôle peuvent aussi être extrapolés pour estimer les effets des aménagements dans les régions écologiques équivalentes.

Cette démarche permettrait aussi de discerner les effets de la gestion sur les écosystèmes. Bien que les effets directs de la gestion soient évalués à l'échelle locale d'écosystème, les effets indirects et cumulatifs ont lieu à différents points dans l'espace ou le temps, souvent à de plus hautes échelles spatiales.

Le résultat de la régionalisation est un modèle synthétique de l'espace, ou ce qu'on peut appeler communément "**une boîte à outil**". Un tel modèle est d'importance

considérable pour guider l'action dans le domaine de la recherche écologique et de la politique de gestion pour les grands bassins versants en rapport avec le socio-système.

Il est donc indispensable de continuer à compléter les informations acquises lors de cette étude pour améliorer cette fonction de boîte à outils.

4. LES DECOUPAGES REGIONAUX : UN CADRE SPATIAL AUX FINS DE CHANGEMENTS D'ECHELLE, UN "FILTRE REGIONAL".

- Exemple d'application sur l'habitat aquatique.

Filtre régional

Contrairement à l'objectif du découpage en écorégions, qui est avant tout un découpage à but multi-disciplinaire, nous proposons dans ce paragraphe "les découpages régionaux". Nous gardons tels quels les découpages obtenus lors des analyses statistiques sur les différentes caractéristiques. L'objectif des découpages régionaux est alors de proposer l'hypothèse suivante :

- chaque compartiment de l'écosystème aquatique n'est pas contrôlé par les mêmes variables, en effet la distribution longitudinale des poissons est fonction de l'altitude, de la température de l'eau et de la taille de la rivière (zonation de Huet, 1954),
- il est aussi évident que la distribution de poisson suit des logiques spatiales (zoogéographie), et ces logiques spatiales sont guidées par les variables de contrôles primaires, à savoir : la géologie, le climat et le relief. Ce qui nous amène à la logique de la régionalisation,
- nous proposons alors de réaliser un découpage régional correspondant à cet objectif ou compartiment,

L'équation de la distribution de poissons dans cet exemple :

Equation habituelle :

Distribution de poisson = fonction (habitat local).

Nouvelle équation :

Distribution de poissons = fonction (habitat local + filtre "tronçon" + "filtre région".

Dans cette dernière équation, le découpage établi servirait de "filtre" régional. Il serait alors possible de tester quelles sont les variables de contrôle qui expliqueraient le mieux la distribution des poissons dans les cours d'eau.

Pour participer à ce challenge, nous avons pu mettre en place durant cette étude des plans d'informations répondant à plusieurs contraintes ou objectifs, permettant l'établissement des méthodes de découpages régionaux en fonction d'objectifs clairs, d'un (ou plusieurs) compartiment cible,

Il reste alors à mettre en place :

- la validation des liens entre les variables de contrôle qui expliquent le mieux les réponses du compartiment cible

- la prédiction avec un modèle du lien, qui pourrait être une fonction de l'évolution amont-aval des cours d'eau,
- à partir du cadre régional établi, tester les liens avec les autres compartiments.

Changement d'échelle.

Les objectifs prochains de cette recherche seront aussi de tester les rapports entre les conditions biologiques des cours d'eau d'une part, la nature et la distribution des activités humaines sur le bassin versant d'autre part, afin d'établir des méthodes pour lier des modèles physiques d'impacts urbains et agricoles avec les caractéristiques biologiques ou qualité des eaux. Ils permettront aussi de définir les rapports entre les prévisions du modèle physique et les conditions biologiques; et ensuite d'intégrer toutes les conclusions dans un système expert pouvant être utilisé par les planificateurs. Et ceci dans un cadre régional

Il serait ainsi intéressant d'examiner les rapports entre :

- la qualité biologique mesurée par exemple par l'Indice d'Intégrité Biologique (IBI) (Karr, 1983),
- les caractéristiques physiques des cours d'eau et de leurs bassins versants,
- les indicateurs de pression anthropiques dans les différentes échelles.

Ces rapports seront établis et détaillés sur plusieurs bassins versants :

- les relations entre ces divers indices par bassin versant
- la comparaison entre bassins versants,
- la comparaison des bassins versants en fonction de leurs caractéristiques régionales (allochtones, autochtones)

La liaison des trois modèles de la simulation pourraient résoudre les problèmes de changement d'échelle.

L'accès à une forte connaissance quantitative utilisée dans ce travail peut permettre d'améliorer la mise en place des modèles prédictifs, ou de rapport de cause-à-effet des phénomènes biologiques et écologiques. Les résultats de cette recherche augmenteront de manière significative la capacité des chercheurs à mesurer la dynamique des écosystèmes aquatiques dans des régions fortement modifiées

5. PERSPECTIVES.

Les principales perspectives de ce travail resteront de loin **l'établissement d'un modèle de gestion régionalisée.**

A partir d'un diagnostic global, on peut concevoir la construction d'un modèle du fonctionnement actuel de la région, qui sera utilisé pour simuler l'évolution de son fonctionnement futur en fonction de la variation des facteurs importants. L'outil nécessaire pour intégrer les connaissances progressivement acquises et simuler les résultats de leur mise en oeuvre est naturellement un modèle du fonctionnement de la région, bâti à partir du diagnostic global. Cet outil sera progressivement enrichi au fil des recherches. Les simulations feront apparaître les variations des résultats économiques et environnementaux correspondant à différents scénarios d'évolution.

Ainsi conçue, l'approche écorégionale correspond à un processus itératif qui s'inscrit dans la durée ; sa mise en oeuvre est la construction progressive d'un projet commun par les chercheurs et les acteurs de l'espace géographique considéré.

Des validations et des évaluations à toutes les échelles spatiales, locales et régionales, ainsi que la transférabilité des méthodes entre les écorégions seront encore nécessaires pour l'utilisation de ces méthodes écologiques.

Dans une longue perspective, il est impossible d'éviter le thème et la place des écorégions et leur développement par rapport au couplage avec la sectorisation.

L'écorégion est-elle perçue comme une région naturelle d'après une approche scientifique ou est ce qu'il pourrait y avoir un lien avec les institutionnels ? Où et comment est-ce que les limites de l'ensemble de la région sont pertinentes en termes de gestion ? Nous ne répondons directement à ces questions, mais nous rappelons ici, par exemple, que la délimitation du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) du bassin de la Loire n'a pas tenu compte de la région de gestion ou les hydro-écorégions proposées par Wasson et al. (1993) dans leur rapport. A notre point de vue, ceci pourrait dépendre de la place de la culture de "région politique" en France. Quelle est alors la place de la région écologique par rapport à cette région politique ?

ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES.

Aadland, L. P. (1993). Stream habitat types : their fish assemblages and relationship to flow. *North American Journal of Fisheries Management*, 13, 790-806.

Agence de l'Eau Loire-Bretagne, (1995) : Caractéristiques hydrologiques du bassin de la Loire-Bretagne. 4 tomes. 800 pages.

Albert, D.A.; Denton S.R.; Barnes, B.V. 1986. Regional landscape ecosystems of Michigan. School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor. 32 p.

Allan, J. D., D. L. Erickson, et al. (1997). "The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales." *Freshwater Biology* 37: 149-161.

Allan, J. D. and L. B. Johnson (1997). "Catchment-scale analysis of aquatic ecosystems." *Freshwater Biology* 37: 107-111.

Allardi, J. (1989). Le peuplement ichthyologique de la Loire, CEMAGREF DQEPP.

Allee, P., G. Giert, et al. (1981). Aménagement des rivières à fond mobile : évolution de sections fluviales aménagées.

Allen, T.H.F.; Starr, T.B. 1982. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: The University of Chicago Press. 310 p.

Amoros, C. and G. E. Petts (1993). Hydrosystèmes fluviaux. Paris.

Andriamahefa, H., Malavoi, J. R. (1993). Eléments pour une typologie morphologique des cours d'eau du bassin de la Loire (Rapport technique CEMAGREF Lyon BEA/LHQ).

Andriamahefa, H. (1993). Approche des tendances d'artificialisation des cours d'eau du bassin de la Loire (Rapport technique CEMAGREF Lyon BEA/LHQ).

Andriamahefa, H. (1995). Régionalisation de la morphologie des cours d'eau dans la bassin de la Loire : approche par le faciès d'écoulement, Cemagref BEA/LHQ et Université Jean Monnet - St Etienne.

Andriamahefa, H. (1996). Approche écosystémique du Bassin de la Loire - Phase II. Volet 3.1 : artificialisation des cours d'eau.

Andriamahefa, H., P. Cohen, et Y Souchon (1997). Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin Loire-Bretagne : éléments de cadrage d'une politique globale de gestion des débits et de restauration physique des cours d'eau, CEMAGREF BEA/LHQ.

Andriamahefa, H. (1998). Approche écosystématique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion, Ministère de l'Environnement/Agence de l'Eau Loire-Bretagne/Cemagref.

Andriamahefa, H. and P. Breil (1998). Approche écosystématique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion, Ministère de l'Environnement/Agence de l'Eau Loire-Bretagne/Cemagref.

Aquascop (1998). Système d'évaluation de la qualité du milieu physique des cours d'eau, Agences de l'Eau.

AREA, (1996) : Caractérisation du débit minimum biologique du bassin de la Loire. Rapport Agence de l'Eau Loire-Bretagne. 250p.

- Avers, P.E.; Schlatterer, E.F. 1991. Ecosystem classification and management on national forests. In: Proceedings of the 1991 symposium on systems analysis in forest resources.
- Baran P., Dauba F., Delacoste M., Lascaux J.M., (1993). Essai d'évaluation quantitative du potentiel halieutique d'une rivière à salmonidés à partir des données de l'habitat aquatique. Présentation au Forum Halieumétrique de Rennes.
- Bailey, R.G., (1976). Ecoregions of the United States. Map (1/7 500 000). Ogden, Utah. U.S. Dept Agr , *Forest Service; Intermountain region*.
- Bailey, R.G. 1980. Descriptions of the ecoregions of the United States. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Miscellaneous Publication 1391. 77 p.
- Bailey, R.G. 1983. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management* 7:365-373.
- Bailey, R.G., S.C. Zoltai et E.B. Wiken. 1985. Ecological regionalization in Canada and the United States. *Geoforum* 116(3): 265–275.
- Bailey, R.G. 1987. Suggested hierarchy of criteria for multi-scale ecosystem mapping. *Landscape and Urban Planning* 14:313-319.
- Bailey, R. G. 1988. Problems with using overlay mapping for planning and their implications for geographic information systems. *Environmental Management* 12:11-17.
- Bailey, R.G. 1989a. Ecoregions of the continents (map). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Scale 1:30,000,000.
- Bailey, R.G. 1989b. Explanatory supplement to the ecoregions map of the continents. *Environmental Conservation* 15(4):307-309.
- Bailey, R.G. 1991. Design of ecological networks for monitoring Yobal change. *Environmental Conservation* 18:173-176.
- Bailey, R. (1995). "Water quantity decisions must be based on good science." *Fisheries* **20**(1): 4.
- Bailey R. G. 1996. *Ecosystem geography*. Springer-Verlag, New York, 2(~1 | pp
- Bailey, R. C., M. G. Kennedy, et al. (1998). "Biological assessment of freshwater ecosystems using a reference condition approach: comparing predicted and actual benthic invertebrate communities in Yukon streams." *Freshwater Biology* **39**(4): 765-774.
- Baran, P., F. Dauba, et al. (1993). Essais d'évaluation quantitative du potentiel halieutique d'une rivière à salmonidés à partie de données de l'habitat physique. Premier Forum Halieumétrique, Rennes (29/06/93 - 01/07/93).
- Balling, R. C. Jr. 1984. Classification in climatology. Pages 81-108 *in* L. Gaile and C. J. Willmott (eds.), *Spatial statistics and models* D. Reidel Publishing, Dordrecht.
- Barnes, B.V.; Pregitzer, K.S.; Spies, T.A.; Spooner, V.H. 1982. Ecological forest site classification. *Journal of Forestry* 80:493-498.
- Barnes, B.V. 1984. Forest ecosystem classification and mapping in Baden-Wurtemberg, West Germany. In: *Forest land classification: experience, problems, perspectives*. Proceedings of the symposium; 1984 March 18-20; Madison, WI:49-65.
- Belliard, J., P. Boët, et al. (1997). "Regional and longitudinal patterns of fish community structure in the Seine River basin, France." *Environmental Biology of Fishes* **50**: 133-147.
- Beschta, R. L. and W. S. Platts (1986). "Morphological features of small streams : significance and functions." *Water Resources Bulletin* **22**(3): 369 - 379.
- Bethemont, J. (1972). Le thème de l'eau dans la vallée du Rhône. Essai sur la genèse d'un espace hydraulique, Saint Etienne.
- Bethemont, J. (1992). "Les grands bassins fluviaux et le concept environnemental." *Revue de Géographie de Lyon* **67**(4): 257-260.

Bethemont, J., H. Andriamahefa, et al. (1997). "Une approche régionale de la typologie morphologique des cours d'eau : application de la méthode "morphorégions" au bassin de la Loire et perspectives pour le bassin du Rhône (France)." *Revue de Géographie de Lyon* **71**(4): 311-322.

Bisson P. A., Nielsen J.L., Palmason R.A., Grove L.E. (1981). A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low streamflow. Paper presented at the Symposium on Acquisition of Aquatic Habitat Inventory Information.

Blandin P., Lamotte M., (1985) : Ecologie des systèmes : fondement théoriques et principes méthodologiques, in *Fondements relationnels de l'aménagement d'un territoire*, Masson Ed, 149-154.

Blandin, P. Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques, Station Biologique de Foljuif.

Bostock, H.S. 1970. Subdivisions physiographiques du Canada. Chap. 2 de Géologie et ressources minérales du Canada. Sous la direction de R.J.W. Douglas. Commission géologique du Canada, Série de la géologie économique, no 1. Énergie, Mines et Ressources Canada.

Boon, P. J., P. Calow, et al. (1992). *River conservation and management*, John Wiley & Sons.

Bouma J., Kuyvenhoven A., Bouman B.A.M., Luyten J.C., Zandstra H.G., ed. *Symposium Ecoregional approaches for sustainable land use and food production*, The Hague, december 1994 (à paraître).

Bravard, J. P. (1986). La basse vallée de l'Ain : dynamique fluviale appliquée à l'écologie. *Recherches interdisciplinaires sur les écosystèmes de la basse plaine de l'Ain (France) : potentialités évolutives et gestion*. Roux A.L., Document Cartographique Ecologique. **29**: 17-43.

Bravard, J. P. (1987). *Le Rhône, du Léman à Lyon*. Lyon.

Bravard, J. P. (1991). "La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagements des rivières ?" *La Houille Blanche* **7/8**: 515-521.

Bravard, J. P., C. Amoros, et al. (1986). "Impact of civil engineering works on the successions of communities in a fluvial system." *Oikos* **47**: 92-111.

Bravard, J. P., J. R. Malavoi, et al. (1989). L'Ain, ou la difficulté de gérer une rivière en cours de métamorphose. *Rivières en crise : Saône, Ain, Durance*, Lyon, Université Jean Moulin, Centre de Recherche en Géographie et Aménagement, Institut du Droit et de l'Environnement,.

Bravard, J. P., A. L. Roux, et al. (1986). Evolution spatio-temporelle des systèmes fluviaux aménagés : recherches méthodologiques sur le Haut-Rhône français. L'impact des activités humaines sur les eaux continentales, XIXe Journées de l'Hydraulique, Paris, 9-11 septembre.

Breil, P. and A. Malafosse (1993). Etude exploratoire de la variabilité des régimes hydrologiques : applications aux besoins hydrobiologiques, Brunchwak.

Breil P., Malafosse A., (1994a) : Etude exploratoire de la variabilité des régimes hydrologiques : application aux besoins hydrobiologiques. IASH publication. No 221. 503-510

Breil P., Malafosse A., (1994b) : Essai de typologie hydroécologique de la variabilité des écoulements en rivière. 23^e journées de l'hydraulique, 14-16 septembre, 1994, Nîmes, Société HydroTechnique ed France, 6 p.

Breil P., Malafosse A., (1996) : Typologie de la variabilité éco-hydrologiques des régimes d'écoulement en rivière. Rapport intermédiaire de l'Etude Loire. 11 p. et 2 annexes.

Breil P., (1997) : Regional hydrological determinants for in-stream ecology. UNESCO FRIEND programme, third report 1994 - 1997. Cemagref Edition. 386-390.

Brenner, R.N.; Jordan, J.K. 1991. The role of an ecological classification system in forest plan development and implementation. In: *Proceedings of the 1991 symposium on systems analysis in forest resources*, 1991 March 3-6; Charleston, SC.

Brookes, A., K. J. Gregory, et al. (1983). "An assessment of river channelization in England and Wales." *The Science of the Total Environment* **27**: 97-112.

- Brookes (A.), 1985. River channelization: traditional engineering methods, physical consequences and alternative practices. *Prog. in Phys. Geogr.* 9.
- Brookes A. (1988). Channelized rivers, perspectives for environmental management. Wiley Interscience *Edition*.
- Brussock, P. P., A. V. Brown, et al. (1985). "Channel form and stream ecosystem models." *Water resources bulletin* 21(5): 859-866.
- Brussock (P.P.), 1985. Channel form and stream ecosystem models. *Wat. Res. Bull.* 21(5).
- Bryce S. A., and S. E. Clarke. 1996. Landscape-level ecological regions: Linking state-level ecoregion frameworks with stream habitat classifications. *Environmental Management* 20(3): 297-311.
- Brown, J. E., T. R. Loveland, J. W. Merchang, B. C. Reed, and D. O. Ohlen. 1993. Using multisource data in global landcover characterization: Concepts, requirements, and methods. *Photogrammetric Engineering ~ Remote Sensing* 59(6): 977-987.
- Bunge, W. 1966. Theoretical geography, Lund studies in geography series C, 2nd ed. General and Mathematical Geography No.1, Gleerup, Lund.
- Bureau de coordination de la surveillance écologique. 1994. Les Centres des sciences écologiques : définition et fonctionnement. Bulletin d'information sur les Centres des sciences écologiques, 1(1): 1-3. Service de la conservation de l'environnement, Centre canadien des eaux intérieures, Burlington, Ont.
- Burrough, R. A. 1986. Principles of geographic information systems for land resource assessment. Clarendon Press, Oxford, 193 pp.
- Cacas, J., M. Degoutte, et al. (1986). Aménagements de rivières : trois études de cas, Cemagref (Ministère Envir.; Ministère Agric).
- Cemagref, (1983). L'étude d'impact des aménagements de cours d'eau. **103p.**
- Cemagref (1988). Plan de gestion piscicole. Etude des conditions d'application de l'article 424 du Code rural. Cas de l'Yzeron (69), CEMAGREF, DQEPP Lyon.
- CEMAGREF, Secrétariat d'État à l'Environnement, 1990. Synthèse technique sur le bilan d'application de l'article L.232-5 du Code Rural.
- Cemagref (1997). Etat de santé des écosystèmes aquatiques - Les variables biologiques comme indicateurs. Paris.
- Chorley, R. J., and P. Haggett (eds.). 1967. Models in geography. Methuen & Co., London.
- Church, M. (1992). Channel morphology and typology. The rivers handbook. Calow P. and Petts G.E. Oxford, Blackwell Scientific Publications. **vol 1**: 126-143.
- Clarke, W. E., D. White, and A. L. Schaedel. 1991. Oregon ecological regions and subregions for water quality management. *Environmental Management* 15:847-856.
- Clausen B., Biggs B.J.F., (1997) : Relationships between benthic biota and hydrological indices in New Zealand streams. *Freshwater Biology*, 38, 327-342.
- Cleland, D.T.; Crow, T.R.; Avers, P.E.; Probst, J.R. 1992. Principles of land stratification for delineating ecosystems. In: Proceedings of Taking an Ecological Approach to Management National Workshop. 1992 April 27-30; Salt Lake City, Utah. 10 p.
- CGIAR, Technical Advisory Committee, 1994. Review of proposals for systemwide and ecoregional initiatives. Washington D.C., CGIAR Secretariat.
- Clifford, H. T., and W. Stephenson. 1975. An introduction to numerical classification. Academic Press, New York.
- Cressie, N. A. C. 1991. Statistics for spatial data. John Wiley & Sons New York.
- Cohen, P. (1994). Approche régionale de l'habitat du poisson : ébauche de typologie de la composante morphologique et aspects méthodologiques, Université Cl. Bernard LYON I, Cemagref BEA LHQ.

- Cohen, P. (1994). La variabilité hydrologique comme facteur structurant les communautés animales lotiques, Un. Cl. Bernard Lyon I, CEMAGREF Lyon - BEA/LHQ.
- Cohen, P. (1998). Régionalisation de l'habitat physique du poisson : approche multi-scalaire et application au bassin de la Loire, France, Université Claude Bernard Lyon I, Cemagref LHQ/BEA: 266.
- Cohen, P. (1998). Régionalisation de l'habitat physique du poisson : approche multi-scalaire et application au bassin de la Loire, France, Université Claude Bernard Lyon I: 266 p.
- Cohen, P., H. Andriamahefa, et al. (1998). "Towards a regionalization of aquatic habitat: distribution of mesohabitats at the scale of a large basin." *Regulated Rivers: Research and Management* **14**: 391-404.
- Cohen, P., M. Philippe, et al. (1995). Effets structurants des étiages et des sécheresses sur les communautés animales et végétales des cours d'eau. Etat des connaissances bibliographiques., Cemagref Lyon, BEA/LHQ.
- Colwell R.K., (1974) : Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. *Ecology*, 55, 1148-1153.
- Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada, 1987, Classification canadienne des sols, 2e éd. Publication 1646, Agriculture Canada. 170 pp.
- Commission de Bassin Seine Normandie, AREA, 1992. Cartographie de synthèse des SDVP et des ZNIEFF humides du bassin Seine-Normandie.
- Connell J.H., (1978) : Diversity in tropical rainforests and coral reefs. *Science*, 199, 1302-1310.
- Cowardin, L.M.; Carter, V.; Golet, F.C.; LaRoe, E.T. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, U.S. Fish and Wildlife Service. 131 p.
- Crowley, J.M. 1967. Biogeography in Canada. *Canadian Geographer* 11: 312-326.
- Cohen, P. (1994). Approche régionale de l'habitat du poisson : ébauche de typologie de la composante morphologique et aspects méthodologiques. DEA, rapport technique, Université Claude Bernard Lyon I, CEMAGREF Lyon BEA/LHQ.
- Commission de Bassin Seine Normandie, AREA, 1992. Cartographie de synthèse des SDVP et des ZNIEFF humides du bassin Seine-Normandie.
- Corbonnois, J. and J. F. Zumstein (1994). "Proposition de typologie des cours d'eau. Application au réseau hydrographique du Nord-Est de la France(bassin de la Moselle)." *Revue de Géographie Alpine* **2**: 15-24.
- Cupp, C. E. (1989). Stream corridor classification for forested lands of Washington. Olympia, Washington: Washington Forest Protection Association.
- Dacey, M. E 1960. Identification of patterns on maps with special reference to data reduction for systems analysis. Dissertation. University of Washington, Seattle, WA.
- De Agar, R M., C. L. De Pablo, and F. D. Pineda. 1995. Mapping the ecological structure of a territory: A case study in Madrid (central Spain). *Environmental Management* 19(3): 345-357.
- Décamps, H. (1984). Towards a landscape ecology of river valleys. *Trends in Ecological Research for the 1980s*. J. H. Cooley and F. B. Golley: 163-178.
- Demarchi, D.A. 1993. Ecoregions of British Columbia. 3e édition. Ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique, Direction de la faune, Victoria, C.-B. Carte au 1/2 000 000.
- Denton, D.R.; Barnes, B.V. 1988. An ecological climatic classification of Michigan: a Quantitative approach. *Forest Science* 34:119-138.
- Diggle, P. J. 1983. Statistical analysis of spatial point patterns. Academic Press, London.
- Driscoll, R.S.; et. al. 1984. An ecological land classification framework for the United States. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Miscellaneous Publication 1439. 56 p.
- Ducruc, J.-P., T. Li, V. Gérardin et J. Bissonnette. 1994. Small scale ecological mapping of Quebec: Natural provinces and regions. Communication présentée lors du Quatrième Congrès de la Société canadienne d'écologie et d'aménagement du paysage, Université Laval, Sainte-Foy, Québec 4 pp.

- Dumanski, J., W.W. Pettapiece, D.F. Acton et P.P. Claude. 1993. Application of agro-ecological concepts and hierarchy theory in the design of databases for spatial and temporal characterization of land and soil. *Geoderma* 60:343–358.
- Dupias, G., & Rey, P. (1980). Carte des régions écologiques de la France au 1/1.000.000. In CNRS - Service de la carte la végétation.
- Dupias (G.) et Rey (P.), 1985. Documents pour un zonage des phyto-écologiques. Cartes. *CNRS, CERR Toulouse*.
- Ebert, D.J.; Nelson, T.A.; Kershner, J.L. 1991. A soilbased assessment of stream fish habitats in coastal plains streams. Proceedings of warmwater fisheries symposium. 1991 June 4-8; Phoenix, AZ.
- Ecoregions Working Group. 1989. Ecoclimatic regions of Canada, first approximation. Ecological Land Classification Series No. 23. Ottawa: Environment Canada. 119 p. and map at 1:7,500,000.
- Eilers, R.G., et G.F. Mills. 1992. Land resource regions and areas of southern Manitoba: Methodology and extended legend. Rapport préliminaire, Prospection pédologique Canada — Manitoba, Département de pédologie, Université du Manitoba, Winnipeg, Man.
- Environnement Canada. 1985. Base de données sur les écodistricts. Fichier ouvert non publié. Système de données sur les terres du Canada, Direction générale des terres, Ottawa, Ont.
- Environnement Canada. 1986. Climate Atlas Climatique Canada: Série de cartes 2–Précipitations. Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa, Ont.
- EPALA/ BETURE-SETAME; 1990. "Étude globale d'environnement de la Loire". Tome 1; Titre 1 à 4. Tome 2: annexes.
- Équipe d'évaluation scientifique de la biodiversité. 1994. La biodiversité au Canada: Évaluation scientifique pour Environnement Canada. Environnement Canada, Ottawa, Ont. 275 pp.
- ESRI, 1991. PC ARC/INFO. Environmental Systems Research, Institute, Inc. Redlands, California.
- Fenneman N. M. 1946. Physical divisions of the United States. Map (scale 1:7,000,000). US Geological Survey, Reston, Virginia.
- Forêts Canada. 1993. L'état des forêts au Canada 1992. Troisième rapport au parlement. Ottawa, Ont.
- Forman, R.T.T.; Godron, M. 1986. Landscape Ecology. New York: Wiley and sons.
- Freemark, K. 1995. Assessing effects of agriculture on terrestrial wildlife: Developing a hierarchical approach for the US EPA. *Landscape and Urban planning* 31:99-115.
- Frissell, C.A.; W.J. Liss, W.J.; Warren, C.E.; Hurley, M.C. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10: 199-214.
- Fulton, R.J. (compilateur). 1995. Matériaux superficiels du Canada. Carte 1880A, échelle de 1/5 000 000. Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, Ottawa, Ont.
- Gallant, A.L.; Whittier, T.R.; Larsen, D.P.; Omernik, J.M.; Hughes, R.M. 1989. Regionalization as a tool for managing environmental resources. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/3-89/060. Research Laboratory. Corvallis, Oregon., OR. 152 p.
- Gallant, A. L., J. M. Omernik, et al. (1991). Ecoregions of the Seine river basin, France. Corvallis, Oregon.
- Gallant, A.L., E.F. Binnian, J.W. Omernik et M.B. Shasby. 1995. Ecoregions of Alaska. Rapport préparé en collaboration par la Colorado State University, l'U.S. Environmental Protection Agency et l'U.S. Geological Survey. (Carte et rapport préliminaires).
- Gasowski, Z. (1994). "L'enfoncement du lit de la Loire." *Revue de Géographie de Lyon* 69(1): 41-45.
- Gauch, H. G. Jr. 1982. Multivariate analysis in community ecology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Gauthier, D. (sous la direction de). 1992. Framework for developing a nationwide system of ecological areas: Part 1–A Strategy. Document occasionnel no 12, Conseil canadien des aires écologiques. Secrétariat, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa/Hull. 47 pp.

- Gauthier, D., K. Kavanagh, T. Beechy, L. Goulet et E. Wiken (sous la direction de). 1995. Framework for developing a nationwide system of ecological areas: Part 2—Ecoregion gap analysis. Document occasionnel no 13, Conseil canadien des aires écologiques. Secrétariat, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa/Hull. 47 pp.
- Gray, P.A., L. Demal, D. Hogg, D. Greer, D. Euler et D. DeYoe. 1995. An ecosystems approach to living sustainability. A Discussion Paper. Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Peterborough, Ont. 77 pp.
- Gilbert, G., R.-G. Hélie et J.-M. Mondoux. 1985. Écorégions et écodistricts du Québec. Dans *Sensibilité de l'écosystème aux précipitations acides au Québec*. Série de la classification écologique du territoire, no 20, Partie A. Environnement Canada. Hull, Qc.
- GIP-Hydrosystèmes (1995). Schéma directeur. Séminaire de réflexion, Ile de ré.
- Godin, B., et M.R. Roberts. 1994. Ecological land classification for New Brunswick: Ecoprovinces, ecoregions and ecodistricts levels. Faculté de foresterie et de gestion de l'environnement, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton, N.-B. 99 pp.
- Goodman, L. A., and W. H. Kruskal. 1972. Measures of association for cross-classification I,II, III, and IV. *Journal of the American Statistical Association* 67:415-421.
- Gordon (N.) et al., 1992. Stream ecology. An introduction for ecologists. *Ed. Wiley*.
- Greff (B.), 1993. Approche méthodologique de la gestion intégrée des cours d'eau. *Problématique de thèse. CERGRENE*.
- Gross, F. and A. Dutartre (1980). L'aménagement des cours d'eau. Evolution des milieux aménagés. Données économiques. Quelques exemples pris dans le Sud-Ouest de la France, Université de Bordeaux, CTGREF.
- Groupe de travail sur les écorégions. 1989. Régions écoclimatiques du Canada, première approximation. Série de la classification écologique du territoire, no 23. Direction du développement durable, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa, Ont. 199 pp. Rapport et carte au 1/7 500 000.
- Guelke, L. 1977. Regional geography. *Professional Geographer* 29(1) : 1-7.
- Hammond, E. H. 1964. Analysis of properties in land form geography: An application to broad-scale land form mapping. *Annals of the Association of American Geographers* 54: 11-19.
- Harding, J. S. and M. J. Winterbourn (1997). "An ecoregion classification of the south Island, New Zealand." *Journal of Environmental Management* 51: 275-287.
- Harding, J. S. and M. J. Winterbourn (1997). "An ecoregion classification of the south Island, New Zealand." *Journal of Environmental Management* 51: 275-287.
- Harding, J. S., M. J. Winterbourn, et al. (1997). "Stream faunas and ecoregions in South Island, New Zealand: do they correspond?" *Archiv Fur Hydrobiologie* 140(3): 289-307.
- Harris, W.C., A. Kabzems, A. Kosowan, G.A. Padbury et J.S. Rowe. 1989. Ecological regions of Saskatchewan (revised edition). Bulletin technique no 10. Ministère des Parcs et des Richesses renouvelables. Regina, Sask.
- Hartshorne, R. 1939. The nature of geography. A critical survey of current thought in the light of the past. Association of American Geographers, Lancaster, Pennsylvania.
- Hartshorne, R. 1955. "Exceptionalism in geography" re-examined. *Annals of the Association of American Geographers* 45 (3) :20-j-244.
- Hawkes, C. L., D. L. Miller, et al. (1986). "Fish ecoregions of Kansas: stream fish assemblage patterns and associated environmental correlates." *Environmental Biology of Fishes* 17(4): 267-279.
- Hawkins, D. M., and D E Merriam. 1973. Optimal zonation of digitized sequential data. *Mathematical Geology* :389-395.
- Hawkins, D. M., and D. E Merriam. 1974. Zonation of multivariate sequences of digitized geologic data. *Mathematical Geology* 6: 263-269.

- Hawkins, C. P., Kershner, J. L., Bisson, P. A., Bryant, M. D., Decker, L. M., Gregory, S. V., McCullough, D. A., Overton, C. K., Reeves, G. H., Steedman, R. J., & Young, M. K. (1993). A hierarchical approach to classifying stream habitat features. *Fisheries*, 18, 3-12.
- Heiskary, S. A. and C. B. Wilson (1989). "The regional nature of lake water quality across Minnesota: an analysis for improving resource management." *Journal of the Minnesota Academy of Science* 55(1): 71-77.
- Heiskary, S. A., C. B. Wilson, et al. (1987). "Analysis of regional patterns in lake water quality: using ecoregions for lake management in Minnesota." *Lake and Reservoir Management* 3: 337-344.
- Herbertson, A. J. 1905. The major natural regions. All essay in svstematic geography *Geographical journal* 25:300-312.
- Herrington, R.B; Dunham, D.K. 1967. A technique for sampling general fish habitat characteristics of streams. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Research Paper INT-41. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 12 p.
- Higler (L.W.G.) et Mol (A.W.M.), 1984. Ecological types of running water based on stream hydraulics in The Nederlands. *Hydrobiological Bull.* 18 (1).
- Hildrew A.G., Townsend C.R., (1987) : Organization in freshwater communities. In : Gee JHR, Giller PS (eds) Organization of communities past and present. Blackwell Scientific, Oxford, 347-372.
- Hills, G.A. 1976. Mapping the site regions and landscape districts of Ontario 1944–1975: Introducing the 1975 version. Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. Institut de recherche forestière de l'Ontario. Manuscrit non terminé, Archives de l'IRFO, Sault Ste. Marie, Ont.
- Hirvonen, H.E. 1984. The Atlantic region of Canada: An ecological perspective. Direction générale des terres et des programmes intégrés, Environnement Canada, Dartmouth (N.-É.)
- Hoag, L. P. 1958. A critical study of methods for delimiting multiple component regions. Dissertation. University of Minnesota Minneapolis. MN.
- Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center. San Jose, CA. 206 p.
- Horton, R. E. (1945). "Erosional development of streams and their drainage basins : hydrophysical approach to quantitative geomorphology." *Geological Society of America Bulletin* 56: 275-370.
- Horwitz R.J., (1978) : Temporal Variability Patterns and the Distributional Patterns of Stream Fishes. *Ecological Monographs*. 48, 307-321.
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 11(3-4), 332-351.
- Huet, M. (1952). "Biologie, profils en long et en travers des eaux courantes." *BFP* 175: 41-53.
- Hughes, R. M., D. P. Larsen, et al. (1986). "Regional reference sites: a method for assessing stream potentials." *Environmental Management* 10(5): 629-635.
- Hughes, J. M. R. (1987). "Hydrological characteristics and classification of Tasmanian rivers." *Australian Geographical Studies* 25: 61-84.
- Hughes, R. M., E. Rexstad, et al. (1987). "The relationship of aquatic ecoregions, river basins and physiographic provinces to the ichthyogeographic regions of Oregon." *Copeia* 2: 423-432.
- Hughes, R. M., et D. P Larsen. 1988. Ecoregions: An approach to surface water protection. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 60: 486-493
- Hughes, J. M. R. and B. James (1989). "A hydrological regionalization of streams in Victoria, Australia, with implications for stream ecology." *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 40: 303-326.
- Hughes, R. M. and S. G. Paulsen (1990). Indicator strategy for inland surface waters. Environmental Monitoring and Assessment. C. T. Hunsaker and D. E. Carpenter, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park: 4.1-4.18.
- Hughes, R. M., T. R. Whittier, et al. (1990). "A regional framework for establishing recovery criteria." *Environmental management* 14(5): 673-683.

Hughes, R. M. and Noss R.F. (1992). "Biological diversity and biological integrity : current concerns for lakes and streams." *Fisheries* **17**(3): 11-19.

Hughes, R. H. (1995). Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions. *Biological Assessment and Criteria looks for Water Resource Planning and Decision Making*. W. S. Davis and T. P. Simon, Lewis Publishers: 31-47.

Hughes, N. F. and L. H. Kelly (1996). "A hydrodynamic model for estimating the energetic cost of swimming maneuvers from a description of their geometry and dynamics." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**: 2484-2493.

Hughes, N. F. (1998). "A model of habitat selection by drift-feeding stream salmonids at different scales." *Ecology* **79**(1): 281-294.

Hynes, H. B. N. (1970). *The Ecology of Running Waters*. Toronto, University of Toronto Press.

Hynes, H.B.N., (1975). *The stream and its valley*. Verh. Inter. Verein. Limnol. 19.p.1-15.

Illies, J. and L. Botosaneanu (1963). "Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique." *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **12**: 1-57.

Ironside, G.R. 1989. Comité canadien de la classification écologique du territoire : Réalisations (de 1976 à 1989) et plan à long terme. Secrétariat du CCCET, Division de la recherche sur les applications écologiques. Développement durable, Environnement Canada, Ottawa, Ont.

Ironside, G.R. 1991. Relevé écologique du territoire : historique et orientation générale. Dans H.A. Stelfox, G.R. Ironside, et J.L. Kansas (sous la direction de) *Lignes directrices pour l'intégration des évaluations de la faune et de l'habitat au relevé écologique du territoire*. Habitat faunique Canada et Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa, Ont. 107 pp.

Isard, W. 1960. *Methods of regional analysis: An introduction to regional science*. Published jointly by the Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, New York.

Ivol, J. M. (1997). *Approche écosystématique du bassin de la Loire*, CEMAGREF BEA/LHQ - Convention Ministère de l'Environnement.

Ivol, J. M. and M. Philippe (1997). *Constitution d'un référentiel régionalisé de bioindicateurs des écosystèmes d'eau courante du bassin de la Loire*, CEMAGREF BEA/LHQ - Convention Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Ivol, J. M., M. Philippe, et al. (1996). *Approche écosystémique du Bassin de la Loire - Phase II. : milieu aquatique*.

Ivol, J. M., M. Philippe, et al. (1995). *Approche écosystémique du bassin de la Loire, phase II.*, CEMAGREF Lyon et Antony.

Ivol-Rigaut, J. M. (1998). *Hydro-écorégions et variabilité des communautés du macrobenthos sur le bassin de la Loire. Essai de typologie régionale et référentiel faunistique*. Lyon, Université Claude Bernard Lyon I, Cemagref LHQ/BEA: 271.

Jarvis, I.E., K.B. MacDonald et T. Betz. 1995. Development and application of a Canadian ecological framework. Dans *Proceedings of GIS 95. Ninth annual symposium on geographic information systems*, Vancouver, British Columbia. GIS World Inc., Ft. Collins, Colo. pp. 605-612.

Jensen, M.C.; McMicoll, C.; Prather, M. 1991. Application of ecological classification to environmental effects analysis. *Journal of Environmental Quality* **20**:24-30.

Joliveau, T. and J. N. Degorce (1992). "Problèmes et méthodes de gestion de l'information pour un diagnostic du bassin de la Loire." *Revue de Géographie de Lyon* **67**(4): 345-354.

Jones, R. K et al. 1983. *Field guide to forest ecosystem classification for the clay belt, site region 3e*. Ontario, Canada: Ministry of Natural Resources. 123 P.

Jordan, J.K. 1982. Application of an integrated land classification. In: *Proceedings, Artificial Regeneration of Conifers in the Upper Lakes Region*. 1982 October 26-28; Green Bay, WI: 65-82.

Jowett, I. G. (1993). "A method for objectively identifying pool, run and riffle habitats from physical measurements." *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **27**: 241-248.

- Jowett I.G., Duncan M.J., (1990) : Flow variability in New-Zeland rivers and its relationship to in-stream habitat and biota in New-Zeland. *Journal of Marine and Freshwater Research*, 24, 305-317.
- Karr, J. R. (1993). "Defining and assessing ecological integrity : beyond water quality." *Environmental Toxicology and Chemistry* **12**: 1521-1531.
- Karr, J. R. and D. R. Dudley (1981). "Ecological perspective on water quality goals." *Environmental Management* **5**: 55-68.
- Keane, R.E.; Jensen, M.E.; Hann, W.J. 1990. *Ecodata and Ecopac: analytical tools for integrated resource management*. The Compiler. 8(3): 24-37.
- Keller, E. A. and W. N. Melhorn (1978). "Rythmic spacing and origin of pools and riffles." *Bulletin of the Geological Society of America*(89): 723-730.
- Kellerhals, R. and M. Church (1990). *The Morphology of large rivers : characterization and management*. Proceedings of the International Large River Symposium, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.
- Kellerhals, R., M. Church, et al. (1976). "Classification and analysis of river processes." *Journal of the Hydraulics Division* **102**(7): 813-829.
- Kershner, J. L., & Snider, W. M. (1992). Importance of a habitat-level classification system to design instream flow studies. In P. J. Boon, P. Calow, & E. Petts (Eds.), *River Conservation and Management* (pp. 179-193). John Wiley & Sons Ltd.
- Kershner, J. L., Snider, W. M., Turner, D. M., & Moyle, P. B. (1992). Distribution and sequencing of mesohabitats : are there differences at the reach scale ? *Rivers*, 3(3), 179-190.
- Kershner, J. L., W. M. Snider, et al. (1992). "Distribution and sequencing of mesohabitats : are there differences at the reach scale ?" *Rivers* **3**(3): 179-190.
- Kirkwood, V., J. Dumanski et A. Bootsma. 1983. *The land potential database for Canada: Users' manual*. Bulletin technique 1983-4E, Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ont. 53 pp.
- Kirchhofer, A. (1995). "Morphological variability in the ecotone - an important factor for the conservation of fish species richness in Swiss rivers." *Hydrobiologia* **303**: 103-110.
- Klijn, F., R. W. De VVaal, and J. H. Ottde Voshaar. 1995. *Ecoregions and ecodistricts: Ecological regionalizations for the Netherlands' environmental policy*. *Environmental Management* 19(6): 797-813.
- Koch, G. S., Jr., and R. E Link. 1971. *Statistical analysis of geological data*. Dover Publications, NewYork.
- Koppen, J.M. 1910. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Grayter. 388 p.
- Krasovskaia, I. and L. Gottschalk (1992). "Stability of river flow regimes." *Nordic Hydrology* **23**: 137-154.
- Kuchler, A.W. 1964. *Potential natural vegetation of the conterminous United States*. American Geographic Society Special Publication 36. 116 p.
- Lalanne Berdouticq, G. (1985). *Aménagement et entretien des rivières en milieu rural ; méthode d'étude et technique de travaux*, Comité d'Aménagement des coteaux de Gasgogne Ministère de l'Agriculture.
- Lamouroux, N. (1995). "Les modèles statistiques de description de l'habitat hydraulique : des outils pour l'écologie." *Bull. Fr. Pêche Piscic.* **337-338-339**: 157-164.
- Larsen, D. P., J. M. Omernik, et al. (1986). "Correspondence between spatial patterns in fish assemblages in Ohio streams and aquatic ecoregions." *Environmental Management* **10**: 815-828.
- Latham, J. R 1959. *The distance relations and some other characteristics of cropland areas in Pennsylvania: An experiment in methodology for empirically analyzing, regionalizing and describing complexly-distributed areal phenomena*. Dissertation. University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
- Legendre et Legendre, 1979. *Ecologie numérique, tome 1, 2, 3. Edition Masson*.

- Legendre, P. and M. J. Fortin (1989). "Spatial pattern and ecological analysis." *Vegetatio* **80**: 107-138.
- Leopold, L. B. and M. G. Wolman (1957). *River channel patterns : braided, meandering, and straight*, U.S. Geological Survey.
- Leopold, L. B., M. G. Wolman, et al. (1964). *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco.
- Lotspeich (F.B.), 1980. Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for a natural classification system. *Wat. Ress. Bull.* **16** (4).
- Lotspeich, F. B. (1982). "An integrated land-aquatic classification system." *North American Journal of Fisheries Management* **2**: 138-149.
- Lowe, J.J., K. Power et M. Marsan. 1995. Inventaire des forêts du Canada 1991: Sommaire par écozone et par écorégion terrestres. Rapport d'information. Institut forestier national de Petawawa, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada. Petawawa, Ont. (sous presse).
- Lyons, J. (1989). "Correspondence between the distribution of fish assemblages in Wisconsin streams and Omernik's ecoregions." *Am. Mid. Nat.*(122): 163-182.
- MacDonald, K.B. et K.W.G. Valentine. 1992. Description générale du SISCan/BNDS : Guide 1 de SISCan. Division des ressources pédologiques, Contribution du CRTRB no 93-35. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques. Direction générale de la Recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ont.
- Major, J. 1969. Historical development of the ecosystem concept. In: (Van Dyne, G.M. ed.) *The ecosystem concept in natural resource management*. New York: Academic Press: 9-22.
- Malafosse A., (1996) : Descripteurs de la variabilité hydrologique temporelle pouvant structurer les peuplements des écosystèmes d'eau courante. Cemagref publication. PhD report in hydrology. 250 p.
- Malavoi (J.R.), 1985. La basse vallée de l'Ain; Etude hydrologique et morphodynamique. *Mémoire de Maîtrise de Géographie; Lyon III*.
- Malavoi, J. R. (1986). Le substrat des rivières à fond graveleux. Approche descriptive. DEA Interface Homme/Nature et problèmes d'aménagements, Lyon III.
- Malavoi, J. R., & Souchon, Y. (1989). Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Exemple d'une station de la Filière (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 252-259.
- Malavoi (J.R.), 1990. Méthodologie de sectorisation et de description des cours d'eau à pente forte et moyenne. Application à une gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante. *Thèse de Géographie; Lyon III*.
- Malavoi (J.R.) / Wasson (J.G.)/ Souchon (Y.); 1991. "Approche typologique de l'impact des aménagements de rivière sur les habitats piscicoles en vue de l'application de l'article L232-3 du Code Rural". Rapport préliminaire. *CEMAGREF/CIPEA*.
- Malavoi, J. R., & Souchon, Y. (1992). Hydrologie et dynamique hydroécologique des cours d'eau. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5, 247-261.
- Marshall, I.B., H. Hirvonen et E. Wiken. 1992. National and regional scale measures of Canada's ecosystem health. Dans S. Woodley, S. Kay et G. Francis (sous la direction de) *Ecological integrity and the management of Ecosystems*. St. Lucie Press, Floride. pp. 117-130.
- Marshall, I.B., C.A. Smith et C. Selby. 1996. A national ecological framework for monitoring and reporting on the environmental Sustainability in Canada. Dans R. Sims (sous la direction de) : *Global to local: Ecological land classification*. Kluwer Publications, Pays-Bas (sous presse).
- McRae, T., et N. Lombardi. 1994. Atelier de consultation sur les indicateurs environnementaux pour l'agriculture canadienne. Rapport final préparé pour le Groupe de travail sur les indicateurs environnementaux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Bureau de l'environnement, Agriculture and Agroalimentaire Canada. Ottawa, Ont. 96 pp.
- Meades, W.J. 1993. Ecoregions of Labrador (revised). Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, St. John's, T.-N.

Meentemeyer, V. and E.O. Box. 1987. Scale effects in landscape studies. In: (Turner, M.G. ed.) Landscape heterogeneity and disturbance. New York: Springer-Verlag: 15-34.

Ministère de l'Environnement et de la Faune. 1994. De la région naturelle à l'écosystème : une voie naturelle. Gouvernement du Québec, Québec (sous presse).

Minshall, G. W. (1988). "Stream ecosystem theory: a global perspective." *Journal of North American Benthological Society* **7**: 263-288.

Minshall, G. W., K. W. Cummins, et al. (1985). "Developments in stream ecosystem theory." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **42**: 1045-1055.

Morisawa, M. (1985). Rivers. IN. Ed. K.M. Kleyton

Naiman (R.J.) et Decamps (H.), 1990. The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones. Vol. 4. *Man and Biosphere Series*.

Naiman, R. J., D. G. Lonzarich, et al. (1990). Stream classification and the assesment of conservation potential. Conference on the conservation and management of rivers, York, England.

Naiman, R. J., J. A. Stanford, et al. (1991). The application of ecological knowledge to river management. *Quels fleuves pour demain ?*, Orléans (France).

Naiman, R. J. (1992). Watershed management : balancing sustainability and environmental change. New-York, Springer-Verlag.

Naiman, R. J., D. G. Lonzarich, et al. (1992). General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers. *Rivers Conservation and Management*. Boon P., Calow P. and Petts G. Chichester, UK, Wiley & Sons: 93-123.

Naiman, R. J., T. J. Beechie, et al. (1992). Fundamental elements of ecologically healthy watersheds in the Pacific Northwest coastal ecoregion. *Watershed management. Balancing sustainability and environmental change*. R. J. Naiman, Springer-Verlag: 127-188.

Niemi, G. J., P. DeVore, et al. (1990). "Overview of case studies on recovery of aquatic systems from disturbance." *Environmental Management* **14**: 571-587.

Omernik, J. M., M. A. Shirazi, et al. (1982). A synoptic approach for regionalizing aquatic ecosystems. *Place resource inventories : principles and practices, proceedings of a national workshop. August 9-14 1981, University Urono : university of Maine*.

Omernik, J. M. and A. Gallant (1986). Ecoregions of the Pacific Northwest, Environmental Protection Agency: 39p.

Omernik, J. M. and G. E. Griffith (1986). "Total alcalinity of surface waters: a map of the upper midwest region of the United States." *Environmental Management* **10**: 829-839.

Omernik, J. M. and G. E. Griffith (1986). "Total alkalinity of surface waters: a map of the western region." *Journal of Soil and Water Conservation* **335**: 374-378.

Omernik, J. M. 1987. Ecoregions of the conterminous United States. *.Annals of the Association of American Geographers* **77**:118-125

Omernik, J. M. and G. E. Griffith (1991). "Ecological regions versus hydrological units: frameworks for managing water quality." *Journal of soil and water conservation* **46**: 334-340.

Omernik, J. M. 1995 Ecoregions: A spatial framework for Environmental management. Pages 49-62 in W.S. Davis and T. P. Shloto (eds.), *Biological assessment and criteria. Tools for water resource planning and decision making*. Lewis Publishers, Florida.

Omernik, J. M. and R. G. Bailey (1997). "Distinguishing between watersheds and ecoregions." *Journal of the American Water Resources Association* **33**(5): 1-15.

Omernik, J. M., and A. L. Gallant. 1988. Ecoregions of the Upper Midwest. Map (scale 1:2,500,000. EPA/600/3-88/037. US environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon. 39 pp.

- O'Neill, R.V.; DeAngelis, D.L.; Waide, J.B.; Allen, T.F.H. 1986. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton, N.J; Princeton University Press.
- Openshaw, S. (1984) The Modifiable Areal Unit Problem IN Concepts and Techniques in Modern Geography Number 38.GeoBooks, Norwich.
- Oswald, E.T., et J.P. Senyk. 1977. Ecoregions of Yukon Territory. Publication no BC-X-164. Service canadien des forêts, Environnement Canada, Victoria, C.-B. 115 pp.
- Pardé M., (1933) : Fleuves et rivières. Ed. A. Colin. Paris. 241p.
- Paredes (F.), 1992. Typologie des aménagements de rivières dans le bassin de la Loire. *Travail de fin d'études ENTPE*.
- Padbury, G.A., et D.F. Acton. 1994. "Ecoregions of Saskatchewan". Carte au 1/2 000 000. Approvisionnement et Services Canada et Saskatchewan Property Management Corporation, Regina, Sask.
- Pédo-paysages du Canada. 1995b. Component file, version 2.0. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Direction de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ont. 17 pp.
- Pédo-paysages du Canada. 1995a. Polygon attribute table, version 2.0. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Direction de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ont. 4 pp.
- Petit, F., Pauquet, A., Mabile, G., Franchmont, C. (1994). "Variations de la récurrence du débit à pleins bords des rivières en relation avec la lithologie de leur bassin versant et les caractéristiques de leur lit." Dossier de la revue de géographie alpine **12**: 157-161.
- Petit, F. and C. Daxhelet (1989). "Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique." Bulletin de la Société Géographique de Liège(25): 69-84.
- Petts, G. (1993). Hydrology, geomorphology and ecology : perspectives for river rehabilitation. Effects of physical modifications of the aquatic habitat on fish populations, Lyon, FAO EIFAC.
- Petts, G. E. and J. P. Bravard (1993). Le réseau hydrographique dans le bassin-versant. Hydrosystèmes fluviaux. Amoros C. and Petts G.E. Paris, Masson: 21-41.
- Petts, G. E. and I. Foster (1985). Rivers and landscape, Edward Arnold.
- Phillips, D. 1990. Les climats du Canada. Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnement et Services Canada, Ottawa, Ont. 176 pp.
- Pielou, E. C. 1977. Mathematical ecology. John Wiley & Sons, New York.
- Platts, W.S. 1980. A plea for fishery habitat classification. Fisheries 5(1):2-6.
- Platts, W.S. 1979. Including the fishery system in land planning. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-60. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 37 p.
- Poff N.L., Ward J.V., (1989) : Implication of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure : A Regional Analysis of Streamflow Patterns. Canadian Journal Fisheries Aquatic Science, 46, 1805-1818.
- Poff, N. L. (1992). Regional hydrologic response to climate change: an ecological perspective. Global climate change and freshwater ecosystems. P. Firth and S. G. Fischer, Springer Verlag: 88-115.
- Poff, N. L. (1992). "Why disturbances can be predictable : a perspective on the definition of disturbance in streams." Journal of North American Benthological Society **11**: 86-92.
- Poff N.L., Allan D., (1995) : Fonctionnal organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. Ecology, 76(2), 606-627.
- Poff, N. L., J. D. Allan, et al. (1997). "The Natural Flow Regime." Bio Science **47 (11)**: 769-784.
- Poiani, K. A., B. L. Bedford, et al. (1996). "A GIS-based index for relating landscape characteristics to potential nitrogen leaching to wetlands." Landscape Ecology **11(4)**: 237-255.
- Pojar, J., K. Klinka et D.V. Meidinger. 1987. Biogeoclimatic ecosystem classification in British Columbia. Forest Ecology Management. 22:119-154.

- Pouilly, M. (1994). Relations entre l'habitat physique et les poissons des zones à Cyprinidés rhéophiles dans trois cours d'eau du Bassin Rhodanien : vers une simulation de la capacité d'accueil pour les peuplements. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, CEMAGREF Lyon BEA/LHQ.
- Pregitzer, K.S.; Barnes, B.V. 1984. Classification and comparison of upland hardwood and conifer ecosystems of the Cyrus H. McCormick Experimental Forest, upper Michigan. *Canadian Journal of Forest Research*. 14:362-375.
- Probst, J.R.; Crow, T.R. 1991. Integrating biological diversity and resource management. *Journal of Forestry*. 89:12-17.
- Protection de l'environnement Alberta 1994. Natural regions and subregions of Alberta. Division des services d'information, Publication, no I/531. Edmonton, Alb.
- Protection de l'environnement Alberta. 1994. Natural regions and subregions of Alberta. Division des services d'information, Carte au 1/1 000 000, Edmonton, Alb.
- Pols et Verne, 1987. L'entretien des cours d'eau en Rhône-Alpes; Bilan, diagnostic et pistes de travail. *Mémoire de fin d'études ISARA*.
- Quigley, T. M., R. W. Haynes, et al. (1998). "Using and ecoregion assessment for integrated policy analysis." *Journal of Forestry*: 33-38.
- Ravichandran, S., R. Ramanibai, et al. (1996). "Ecoregions for describing water quality patterns in Tamiraparani basin, South India." *Journal of Hydrology* **178**: 257-276.
- Resh V.H., Brown A.V., Covich A.P., Gurtz M.E., Li H.W., Minshall G.W., Reice S.R., Sheldon A.L., Wallace J.B., Wissmar R.C., (1988) : The role of disturbance in stream ecology. *Journal of North American Benthological Society*, 7, 433-455.
- Rhin-Meuse, A. d. I. E. (1995). Mise au point d'un indice d'évaluation de la qualité de l'habitat des cours d'eau, Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- Richards, C. (1997). "Landscape properties and species traits." *Freshwater Biology* **37**: 219-230.
- Richards, C., R. J. Haro, et al. (1997). "Catchment and reach-scale properties as indicators of macroinvertebrate species traits." *Freshwater Biology* **37**: 219-230.
- Richards, C., L. B. Johnson, et al. (1996). "Landscape-scale influences on stream habitats and biota." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**(Suppl. 1): 295-311.
- Richards, K. (1982). *Rivers. Form and process in alluvial channels*. New York, Methuen.
- Richards, R. P. (1990). "Measures of flow variability and a new flow-based classification of Great Lakes tributaries." *Journal of Great Lakes Research* **16**: 53-70.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J., Braun P.D., . (1996) : A method for assessing Hydrologic Alteration Within Ecosystems. *Regulated Rivers : Ressources Management*. 14 : 329-430.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Wingington R., Braun P.D., . (1997) : How Much Water Does a River Need ? *Freshwater Biology*, 37, 231-249.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Braun P.D., Powell J., (1998) : A Spatial Assessment of Hydrologic Alteration within a River Network. *Conservation Biology*, Vol.10, No.4, 1163-1174.
- Ripley, B. D. 1981. *Spatial statistics*. John Wiley & Sons, New York.
- Rohm, C., J. W. Giese, et al. (1987). "Evaluation of an aquatic ecoregion classification of streams in Arkansas." *Journal of Freshwater Ecology* **4**(1): 127-140.
- Rohm, C. M., J. M. Omernik, et al. (1995). "Regional patterns of total phosphorus in lakes of the Northeastern United States." *Lake and reservoir management* **11**(1): 1-14.
- Rosgen, D. (1996). *Applied river morphology*. Colorado, Wildland Hydrology.

- Rosgen, D. and B. L. Fittante (1988). "Fish habitat structures - a selection guide using stream classification." : 163-179.
- Roth, G., P. La Barbera, et al. (1996). "On the description of the basin effective drainage structure." *Journal of Hydrology* **187**: 119-135.
- Roper, B. B., & Scarnecchia, D. L. (1995). Observer variability in classifying habitat types in stream surveys. *North American Journal of Fisheries Management*, 15, 49-53.
- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. Ministère de l'Environnement, Service canadien des forêts. Publication no 1300, Ottawa, Ont.
- Rowe, J.S. 1980. The common denominator in land classification in Canada: an ecological approach to mapping. *Forest Chronicle* 56:19-20.
- Rowe, J.S., et J.S. Sheard. 1981. Ecological Land Classification: A survey approach. *Environmental Management*. 5(5): 451-464.
- Rowe, J.S. 1984. Forest Land Classification: limitations of the use of vegetation. Proceedings of the symposium on forest land classification. 1984 March 18-20; Madison, WI: 132-147.
- Rowe, J.S. 1992. Site classification: Prologue. *The Forestry Chronicle* 68:(1): 22-24.
- Rowe, J.S. 1992. The ecosystem approach to forest management. *Forest Chronicle* 68: 222-224.
- Rubec, C.D.A., E.B. Wiken, J. Thoe et G.R. Ironside. 1988. Ecological land classification and landscape ecology in Canada: the role of the C.C.E.L.C. and the formation of the C.S.E.L.M. Dans M.R. Ross (sous la direction de) Landscape ecology and management. Proceedings of the first symposium of the Canadian society for landscape ecology and management. University of Guelph. May 1987. Polyscience Publications Inc., Montréal, Qc.
- Russell, W.E.; Jordan, J.K. 1991. Ecological classification system for classifying land capability in midwestern and northeastern U.S. national forests. In: Proceedings of the symposium, Ecological Land Classification: applications to identify the productive potential of southern forests. Charlotte, NC, January 7-9. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Gen. Tech. Report SE-68.
- SAS Institute. 1988. SAS Users Guide : Statistics, Version 5 edition SAS Institute, Cary, North Carolina.
- Sauer, C. O. 1925. The morphology of landscape. *University of California Publications in Geography* 2:19-35.
- Schaefer, E K. 1953. Exceptionalism in geography: A methodological examination. *Annals of the Association of American Geographers* 43(2): 226-249.
- Schéma, départemental, et al. (1984). Guide méthodologique, Ministère de l'environnement, Dir. Protection de la Nature.
- Schéma, départemental, et al. (1984). Notice cartographique, Ministère de l'environnement, Dir. Protection de la Nature.
- Schindler, D. W. (1987). "Detecting ecosystem responses to anthropogenic stress." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **44**((suppl. 1)): 6-25.
- Schlagel, J. D., and C. M. Newton. 1996. A GIS-based statistical method to analyze spatial change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62 (7): 839-844.
- Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. New-York, Water Resources Publications.
- Schumm, S. A., D. M. Harvey, et al. (1984). *Incised channels : Morphology, dynamics and control*. Littleton, Colorado, Water Resources Publications.
- Schumm, S. A. and R. W. Lichty (1965). "Time, space and causality in geomorphology." *American journal of science* **263**: 110-119.
- Sedell, J. R., Richey J.E., et al. (1989). "The river continuum concept : a basis for the expected ecosystem behavior of very large rivers?" *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **106**: 49-55.
- Sheng, T. C., R. E. Barrett, et al. (1997). "Using geographic information systems for watershed classification and rating in developing countries." *Journal of Soil and Water Conservation* **299**: 84-89.

- Simonson, T. D. (1993). "Correspondence and relative precision of stream habitat features estimated at two spatial scales." *Journal of Freshwater Ecology* **8**(4): 363-372.
- Smart, M. M., T. W. Barney, et al. (1981). "Watershed impact on stream water quality: a technique for regional assessment." *Journal of soil and water conservation* **35**: 297-300.
- Souchon, Y. (1996). *Artificialisation de l'hydrologie et fonctionnement écologique. Les entretiens sur l'eau. 2ème édition. Qualité des hydrosystèmes continentaux*, Grenoble, 29 et 30 mars 1995, EDF.
- Souchon, Y., F. Trocherie, et al. (1985). *Schéma de vocation piscicole : un outil cartographique adapté à la gestion des cours d'eau. Colloque franco-québécois sur la restauration des rivières à saumon*, Bergerac.
- Souchon, Y., F. Trocherie, et al. (1985). *Schéma départemental de vocation piscicole. Notice cartographique. Bulletin de liaison n°1.*, Ministère de l'environnement, Dir. Protection de la Nature, Serv. Pêche et hydrobiologie, CEMAGREF Div. QEPP Lyon, CNRS, Laboratoire de Géographie rhodanienne.
- Souchon, Y., F. Trocherie, et al. (1985). *Schéma départemental de vocation piscicole*, Ministère de l'environnement, Dir. Protection de la Nature, Serv. Pêche et hydrobiologie, Cemagref Div. QEPP Lyon.
- Souchon, Y., F. Trocherie, et al. (1985). *Schéma départemental de vocation piscicole. Guide technique et méthodologique.*, Ministère de l'environnement, Dir. Protection de la Nature, Serv. Pêche et hydrobiologie, CEMAGREF Div. QEPP Lyon.
- Southwood T.R.E., (1977) : *Habitat, the template for ecological strategies ?* *J. Anim. Ecol.*, **46**, 337-365.
- Stanford, J. A. (1996). *Landscapes and catchment basins. Methods in Stream Ecology. Chapitre 1*: 3-21.
- Statistical Sciences. 1991. *S-Plus reference manual, Vols. 1 and 2, Version 3.0.* Statistical Sciences, Inc., Seattle, Washington.
- Stearns S.C., (1981) : *On measuring fluctuating environments : Predictability, constancy, and contingency.* *Ecology*, **62**, 185-199.
- Strahler, A. N. (1957). "Quantitative analysis of watershed geomorphology." *Transactions of the American Geophysical Union* **38**: 913-920.
- Thorpe, J. 1992. *Ecological regions of Saskatchewan. Dans Saskatchewan's endangered spaces: An introduction.* P. Johker (sous la direction de) Extension Division, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, Sask.
- Sciences humaines*, 8, 1995. *Régions et mondialisation (numéro spécial).*
- Smalley, G.W. 1986. *Site classification and evaluation for the Interior Uplands.* Atlanta, GA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Tech. Pub. R8-TP9. Southern Region.
- Spies, T.A.; Barnes, B.V. 1985. *A multifactor ecological classification of the northern hardwood and conifer ecosystems of Sylvania Recreation Area, Upper Peninsula, Michigan.* *Canadian Journal of Forest Research* **15**:949-960.
- Statistique Canada. 1994. *Annuaire du Canada 1994. Industrie, Sciences et Technologie*, Ottawa/Hull. pp. 747.
- Strahler, A. N. (1954). *Quantitative analysis of watershed geomorphology.* *Amer. Geophys. Union Trans.*, **36**(6), 913-20.
- Strong, W.L. 1992. *Ecoregions and ecodistricts of Alberta. Vol. 1.* Ministère des Forêts, des Parcs et de la Faune de l'Alberta, Edmonton. 75 pp. et carte au 1/1 000 000.
- Swanson, F.J.; Kratz, T.K.; Caine, N.; Woodmansee, R.G. 1988. *Landform effects on ecosystem patterns and processes.* *BioScience* **38**:92-98.
- Tabacchi, E. (1995). *Identification des écorégions hydrologiquement homogènes du territoire national.* Toulouse, Agence de l'Eau Rhin-Meuse/CNRS.
- Tabacchi, E. (1996). *Identification des écorégions hydrologiquement homogènes du territoire national.* Toulouse, Agence de l'Eau Rhin-Meuse /CNRS.

- Takahashi, G. (1994). Basis for classification of riffle-pool components and its application. 1st Symposium on Habitat Hydraulics, Trondheim, Norway, The Norwegian Institute of Technology.
- Tonn, W. M., J. J. Magnuson, et al. (1990). "Intercontinental comparison of small-lake fish assemblage: the balance between local and regional processes." *The American Naturalist* **136**: 345-375.
- Townsend, C. R. (1989). "The patch dynamics concept of stream community ecology." *Journal of North American Benthological Society* **8**(1): 36-50.
- Urban, D.L.; O'Neil, D.; Shugart, H.H. 1987. Landscape ecology. *BioScience* 37:119-127.
- Udvardy, M.D.F. 1975. A classification of the biogeographical provinces of the world. Occasional Paper 18. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Morges, Switzerland. 48 p.
- U.S. Department of Agriculture. 1981. Land resource regions and major land resource areas of the United States. Washington, DC: Agricultural Handbook 296. U.S. Government Printing Office. 156 p.
- Vandermeer, J. 1981. Elementary mathematical ecology. John Wiley & Sons, New York.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **37**, 130-137.
- Verneaux, J. (1976). "Biotypologie de l'écosystème "eaux courante". La structure biotypologique." *C.R. Acad. Sci. Paris* **228**(D): 1663-1666.
- Vidal de la Blache, R 1926. Principles of human geography. Constable Press, London
- Vigier, P. (1986). Une histoire de la Loire. Paris.
- Walter, H.; Box, E. 1976. Global classification of natural terrestrial ecosystems. *Vegetatio* 32:75-81.
- Ward J.V., Stanford J.A., (1983) : The intermediate-disturbance hypothesis : an explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems. In fontaine T.D. Bartell S.M. (Eds.), Dynamics of lotic ecosystems. Ann Arbor, Michigan : Ann Arbor Science. 347-356.
- Ward, J. V. and J. A. Stanford (1987). The ecology of regulated streams : past accomplishments and directions for future research. *Regulated streams : advances in ecology*. K. J. B. Craig J.F. New York, Plenum Press: 391-409.
- Ward, J. V. (1989). "The four-dimensional nature of lotic ecosystems." *Journal of North American Benthological Society* **8**(1): 2-8.
- Warry, N. D. and Hanau M. (1993). "The use of terrestrial ecoregions as a regional-scale screen for selecting representative reference sites for water quality monitoring." *Environmental Management* **17**(2): 267-276.
- Wasson, J. G. (1989). Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes : 1. Revue critique de quelques approches existantes. *Bulletin d'Ecologie*, 20(2), 109-127.
- Wasson (J.G.) et al., 1990. Typologie et modélisation des écosystèmes d'eau courante. Programme de recherche triennal 1990-1992. *Rapport interne CEMAGREF*.
- Wasson (J.G.), 1992. Les orientations fondamentales par bassin, propositions pour une gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante. *Doc CEMAGREF*.
- Wasson, J. G. (1992). La rivière et l'homme : vers une gestion par bassin intégrant la dimension écologique. *Revue de Géographie de Lyon*, 67(4), 333-343.
- Wasson, J. G., Bethemont, J., Degorce, J. N., Dupuis, B., & Joliveau, T. (1993). Approche Ecosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase I : Etat initial - Problématique. (Rapport d'étape CEMAGREF Lyon BEA/LHQ et Univ. St Etienne CRENAM). 150p. + annexes.
- Wasson, J. G., Malavoi, J. R., Souchon Y., (1993). Approche typologique de l'impact des aménagements de rivière sur les habitats et les peuplements piscicoles : aide à l'application de l'article L232-3 du Code Rural. (Rapport final CEMAGREF Lyon BEA/LHQ).
- Wasson, J. G. (1996). "Les SDAGE : une approche écosystémique." *La Houille Blanche* **335**(3): 23-26.

- Wasson, J. G. (1996). "Structures régionales du bassin de la Loire." *La Houille Blanche* **6**: 25-31.
- Weatherall, W. (compilateur). 1985. Ecoregions of the District of Franklin, N.W.T. Rapport interne inédit. Direction générale des terres, Environnement Canada, Hull, Qc.
- Whittaker, J. G. and M. N. R. Jaeggi (1982). "Origin of step-pool systems in mountain stream." *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers* **108**(HY6): 758-773.
- Whittier, T. R., R. M. Hughes, et al. (1988). "Correspondance between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**: 1264-1278.
- Williams, G. P. (1978). "Bankfull discharge of rivers." *Water Resources Research* **14**(6): 1141-1154.
- Winterbourn, M. J., J. S. Rounick, et al. (1981). "Are New Zealand stream ecosystems really different?" *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **15**: 321-328.
- Wertz, W.A.; Arnold, J.A. 1972. Land Systems Inventory. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Region. 12 p.
- Wickware, G.M., et C.D.A. Rubec. 1989. Écorégions de l'Ontario. Série de la classification écologique du territoire, no 26. Environnement Canada, Hull, Qc. Rapport et carte.
- Wiken, E.B. 1979. Raison d'être et méthodes des relevés écologiques des terres : une vue d'ensemble des méthodes canadiennes. Dans D.G. Taylor (sous la direction de) *Intégration terre/faune : compte rendu d'un atelier technique sur l'introduction de l'information sur la faune dans les relevés écologiques du territoire*, 1 et 2 mai, 1979, Saskatoon, Sask. Série de la classification écologique du territoire, No 11. Direction générale des terres, Environnement Canada Ottawa, Ont. 160 pp.
- Wiken, E.B. (compilateur). 1986. Écozones terrestres du Canada. Série de la classification écologique du territoire, No 19. Environment Canada, Hull, Qc. 27 pp. + carte.
- Wiken, E.B., et K. Lawton. 1995. North American protected areas: An ecological approach to reporting and analysis. *The George Wright Forum* **12**:(1): 25-33. Hancock, Mich.
- Wiken, E.B., C.D.A. Rubec et G. Ironside. 1993. Canada — Écorégions terrestres. Atlas national du Canada. 5e édition. (MCR 4164). Centre canadien de cartographie, Énergie, Mines et Ressources Canada, et Rapport sur l'état de l'environnement. Environnement Canada, Ottawa, Ont. Carte au 1/7 500 000.
- Wiken, E.B., C.D.A. Rubec, G. Ironside, T.W. Pierce et R. Decker. 1985. Ecological land survey of the District of Keewatin, N.W.T. Open file report. Environnement Canada, Hull, Qc.
- Wiken, E.B., D.M. Welch, G.R. Ironside et D.G. Taylor. 1981. The Northern Yukon: An ecological land survey. Série de la classification écologique du territoire, No 6. Environnement Canada, Vancouver, C.-B. 197 pp. Carte au 1/1 000 000.
- Zonneveld, I.S. 197a Landscape Science and Landscape Evaluation. ITC-Textbook VII-4, 2nd Edition, 134 p.