

De l'hydro-écorégion au tronçon fluvial : recherche méthodologique. Le cas du bassin versant de l'Ivaí, État du Paraná, Brésil.

Par Maurício MEURER

Thèse de doctorat de Géographie, Aménagement et Urbanisme
sous la direction de Jean-Paul BRAVARD
présentée et soutenue publiquement le 21 novembre 2008

Devant un jury composé de : Jean-Paul BRAVARD, Professeur des universités, Université Lyon 2
José Cândido STEVAUX, Professeur d'université, Univ. Estadual de Maringa Brésil François PETIT,
Professeur d'université, Université de Liège Roberto VERDUM, Professeur d'université, Université de
Porto Alegre Brésil Laurent SCHMITT, Maître de Conférences, Université Lyon 2

Table des matières

Remerciements . . .	6
Résumé . . .	8
Abstract . . .	9
Resumo . . .	10
Sigles et Abréviations . . .	11
Introduction . . .	13
Première partie - L'aménagement des ressources en eau et la classification des systèmes fluviaux : présentation de la problématique de recherche . . .	15
1.1. L'Homme et les systèmes fluviaux . . .	15
1.2. Le besoin de classification . . .	16
1.3. Approche méthodologique des classifications . . .	17
1.3.1. Précisions terminologiques . . .	19
1.4. Les classifications appliquées aux milieux fluviaux . . .	22
1.4.1. La classification des cours d'eau dans la théorie du cycle d'érosion . . .	22
1.4.2. La hiérarchisation du réseau hydrographique . . .	23
1.4.3. Les recherches morphologiques et processuelles . . .	24
1.4.4. La connaissance de la diversité des systèmes fluviaux . . .	29
1.4.5. La classification au service de la récupération d'habitats . . .	30
1.4.6. Classifications pour prévoir le comportement des cours d'eau . . .	32
1.4.7. Les écorégions . . .	38
1.5. Les enjeux de la gestion des eaux au Brésil . . .	43
1.5.1. La mise en œuvre des bases légales et institutionnelles . . .	43
1.5.2. Le Plan National de Ressources en Eau . . .	45
1.6. La recherche d'une méthode de découpage applicable aux bassins versants du Brésil . . .	46
1.6.1. La problématique de recherche . . .	46
1.6.2. Proposition méthodologique appliquée au cas du bassin versant de l'Ivaí . . .	47
1.7. Conclusions de la Première Partie . . .	51
Deuxième partie - L'hydrosystème Ivaí et ses facteurs de contrôle . . .	53
2.1. Le bassin versant de l'Ivaí . . .	53
2.2. Histoire géologique du bassin versant de l'Ivaí . . .	59
2.2.1. Le socle et le bassin de subsidence . . .	60
2.2.2. Le Groupe Paraná . . .	60
2.2.3. Le Groupe Itararé . . .	61
2.2.4. Le Groupe Guatá . . .	62
2.2.5. Le Groupe Passa Dois . . .	62
2.2.6. Le Groupe São Bento . . .	63
2.2.7. Le Groupe Bauru . . .	65
2.3. La Distribution des climats dans le bassin versant . . .	68
2.4. La couverture pédologique . . .	78

2.4.1. Latosol vermillon dystrophique . . .	79
2.4.2. Nitosol « háplico » dystrophe . . .	79
2.4.3. Nitosol vermillon eutrophe . . .	79
2.4.4. Argisol vermillon-orange dystrophe . . .	80
2.4.5. Néosol lithique eutrophe . . .	80
2.4.6. Sol à Gley « háplico » dystrophe . . .	80
2.4.7. Cambisol humique dystrophe . . .	81
2.4.8. Néosols aréniques quartzeux . . .	81
2.5. La végétation originelle . . .	82
2.5.1. Forêt saisonnière semi-décidue . . .	83
2.5.2. Forêt ombrophile mixte ou Forêt d' <i>Araucárias</i> . . .	84
2.5.3. Steppe ou <i>campo</i> . . .	85
2.5.4. Savane ou <i>cerrado</i> . . .	86
2.6. Histoire de l'occupation et de l'usage du sol . . .	88
2.6.1. La période exploratoire . . .	88
2.6.2. La colonisation espagnole et les Réductions jésuites . . .	89
2.6.3. L'occupation portugaise, le cycle de l'or et le <i>tropeirismo</i> . . .	91
2.6.4. L'occupation du Paraná traditionnel et les cycles du bois e de l' <i>erva-mate</i> . . .	93
2.6.5. L'occupation du Nord et du Nord-Ouest du Paraná et le cycle du café . . .	97
2.6.6. Les problèmes d'érosion au nord-ouest du Paraná . . .	102
2.6.7. Les conséquences possibles des changements d'usage du sol sur la dynamique du réseau hydrographique . . .	108
2.7. Conclusions de la Deuxième Partie . . .	109
Troisième partie - Les flux dans le bassin versant . . .	113
3.1. Les Flux d'eau et le régime de débits de l'Ivaí . . .	113
3.1.1. Considérations sur les stations de mesure et les séries de données hydrologiques . . .	114
3.1.2. La distribution spatio-temporelle des débits moyens . . .	117
3.1.3. Les débits de crue . . .	130
3.1.4. Les débits de pleins bords . . .	141
3.1.5. Les débits d'étiage et le tarissement des nappes . . .	143
3.1.6. Les rapports entre le débit et la surface drainée . . .	148
3.2. Formes fluviales, flux de sédiments et processus géomorphologiques . . .	152
Conclusion . . .	169
3.3. Conclusion de la Troisième Partie . . .	172
Quatrième partie - Du bassin versant au tronçon : une nouvelle méthodologie . . .	174
4.1. La compartimentation du bassin versant de l'Ivaí . . .	174
4.1.1. La compartimentation en Ecorégions . . .	174
4.1.2. La compartimentation du profil en long . . .	182
4.1.3. La compartimentation en fonction de la dynamique hydro-sédimentaire . . .	188

4.1.4. La compartimentation en fonction de la puissance de l'écoulement dans le chenal . .	192
4.2 Sectorisation de synthèse des cours d'eau du bassin versant de l'Ivaí . .	199
4.3. La transférabilité de la méthode . .	221
Conclusion Générale . .	224
Références . .	226
Annexes . .	236
Annexe I - Les courbes de débits classés . .	236
Annexe II - Tableaux des valeurs de C et M des échantillons prélevés dans le bassin de l'Ivaí . .	241

Remerciements

Mes remerciements vont à toutes les institutions et personnes qui ont permis le développement de cette thèse :

Au GEMA/UEM – *Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente / Universidade Estadual de Maringá* (Groupe d'Études Multidisciplinaires de l'Environnement, Université de Maringá, Paraná, Brésil), pour le soutien qu'il a apporté à mes travaux sur le terrain et aux premiers travaux de laboratoire. Un remerciement spécial aux professeurs Edvard Elias de SOUZA FILHO, Nelson Vicente Lovato GASPARETTO, Edison FORTES et Manoel Luís dos SANTOS pour les données, les matériaux et l'infrastructure qu'ils ont mis à disposition.

A la SUDERHSA/PR – *Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental* (Superintendance de Développement des Ressources en Eaux et Assainissement Environnemental, Paraná, Brésil) et particulièrement à l'ingénieur Edson Sakae NAGASHIMA pour les données hydrométriques mises à disposition et pour les précisions techniques fournies.

Aux amis et collègues de l'Université de Maringá : à Jaime Sérgio Frajuca LOPES, à Eduardo de MORAIS, à José Antônio de ANDRADE et à sa famille. A Rafaela Harumi FUJITA et Vanessa Cristina dos SANTOS pour le téléchargement des images satellitales et pour l'envoi de plusieurs documents fondamentaux pour le développement de cette thèse. A Edilaine Valéria DESTEFANI pour son excellent travail sur le régime de l'Ivaí et pour la mise en disposition de toutes ces données ; à Elaine Aparecida MERENDA et à sa famille pour le soutien accordé avant notre venue en France et pendant la réalisation des travaux sur le terrain.

Aux collègues de l'Université Lumière Lyon 2 : à Alexandra FUSIER et à Erina SIROY pour ses patientes révisions du français ; à Stéphane GAILLOT pour son accueil et sa générosité ; à Vincent GAERTNER pour la compétence de son orientation dans les travaux de laboratoire.

A Estelle GRANET et à sa famille, Thomas OTT et Lydie BOSC pour l'accueil à l'arrivée en France. A Leonardo Lana de CARVALHO et Elayne de Moura BRAGA, pour l'amitié, le soutien et tous les bons moments partagés au long de ces trois années en France.

Aux amis : à Amélie CORDIER, à André FRANCO, à Fernanda COIRO et à sa famille, à Inès BROUARD et à sa famille, à Marius DULGHERU et Mioara CHIABURU (Gabi), à Pierric PERMEZEL, Priscila BATISTA, Rita MUNIZ, Renato PAES et Fernanda ROCHA, Roni BLUME et Suzimary SPECHT, Sérgio de MORAIS et Estelle DEMILLY, Volmério COELHO. Toute ma gratitude envers vous ; merci à tous pour votre amitié et pour les encouragements.

A tous mes ex-élèves de la Licence en Tourisme et Environnement de la FECILCAM – *Faculdade de Ciências e Letras de Campo Mourão* (Faculté de Sciences et Lettres de Campo Mourão) : merci pour toutes vos messages de soutien.

A mon épouse aimée Débora MARTINS : nous sommes seuls à connaître tous les obstacles affrontés pour arriver jusqu'à la fin de cette thèse. Merci d'être toujours à mes cotés, de partager cette expérience avec moi et d'avoir été là pour me soutenir aux moments où j'en avais besoin. Mon français est un peu limité et ne me permet pas de tout dire pour te remercier. A nos familles qui ont patiemment accepté la distance et la *saudade* * et qui nous ont soutenu jusqu'au bout pour que nous puissions atteindre nos objectifs.

Aux membres du jury, MM. François PETIT, Laurent SCHMITT et Roberto VERDUM pour avoir accepté de participer à cette soutenance. A mon co-directeur de la thèse, M. José STEVAUX pour le soutien qu'il a apporté à mes travaux sur le terrain.

A mon directeur de thèse, M. Jean-Paul BRAVARD, pour avoir accepté sans hésitation le défi de travailler au Brésil, pour son support très compétent, pour avoir partagé toute son expérience sur l'aménagement des systèmes fluviaux et pour sa gentillesse. A son épouse, Mme Geneviève BRAVARD, pour sa sympathie, sa gentillesse et pour les constants encouragements. Je vous remercie chaleureusement de tout mon cœur.

* *Saudade* est généralement considéré comme le mot portugais et galicien le plus difficile à traduire. (...) La *saudade* exprime un désir intense, pour quelque chose que l'on aime et que l'on a perdu, mais qui pourrait revenir dans un avenir incertain (...), de quelqu'un éloigné de son pays, et qui garde l'espoir d'un jour revenir (Source : Wikipédia).

Résumé

Le Brésil est un pays très vaste qui concentre sur son territoire une part importante de l'eau douce de la planète. Malgré cette relative abondance, dans les dernières décennies la dégradation des ressources en eau a fortement augmenté, principalement à cause de la croissance démographique et économique. Face à ce nouveau scénario, le pays fait des efforts pour assurer une meilleure gestion de ces ressources : récemment, le Brésil a élaboré la première version de son Plan National des Ressources en Eau dans lequel il explicite la nécessité de mieux connaître son territoire et ses systèmes fluviaux, de travailler ses plans de gestion à des échelles emboîtées et de planifier les futures politiques de protection et préservation des eaux. Ainsi, les méthodes de classification des cours d'eau et de délimitation de zones homogènes semblent-elles représenter un bon point de départ pour répondre aux besoins de la gestion des eaux au Brésil. La présente thèse a pour but la construction et l'application d'une approche méthodologique de délimitation de zones homogènes et de sectorisation longitudinale de cours d'eau, qui englobe à la fois l'hydro-écorégion et le tronçon fluvial et qui respecte les spécificités des bassins versants brésiliens. La méthode construite commence par l'inventaire des facteurs de contrôle du bassin versant, pour ensuite les superposer et délimiter les écorégions. Ensuite, une étude du fonctionnement hydro-sédimentaire présente le régime des débits et les caractéristiques du transport sédimentaire analysées à partir des dépôts des berges, en utilisant la méthode de l'image CM. La morphométrie du profil en long est aussi étudiée de façon à identifier les changements de pente. Ensuite, le calcul de la puissance de chenal permet de mettre en évidence les variations amont-aval de l'énergie du chenal. La synthèse des écorégions, de l'étude du fonctionnement hydro-sédimentaire, de l'étude du profil en long et de la distribution des puissances donne la sectorisation finale. Cette sectorisation est faite de façon hiérarchisée, afin de pouvoir transposer les types identifiés à autres bassins versants brésiliens. La méthode proposée a été construite et appliquée dans le bassin versant de l'Ivaí, un important bassin versant de l'Etat du Paraná, au Brésil. Cette application de la méthode élaborée a permis d'identifier 17 types de tronçons dans le réseau hydrographique du bassin de l'Ivaí. Cette sectorisation peut être un important outil pour l'aménagement futur du bassin versant de l'Ivaí, et la méthode peut être un outil très valable pour répondre aux besoins de gestion des cours d'eau au Brésil.

Mots-clé : Brésil, Paraná, Ivaí, sectorisation fluviale, écorégion

Abstract

Brazil is a very large country which concentrates a significant part of the world's fresh water in its territory. Despite this abundance, the degradation of the water resources has strongly increased in the last decades, mainly because of demographic and economic growth. Facing this new scenario, the country is making an effort to ensure a better management of resources. Recently, Brazil published the first version of its Water Resources National Plan which presents the necessities of a better knowledge of its territory and fluvial systems, the work on its management plans in a multiple level scale and the plan for future water protection and preservation policies. Thus, the methods of stream classifications and homogeneous delimitation zones seem to be a good starting point to answer the necessities of water management in Brazil. This thesis aims to construct and to apply a methodological approach to homogeneous delimitation zones and longitudinal sectorisation of streams, in order to include the hydro-ecoregion and the stream reach and in order to respect the specificities of the Brazilian watersheds. The elaborated method begins with an inventory of the control factors of the watershed, to then be able to superpose and delimit the ecoregions. Then, a study of the hydro-sedimentary dynamics presents the rates of flow and the characteristics of the sedimentary transport which are analysed through the deposits on the watershed, using the CM image method. The morphometric characteristics of the longitudinal profile are also studied to identify the changes in the slope. Moreover, the calculation of the stream power enables to underline the upstream-downstream variations of the channel's energy. The synthesis of the ecoregion, the hydro-sedimentary study, the longitudinal profile study and the stream power distribution result in the Final Sectorisation. This sectorisation is treated on a hierarchical basis, in order to transpose the identified types to other Brazilian watersheds. The proposed method was built and applied in the Ivaí basin, a large watershed in the Paraná State in Brazil. Applying the elaborated method, enabled to identify 17 types of stream reaches in the drainage system of the Ivaí basin. This sectorisation could be a very important tool for the future work on the Ivaí basin, and the method could be a very useful tool to meet the needs in water resources management in Brazil.

Key-words: Brazil, Parana, Ivaí, fluvial reach classification, ecoregion

Resumo

O Brasil é um país muito grande e que concentra no seu território uma parte importante de toda a água doce do planeta. Apesar desta relativa abundância, nas últimas décadas a degradação dos recursos hídricos aumentou consideravelmente, principalmente em função do crescimento demográfico e econômico. Face a este novo cenário, o país tem se esforçado para garantir uma melhor gestão dos seus recursos: recentemente, o Brasil elaborou a primeira versão do seu Plano Nacional de Recursos Hídricos no qual explicita a sua necessidade de melhor conhecer o seu território e os seus sistemas fluviais, de trabalhar os seus planos de gestão em escalas hierarquizadas e de planejar as futuras políticas de proteção e de preservação das águas. Assim sendo, os métodos de classificação de cursos d'água e de delimitação de zona homogêneas parecem representar um bom ponto de partida para responder às necessidades da gestão das águas no Brasil. A presente tese tem por objetivo a construção e a aplicação de uma metodologia de delimitação de zonas homogêneas e de setorização longitudinal de cursos d'água que englobe ao mesmo tempo a hidroecorreção e o segmento de canal, e que respeite as especificidades das bacias hidrográficas brasileiras. O método elaborado começa pelo inventário dos fatores de controle da bacia hidrográfica, para em seguida superpô-los a fim de delimitar as ecorregiões. Em seguida, um estudo do funcionamento hidro-sedimentológico apresenta o regime de vazões e as características do transporte sedimentar analisadas a partir dos depósitos das margens, utilizando para tanto o método da imagem CM. A morfometria do perfil longitudinal também é estudada de forma a identificar as variações de declividade. Posteriormente, o cálculo do *stream power* permite observar a variação da energia do canal de montante para a jusante. A síntese das ecorregiões, do estudo do funcionamento hidro-sedimentológico, do estudo do perfil longitudinal e da distribuição do *stream power* resulta na setorização final. Esta setorização é realizada de forma hierarquizada, a fim de poder fazer a transposição dos tipos identificados para outros cursos d'água de outras bacias hidrográficas brasileiras. O método proposto foi construído e aplicado sobre a bacia do rio Ivaí, uma importante bacia hidrográfica do Estado do Paraná, no Brasil. Esta aplicação do método elaborado permitiu a identificação de 17 tipos de segmentos de canal na rede hidrográfica da bacia do Ivaí. Esta setorização pode ser uma ferramenta muito útil para atender às necessidades da gestão dos recursos hídricos no Brasil.

Palavras-chave: Brasil, Paraná, Ivaí, setorização fluvial, ecorregião

Sigles et Abréviations

ANA – Agência Nacional de Águas (Agence National des Eaux)

BRAVIACO – Companhia Brasileira de Viação e Comércio (Compagnie Brésilienne de Transport et Commerce)

CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite (Satellite Sino-brésilien pour les Ressources Terrestres)

CIC – Centro de Inteligência do Café (Centre de Intelligence du Café)

COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica (Compagnie d’Energie Electrique de l’Etat du Paraná)

CMNP – Companhia Melhoramentos Norte do Paraná (Compagnie Améliorations Nord du Paraná)

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Compagnie de Recherche sur les Ressources Minéraux)

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral (Département National de Production Minéral)

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Entreprise Brésilienne de Recherche en Agriculture et Elevage)

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná (Institut Agronomique du Paraná)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Institut Brésilien de Géographie et Statistique)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (Institut National de Météorologie)

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (Institut pour le Développement Economique et Social du Paraná)

MMA – Ministério do Meio Ambiente (Ministère de l’Environnement)

MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. (Minéraux du Paraná Société Anonyme)

PARANARURAL – Programa de Desenvolvimento Rural do Paraná (Programme pour le Développement Rural du Paraná)

PMISA – Programa de Manejo Integrado do Solo e Água (Programme d’Aménagement Intégré du Sol et de l’Eau)

PROICS – Programa Integrado de Proteção dos Solos (Programme Intégré de Protection des Sols)

SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Secrétariat de l’Environnement et des Ressources en Eau de l’Etat du Paraná)

SETR – Secretaria de Estado dos Transportes (Secrétariat de Transports de l’Etat du Paraná)

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (Mission de Topographie avec Navette Spatiale et Radar)

SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Superintendance pour le Développement des Ressources en Eaux et Assainissement Environnemental)

Introduction

Le Brésil est le 5^{ème} plus grand pays du monde par son étendue. Avec un territoire de plus de 8,5 millions de km², pour l'essentiel (92 %) dans la zone tropicale, le pays est aussi important par ses ressources en eau. Selon les estimations, le Brésil concentre 13,7% de l'eau douce du globe (MMA, 2003). Cependant, depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, l'augmentation de la population, la concentration dans les centres urbains, la forte demande en eau des activités agricoles et industrielles ont beaucoup changé ce scénario. Pour cette raison, l'aménagement des ressources en eau est devenu un sujet très courant dans les discussions politiques sur l'environnement.

Selon Gordon *et al.* (2004), « La majeure partie des grands pays ont une ample variété d'écosystèmes aquatiques. Cette diversité crée des difficultés pour l'aménagement de ces écosystèmes à une échelle nationale ». C'est le cas du Brésil : en raison de l'extension de son territoire et de son important réseau hydrographique, le pays possède une grande variété d'écosystèmes aquatiques, mais la plupart sont encore peu ou mal connus. Afin de mieux connaître et mieux gérer les ressources disponibles, le pays a élaboré la première version de son Plan National de Ressources en Eau. Ce plan, initialement très ample et généraliste, doit être détaillé dans les prochaines années, de façon à donner aux responsables de la gestion de l'eau un document de base pour aider à la prise de décisions.

Le présent travail de recherche essaie d'apporter une contribution méthodologique au besoin qu'a le Brésil de mieux connaître son territoire et ses systèmes fluviaux. En utilisant le bassin versant de l'Ivaí comme aire d'étude, on a essayé de construire et d'appliquer une méthode de découpage du bassin versant et de sectorisation longitudinale des cours d'eau en fonction des caractéristiques naturelles. Le document qui est l'aboutissement de ce travail a été organisé de la façon suivante:

La première partie présente quelques réflexions sur l'aménagement des ressources en eau et le besoin de développement de méthodes de classification des cours d'eau. Le texte montre d'une façon relativement résumée comment le besoin de maîtrise des ressources en eau a conduit à essayer de classer et de comprendre le fonctionnement des systèmes de drainage. Une recension de travaux sur la classification et la sectorisation des cours d'eau montre les différents éclairages donnés à cette question dans les différents domaines du savoir au cours des dernières années. Ensuite, vient une présentation des enjeux de la gestion des ressources en eau au Brésil, ce qui nous emmènera à la problématique de la recherche : la construction d'une méthode de sectorisation longitudinale applicable à la réalité brésilienne.

La deuxième partie présente le bassin versant de l'Ivaí et ses facteurs de contrôle. Au long de toute cette partie, on présentera un inventaire des caractéristiques naturelles et d'occupation de cet important morceau du territoire du Paraná. Cet inventaire sera une importante source de données pour la construction d'une sectorisation longitudinale de l'hydrosystème Ivaí.

La troisième partie traite des flux dans le bassin versant. A partir du traitement et de l'interprétation des données issues des stations fluviométriques, on présentera une caractérisation du régime hydrologique de l'Ivaí, de façon à comprendre un peu mieux

le fonctionnement dynamique de ce hydrosystème. Le traitement des échantillons de sédiments collectés au long de l'axe principal de drainage donnera aussi une idée de la dynamique d'érosion et de transport au long de l'Ivaí.

La quatrième et dernière partie montre comment on passe du bassin versant au tronçon fluvial avec la mise au point et l'application d'une méthode de sectorisation. La reprise de toutes les variables rassemblées ou produites au cours du travail de recherche about à la carte de sectorisation finale. A la fin, une discussion sur la validité et sur la transférabilité de la méthode est présentée.

Le choix du bassin versant de l'Ivaí comme aire d'étude est motivée par plusieurs raisons. Ce bassin versant est un de plus importants bassins versants de l'Etat du Paraná ; il traverse trois régions géologiquement très différentes, il concentre en même temps une région agricole très moderne et très attachée au marché international, et une autre région d'agriculture très traditionnelle, qui cherche à trouver des alternatives pour ne pas disparaître. Malgré ces contrastes, l'hétérogénéité du bassin de l'Ivaí est encore inconnue, et on espère avec cette étude apporter quelques données qui puissent aider à mettre en évidence les différentes régions qui ensemble forment la mosaïque de paysages de ce bassin versant.

Première partie - L'aménagement des ressources en eau et la classification des systèmes fluviaux : présentation de la problématique de recherche

1.1. L'Homme et les systèmes fluviaux

L'être humain, depuis son apparition à la surface de la Terre, a développé une étroite relation avec les systèmes fluviaux. Au long de la Préhistoire, l'homme utilisait déjà les cours d'eau pour s'approvisionner en eau, pour la pêche et pour la navigation. La disponibilité de l'eau sur la surface de la planète déterminait les zones propres à l'occupation, et parfois des déplacements de population étaient opérés en raison du régime des pluies.

Pendant l'Antiquité, d'importantes civilisations se sont développées en suivant les grands fleuves et rivières, tel les Egyptiens, des peuples de la Mésopotamie, des peuples de l'Indus et de la Chine. Les cours d'eau étaient utilisés pour l'approvisionnement des villes en eau, pour le transport de personnes et marchandises, pour l'évacuation des déchets et des eaux usées et pour l'irrigation des zones agricoles. La maîtrise de certaines techniques permettait aussi la construction de barrages pour le contrôle du régime hydrologique et la construction de canaux de dérivation pour la navigation. Un des exemples les plus nets de la maîtrise de l'eau par les peuples de l'Antiquité étaient les jardins suspendus de Babylone, une des sept merveilles du monde.

Autour du X^e siècle, au Moyen Âge européen, l'usage des roues à aubes s'est répandu dans l'Occident, et l'énergie des cours d'eau a été mobilisée pour des activités commerciales, comme les moulins à céréales, les forges et les scieries. Par contre, les ouvrages destinés à l'approvisionnement en eau coûtaient très cher, ce qui faisait que seules les villes les plus riches avaient accès à ce genre d'infrastructure. Les problèmes liés à la pollution des puits et la dégradation des cours d'eau réduisaient les ressources disponibles, de sorte que l'exploration des fontaines et des sources était devenu un enjeu très lucratif. Les questions de propriété et du droit d'accès à l'eau potable avaient parfois pour résultat de violents conflits.

Pendant la Renaissance, Leonardo Da Vinci a écrit quelques notes dans son journal sur l'eau, les rivières, l'origine de la charge transportée par les cours d'eau, les canaux et l'aménagement des systèmes fluviaux, basées principalement sur les observations faites sur l'Arno, à Florence. Du point de vue scientifique, les notes de Da Vinci ne sont pas totalement correctes, ce qui est acceptable en raison des limites imposées par les connaissances de l'époque. Néanmoins, Leonardo Da Vinci a fait un pas considérable en direction de la compréhension des systèmes fluviaux. Les recherches de Da Vinci et celles faites par le français Bernard Palissy ont été à l'origine des études systématiques en hydrologie.

A la fin du XVIII^e siècle, la pression sur les ressources en eau augmentait de plus en plus. L'accroissement de la population urbaine et le développement de l'agriculture à grande échelle demandaient beaucoup d'eau, tandis que la pollution se révélait être un grave problème pour l'utilisation des ressources existantes. Les problèmes de santé publique, ainsi que la mauvaise qualité des eaux préoccupaient la population des grands centres urbains. Ainsi, à partir du milieu du XIX^e siècle, des projets d'assainissement des grandes villes de l'Europe ont été réalisés.

Le XIX^e siècle a été marqué aussi par la Révolution Industrielle, quand le développement technologique et la modernisation des procès productifs ont permis l'essor des industries dans les grandes villes européennes. La création des machines à vapeur et l'industrialisation de l'Europe ont transformé l'eau en outil de travail (HAGHE, 1998). Ainsi, les cours d'eau ont-ils acquis une importance économique et stratégique.

Dans ce contexte, les sciences liées aux systèmes fluviaux essayent de former un noyau de connaissances fondamentales, qui permettent aux responsables de l'aménagement du territoire de rechercher des solutions aux problèmes qui touchaient la population, principalement celle des zones urbaines. C'est à partir de ce moment que des sciences comme l'hydraulique, l'hydrologie et la géomorphologie fluviale ont acquis leur statut.

Au XX^e siècle, l'augmentation de la population, la densification des villes, l'expansion de l'agriculture et l'exploitation des ressources en eau se sont accrues. Malgré le progrès scientifique et technologique, qui a nettement amélioré les conditions de vie et d'aménagement des ressources naturelles, les problèmes de qualité et distribution des eaux ont traversé le siècle, et ils sont aujourd'hui encore présents dans tous les continents, surtout dans les régions les plus pauvres.

Au présent, les discussions se concentrent surtout sur la gestion des ressources en eau. Les organismes de gestion, les responsables de l'approvisionnement public et les usagers concentrent leurs efforts afin de maintenir la qualité et la disponibilité de l'eau pour l'avenir. Pour cette raison, le besoin d'études de diagnostic et de classification des cours d'eau a pris une grande importance.

1.2. Le besoin de classification

« Classer, au sens strict, veut dire ordonner et organiser des objets en groupes ou ensembles basés sur leurs similarités et rapports » (PLATTS, 1980). Le procès d'élaboration de classifications a été très utilisé dans les sciences, surtout dans les premières étapes de développement des connaissances (MOSLEY, 1987). Goodwin (1999) affirme que « l'évolution des connaissances démarre avec l'observation, et ensuite vient la classification. Après ces deux phases, on construit des lois empiriques et, à la fin, on arrive à une théorie ». Ainsi, la classification est-elle l'étape qui succède à l'observation. Le besoin de classer apparaît quand les résultats des observations deviennent trop complexes ou nombreux, mais aussi quand ces résultats présentent quelques similitudes entre eux, de façon à permettre des regroupements.

Regrouper plusieurs éléments en groupes homogènes est une façon de synthétiser, de simplifier et de « créer de l'ordre dans le chaos » (GOODWIN, 1999). Les classifications sont donc présentes dans toutes les branches de la science. Le tableau des éléments chimiques de Mendeleïev, la taxonomie des êtres vivants, la division des périodes historiques, les différents styles artistiques, les types de particules quantiques sont différents exemples de classification.

Depuis les premières études hydrologiques de Da Vinci et Palissy, au XVI^e siècle, les systèmes fluviaux ont été reconnus comme des systèmes très diversifiés et complexes. Avec le développement des études systématiques en hydraulique, hydrologie et géomorphologie au cours du XIX^e siècle, la diversité et la complexité des systèmes fluviaux sont devenues plus évidentes. A mesure que les études descriptives sur les cours d'eau se multipliaient, les chercheurs reconnaissaient l'existence de quelques caractéristiques récurrentes entre les différents systèmes étudiés, ce qui ouvrait la possibilité de les regrouper à partir de ces similarités. C'est le début des études de classification fluviale.

1.3. Approche méthodologique des classifications

Au fur et à mesure que la phase des premières observations avançait, l'évolution des connaissances sur les phénomènes naturels exigeait la mise en ordre des résultats d'une façon logique et susceptible de compréhension. Il existait donc un besoin de classification des résultats.

A l'époque moderne, la classification n'était pas encore sujet de discussion très répandu dans les sciences, de sorte qu'il n'existait pas de méthodes générale de classification bien définies, qui puissent inciter les chercheurs à mieux classer leurs résultats. Ainsi, la construction des méthodes de classification est-elle survenue en même temps que le besoin s'en faisait ressentir. Au fil des années, les discordances existant entre les techniques de classification employées par les chercheurs ont conduit à la discussion sur la construction des systèmes de classification.

Aujourd'hui, il n'existe pas encore une méthode bien définie pour la construction d'un système de classification, mais on reconnaît déjà l'existence de quelques recommandations que doivent être suivies (MOSLEY, 1987 ; GOODWIN, 1999), et on reconnaît aussi quelques points communs entre les nombreuses propositions existantes. La définition d'une méthode de classification dépend beaucoup des objectifs de la recherche, et en considérant ses objectifs, le chercheur doit choisir le type d'approche, la nature des variables, la méthode, la quantité des variables, les niveaux d'analyse et les échelles spatiales à utiliser (Figure 1).

Approche	Quantitative	Qualitative				
Nature des Variables	Abiotiques Basée sur les formes (Morphologique) Basée sur les procès (Processuelle) Basée sur les formes et les procès (Morpho-processuelle)	Biotiques				
Méthode	"Classical View"	"Probabilistic View"	"Exemplar View"			
Quantité de Variables	Critère unique		Critères multiples			
Niveaux	Niveau unique		Niveaux hiérarchisés			
Echelle Spatiale	Bassins	Chenaux	Segment du réseau	Tronçon	Seuils et moulles	Microhabitats

Figure 1. Les types de classification selon différents critères.
Sources : Mosley (1987), Naiman et. al., (1992), Goodwin (1999).

Les travaux de classification peuvent utiliser une approche plus **quantitative** ou une approche plus **qualitative**. L'approche quantitative permet une bonne délimitation des classes, permet la détermination de valeurs limites, de moyennes et de tendances (valeurs standard) ; elle permet enfin la comparaison des résultats entre différentes aires ou domaines. Quant à elle, l'approche qualitative minimise le besoin des connaissances mathématiques, permet l'utilisation de critères non quantifiables et, dans certains cas, représente d'une façon plus fiable la réalité. Le travail de Bothale et. al. (1998) est un exemple de l'utilisation d'une approche qui privilégie la quantification, tandis le travail sur la zonation des bassins versants présenté par Schumm (1977) est un exemple d'une approche qui privilégie l'utilisation de critères plus qualitatifs. Quelques travaux ont opté pour l'utilisation d'une approche combinant des données quantitatives et qualitatives ; c'est le cas de Leopold et Wolman (1957).

Les variables utilisées dans une classification peuvent être **abiotiques** ou **biotiques**. Une classification faite à partir de données abiotiques peut présenter une entrée qui privilégie les formes, c'est-à-dire une entrée morphologique ; elle peut se faire sous un angle qui privilégie les processus, soit une entrée processuelle ; ou peut enfin présenter un angle d'attaque qui combine les formes et les processus, soit une entrée morpho-processuelle. De toute façon, tous ces types de classification ne sont pas suffisants pour la compréhension de la dynamique des interactions entre les êtres vivants. Par contre, une classification faite à partir de données biotiques donne une bonne idée de la dynamique de l'habitat étudié, mais ne permet pas la compréhension des facteurs qui ont permis le développement des êtres vivants à tel ou tel endroit. Actuellement, on sait qu'il existe une étroite liaison entre la distribution des facteurs biotiques et celle des facteurs abiotiques. Pour cette raison, les travaux de classification plus récents essaient d'utiliser les deux types de variables pour la discrimination des classes.

Au long de l'histoire des sciences, trois méthodes de classification se sont développées : la **classical view**, la **probabilistic view** et la **exemplar view**, selon la

classification de Goodwin (1999). Dans la méthode classique, les termes de comparaison sont définis d'après des caractéristiques possédées en commun, de façon qu'aucun terme ne possède une importance spéciale ou est plus de représentativité que les autres. Dans la méthode probabilistique, on considère que les éléments d'une classe varient autant par leurs propriétés que par leur position dans la classe. Ainsi, existent dans chaque classe des éléments plus représentatifs que les autres, de façon que le classement est fait en fonction de leur localisation individuelle par rapport aux tendances centrales de la classe. L' **exemplar view** est une méthode plus extrême que la méthode probabilistique, car elle utilise des individus spécifiques ou « exemplaires » pour déterminer une classe. Ainsi, la description d'une classe consiste-t-elle en la description d'une composante exemplaire. Un élément n'est placé dans une classe que s'il se compare bien avec la composante exemplaire qui définit la classe (GOODWIN, 1999).

La quantité de variables utilisées diffère aussi entre les diverses classifications. Les classifications peuvent être basées sur un **unique critère** ou basées sur un ensemble de critères, ce qui donne une classification à **critères multiples**. Les travaux de hiérarchisation du réseau de drainage (HORTON, 1945 ; STRAHLER, 1957 ; SHREVE, 1966) sont des exemples de classifications basées sur un critère unique. Le travail fait par Schmitt (2001) sur les cours d'eau d'Alsace est un bon exemple de l'utilisation de critères multiples.

Les classifications diffèrent aussi quant au niveau d'analyse : elles peuvent utiliser un **niveau unique** ou adopter une perspective en **niveaux hiérarchisés**. Les classifications à niveau unique utilisent une seule échelle spatiale, de façon que les variables sont collectées et analysées à l'échelle définie par le chercheur. Ce type d'approche a été très utilisé pendant les premières observations du milieu naturel, quand la récurrence des quelques caractéristiques des éléments étudiés conduisait à l'élaboration de regroupements, mais quelques travaux récents de classification par écorégions utilisent aussi cette approche. Les classifications à niveaux hiérarchisés sont celles où le travail est fait en utilisant plusieurs échelles spatiales emboîtées, en différents niveaux d'analyse. Dans ce type de classification, les facteurs de contrôle du milieu naturel changent dans leur degré d'importance en fonction de l'échelle spatiale. Pour cette raison, l'ensemble des variables à utiliser doit comporter des critères à toutes les échelles spatiales prévues pour la classification. Dans les classifications hiérarchisées, les analyses à une échelle plus généraliste résultent en la définition de la classe supérieure à laquelle l'élément appartient ; la continuation de l'analyse en niveaux plus détaillés donne les sous-classes, et ainsi de suite (NAIMAN et. al., 1992).

Tant les classifications à niveau unique que les classifications hiérarchisées peuvent être employées à des échelles spatiales distinctes. Les classifications peuvent être faites à l'échelle des **bassins versants**, des **chenaux**, des **segments du réseau**, des **tronçons**, des **seuils et mouilles** et des **microhabitats**. Le niveau d'analyse dépend de l'objectif de la classification : une classification qui aura pour but l'aménagement d'un bassin hydrographique travaillera surtout à l'échelle du bassin versant, tandis qu'une classification qui aura pour but délimiter des zones d'occurrence de certaines espèces de poissons travaillera plus aux échelles des tronçons, des seuils et mouilles ou des microhabitats.

1.3.1. Précisions terminologiques

Au fur et à mesure que les systèmes de classification étaient créés et appliqués, les chercheurs ont observé que ces systèmes présentaient différentes façons de traiter la question de la classification de cours d'eau. Dans la littérature géomorphologique, des

termes comme classification, zonation, régionalisation, sectorisation, typologie, étaient fréquemment utilisés, mais le rôle précis de chacun de ces méthodes de découpage n'était pas encore bien clair.

a) Classification

Un des termes les plus rencontrés dans la littérature est celui de classification. Pour Kellerhals et al. (1976) « la classification d'un cours d'eau doit être faite par 'tronçons homogènes', c'est-à-dire par des segments de chenal (de longueur variable) dans lesquels les conditions hydrologiques, géologiques, et la surface du bassin versant adjacente restent suffisamment uniformes, de façon qu'en résulte un tronçon de cours d'eau avec une morphologie substantiellement uniforme ». A partir de cette définition, on voit que le mot classification est utilisé par Kellerhals et al. (1996) dans un sens plus général, comme un synonyme de découpage en tronçons homogènes. L'auteur ne fait aucune référence quant au moment où est faite la classification, à un possible ordre des tronçons homogènes ou à la possibilité de récurrence de ces tronçons.

Mosley (1987) présente aussi un concept très ample et en même temps synthétique sur la classification. Selon lui, « la classification, le procès de mettre ordre ou organiser les objets en groupes ou ensembles, basé sur leurs caractéristiques ou rapports, est un outil qui a été utilisé dans pratiquement tous les sciences, particulièrement dans leurs premiers stades de développement ». On voit apparaître dans ce concept la possibilité d'organiser les objets non seulement en fonction de leurs caractéristiques, mais aussi en fonction des rapports existant entre ces objets. Ceci rappelle d'une certaine façon que les systèmes fluviaux sont des systèmes dynamiques, et que cette dynamique doit être incluse dans les efforts de classification.

Pour Naiman et al. (1992) « le terme 'classification' implique que des ensembles d'observations ou caractéristiques peuvent être organisés en groupes expressifs, basés sur des mesures de similitude et différence ». On voit dans ce concept que les auteurs attirent l'attention sur l'expressivité des groupes issus de la classification. Rien ne sert de faire une classification avec une grande quantité de classes si chaque classe rassemble seulement un ou deux éléments ; il est préférable d'élaborer une classification plus simple où les classes ont un poids plus important pour la systématisation des éléments analysés.

Pour leur part, Newson et al. (1997) ont fait une importante synthèse de l'usage du terme classification. Selon eux, « classification est utilisée comme un terme ample et générique. (...) La classification est la proposition générale de regrouper les entités par similarité ». Cette définition est très résumée et elle ne présente pas de différences considérables par rapport aux définitions précédentes. Les auteurs rappellent cependant l'usage générique du terme classification pour désigner toute activité de regroupement d'entités en fonction de caractéristiques communes.

Dans ses travaux sur la sectorisation de cours d'eau, Schmitt (1996, 2001) a présenté une révision conceptuelle des terminologies utilisées dans la littérature géomorphologique. Pour cet auteur, « la classification est l'étape qui succède à la typologie, puisqu'elle consiste à appliquer sur un certain nombre de cours d'eau la typologie préalablement définie. Une classification ne peut pas donc en aucun cas chercher à définir une méthode de segmentation de cours d'eau ». On voit que d'après le concept présenté, la classification ne serait pas un concept très ample et générique, mais une étape de travail bien définie qui viendrait de l'application d'une typologie.

b) Typologie

Le terme de typologie est souvent utilisé dans la littérature géomorphologique et écologique, mais les concepts concernant la typologie n'y sont pas aussi abondants.

Dans ses recensions théoriques, Schmitt (1996, 2001) affirme qu'une typologie permet d'une part de séparer des tronçons homogènes dans lesquels on peut regrouper tous les cours d'eau pris en compte, et d'autre part de préciser la méthode de découpage qu'on doit utiliser pour cette délimitation de tronçons homogènes. Selon cet auteur, « La variété de types définie doit recouvrir la diversité des cours d'eau sur lesquels doit s'appliquer la typologie ». Selon Schmitt (1996, 2001), l'ordre et la récurrence des types identifiés est ce qui différencie les typologies : « ces types sont donc récurrents puisqu'on les retrouvera sur de multiples cours d'eau, mais au contrairement aux zonations, ils ne sont pas disposés selon un ordre prédéterminée de l'amont vers l'aval et ne sont pas caractérisés par des peuplements » (SCHMITT, 1996 ; 2001).

Wasson et. al. (2004), dans une discussion sur la différence existant entre typologie et régionalisation affirment qu'avec la typologie on dispose de tous les données pertinentes sur les sites d'analyse (des sites nombreux et bien repartis). Ainsi, la typologie serait l'étape de différenciation des cours d'eau en types après la collecte et traitement de ces données.

c) Zonation

La zonation fluviale a commencé aussi au XIX^{ème} siècle en raison des études portant sur le comportement des paramètres physico-chimiques d'eau et leurs relations avec la distribution des invertébrés et des poissons au long du profil longitudinal d'un cours d'eau (MARTENS et DUMONT, 2003). Ultérieurement, d'autres propositions de zonation fluviale sont apparues, à partir de critères biologiques, écologiques ou géomorphologiques (CARPENTER, 1928 ; Illies et BOTOSANEANU, 1963 ; SCHUMM, 1977).

Le terme de zonation est un des mieux définis dans la littérature géomorphologique et écologique. Selon Brown (1997), la zonation est « un gradient d'environnements auquel certaines espèces répondent ». Schmitt (1996, 2001) reprend un concept de Wasson (1989) qui présente la zonation comme l'action de « définir, de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau, une succession de zones relativement homogènes caractérisées par leur peuplements et définies à partir de paramètres abiotiques assez simples ». Pour Schmitt (1996, 2001), « les zones sont récurrentes et une zone donnée dans un cours d'eau est comparable à la même zone dans un autre cours d'eau ». Pour cet auteur, la zonation donne toujours la « même succession des zones sur tous les cors d'eau, sauf exceptions (confluences, par exemple) ».

Bref, la zonation se distingue des autres concepts car les zones sont généralement délimitées sur le profil en long, obéissant ainsi à une séquence amont-aval qui ne peut pas être modifiée, et ces mêmes zones peuvent être retrouvées sur d'autres cours d'eau.

d) Sectorisation

L'utilisation du concept de sectorisation n'est pas encore très répandue dans la littérature écologique et géomorphologique. SCHMITT (2001) définit la sectorisation comme l'action qui « vise à subdiviser en secteurs homogènes en se basant sur quelques critères (selon les objectifs) ». Selon cet auteur, « chaque tronçon est unique, a une position précise sur un cours d'eau donné, et ne peut se retrouver sur aucun autre cours d'eau. Les tronçons n'ont donc aucune récurrence ».

Dans un travail de sectorisation de l'Allier entre Vieille Brioude et Le Bec d'Allier (ASCONIT CONSULTANTS et HYDRATEC, 2007) on observe que, contrairement à ce qu'a

affirmé Schmitt (2001), certains tronçons présentent une récurrence, ce qui démontre qu'il n'existe pas encore un accord sur ce qu'une sectorisation veut dire.

e) Conclusion

D'après cette révision des terminologies utilisées dans la littérature spécialisée pour les travaux de classification, on peut conclure que malgré le besoin d'une nomenclature bien précise, certains concepts ne sont pas encore très nets, et parfois ils se superposent, en rendant difficile la compréhension des limites de chacune des méthodes ici présentées. En raison de l'inexistence d'une nomenclature bien précise, la plupart des chercheurs évitent cette discussion, tandis que d'autres préfèrent exposer clairement au début de leur travail ce qu'ils veulent signifier avec chaque concept.

Pour la réalisation de ce travail, on va souvent utiliser les termes de classification et sectorisation comme synonymes de l'action de diviser les cours d'eau en tronçons homogènes, indépendamment de toute récurrence ou ordre.

1.4. Les classifications appliquées aux milieux fluviaux

« La géomorphologie est une science nouvelle, et pour cette raison on fait encore beaucoup de classifications » (GOODWIN, 1999). Dans le cas de la géomorphologie fluviale, la diversité et la complexité des systèmes fluviaux ont stimulé le développement de propositions de classification. Selon Knighton (1998), « l'interaction d'un flux de fluide mobile avec une berge solide érodable donne une ample variété de formes de chenal. Dans le but d'y mettre quelque rationalité, plusieurs classifications des chenaux ont été proposées ». Pour Mosley (1987), « les cours d'eau ont été un fréquent sujet de classification par les pratiquants d'une ample gamme de disciplines, y compris la géomorphologie. Les motivations pour l'identification des différents types ou classes de cours d'eau largement ont varié, dès lors que les scientifiques ont souhaité augmenter leurs connaissances sur le comportement et la morphologie des cours d'eau, du relevé des caractéristiques communes à un type de cours d'eau donné, jusqu'au besoin d'un ingénieur ou d'un gestionnaire des poisons d'eau douce d'extrapoler son expérience et sa connaissance portant sur un cours d'eau donné aux cours d'eau appartenant à la même catégorie ».

Au fil du temps, les classifications ont présenté les objectifs les plus divers, comme par exemple expliquer le fonctionnement des systèmes fluviaux (LEOPOLD et WOLMAN, 1957 ; SCHUMM, 1963), et élaborer des méthodologies susceptibles d'applications à tous les cours d'eau existants (ROSGEN, 1994).

1.4.1. La classification des cours d'eau dans la théorie du cycle d'érosion

La théorie du cycle d'érosion ou du cycle géographique formulée par Davis (1899) est considérée comme un des premiers travaux de classification des cours d'eau (KNIGHTON, 1998). En réalité, cette théorie a été présentée par la première fois par Davis en 1884, pendant une session de l'*Association of American Geologists* (GIUSTI, 2004). Cinq ans après, dans un article sur les rivières et les vallées de Pennsylvanie (DAVIS, 1889), Davis

a présenté le cycle complet de la vie d'une rivière avec des idées sur le progrès de la dénudation du relief à l'échelle régionale. Dix ans après, un nouvel article présente une nouvelle fois au milieu scientifique la théorie du cycle géographique (DAVIS, 1899).

La théorie proposée par Davis (1899) considérait qu'après le soulèvement, un relief tectoniquement stable, sous conditions de stabilité du climat et du régime des cours d'eau, était soumis aux processus de dénudation régionale, qui rabaissent les formes du relief jusqu'au niveau de la mer (niveau de base). Le réseau hydrographique est pour Davis le principal agent d'aplanissement du relief et, au cours de cet aplanissement, ce dernier passe par une succession de stades ordonnés : la **jeunesse**, quand le relief est encore haut et à forte pentes ; la **maturité**, quand le relief est rabaissé et les pentes plus faibles ; la **vieillesse**, quand la majeure partie du relief est déjà abaissée (pénéplaine) ; et la **sénilité**, quand la morphologie se résume à une plaine d'érosion (GIUSTI, 2004). Ainsi, dans la théorie du cycle d'érosion, les cours d'eau étaient un moyen qui permettait la compréhension de l'histoire de l'évolution géologique d'une région donnée.

La théorie du cycle géographique a été progressivement détaillée par Davis au cours des premières années du XX^e siècle. En même temps, cette théorie a fait progresser les débats sur l'évolution du relief, sur les stades successifs de la dénudation et sur l'évolution du profil en long des cours d'eau. Malgré ses contributions à la compréhension des systèmes fluviaux, une critique a été faite au cycle géographique : « le temps n'est pas une base utile et facilement applicable pour les classifications » (KNIGHTON, 1998). L'utilisation d'une terminologie chronologique (jeunesse, maturité, vieillesse et sénilité) donne une fausse idée de temps, qui ne correspond pas toujours à l'âge véritable du relief.

1.4.2. La hiérarchisation du réseau hydrographique

“Toutes les ramifications de l'eau à quelque degré de leur parcours que ce soit, si elles sont d'égale rapidité, sont de taille égale à celle de la rivière principale”

Leonardo Da Vinci, The Notebooks of Leonardo Da Vinci, Volume 1, VIII. BOTANY FOR PAINTERS, AND ELEMENTS OF LANDSCAPE PAINTING, 394 – 396. The law of proportion in the growth of the branches, Florence, 1508.

Horton (1945) a présenté une technique d'ordination des cours d'eau inspirée des idées de l'hydrologue allemand Gravelius (1914) (LE FELLIC, 1990, 1991 ; BRAVARD et PETIT, 2002). Selon la technique proposée par Gravelius (1914), les segments du réseau hydrographique d'un bassin versant quelconque sont susceptibles de hiérarchisation. Le cours d'eau principal du bassin versant reçoit l'ordre « 1 » depuis son exutoire jusqu'à sa source ; de la même façon, les affluents reçoivent des numéros d'ordre, qui augmentent en direction de l'amont. Afin de donner une meilleure idée de la magnitude des cours d'eau, Horton (1945) a inversé le système d'ordination de Gravelius (1914), en donnant l'ordre « 1 » aux sources et en augmentant la valeur en direction du tronc hydrographique principal. Par contre, la valeur d'ordre atteint par un cours d'eau donné à l'exutoire est extrapolée jusqu'à sa source le long de son cours, de façon que chaque cours d'eau possède une valeur d'ordre unique (Figure 2).

A partir de la proposition présentée par Horton (1945), Strahler (1957) a développé un nouveau système d'ordination, dans le but de supprimer la subjectivité imposée par l'extrapolation des numéros d'ordre jusqu'aux sources. Pour Strahler (1957), le fait d'attribuer un même numéro d'ordre à la totalité d'un cours d'eau donne une fausse idée de sa taille, car les sources et l'exutoire ont le même rang. Ainsi, dans sa nouvelle proposition,

Strahler (1957) adopte comme unité hydrographique le tronçon. La méthode proposée attribue la valeur « 1 » à tous les tronçons de tête de bassin ; le rencontre de deux tronçons de valeur « 1 » produit, après leur confluence, un tronçon de valeur « 2 » ; le rencontre de deux tronçons de valeur « 2 » produit un tronçon de valeur « 3 », et ainsi de suite (Figure 2).

Une nouvelle proposition d'ordination des chenaux a été faite par Shreve (1966). Afin d'insister sur la notion de magnitude du réseau hydrographique, la méthode proposée par Shreve (1966) propose la somme des valeurs d'ordre aux confluences. Les sources reçoivent la valeur « 1 » ; la rencontre de deux tronçons de valeur « 1 » produit un tronçon de valeur « 2 » ; le rencontre d'un tronçon d'ordre « 1 » avec un tronçon d'ordre « 2 » produit un tronçon d'ordre « 3 », et ainsi de suite. La totalisation des ordres de tous les tronçons donne, à l'exutoire du bassin versant, la quantité totale de tronçons de rang « 1 » (Figure 2).

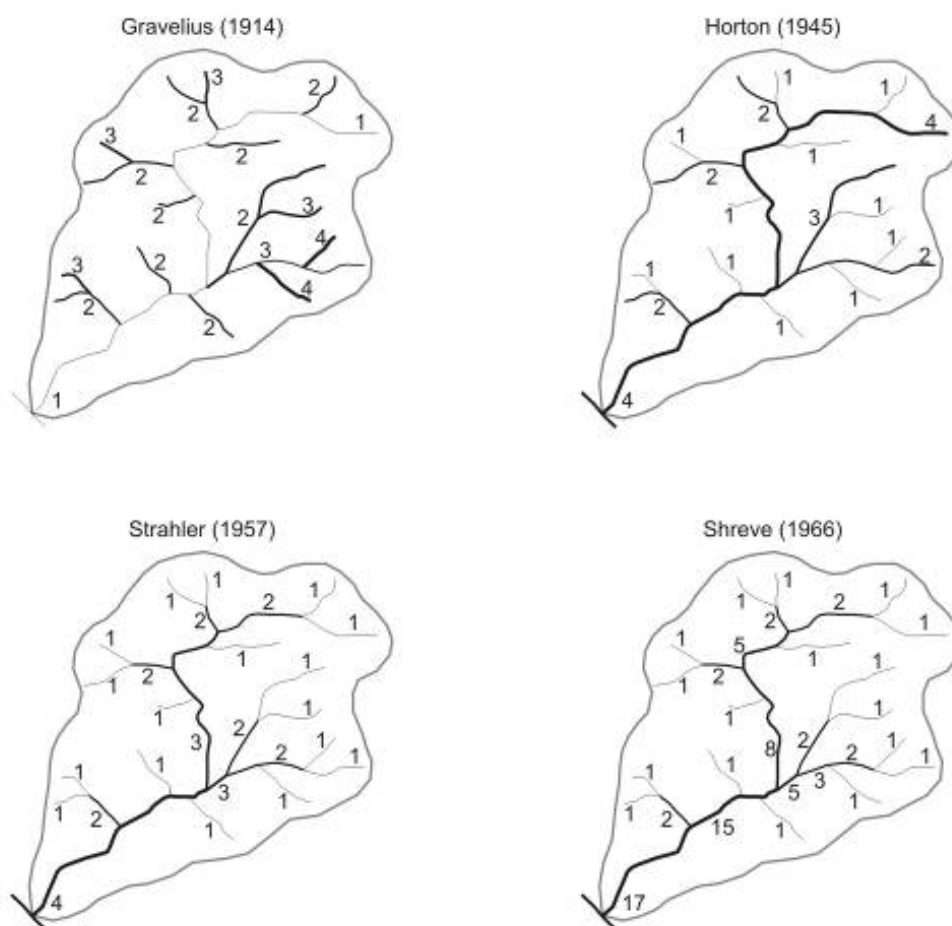


Figure 2. Ordination des cours d'eau selon les propositions de Gravelius (1914), Horton (1945), Strahler (1957) et Shreve (1966).

1.4.3. Les recherches morphologiques et processuelles

La morphologie fluviale est le résultat de la combinaison de différents facteurs qui contrôlent la dynamique des cours d'eau. Ces facteurs de contrôle peuvent varier à différentes échelles temporelles, de l'heure jusqu'aux milliers d'années, ce qui rend les études morphologiques et processuelles très complexes. Etant une conséquence des processus qui se déroulent dans l'ensemble du bassin versant, la morphologie des cours d'eau a attiré l'attention de plusieurs domaines scientifiques concernés par les milieux fluviaux. Dans le domaine de l'ingénierie, l'intérêt pour la géomorphologie est apparu en raison des modifications observées suite aux nombreuses interventions humaines ; du point de vue de l'ichtyologie, les variations de la morphologie du lit déterminent la distribution des habitats au long du chenal fluvial (KELLERHALS et CHURCH, 1989). Cet intérêt croissant pour la morphologie et les processus fluviaux a donné lieu à un ensemble d'études et travaux qui, petit à petit, ont rendu plus compréhensible le fonctionnement des systèmes fluviaux.

Leopold et Wolman (1957) ont élaboré des notions de base sur le style fluvial et les lois physiques qui gouvernent la formation des chenaux. Ainsi, ils ont classé les chenaux alluviaux en trois types : les lits rectilignes, les lits à méandres et les lits en tresses. En considérant que les lits à méandres étaient déjà très bien présents dans la littérature géomorphologique, les deux chercheurs ont particulièrement exploré la formation et la morphologie des lits en tresses et rectilignes.

A partir des données bibliographiques, des observations sur le terrain et des essais faits en laboratoire, Leopold et Wolman (1957) ont réussi à présenter une description détaillée de la morphologie et de la dynamique processuelle des deux styles fluviaux en question. Au long de ce travail, plusieurs rapports ont été faits entre le style fluvial et les caractéristiques des chenaux, ce qui ultérieurement a servi de base à d'autres recherches sur le même sujet. Les deux auteurs ont enfin établi les huit variables qui gouvernent les chenaux fluviaux : débit, charge totale transportée, granulométrie de la charge transportée, largeur, profondeur, vitesse, pente et rugosité du fond. Les différentes combinaisons de ces huit variables donnent le comportement et le style des chenaux alluviaux.

Après le travail de Leopold et Wolman (1957), plusieurs essais de classification ont été faits, mais « aucune des classifications précédentes, néanmoins, ne donne une indication sur le caractère du chenal fluvial par rapport à deux variables indépendantes, le débit et la charge sédimentaire, desquelles la morphologie des chenaux fluviaux alluviaux dépendent » (SCHUMM, 1963). Dans ce contexte, Schumm (1963) a proposé une classification des cours d'eau en mettant en relation le moyen de transport de sédiments, la stabilité des chenaux et les formes résultantes. Le critère de départ pour la classification choisi par Schumm (1963) a été la proportion de la charge en suspension par rapport à la charge de fond. Selon ce critère, les cours d'eau peuvent être classés en trois catégories : charge en suspension, charge mixte ou charge de fond (Tableau 1).

Deuxièmement, les cours d'eau sont classés en fonction de leur stabilité. La stabilité des chenaux « dépend de la balance, ou de l'absence de balance, entre la charge sédimentaire et la transportabilité ». « Le type de matériel transporté ou le mode de transport, soit comme charge de fond, soit comme charge en suspension, paraît être un des principaux facteurs qui déterminent le caractère des chenaux, et la subdivision finale s'est basée sur cette relation » (SCHUMM, 1963). A partir de ces observations, Schumm (1963) propose trois types de cours d'eau selon leur stabilité : les cours d'eau stables, érosifs et à dépôt.

Les cours d'eau stables ne présentent pas de changements progressifs de pente, de dimensions ou de formes. Pour les autres cours d'eau, les changements de morphologie se produisent surtout pendant les crues ; les cours d'eau érosifs sont ceux-ci où le chenal est progressivement transformé ou élargi par l'érosion des berges ; les cours d'eau

« dépositionnels » sont les cours d'eau où les sédiments sont déposés dans le lit ou sur les berges (SCHUMM, 1963).

La classification de Schumm (1963) propose encore l'existence de rapports entre le pourcentage de limon-argile (M) et la morphologie des chenaux. Les cours d'eau avec une valeur de « M » élevée tendent à être profonds et étroits (faible ratio largeur-profondeur), avec une faible sinuosité ; les cours d'eau avec une valeur de « M » basse tendent à être peu profonds et larges (fort ratio largeur-profondeur), avec une forte sinuosité.

Tableau 1 - Proposition de Schumm (1963) pour la Classification des Chenaux Alluviaux

Mode de transport des sédiments	Pourcentage (M) de sédiments dans le chenal	Proportion de la charge sédimentaire totale		Stabilité du chenal		
		Pourcentage de sédiments en suspension	Pourcentage de sédiments de fond	Stable (chenal « graded »)	Dépositionnel (Excès de charge)	Erosif (Insuffisance de charge)
Charge en suspension	30 – 100	85 – 100	0 – 15	Stable avec charge en suspension. Rapport largeur - profondeur inférieur à 7. Sinuosité supérieure à 2,1. Gradient relativement faible.	Dépositionnel avec charge en suspension. Prédomine le dépôt sur les berges, ce qui cause le rétrécissement du chenal. Dépôt au fond du lit de façon secondaire.	Erosif avec charge en suspension. Prédomine l'érosion du fond du lit. Elargissement du lit de façon secondaire.
Charge mixte	8 – 30	65 – 85	15 – 35	Stable avec charge mixte. Rapport largeur – profondeur supérieur à 7 et inférieur à 25. Sinuosité inférieure à 2,5 et supérieure à 1,5. Gradient modéré.	Dépositionnel avec charge mixte. Initialement dépôt sur les berges, suivi par le dépôt au fond du lit.	Erosif avec charge mixte. Initialement érosion du fond du lit, suivi par l'élargissement du chenal.
Charge de fond	0 – 8	30 – 65	35 – 70	Stable avec charge de fond. Rapport largeur – profondeur supérieur à 25. Sinuosité inférieure à 1,5. Gradient relativement fort.	Dépositionnel avec charge de fond. Dépôt au fond du lit et formation d'îles.	Erosif avec charge de fond. Faible érosion du fond du lit. Prédomine l'élargissement du chenal.

Après avoir proposé une classification à une échelle plus régionale, Schumm (1977) a présenté une division longitudinale des cours d'eau à l'échelle du bassin versant. Se basant sur la dynamique sédimentaire et le bilan de matière, cet auteur a proposé une subdivision des bassins versants en trois zones (Figura 3). La **zone 1** correspond aux têtes

de drainage, source de l'eau et des sédiments ; la **zone 2** est la zone de transport, où l'eau et les sédiments transitent, avec un gain ou une perte de matériel ; la **zone 3** est la zone d'accumulation, où les sédiments venus des parties amont s'accumulent en formant des deltas, des cônes de déjections ou d'autres types de dépôts.

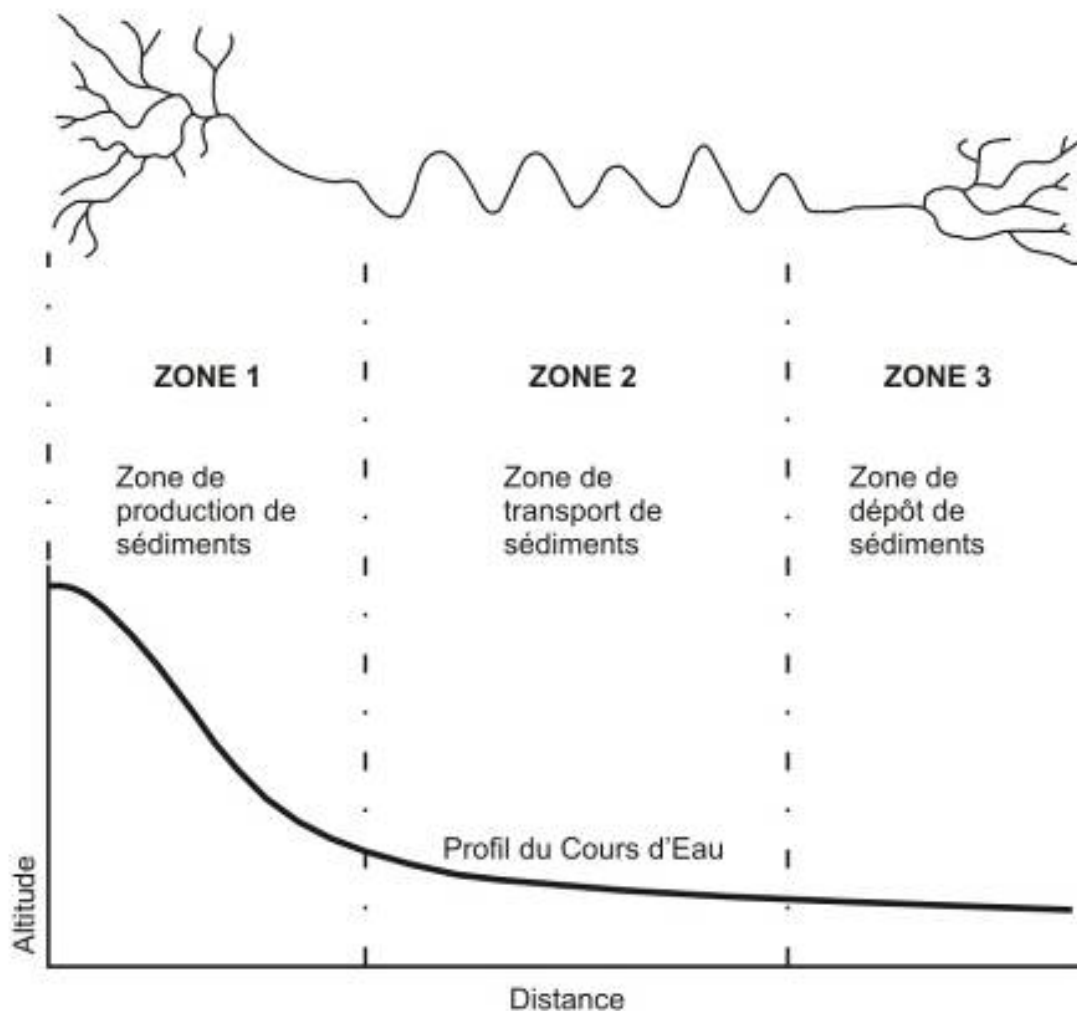


Figure 3. Les trois « zones » d'un bassin versant, selon Schumm (1977).

Au Canada, Kellerhals *et al.* (1976) ont proposé une méthode de classification descriptive de la vallée fluviale, des cours d'eau et des éléments du chenal. La méthode proposée a été développée pour permettre l'analyse du système fluvial sur les cartes topographiques et les photographies aériennes. La classification est faite à l'aide de deux approches : la première concerne la classification des éléments de la vallée fluviale ; la deuxième concerne la classification de la plaine alluviale, du chenal et de ses éléments. Dans chaque approche, sont présentées les modalités de classification pour chaque élément du système fluvial, de façon que la personne qui s'occupe de l'analyse des cartes ou des photos aériennes puisse coder la modalité correspondant aux caractéristiques des éléments observés. En gros, le processus de codification des éléments de la vallée prend en compte les informations sur le terrain (géologie et géomorphologie), sur la couverture végétale et l'usage du sol, sur les processus érosifs à l'échelle des versants, la présence de terrasses et la position du chenal par rapport à la vallée. En ce qui concerne le chenal, la codification prend en compte le style fluvial, l'activité latérale du chenal, la composition des

berges et du fond du lit et les unités morphologiques du chenal (îles, bancs, obstructions, type de flux), entre autres. Cette codification est appliquée à des tronçons homogènes, en allant d'un point de vue général à un point de vue plus détaillé.

1.4.4. La connaissance de la diversité des systèmes fluviaux

« Un système standardisé de classification des cours d'eau simplifierait la discussion sur le type de chenal, mais jusqu'à présent ce système n'existe pas » (GALAY *et al.*, 1973). Motivés par la quête d'un système de classification susceptible d'une application à tous les cours d'eau, Galay *et al.* (1973) ont élaboré un travail de classification ayant pour but de « développer les lignes d'un système partiel de classification et d'utiliser une partie de ce système pour illustrer la grande variété des types de cours d'eau qu'on peut trouver dans un pays comme le Canada » (GALAY *et al.*, 1973). Pour ces auteurs, « dans un pays grand et relativement peu aménagé comme le Canada, l'identification des types de cours d'eau a une très grande importance pratique parce que les projets d'ingénierie dans les cours d'eau ont été planifiés à partir de cartes, de photographies aériennes et d'informations de nature climatique. On espère que le système de classification prouvera qu'il est un outil important pour prédire le comportement futur d'un cours d'eau à partir de son apparence ».

Initialement les cours d'eau du Canada ont été découpés, à partir des caractéristiques du chenal, en cinq grandes catégories : 1) de vallée ; 2) à plaine alluviale ; 3) delta ; 4) cône de déjections et 5) lit rocheux irrégulier. En travaillant à l'échelle de ces types de tronçons, les auteurs ont proposé l'analyse de cinq groupes de variables : 1) le régime hydrologique ; 2) le régime des glaciers (ce que ne s'applique pas beaucoup de régions du globe) ; 3) la situation géomorphologique et les processus dominants dans le chenal ; 4) les matériaux et la stabilité du chenal ; 5) les dimensions du chenal et le détail des processus. L'analyse du régime hydrologique et des glaciers donne une idée du fonctionnement hydrologique des cours d'eau au long de l'année. La situation géomorphologique et les processus dominants dans le chenal sont obtenus à partir des cartes topographiques et des photographies aériennes. A partir de ces documents, des observations sont faites sur la morphologie des vallées, des plaines, des chenaux, des dépôts sédimentaires et des processus identifiables. Toutes ces observations sont ultérieurement confirmées sur le terrain, et elles sont classées sur la base d'un protocole d'observations élaboré par les auteurs (GALAY *et al.*, 1973). L'analyse des matériaux du chenal et de sa stabilité a été faite par l'observation des matériaux du fond du lit et des berges, par l'observation de la stabilité du fond du lit et des berges, et par l'observation des matériaux qui entourent le chenal (plaine alluviale, terrasses, dépôts divers). Initialement, ces données ont été déduites des cartes topographiques et des photographies aériennes, et ultérieurement elles ont été confirmées ou corrigées sur le terrain. L'analyse des dimensions du chenal et du détail des processus a été faite directement sur le terrain, où ont été collectées des informations sur la géométrie du chenal (largeur, profondeur, pente, forme de la section en travers), sur les formes de fond (*ripples*, dunes, etc.), sur le taux de migration du chenal, sur les taux d'aggradation ou de « dégradation » et les taux de transport de fond et en suspension.

La méthode proposée par Galay *et al.* (1973) privilégie de beaucoup les aspects géomorphologiques pour décrire les tronçons. Pour cette raison, des critiques ont été faites, au motif que ce travail ne constitue pas une classification, mais une caractérisation de cours d'eau, la méthode proposant seulement une description des tronçons fluviaux d'après un ensemble de critères et attributs (MOSLEY, 1987).

1.4.5. La classification au service de la récupération d'habitats

Pendant la deuxième moitié du XX^e siècle, les recherches sur l'écologie des milieux fluviaux ont attiré l'attention des chercheurs sur une nouvelle question : l'état de conservation des cours d'eau et des paysages riverains. Ces mêmes recherches ont révélé aussi l'existence d'une étroite liaison entre les caractéristiques physiques des cours d'eau et la distribution des composantes biologiques au long d'un système fluvial. Pour ces raisons, plusieurs travaux de classification des cours d'eau ont adopté une approche écologique, soit pour la reconnaissance de la diversité biologique, soit pour la récupération des écosystèmes dégradés.

Aux Etats-Unis, Cupp (1989) a essayé d'élaborer une méthode de classification des couloirs fluviaux adaptée aux cours d'eau et aux vallées forestières de l'Etat de Washington. Selon Cupp (1989), « l'ample variété de paysages associée à la diversité de conditions des cours d'eau qu'on trouve dans les forêts de l'Etat de Washington fait que le développement de directives pour l'aménagement de tous les cours d'eau n'est pas pratique. Pour cette raison, le besoin d'un système de classification qui intègre les terres et les cours d'eau est largement reconnu ».

De façon simplifiée, la méthodologie proposée par Cupp (1989) se développe en trois phases : la première consiste à extraire des informations des cartes topographiques (pré-analyse) ; la deuxième consiste à affiner et confirmer les informations de l'étape précédente (travaux sur de photographies aériennes et sur le terrain) ; la dernière phase consiste dans l'application de la classification.

Le travail sur les cartes topographiques commence par la hiérarchisation du réseau hydrographique selon la proposition de Strahler (1957). Ensuite, les couloirs fluviaux doivent être délimités. Le couloir fluvial est défini par l'auteur comme « la bande de terre parallèle au chenal actif, distant à peu près de 1000 pieds¹ horizontalement de chaque côté du chenal, et avec un relief vertical de 300 pieds² de hauteur maximale » (CUPP, 1989). Une fois définis les couloirs fluviaux, quatre paramètres les décrivant doivent être extraits des cartes topographiques : 1) La forme du profil en travers de la vallée (classée en 5 types proposés par l'auteur) ; 2) La pente longitudinale de la vallée ; 3) La pente latérale de la vallée ; 4) Le style fluvial (classé en 3 types proposés par l'auteur). Pendant la phase d'analyse des photographies aériennes, un critère supplémentaire doit être déterminé : 5) Le ratio largeur de la vallée/largeur du chenal actif. Le sixième paramètre est établi sur le terrain, 6) La géomorphologie de surface. La classification finale est faite à partir de la synthèse de ces six critères. Les résultats sont analysés à l'aide d'un tableau où sont décrits les 18 types de couloirs fluviaux définis par Cupp (1989).

La classification des couloirs fluviaux proposée par Cupp (1989) semble intéressante du point de vue géomorphologique parce que la combinaison des différents critères utilisés donne une bonne idée du paysage des vallées étudiées. La relative facilité d'application de la méthode est un autre point notable. Néanmoins, malgré ses intentions initiales, l'auteur n'a fait aucun rapport entre les différents types de couloirs fluviaux et les aspects biotiques, de sorte que la méthode de classification présentée ne permet pas la planification de travaux d'aménagement des forêts ou de récupération d'habitats, son but originel.

En Allemagne, les discussions sur la protection des cours d'eau et sur la récupération d'habitats ont gagné beaucoup de terrain ces dernières années, principalement en raison

¹ 1000 pieds = 304,8 mètres

² 300 pieds = 91,44 mètres

de l'accroissement de la conscience écologique (BOSTELMAN *et al.*, 1998). Depuis le début des années 1990, les chercheurs allemands travaillent sur la récupération d'habitats en utilisant le concept de *Leitbild*. Le *Leitbild* « est une image modèle d'un cours d'eau en conditions « naturelles », et il peut être utilisé pour comparer l'état actuel avec l'état « désiré » (BOSTELMAN *et al.*, 1998).

Malgré toutes les préoccupations exprimées vis-à-vis des systèmes fluviaux, le manque de connaissances sur l'état naturel des cours d'eau faisait que les projets de réhabilitation menés en pratique à l'Allemagne se basaient sur des idées subjectives. Pour cette raison, un groupe interdisciplinaire de recherche sur les cours d'eau a été constitué, avec pour finalité de créer des outils d'aménagement des systèmes fluviaux susceptibles d'applications à la majorité des petits cours d'eau du sud-ouest de l'Allemagne et à l'échelle de la région. Ainsi, afin d'« occuper l'espace vide existant entre les différentes théories de la classification fluviale » (BOSTELMAN *et al.*, 1998), un système de classification lié au concept de *Leitbild* a été proposé (Figure 4).

La première étape de ce système de classification est la réalisation d'une analyse régionale du paysage, à partir des différentes sources d'information disponibles. Cette analyse donne comme résultat un ensemble d'unités spatiales avec des caractéristiques similaires, appelées MSR – *Main Stream Regions* (en libre traduction, « Régions fluviales »). Dans chaque MSR, les cours d'eau en conditions les plus « naturelles » possibles sont choisis pour représenter l'ensemble des cours d'eau de l'unité en question. Ces cours d'eau sont donc étudiés quant aux aspects géomorphologiques, avec la morphologie du chenal, la végétation du chenal et de la plaine, les poissons et les macroinvertébrés, la chimie de l'eau. Les résultats des observations faites sont analysés par des équipes multidisciplinaires, et la synthèse des résultats permet le développement d'un système de classification et la détermination des *Leitbild* (des scénarios désirables) pour chaque type de cours d'eau et dans chaque unité spatiale.

Le travail sur la méthodologie du *Leitbild* est effectué de façon hiérarchisée, ce qui permet son application aux différentes échelles spatiales. Cette hiérarchisation influence aussi le nombre de critères à prendre en compte et le degré de détail des observations à faire sur le terrain. Le *Leitbild* donne aussi une bonne description des conditions désirables pour un cours d'eau donné, ce qui permet une meilleure planification des travaux de récupération des habitats, en respectant les particularités de chaque région naturelle (BOSTELMAN *et al.*, 1998). Par contre, le développement d'un travail de ce type nécessite un grand nombre d'experts, dans différents domaines du savoir, à fin de rendre l'analyse la plus interdisciplinaire possible.

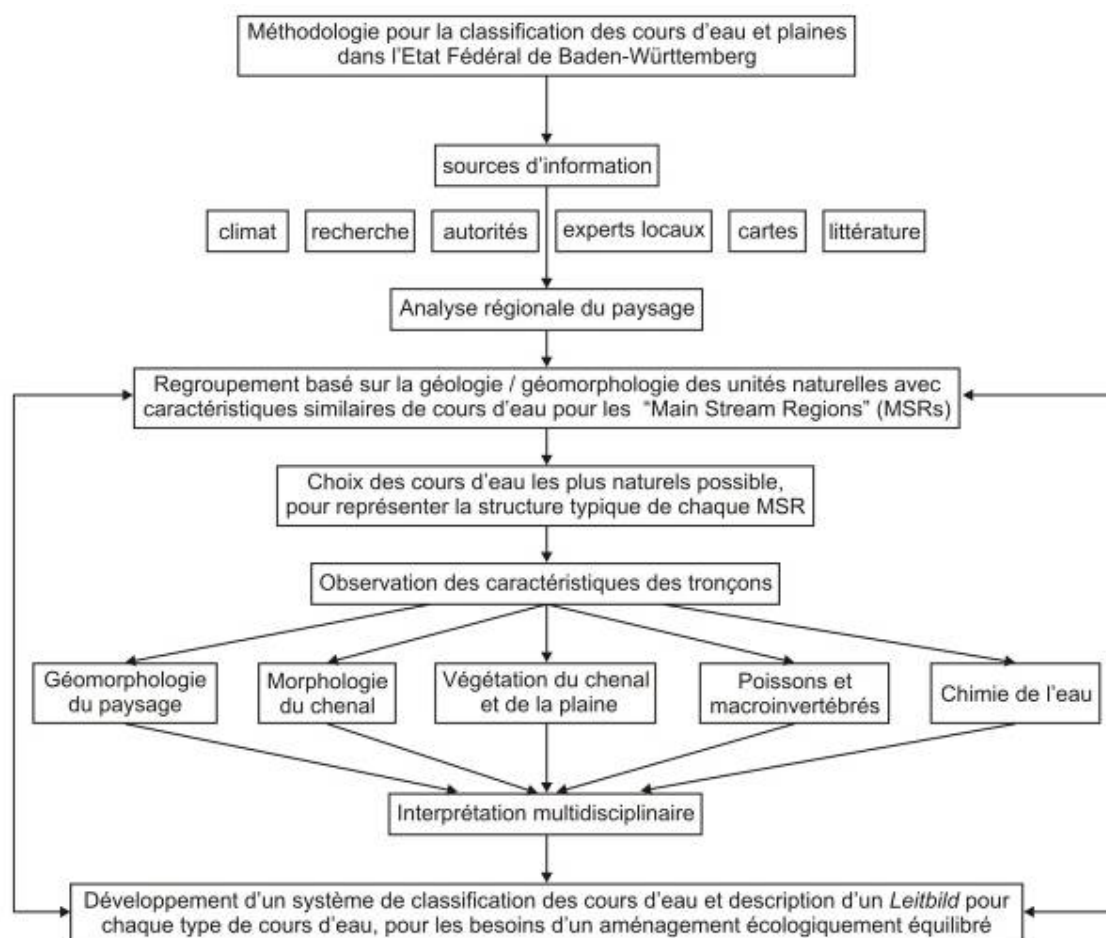


Figure 4. Méthodologie de classification des petits cours d'eau et leurs plaines d'inondation dans l'Etat de Baden-Württemberg, sud-ouest de l'Allemagne. Source : Bostelman et al. (1998).

En ce qui concerne les classifications et les travaux de restauration d'habitats, quelques critiques ont été faites par Doyle *et al.* (1999). Selon ces auteurs, la restauration d'habitats doit se montrer fonctionnelle sur le plan hydraulique, géomorphologique et biologique, et on doit considérer que les projets de restauration peuvent affecter le public du point de vue de l'économie et de la sécurité.

1.4.6. Classifications pour prévoir le comportement des cours d'eau

Malgré la grande quantité d'études sur la morphologie et la dynamique processuelle des cours d'eau déjà réalisée, on peut considérer qu'il est encore impossible de prévoir avec exactitude le comportement des cours d'eau face à des changements, naturels ou provoqués par l'homme, sur les éléments qui contrôlent le système fluvial (comme par exemple le débit, la charge sédimentaire ou la pente). Par contre, l'avancée de l'état des

connaissances hydrologiques et géomorphologiques permet l'élaboration de systèmes de classification de plus en plus complexes. La quête d'un système de classification universel, qui permette de faire des prévisions sur le comportement des cours d'eau, se poursuit.

Pour Rosgen (1994), le processus d'élaboration d'une classification se justifie quand on essaye d'atteindre les objectifs suivants : 1) Prédire le comportement d'une rivière à partir de son apparence ; 2) Développer des rapports spécifiques entre l'hydraulique et les sédiments pour un type donné de rivière, dans un état donné ; 3) Donner un mécanisme permettant l'extrapolation des données d'un site spécifique à l'ensemble d'un tronçon aux caractéristiques similaires ; 4) Donner un cadre de référence consistant et reproductible pour ceux qui travaillent sur des rivières. Cet auteur a ainsi présenté une proposition de classification des chenaux naturels, en essayant d'intégrer tout ce qui a été appris sur la dynamique des cours d'eau dans l'histoire de la discipline, de façon à rendre disponible un schéma méthodologique commun à toutes les branches de la science qui travaillent sur les milieux fluviaux. La proposition méthodologique de Rosgen (1994) a été développée à deux niveaux d'analyse, afin de permettre l'organisation des variables en respectant les différentes échelles spatiales. Le premier niveau est celui de la caractérisation géomorphologique, tandis que le deuxième niveau est celui de la description morphologique. En termes pratiques, l'application de la méthodologie se fait à travers l'utilisation de quelques clés de classification (Figures 5, 6 et 7).

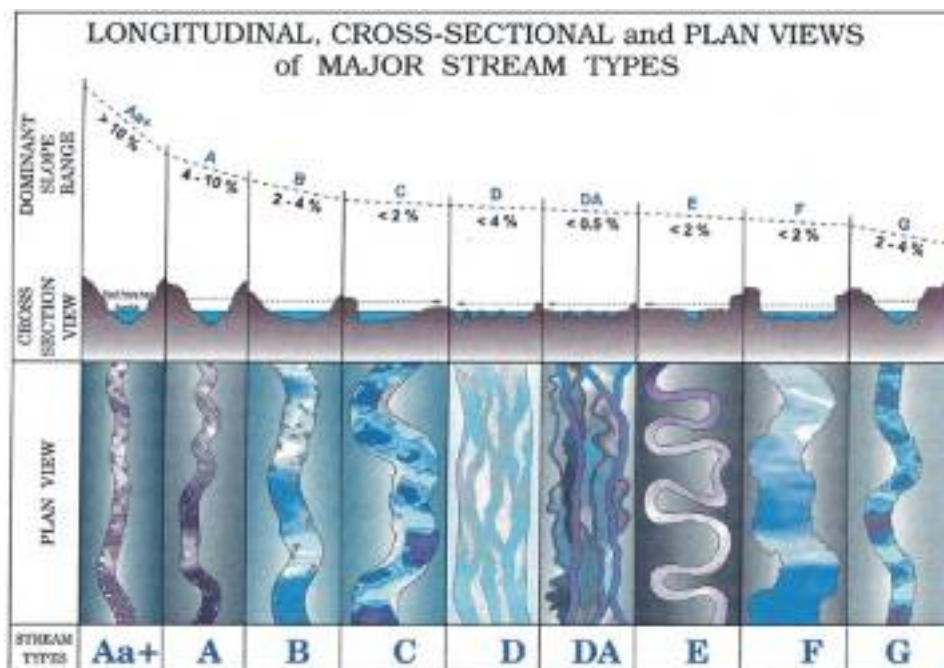


Figure 5. Profil en long, section en travers et vue en plan des principaux types de chenaux, selon la classification de Rosgen (1994).

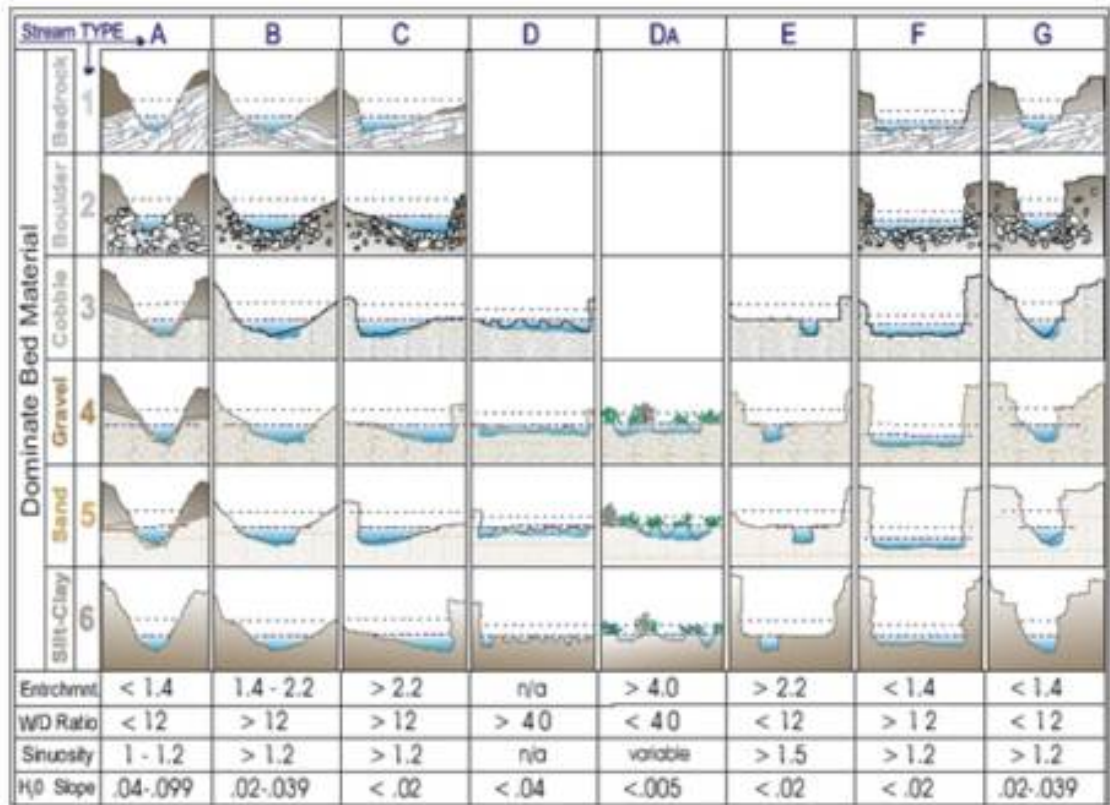


Figure 6. Guide illustratif de la configuration des sections en travers, composition et critères de délimitation des principaux types de chenaux, selon la classification de Rosgen (1994).

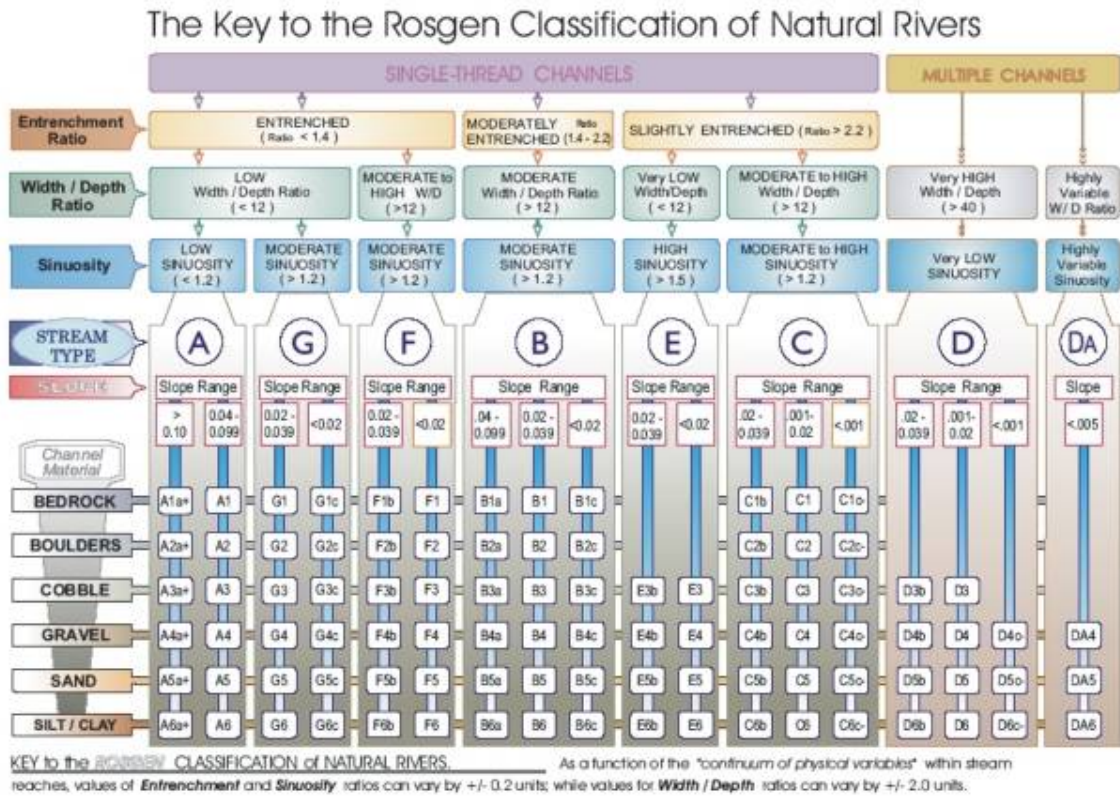


Figure 7. La clé de la classification de Rosgen (1994) pour les cours d'eau naturels.

Le processus de classification commence par le choix entre les entrées « cours d'eau à chenal unique » et « cours d'eau à chenaux multiples ». En descendant dans la clé de classification, il est nécessaire de définir le rapport d'encaissement. La définition du rapport d'encaissement donnée par l'auteur est « la largeur de la surface soumise aux crues divisée par la largeur du chenal à pleins bords » (ROSGEN, 1994). La largeur de la surface soumise aux crues est définie par l'auteur comme « la largeur mesurée pour une hauteur égale à deux fois la profondeur maximale à pleins bords » (ROSGEN, 1994). Dans la suite de la classification, le critère suivant est le rapport largeur/profondeur. Ce rapport est calculé en divisant la largeur à pleins bords par la profondeur moyenne du chenal. Enfin, la détermination de la sinuosité est la dernière étape pour arriver à un des huit types de chenaux (Figure 7, Tableau 2). Le type Aa+, le type de chenal n° 9 qui n'est pas représenté dans la clé de classification, existe pour les chenaux à très forte pente, très encaissés, avec une charge sédimentaire formée de débris.

Pour donner une continuité à la classification, afin d'arriver à un des 94 sous-types de cours d'eau proposés par Rosgen (1994), il est nécessaire d'établir la pente du profil en

long du tronçon et ensuite le type de matériel du chenal (Figure 7), du fait que ces deux variables interfèrent directement avec le style fluvial (ROSGEN, 1994).

Le système de classification proposé par Rosgen (1994) est très vaste. L'auteur discute son applicabilité dans plusieurs domaines de la science, comme par exemple dans les recherches sur l'évolution des systèmes fluviaux, les études hydro-sédimentaires et les travaux de restauration et récupération d'habitats. Ces dernières années, cette méthodologie a gagné en notoriété et, malgré sa popularité, elle a été soumise à quelques dures critiques de la part de Miller et Ritter (1996). Selon ces deux auteurs, la classification proposée par Rosgen (1994) présente une terminologie sans consistance et pas très bien définie, et utilise de façon très discutable des extrapolations de données entre des cours d'eau similaires. La classification en question utilise la surface soumise aux crues comme un des facteurs de contrôle, ce qui, selon Miller et Ritter (1996), n'a aucune signification géomorphologique pour certains cours d'eau, comme par exemple les cours d'eau des milieux désertiques. L'absence de prise en considération de l'histoire des cours d'eau, quant au régime climatique et au régime hydrologique, et l'inconsistance des modèles évolutifs présentés par Rosgen (1994) ont été aussi beaucoup critiquées par Miller et Ritter (1996).

Tableau 2 – Description des grands types de chenaux, selon la classification de Rosgen (1994)

Type de Chenal	Description Générale
<i>Aa+</i>	<i>Cours d'eau à très forte pente, très encaissé, transport de débris</i>
<i>A</i>	<i>Forte pente, encaissement, rapides, chenaux à seuils et mouilles. Haute énergie / transport de débris associé avec des sols de dépôts. Très stables si le bedrock ou les blocs dominant dans le chenal.</i>
<i>B</i>	<i>Modérément encaissé, gradient modéré, chenal dominé par seuils avec mouilles espacées de façon non fréquente. Style et profil très stables. Berges stables.</i>
<i>C</i>	<i>Faible gradient, méandres, bancs dans les points de courbure des méandres, seuils et mouilles, chenaux alluviaux avec plaines d'inondation larges et bien définies.</i>
<i>D</i>	<i>Chenal en tresses avec bancs longitudinaux et transversaux. Chenal très large avec berges érodables.</i>
<i>DA</i>	<i>Chenal anastomosé (chenaux multiples), étroit et profond, avec plaine étendue et bien végétalisée associée à des terres humides. Relief très souple avec sinuosité fortement variable. Berges stables.</i>
<i>E</i>	<i>Faible gradient, chenaux à méandres avec seuils et mouilles, faible rapport largeur-profondeur et faible dépôt. Très efficient et stable. Fort rapport de largeur des méandres.</i>
<i>F</i>	<i>Chenal à méandres encaissés, avec seuils et mouilles, faible gradient et fort rapport largeur-profondeur.</i>
<i>G</i>	<i>« Ravine » encaissée avec seuils et mouilles et faible rapport largeur-profondeur, gradient modéré.</i>

Au Royaume-Uni, Newson et al (1998) ont élaboré un travail de classification et de typologie de cours d'eau ayant pour but la création d'un outil qui permette de faire des prédictions sur la dynamique des chenaux, sur la tendance évolutive des systèmes fluviaux et sur la sensibilité de ces systèmes aux impacts possibles. Le travail a aussi pour ambition de servir de base géomorphologique pour des travaux de protection contre les inondations et pour un système écologique d'évaluation, restauration et réhabilitation d'habitats.

Ce dernier travail a utilisé la base de données du RHS – *River Habitat Survey* (Service des Habitats Fluviaux). A partir de cette base de données, les critères utilisés dans la classification ont été choisis en raison de leur importance géomorphologique et écologique. L'analyse des données disponibles a permis la reconnaissance de cinq types de variables : variables de localisation, de condition, d'énergie, de résistance et de style. L'ensemble des variables fournit des informations à quatre échelles spatiales distinctes : à l'échelle du bassin, du secteur, du tronçon et de la section en travers. Quelques informations non disponibles sur la base de données y ont été ajoutées. C'est le cas des données topographiques (altitude, pente et style), photographiques, morphologiques de base (la forme des vallées, la nature des chenaux), morphologiques de détail (le profil des berges), dimensions (le niveau de plein bord, la largeur du chenal), la composition (le matériel des berges, le matériel du fond du lit), les éléments des berges (les berges érodables), les éléments naturels du chenal (la quantité de seuils, de bancs, etc.), et les éléments artificiels du chenal (piliers, gabions). Afin de donner une idée des conditions originales des cours d'eau, la classification a été élaborée seulement à partir des données des 484 sites considérés comme en état semi-naturel.

L'analyse des données a pris en considération la redondance et la discrimination entre les données des sites, et elle a été faite à l'aide d'un logiciel de classification. À la fin, un schéma méthodologique de classification complexe a été développé, basé principalement sur les données du matériel de fond, compte tenu de l'importance de ce critère pour la discrimination des sites d'étude. L'application du schéma élaboré a donné 13 classes de cours d'eau, dans lesquelles ont été regroupés les 484 sites issus de la base de données. Un essai de comparaison des résultats obtenus avec les données concernant la puissance dans le chenal des sites étudiés a été fait, mais il n'a pas été possible de définir des zones homogènes de puissance bien nettes. En synthèse, les résultats atteints ont été considérés comme bons, mais il est encore impossible de faire des pronostics sur le comportement des cours d'eau à partir de la typologie élaborée. Ainsi, il faudra essayer des nouvelles méthodes de regroupement à partir d'autres combinaisons de variables.

En France, Schmitt (2001), motivé par les exigences de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, a élaboré une étude portant sur la dynamique naturelle (dynamique hydro-géomorphologique) des cours d'eau d'Alsace, de façon à définir les types de tronçons homogènes de cours d'eau dans lesquels il serait possible classer tous les cours d'eau de la région et de préciser la méthode de découpage qu'il conviendrait d'utiliser pour aboutir à ces types de tronçons homogènes. La typologie proposée devait aussi constituer un outil de gestion en « routine » des cours d'eau, permettre d'évaluer la qualité du milieu physique des cours d'eau, permettre de guider les opérations de restauration de cours d'eau et enfin permettre d'évaluer les impacts des aménagements des cours d'eau.

La collecte de données sur la totalité du réseau hydrographique alsacien aurait été trop longue et coûteuse, tandis que la collecte d'informations sur des sites de mesure disposés sur les réseaux à intervalle fixe n'aurait pas été représentative. Aussi Schmitt (2001) a-t-il sélectionné les tronçons à étudier à partir d'un échantillonnage stratifié. Pour chaque point de mesure sélectionné, 31 variables ont été mesurées. L'élaboration d'analyses multivariées des données collectées sur les plusieurs sites a permis l'élaboration d'une typologie des cours d'eau alsaciens, rendant plus évidents quelques aspects de la dynamique hydrogéomorphologique du réseau hydrographique. Dans une deuxième étape, Schmitt (2001) a élaboré une sectorisation longitudinale des cours d'eau, en faisant apparaître les discontinuités longitudinales de la morphodynamique fluviale. Un point remarquable du travail fait par Schmitt (2001) est l'utilisation de la puissance dans le chenal comme variable

discriminatoire pour la sectorisation du réseau hydrographique. Dans le but d'incorporer quelques facteurs de contrôle dans le calcul, la puissance dans le chenal s'est révélée être une variable tout à fait fiable pour procéder au découpage d'un réseau hydrographique.

Les méthodes présentées par Schmitt (2001) ont été très efficaces pour la caractérisation, le regroupement et la sectorisation des cours d'eau d'Alsace. L'utilisation de l'ordinateur a rendu possible l'application des analyses statistiques sur un ensemble important de variables, de façon que le regroupement des cours d'eau en ensembles homogènes a été fait en considérant plusieurs aspects de leur dynamique. La transférabilité de la méthode présentée par Schmitt (2001) pour d'autres régions hydrographiques, une des conditions désirées par l'auteur au début du travail, a été aussi prouvée par l'application ultérieure de cette méthodologie à d'autres cours d'eau (HALLOT et al., 2004 ; SCHMITT et al., 2004). Par contre, l'applicabilité de la méthode demande une grosse quantité de données, qui ne sont pas toujours disponibles, et la collecte sur le terrain est aussi très longue. Cela rend difficile l'application de la méthode dans les grands bassins versants et dans les endroits pas très bien instrumentés par les services hydrologiques.

1.4.7. Les écorégions

Les "écorégions sont des grands écosystèmes d'extension régionale qui contiennent un certain nombre d'écosystèmes. Ce sont des zones géographiques représentées par des groupes ou associations d'écosystèmes possédant un fonctionnement similaire. Les limites régionales peuvent être basées sur des informations détaillées obtenues sur les écosystèmes au niveau des sites ou par l'analyse des facteurs qui très probablement ont agi comme des forces sélectives dans la création des divers écosystèmes » (BAILEY, 1983).

L'origine du concept d'écorégion vient d'une dérivation du concept d'écosystème. Au long du XX^e siècle, une partie de la recherche s'est concentrée sur des études climatiques et biogéographiques à l'échelle régionale. Au vu de l'étroite liaison existant entre la distribution spatiale des climats et celle des domaines biogéographiques, les chercheurs ont essayé d'établir une régionalisation écologique de la surface de la Terre. Le concept d'écosystème, utilisé pour de petites unités spatiales, ne s'appliquait pas aux études biogéographiques à échelle régionale. Dans une étude sur les forêts des provinces maritimes au Canada, Loucks (1962) a présenté par la première fois le concept d'écorégions (BAILEY, 2005). Quelques années après, Crowley (1967), se basant sur des données régionales de climat et de végétation, élaborait la première carte des écorégions du Canada. En suivant l'exemple de Crowley (1967), Bailey (1976) a élaboré la carte des écorégions des Etats-Unis. Malgré ces deux travaux de cartographie appliquée, les bases théoriques et méthodologiques de la délimitation des écorégions ont été publiées seulement dans les années 1980, quand Bailey (1983) a explicité la méthode qu'il a utilisée pour la confection de la carte des écorégions des Etats-Unis.

Selon Wasson et al. (2004), les biologistes ont repris le concept d'écorégions et ils l'ont adapté pour l'appliquer aux études de gestion des milieux aquatiques à l'échelle régionale. Ce fut le premier pas vers l'utilisation des écorégions pour les travaux de classification fluviale. L'utilisation des écorégions dans les classifications de cours d'eau est devenue de plus en plus fréquente. Selon Naiman et al. (1992), « *le concept de l'écorégion s'applique de plus en plus au regroupement de cours d'eau où est utilisée la résolution à grande échelle. Cela permet en effet une alternative moins coûteuse aux schémas de classification requérant un travail et des données intensives ; elle est basée sur des variables de plus petite échelle, puisque cela permet aux gestionnaires de prévoir les*

caractéristiques physiques et biologiques selon les lieux. Cependant, ce concept est moins utile aux gestionnaires opérant aux confins d'une seule écorégion à cause des variations géologiques, de débits, de pente et de forme des chenaux locales ». Selon Marston (2006) « les géographes obtiennent quelque succès en réduisant la complexité du monde à travers le développement des écorégions ».

En termes méthodologiques, deux stratégies ont été élaborées pour la délimitation d'écorégions. Les régions peuvent être identifiées par la collecte et l'analyse de grandes quantités de données géographiques et biologiques, de façon que le regroupement soit fait à partir de similarités documentées ou perçues dans les propriétés du paysage. Cela demande une base de données très grande, et l'extrapolation des résultats pour d'autres régions géographiques n'est pas toujours simple. Par contre, les écorégions peuvent être définies aussi par le regroupement des déterminants physiques connus du fonctionnement et de la structure des écosystèmes (les « facteurs de contrôle »). Cela donne une approche plus holistique et demande une base de données moins lourde, ce qui aide à réduire le volume de travail (HARDING et WINTERBOURNE, 1997).

Selon Bryce et Clarke (1996), « la régionalisation écologique est un mode de classification spatiale. C'est une méthode dans laquelle les limites sont dessinées autour d'aires relativement homogènes à une échelle spécifique et à un niveau de détail donné. La délimitation d'écorégions inclut l'analyse de la structure de l'écosystème. Les limites écorégionales indiquent où se produisent des changements significatifs dans les caractéristiques du paysage. Les changements peuvent être graduels ou abrupts, mais en raison du procédé de régionalisation des aires discrètes sont créées à partir d'un continuum, ce qui fait que les limites des régions résultantes sont des approximations. Les écorégions sont des modèles de la réalité ; leurs limites représentent une aire de transition de largeur variable ». Au cours des dernières années, quelques travaux de classification fluviale basés sur les écorégions ont été réalisés, et parfois assortis de nouvelles propositions méthodologiques.

Aux Etats-Unis, Bryce et Clarke (1996) ont élaboré une étude du bassin versant du Grand Ronde, dans l'Etat d'Ohio, en utilisant la délimitation d'écorégions. L'Etat d'Ohio comptait déjà une régionalisation par écorégions, qui fournit un bon point de départ aux deux auteurs. Malgré l'existence de cette régionalisation, Bryce et Clarke (1996) ont choisi d'aborder la question à l'échelle des paysages, de façon à combler le vide existant entre les études à l'échelle de l'Etat et celles à l'échelle des habitats du chenal. Le but de la recherche était de délimiter des écorégions à l'échelle du paysage pour « essayer de recréer les limites et les caractéristiques du paysage drainé par le haut Grand Ronde et ses affluents. Avec ces informations, les responsables de l'aménagement du territoire peuvent orienter les efforts de restauration à partir de l'estimation des conditions de référence avant l'occupation humaine » (BRYCE et CLARKE, 1996).

Le travail a démarré par la collecte des cartes thématiques se rapportant aux grands facteurs de contrôle des paysages : le climat, la géologie, les sols et la topographie. Des photos aériennes et des documents écrits (rapports techniques, travaux de recherche, etc.) ont été aussi réunis. Avec tous ces matériels, une première étape de reconnaissance du bassin versant d'étude a été réalisée ; elle est appuyée sur une lecture extensive de la littérature et la consultation des experts locaux. Après cette phase de reconnaissance, a débuté la délimitation des écorégions. L'établissement des limites entre les écorégions a commencé par les changements de paysage le plus brusques et les plus évidents (les *obvious breaks*, selon les auteurs). Comme la recherche avait pour but de donner une image des paysages avant l'occupation, les données se référant à la végétation ont pris

en considération la végétation originelle. Pour cela, une reconstitution des limites de la végétation originelle a été élaborée à partir des documents cartographiques disponibles et des informations extraites de l'histoire de l'occupation. A la fin, le bassin versant a été découpé en 18 écorégions, représentées sur une carte à l'échelle du 1/100 000^{ème}. Une évaluation des résultats a été faite à travers la corrélation de la distribution de données biotiques et abiotiques issues d'autres recherches avec celles des écorégions délimitées. La concordance entre le patron spatial des données obtenus et le patron spatial des écorégions délimitées a validé les limites définies par Bryce et Clarke (1996).

En Nouvelle Zélande, Harding et Winterbourne (1997) ont travaillé aussi sur les écorégions. Leur proposition était de « développer une classification d'écorégions pour l'île du sud de la Nouvelle-Zélande, basée sur les facteurs climatiques et géomorphologiques considérés comme importants au point d'influencer la distribution et l'abondance des biotopes terrestres et aquatiques » (HARDING et WINTERBOURNE, 1997). Le territoire Néo-Zélandais comptait déjà quelques propositions de classification, mais les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants. Les limites établies entre les régions étaient assez arbitraires, de sorte qu'il y avait un fort degré de généralisation entre les écorégions. Ainsi, Harding et Winterbourne (1997) ont-ils lancé une nouvelle proposition de régionalisation, basée sur l'intégration des critères dits « déterminants pour le fonctionnement et la structure des écosystèmes ».

Le processus d'identification des écorégions a utilisé six critères : 1) la division des régions climatiques de la Nouvelle Zélande ; 2) les normales de précipitation ; 3) le relief (altitude et pente) ; 4) la végétation (originelle et du sol) ; 5) les types de sols ; 6) la géologie du *bedrock*. L'intégration de ces critères a été faite dans un SIG, où les facteurs de contrôle ont été superposés deux à deux (géologie du *bedrock* et sols ; régions climatiques et précipitations ; relief et végétation). A partir de ces croisements, trois cartes ont été produites. La superposition de ces trois cartes a donné les limites des 12 écorégions de l'île du sud de la Nouvelle-Zélande. La validation de la classification obtenue a été faite par la comparaison avec les limites des régions biogéographiques et d'occurrence de certains éléments biotiques, décrits dans d'autres recherches.

A la différence du travail fait par Harding et Winterbourne (1997) en Nouvelle-Zélande, Bothale *et al.* (1998) ont fait une proposition de délimitation d'éco-bassins versants dans le bassin de l'Erau, en Inde. Les éco-bassins versants sont des « bassins versants homogènes qui possèdent les mêmes caractéristiques de développement des ressources naturelles et d'aménagement » (BOTHALE *et al.*, 1998). En fait, la différence entre les éco-bassins versants et les écorégions repose sur la délimitation spatiale : les éco-bassins versants sont tracés en respectant les limites des sous-bassins hydrographiques. Chaque sous-bassin hydrographique appartient à une seule classe, tandis que le dessin des écorégions ne respecte pas les limites des sous-bassins hydrographiques ; de même, un sous-bassin donné peut contenir plusieurs écorégions dans ses limites.

De façon similaire à la recherche faite par Harding et Winterbourne (1997), le travail de Bothale *et al.* (1998) a utilisé les SIG mais, de manière différente de la recherche néo-zélandaise, l'auteur a beaucoup utilisé les outils de la télédétection pour arriver à la délimitation des régions. Le choix de l'utilisation de la télédétection est justifié en raison de l'extension du bassin versant d'étude, en raison de l'économie de temps et de ressources, et en raison de la qualité et de la fiabilité des données sortantes.

Avec pour objectif de « donner une base scientifique à l'aménagement du bassin versant » (BOTHALE *et al.*, 1998), la méthodologie de délimitation proposée (Figure 8)

est partie des images satellitales pour créer une base de données dont ont été extraites les cartes d'usage du sol et de l'hydrogéomorphologie. Parallèlement, les courbes de niveau ont été extraites des cartes topographiques et le traitement de ces données altimétriques a donné lieu à un Modèle Numérique du Terrain (MNT). Toujours en environnement numérique, le MNT a été traité de façon à définir automatiquement les limites des sous-bassins hydrographiques et la pente. L'hydrographie a été aussi extraite des cartes topographiques, et des traitements SIG ont permis le calcul de cinq paramètres morphométriques pour chacun des 135 sous-bassins : 1) ratio de bifurcation ; 2) longueur totale des chenaux ; 3) densité de drainage ; 4) nombre total de chenaux ; 5) circularité. Les valeurs descriptives (minimum, moyenne, maximum, écart type) de chaque paramètre morphométrique ont été calculées.

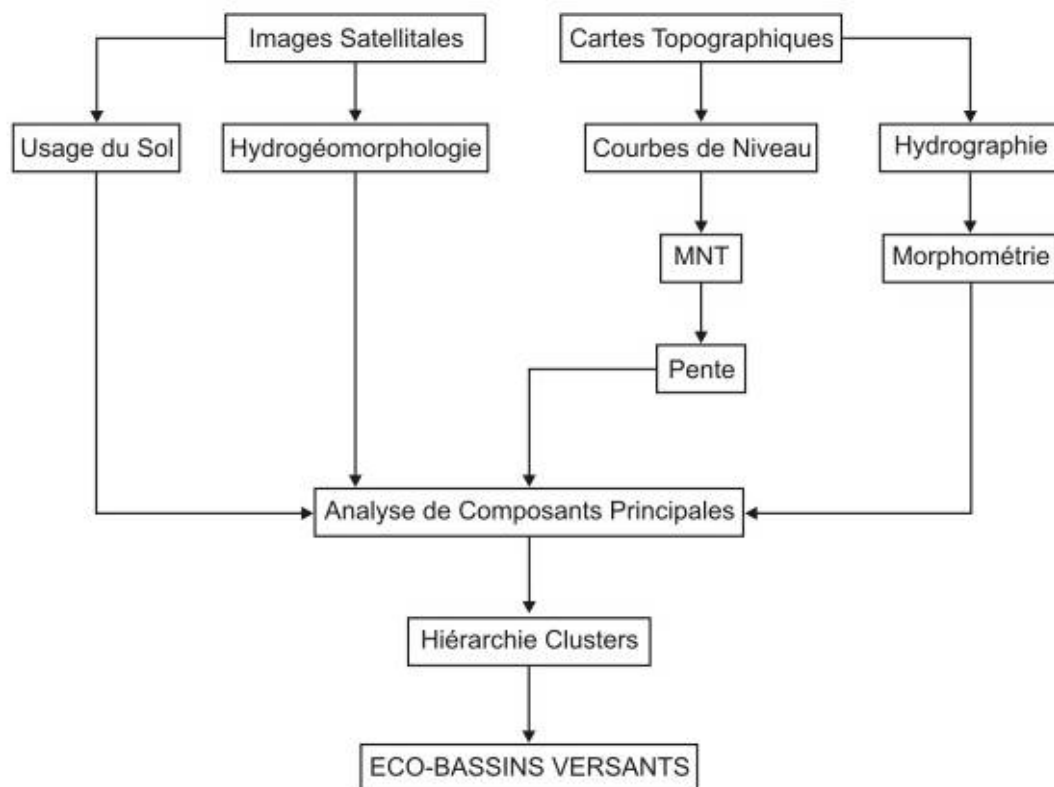


Figure 8. Schéma méthodologique pour la délimitation des éco-bassins versants. Source : Bothale et al. (1998).

La synthèse de toutes les données générées a été faite par l'application d'une Analyse en Composants Principales (ACP). Le résultat de l'ACP a donné 100 groupes de sous-bassins. En utilisant la technique de l'analyse hiérarchique de clusters, plusieurs regroupements ont été faits. Ainsi des 100 groupes sortants de l'ACP, 50 éco-bassins versants ont été délimités dans un regroupement. Après d'autres regroupements, le résultat final a été obtenu : les 50 éco-bassins versants ont été rassemblés en 9 écorégions.

En Europe, en 2000, le Parlement Européen a approuvé la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE). Cette directive a fixé l'objectif d'atteindre, en 2015, le bon état des milieux naturels en préservant les milieux en bon état et en récupérant les milieux dits artificialisés. La mise en œuvre de la directive était prévue en deux phases : la première était un diagnostic général des conditions des milieux ; la deuxième était la phase de restauration des milieux qui n'ont pas été considérés comme étant en bon état. Pour le développement de la première

phase, la DCE permet de choisir entre deux systèmes typologiques : un système fermé, basé sur la délimitation d'écorégions à partir de paramètres et de classes bien définis ; ou un système plus ouvert, avec l'utilisation de plusieurs paramètres optionnels. Les deux options sont basées sur des caractéristiques abiotiques et biotiques, et elles doivent être travaillées au minimum avec une base géographique comprenant la géologie, l'altitude et la taille des cours d'eau (SCHMITT, 2001 ; WASSON et al. 2002, 2004).

A fin de s'ajuster à la DCE, un groupe de chercheurs du CEMAGREF de Lyon (WASSON et al 2002, 2004) a lancé une proposition de délimitation d'hydro-écorégions pour la France métropolitaine. Pour cette délimitation, les trois facteurs de contrôle, la géologie, le relief et le climat, ont été analysés. La carte géologique a donné une idée des différents compartiments lithologiques et des aspects structuraux, mais aussi des autres variables susceptibles d'influencer la dynamique des cours d'eau, comme par exemple la perméabilité des roches et le type de charge sédimentaire disponible. L'élaboration d'un MNT au pas de 250 mètres a rendu possible l'analyse du relief. Des informations comme les niveaux hypsométriques et les pentes ont été extraites de ce modèle. Les données climatiques de précipitation et température ont été incluses dans cette analyse, parfois mises en rapport avec les aspects de la végétation naturelle et du bilan hydrique. Outre ces informations, des cartes géomorphologiques et hydrogéologiques ont été aussi consultées. La délimitation des hydro-écorégions a été faite dans un SIG, à l'échelle de 1/1 000 000, par la superposition des couches d'information portant sur les facteurs de contrôle. Le dessin des limites a été fait de façon visuelle, en cherchant à représenter les discontinuités régionales observées pour chaque paramètre. Le croisement de ces discontinuités a donné comme résultat la carte des hydro-écorégions de la France métropolitaine. La délimitation finale des hydro-écorégions a été faite de façon hiérarchisée, en considérant l'emboîtement des facteurs de contrôle dans les cours d'eau (Figure 9). Ainsi, les 22 hydro-écorégions de premier niveau représentées sur la carte de synthèse ont été subdivisées, ce qui a donné comme résultat 117 hydro-écorégions de deuxième niveau. La validation des résultats a été faite par la comparaison avec d'autres travaux de classification des éléments biotiques et abiotiques.

La délimitation des hydro-écorégions mise en œuvre dans la France métropolitaine a été ultérieurement faite dans les territoires d'outre-mer de la Martinique et de la Guyane Française (CHANDESRIS et al, 2005a et b). De la même façon qu'en France métropolitaine, les facteurs de contrôle primaires (Figure 9) ont été utilisés pour la délimitation des hydro-écorégions de premier niveau. Des facteurs de contrôle secondaires ont permis la délimitation d'hydro-écorégions de deuxième niveau.

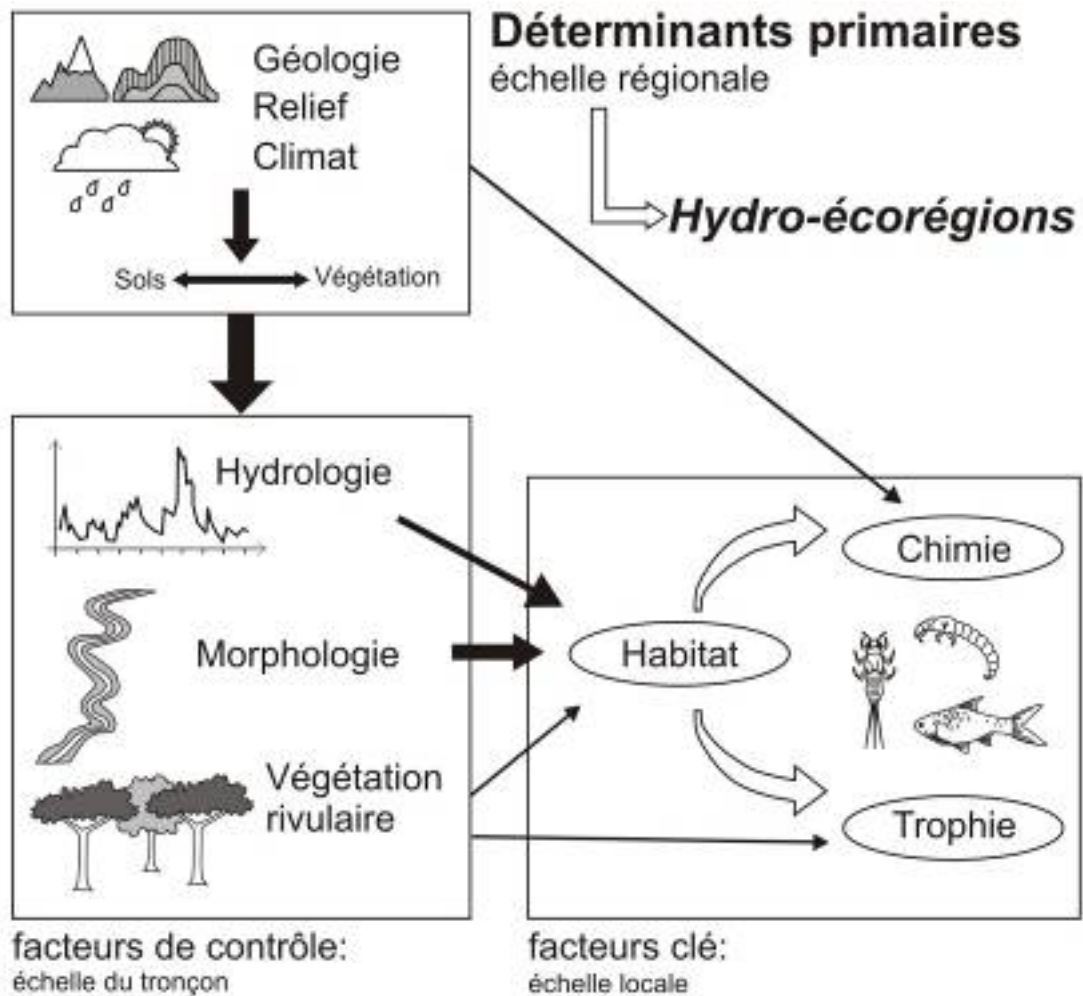


Figure 9. Schéma de l'emboîtement spatial des facteurs de contrôle. Source : Chandesris et al. (2005a et b).

1.5. Les enjeux de la gestion des eaux au Brésil

1.5.1. La mise en œuvre des bases légales et institutionnelles

La législation sur l'eau au Brésil a commencé pendant la période coloniale, quand des lois ont réglementé les droits de possession des ressources ou ont encadré des règlements pour la santé publique. En 1934, le Congrès national a approuvé le Code des Eaux, considérée comme la première loi spécifique sur les ressources en eau au Brésil. Le Code des Eaux donnait au gouvernement le droit de contrôler et stimuler l'usage industriel des eaux (MMA, 2003). A cette époque, le Brésil envisageait devenir un pays industrialisé, et le contrôle des eaux par le gouvernement était stratégique pour le succès de cette initiative. Jusqu'en 1988, la posture du gouvernement et des lois brésiliennes était de stimuler le développement de l'infrastructure du pays en profitant de l'abondance de ressources disponibles. Après la promulgation de la Constitution Fédérale de 1988, le gouvernement et la législation

ont adopté une posture plus prudente par rapport à l'exploration de l'environnement. Pour comprendre les enjeux de la gestion des eaux au Brésil, il faut comprendre la formation des bases légales et institutionnelles que se sont mises en place après la promulgation de la Constitution Fédérale de 1988.

La Constitution de 1988 a mis fin au concept d'eau comme bien privé, en en faisant un bien public rattaché au domaine de l'Etat Fédéral et des Etats. Cette nouvelle Constitution a donné à l'Etat Fédéral les compétences légales pour l'institution d'un système national d'aménagement des ressources en eau. De leur côté, les Etats ont reçu le droit de créer leur propre politique locale pour l'aménagement des leurs ressources en eau. Ainsi, entre 1988 et 1991, avant la présentation de la loi fédérale sur la politique nationale des ressources en eau, quelques Etats avaient déjà mis en pratique leur propre politique.

En 1991, le gouvernement fédéral a présenté au Congrès National le projet de loi pour la création de la Politique Nationale des Ressources en Eau et du Système National de Gestion des Ressources en Eau (Figure 10). Ce projet est resté longtemps entre les mains du Congrès, car il a fait l'objet de plusieurs propositions de correction et de substitution.

Malgré le caractère non défini de la Politique Nationale des Ressources en Eau, en 1995 le Ministère de l'Environnement changea son nom en MMA – *Ministério do Meio Ambiente* (Ministère de l'Environnement). Dans le nouveau ministère, a été créé le SRH – *Secretaria de Recursos Hídricos* (Secrétariat des Ressources en Eau). La première demande du gouvernement fédéral au nouveau secrétariat a été de faire accepter l'approbation par le Congrès de la Politique Nationale des Ressources en Eau. En 1997, après environ 6 ans de débat, cette politique a été finalement approuvée et validée. En 1998, le gouvernement fédéral a installé le CNRH – *Conselho Nacional de Recursos Hídricos* (Conseil National des Ressources en Eau), entité responsable de la formulation des lois se référant aux ressources en eau et de l'articulation entre le niveau national, le niveau des états et celui des usagers de l'eau. En 2000 a été créée l'ANA – *Agência Nacional de Águas* (Agence Nationale des Eaux), entité responsable de la mise en œuvre de la politique des ressources en eau, de la supervision, du contrôle et de l'évaluation des actions découlant de l'application des lois, du contrôle des conditions d'opération des réservoirs et du soutien technique aux études gouvernementales. La SRH, avec la participation de l'ANA et du CNRH ont lancé l'élaboration du PNRH – *Plano Nacional de Recursos Hídricos* (Plan National des Ressources en Eau).

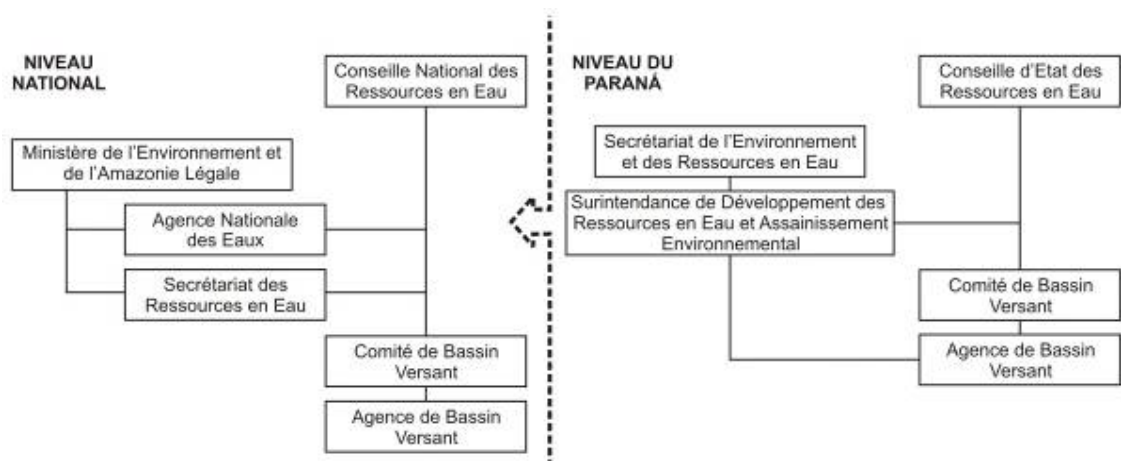


Figure 10. Schéma organisationnel du système national et de celui de l'Etat du Paraná de gestion des ressources en eau.

1.5.2. Le Plan National de Ressources en Eau

Ces dernières années, les besoins en eau du Brésil ont fortement augmenté, principalement en raison des changements démographiques et de la croissance économique. Cela a fait que le Brésil a subi une dégradation de ces ressources en eau, principalement celles qui sont proches des grands centres urbains. L'expansion de l'agriculture et l'augmentation des surfaces cultivées ont contribué aussi à l'augmentation de la consommation d'eau, l'irrigation étant responsable d'à peu près 56 % de la demande totale en eau du pays (MMA, 2003, 2006). La distribution inégale des ressources en eau sur le territoire brésilien est aussi un facteur qui rend difficile la gestion des ressources en eau. Les conflits entre les usagers de l'eau sont de plus en plus fréquents, principalement dans les régions les plus densément peuplées. C'est dans ce contexte qu'a été élaborée la première version du PNRH – *Plano Nacional de Recursos Hídricos* (Plan National des Ressources en Eau).

Le PNRH est un "plan stratégique de longue durée, négocié entre les pouvoirs publics, les usagers et les communautés, et qui a pour but de donner des fondements à la politique d'aménagement des ressources en eau et de l'orienter la mise en œuvre, en proposant des directives et des grands objectifs pour leur gestion » (MMA, 2003). La construction du PNRH a été faite en prenant en considération cinq prémisses :

- La première version est produite sans détails ; c'est le point de départ de l'élaboration d'un plan plus détaillé dans le futur ;
- Le PNRH doit être le résultat d'un processus permanent d'élaboration, qui perfectionne, mette à jour, qui corrige et approfondisse les thèmes à prendre en compte en fonction des possibilités et des demandes ;
- Le PNRH doit orienter les politiques publiques concernant les ressources en eau à l'échelle nationale. Il institue aussi le découpage territorial à utiliser pour les plans d'aménagement (les Régions Hydrographiques) ;
- Le PNRH doit prendre en compte les analyses et les demandes de financement que présentent les composants du Système National d'Aménagement des Ressources en Eau. Il s'agit des entités liées à la question des ressources en eau, qu'elles soient publiques, au niveau de la nation, des états ou des communes, qu'elles soient privées, ou qu'elles relèvent des usagers de l'eau ou des organisations non gouvernementales ;
- Le processus d'élaboration du PNRH, soutenu par la grande majorité de la population brésilienne, devra refléter ses désirs quant à l'usage, au contrôle et à la protection des eaux douces, des estuaires et des côtes.

Le plan a été élaboré en six volumes : 1) Vision nationale ; 2) Diagnostic ; 3) Scénarios et identification des conflits ; 4) Directives et buts ; 5) Programmes nationaux et régionaux ; et 6) Résumé exécutif. Les analyses présentées dans le plan ont été faites aux échelles du 1/1 000 000^{ème} et du 1/5 000 000^{ème} ; les échelles plus fines (le 1/250 000^{ème}) sont recommandées pour les plans élaborés au niveau des états. En réalité, la première version du plan possède un caractère plus centré sur la reconnaissance du territoire, sur la situation actuelle des ressources et sur les problèmes et conflits qui y existent. La plupart des recommandations et des directives présentées dans le PNRH ont pour but d'orienter les études destinées au perfectionnement du plan actuel et à l'élaboration des plans à l'échelle des états.

1.6. La recherche d'une méthode de découpage applicable aux bassins versants du Brésil

1.6.1. La problématique de recherche

La réorganisation de la politique environnementale au Brésil et la rédaction de la première version du Plan National de Ressources en Eau ont changé la posture du pays quant à la gestion de ses ressources. Après 1988, le Brésil, toujours reconnu comme un pays bien doté en eau, s'est éveillé à quelques problèmes qui, jusqu'à cette date n'étaient pas au centre des discussions: la distribution inégale des ressources sur le territoire, la croissante augmentation de la demande, les fréquents conflits entre les usagers de l'eau et la possibilité de problèmes de pénurie dans un avenir pas très lointain.

L'élaboration du PNRH peut être vue comme un premier effort de diagnostic de la situation des ressources en eau au Brésil. Sur la base de ce plan, le gouvernement brésilien s'est proposé de donner une nouvelle direction aux politiques de gestion des eaux dans le pays. Pour que cela devienne possible, il faut que le Brésil réponde aux questions qui sont apparues lors de la construction du PNRH, comme par exemple : « quels sont les problèmes des ressources en eau à l'échelle régionale et quelle est la hiérarchie de ces problèmes en fonction de leur aire d'influence ? », « quelle est la meilleure division spatiale pour les plans de bassins versants ? », ou encore : « quelle doit être l'articulation entre le plan national, celui des états et celui à l'échelle des bassins versants ? » (MMA, 2003, 2006).

Vis-à-vis de la nécessité qu'a le Brésil de mieux connaître son territoire et ses systèmes fluviaux, de travailler ses plans de gestion en échelles emboîtées et de planifier les futures politiques de protection et préservation des eaux, les travaux de classification de cours d'eau et de délimitation de zones homogènes, telles qu'on les a discutées précédemment, peuvent donner un point de départ intéressant à la recherche de solutions aux questions issues de la première version du PNRH. L'utilisation de ces expériences pour la construction d'une méthodologie adaptable à la réalité des bassins versants brésiliens peut apporter une contribution de valeur aux instances qui s'occupent de la gestion des systèmes fluviaux au Brésil.

En considérant les présupposés décrits ci-dessus, ce travail a pour but la construction et l'application d'une approche méthodologique de délimitation de zones homogènes et de sectorisation longitudinale de cours d'eau, qui englobe à la fois l'hydro-écorégion et le tronçon fluvial ; il s'agit de respecter les spécificités des systèmes fluviaux brésiliens et d'appliquer cette méthode au bassin versant de l'Ivaí, dans l'Etat du Paraná.

Le choix du bassin versant de l'Ivaí pour la réalisation de cette recherche ne s'est pas fait au hasard. Ce bassin versant recouvre une surface importante de l'Etat du Paraná. Il s'y trouve quelques unes des plus grandes villes du Paraná, comme Londrina et Maringá. L'Ivaí draine deux régions agricoles fortement contrastées : une région peu développée économiquement à l'amont du bassin (à l'Est), avec une faible densité démographique et une agriculture très traditionnelle, basée sur la main d'œuvre familiale ; une autre région d'occupation récente, avec des zones urbaines planifiées, une agriculture très compétitive tournée vers le marché extérieur (IPARDES, 2004).

Ces dernières années, l'Ivaí et son bassin versant sont devenus le sujet de quelques recherches académiques. En 2003, le GEMA - *Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente* (Groupe d'Etudes Multidisciplinaires de l'Environnement), de l'UEM -

Universidade Estadual de Maringá (Université de Maringá) a réalisé quelques travaux sur l'hydrologie et la géomorphologie de l'Ivaí, concentrés principalement dans la partie aval ; c'est une partie du projet « *Regime Hidrológico e Sedimentação Quaternária no Curso Inferior do Rio Ivaí: Análise Geo-ambiental* » (Régime hydrologique et sédimentation quaternaire du bas cours de l'Ivaí : analyse géo-environnementale). Deux autres études sur les aspects climatologiques du bassin de l'Ivaí ont été aussi récemment publiées (ANDRADE, 2003; BALDO, 2006). Le développement des discussions sur l'Ivaí et son bassin versant n'ont pas produit de résultats effectivement opérationnels jusqu'à présent.

En considérant le paradoxe existant entre le besoin de gestion des ressources en eau et l'absence d'études systématiques sur le bassin versant de l'Ivaí, on s'est posé quelques questions complémentaires: comment le Brésil et l'Etat du Paraná peuvent-ils faire des plans de gestion des ressources sans connaître les caractéristiques des systèmes fluviaux et leur diversité ? Serait-il possible d'établir une méthodologie de sectorisation des cours d'eau applicable au bassin versant de l'Ivaí, mais aussi aux grands bassins versants brésiliens ?

1.6.2. Proposition méthodologique appliquée au cas du bassin versant de l'Ivaí

La quête de réponses pour les questions qui viennent d'être posées passe par le choix d'une méthode de délimitation de zones homogènes et de sectorisation longitudinale des cours d'eau qui soit applicable au cas du bassin versant de l'Ivaí ainsi qu'aux grands cours d'eau brésiliens.

D'après la recension théorique précédemment présentée, on voit que les méthodes de découpage du réseau hydrographique sont relativement nombreuses dans la littérature hydrologique, écologique et géomorphologique. Cependant, la grande majorité de ces méthodes a été développée dans les pays de climat tempéré, sur des cours d'eau qui disposent de données abondantes, et à l'aide de documents cartographiques généralement très détaillés. La réalité brésilienne est bien autre. Le Brésil est un pays tropical relativement jeune et qui possède un territoire immense drainé par un réseau hydrographique en proportion. En fonction des dimensions du pays, l'utilisation d'une des méthodes déjà existantes, qui demandent fréquemment l'utilisation de données d'échelle très fine, n'est pas simple. Pour cette raison, on a décidé de construire une nouvelle proposition méthodologique qui prenne en compte les particularités des cours d'eau brésiliens, de façon qu'elle soit applicable non seulement au bassin de l'Ivaí, mais aussi à d'autres bassins versants du pays.

La méthode proposée dans ce travail s'appuie sur quatre grands groupes de variables : les facteurs de contrôle du bassin versant, la dynamique hydro-sédimentaire, les caractéristiques morphométriques du profil en long et la distribution des puissances dans le chenal. Le travail sur ces quatre grands groupes de variables a été organisé selon les étapes suivantes :

a) Inventaire des facteurs de contrôle et délimitation des écorégions :

Le travail a commencé par un long inventaire effectué sur le bassin versant de l'Ivaí. On a essayé de rassembler tous les informations disponibles (documents textuels, cartographiques, séries de données, photos aériennes et images satellitaires). Ces matériaux ont été utilisés pour élaborer une description détaillée de tous les aspects naturels et d'occupation du bassin étudié. Ensuite, a débuté le travail de délimitation des écorégions

du bassin versant de l'Ivaí. On a fait le choix d'utiliser les écorégions car cette méthode est une alternative d'application facile, peu coûteuse, et qui *utilise des variables à une échelle plus générale* (NAIMAN *et al.*, 1992). Ceci semble bien s'accorder aux données disponibles pour la réalisation des études fluviales au Brésil.

Selon Bailey (1983), la délimitation des écorégions doit être faite en considérant les « forces sélectives » qui conditionnent les écosystèmes, ce que Harding et Winterbourne (1997) présentent comme les déterminants physiques du fonctionnement des écosystèmes ou **facteurs de contrôle**. La délimitation des écorégions du bassin versant de l'Ivaí a été faite en retenant les facteurs de contrôle utilisés Harding et Winterbourne (1997) : **la géologie, les types de sols, le climat, les précipitations, la végétation originelle et le relief**. Les cartes de chacun des facteurs de contrôle du bassin versant de l'Ivaí ont été superposées deux par deux, conformément à la proposition originelle de Harding et Winterbourne (1997) : la géologie a été superposée aux sols, le climat aux précipitations, et la végétation originelle au relief (Figure 11). Suite à ces superpositions, trois cartes de synthèse ont été élaborées. Une fois obtenues, elles ont elles-mêmes été superposées pour donner lieu à une nouvelle carte de synthèse qui est la carte des écorégions. Les endroits où plusieurs limites de facteurs de contrôle se superposaient ont été considérés comme des limites entre des écorégions distinctes ; les endroits où une partie seulement des limites de facteurs de contrôle se superposaient ont été considérés comme des subdivisions d'une même écorégion. A la fin, chaque écorégion a été caractérisée en fonction des facteurs de contrôle qui la déterminent.

Il est important de préciser que la superposition des cartes n'est pas parfaite car les documents cartographiques dont ont été extraites les informations sur les facteurs de contrôle présentent des différences d'échelle et de précision. Il faut être aussi conscient que les limites entre les écorégions ne sont pas des limites franches, mais parfois de larges zones de transition.

b) Étude du fonctionnement hydro-sédimentaire amont-aval :

Une fois connus les facteurs de contrôle du bassin versant, a débuté la deuxième étape : l'étude des flux du bassin versant. Le régime de débits d'un cours d'eau est caractérisé en fonction de la source d'alimentation, de la magnitude des débits, de leur distribution saisonnière (à différentes échelles temporelles), de leur fréquence et de leur période de retour. Pour comprendre la dynamique hydrologique du bassin de l'Ivaí, on a utilisé les séries de débits journaliers des 17 stations hydrométriques qui équipent le bassin versant, surtout les données des 8 stations qui se trouvent dans l'axe de drainage principal. Ces séries de données ont été téléchargées à partir de la base de données HIDROWEB, base gérée par l'ANA – Agência Nacional de Águas (Agence Nationale des Eaux), MMA – Ministério do Meio Ambiente e Amazônia Legal (Ministère de l'Environnement et de l'Amazonie Légale).

Afin de mieux comprendre la distribution amont-aval des débits, on a travaillé sur la magnitude et distribution saisonnière des débits moyens, de crue et d'étiage. D'autres débits caractéristiques ont aussi été calculés, comme le débit de pleins bords, les débits de crue DC₁₀ et DC₃₀, et le débit d'étiage DC₃₅₅, ces trois derniers étant extraits de la courbe des débits classés (REMENIERAS, 1980 ; GIRET, 2007). De façon complémentaire, on a recouru aussi à l'utilisation de trois indices adimensionnels : le coefficient mensuel des débits et le rapport des moyennes mensuelles extrêmes (PARDÉ, 1933), qui permettent comprendre la distribution et la variabilité des débits au long de l'année, et le coefficient de tarissement α , un coefficient adimensionnel qui exprime la vitesse avec laquelle les nappes souterraines se vidangent (MAILLET, 1905 ; GONOT, 1996).

En ce qui concerne la dynamique sédimentaire, le bassin de l'Ivaí a été caractérisé par des échantillons de sédiments prélevés sur les berges, sur les terrasses et sur la plaine alluviale. Le prélèvement des sédiments a eu lieu pendant les travaux sur le terrain réalisés en janvier 2007. A cette occasion, 63 échantillons ont été prélevés sur différents profils morpho-topographiques qui ont fait l'objet de relevés descriptifs. Ces échantillons ont été préparés au LRGE - Laboratoire Rhodanien de Géographie de l'Environnement (Université Lumière Lyon 2). La granulométrie des échantillons a été déterminée au Laboratoire des Sciences de l'Environnement (Ecole Nationale de Travaux Publics de l'Etat de Vaulx-en-Velin), en utilisant un granulomètre laser. Les résultats des analyses granulométriques ont été interprétés à l'aide du diagramme CM, proposé par Passega (1957, 1963, 1964, 1969). Ce diagramme est un graphique de type nuage de points, à axes gradués de façon logarithmique où l'on place les valeurs C et M extraites de la courbe cumulée de distribution des tailles de particules. La valeur M correspond au diamètre médian des particules de l'échantillon (le d_{50}), tandis que la valeur C correspond au premier percentile de l'échantillon ou le diamètre des particules qui n'est dépassé que par 1% de l'échantillon. De la position des points sur le graphique, on peut inférer les mécanismes de transport et de dépôt des sédiments dans chaque tronçon.

Tous les paramètres hydrologiques ont été listés et les changements de comportement ont été portés sur un tableau. Une pré-sectorisation hydrologique a été faite en comptabilisant les sections de mesure où plusieurs changements de comportement des variables ont été observés. Les résultats de l'image CM ont ensuite été ajoutés, de façon à raffiner le découpage préalablement fait. A la fin, l'axe principal de drainage a été pré-sectorisé en fonction de la dynamique hydro-sédimentaire.

c) Étude morphométrique du profil en long :

Selon Astrade (2005), « le profil en long d'une rivière est d'une importance déterminante dans la mesure où il affecte la répartition des forces hydrauliques, notamment en ce qui concerne la puissance et les forces de cisaillement ». Pour l'élaboration du profil en long, on a téléchargé sur internet, sur le site de l'Université de Maryland, les 8 images altimétriques du projet SRTM qui recouvrent le bassin de l'Ivaí. Ces images ont été rassemblées pour former une mosaïque de données altimétriques. Ensuite, le profil en long de l'Ivaí en a été extrait. Ce profil a été découpé en plusieurs secteurs en fonction de variations de pente, et chaque secteur a été caractérisé en fonction de ses caractéristiques morphométriques. Pour les derniers 240 km de l'Ivaí on a utilisé aussi les informations issues du rapport d'une expertise géologique réalisée par le Secrétariat de Transports du Paraná pour une recherche sur la navigabilité dans la basse Ivaí (SETR, 1982).

D'après le profil en long, l'axe principal de drainage a été pré-sectorisé en unités de même forme et pente.

d) Étude sur la distribution des puissances de chenal :

La puissance de chenal est l'énergie potentielle dépensée par un cours d'eau lorsque l'eau se déplace au long d'un gradient d'énergie. Le calcul de la puissance est important car elle exprime la capacité que présente un cours d'eau de modifier son lit, de remobiliser et de transporter les sédiments. Pour calculer les puissances brutes et spécifiques, on doit disposer des valeurs de débits de pleins bords, de la pente et de la largeur du lit mineur.

L'étude de la distribution des puissances dans l'Ivaí a commencé par le calcul des débits de pleins bords pour chacune des sections de mesure. Pour ce faire, on a utilisé les séries

de débits maximaux annuels de chaque section de mesure. Sur cette série, on a appliqué la loi de probabilités de Gumbel (BRAVARD et PETIT, 2002) pour trouver le débit d'une période de retour de 1,5 an. Dans les cours d'eau sous climat tempéré, le débit de pleins bords a une période de retour de 1,5 an. Du fait de l'inexistence d'informations sur les débits de pleins bords dans chaque section, on a extrapolé cette règle à l'Ivaí, un cours d'eau à la transition du climat subtropical et du climat tropical.

Les valeurs de pente utilisées pour le calcul des puissances ont été extraites du profil en long précédemment élaboré. Comme on ne dispose pas de données très détaillées sur la pente de la ligne d'énergie, on a utilisé la valeur de la pente moyenne du tronçon, cette valeur ne devant pas être très différente en théorie. En ce qui concerne la largeur du lit mineur, on a utilisé les données mises à disposition par la SUDERHSA. Pour certaines sections, la largeur du lit mineur a été mesurée à partir de photos aériennes et d'images satellitales de moyenne et haute résolution spatiale. Pour chaque tronçon situé entre deux stations de mesure, ou entre une station de mesure et une limite de changement de pente, on a établi la largeur minimale et la largeur maximale du lit mineur de façon à pouvoir calculer les puissances spécifiques minimale et maximale.

D'après les résultats, l'axe principal de drainage a été pré-sectorisé en fonction des valeurs de puissance et de leur variation amont-aval, de façon semblable à ce qui a été fait par Bernot *et al.* (1996) et par Astrade (2005).

e) Synthèse et élaboration de la sectorisation finale :

L'élaboration de la sectorisation finale a été faite par la synthèse des pré-sectorisations réalisées au long du travail : la pré-sectorisation en écorégions, la pré-sectorisation du profil en long, la pré-sectorisation hydro-sédimentologie, et la pré-sectorisation en fonction des puissances dans le chenal (Figure 11). La sectorisation finale a été faite à l'aide d'une carte du réseau hydrographique du bassin de l'Ivaí. Cette carte a été superposée à chacune des cartes issues des pré-sectorisations, et les tronçons ont été peu à peu séparés en fonction des limites des découpages préalablement faits. Les affluents ont été découverts en fonction d'au moins 6 variables, tandis que l'axe principal de drainage a été découpé en fonction d'au moins 26 variables. Après le travail de découpage, chaque type de cours d'eau identifié a été décrit en fonction de ses caractéristiques. A la fin, une discussion théorique sur la méthode mise au point et sur sa transférabilité à d'autres bassins versants est proposée.

La méthode construite (Figure 11) pour la sectorisation du bassin versant de l'Ivaí semble satisfaire aux conditions préalablement imposées au travail sur ce bassin versant, et même sur d'autres bassins versants au Brésil. Si d'un côté elle semble une méthode simple, qui ne demande pas une grande masse de données, d'un autre côté on peut dire qu'elle privilégie les données qui contrôlent réellement le fonctionnement hydro-géomorphologique du bassin versant. Pour cette raison, elle possède les atouts nécessaires pour produire une bonne sectorisation des cours d'eau étudiés.

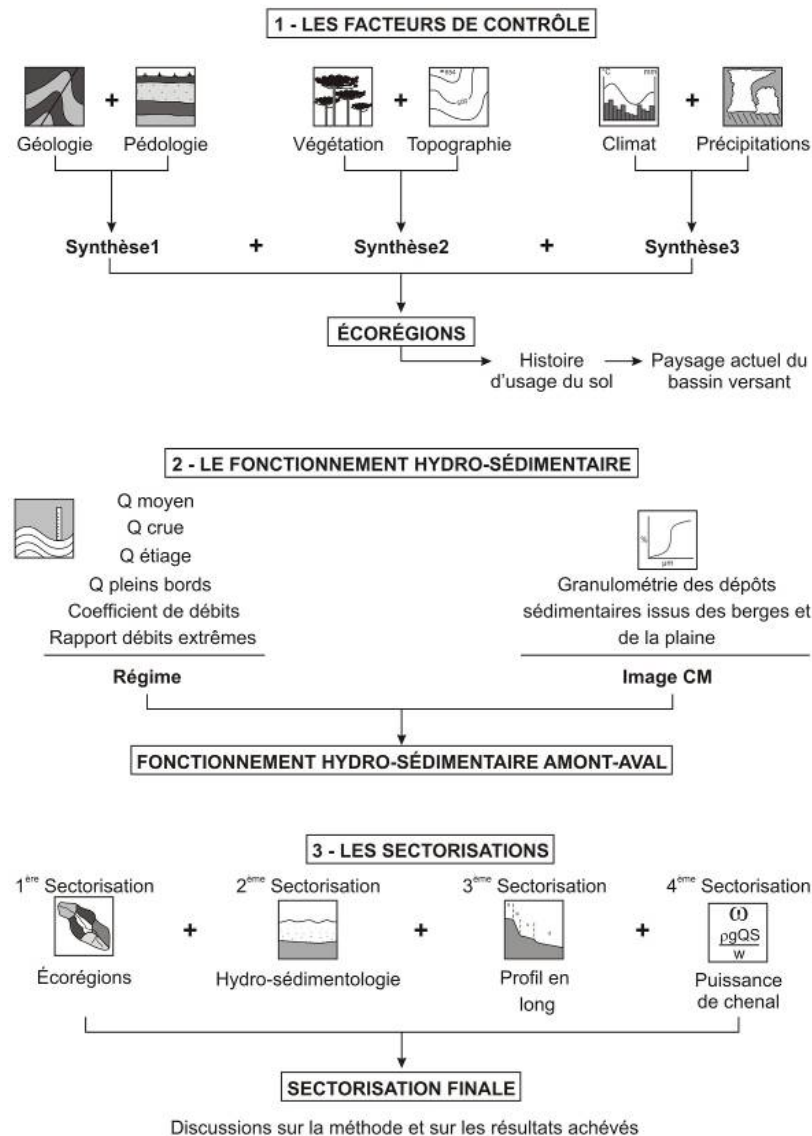


Figure 11. Schéma méthodologique développée pour la sectorisation du bassin de l'Ivaí.

1.7. Conclusions de la Première Partie

L'interférence de l'homme avec les systèmes fluviaux n'est pas récente. Il y a plus de quatre mille ans les chinois construisaient déjà des digues pour se protéger des inondations ; il y a plus de trois mille ans les Mésopotamiens ont construit un canal pour la navigation ; il y a plus de deux mille ans et les Egyptiens profitaient du régime des crues pour l'agriculture (BETHEMONT, 2002). Le besoin d'eau, soit pour la consommation, soit pour l'usage agricole ou industriel, a poussé l'homme à interagir avec les systèmes fluviaux. Au fur et à mesure que cette interaction s'est intensifiée, la complexité des systèmes fluviaux devenait de plus en plus évidente. A fin de comprendre cette complexité, plusieurs systèmes de classification ont été créés.

L'analyse de quelques travaux portant sur la classification des systèmes fluviaux a permis d'observer que les objectifs des classifications varient en fonction des besoins de chaque pays ou continent et en fonction des objectifs retenus. Selon Mosley (1987) « les caractéristiques des cours d'eau mises en évidence dans les diverses méthodes de classification peuvent varier largement, en fonction de la proposition de celui qui les met en œuvre ».

Les premiers travaux développés aux Etats-Unis se sont concentrés principalement sur la compréhension de la morphologie des cours d'eau et des processus dont ils sont le siège. Les politiques d'avancée de l'occupation vers l'ouest, l'expansion des domaines agricoles irrigués et la construction des usines hydroélectriques ont été les facteurs qui ont motivé ce type de recherche. En Europe, où les cours d'eau sont utilisés depuis longtemps, les travaux de classification procèdent d'une autre logique, plus ciblée sur la récupération des écosystèmes fluviaux. Ces dernières années, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau a fixé comme objectif la récupération des cours d'eau anthropisés d'ici 2015. Ceci a donné une nouvelle motivation aux études de segmentation et classification fluviale, qui cherchent maintenant à définir des états de référence écologique pour chaque tronçon à réhabiliter. Dans les pays d'occupation plus récente, comme la Nouvelle-Zélande, les travaux de classification présentent des objectifs qui mêlent la recherche de la compréhension du fonctionnement des systèmes fluviaux et le besoin de mieux connaître la diversité de ressources existant sur le territoire.

En ce que concerne le Brésil, le pays a adopté une nouvelle posture et il a récemment changé sa politique d'aménagement de l'environnement et des systèmes fluviaux. L'élaboration de la première version du PNRH - Plan National des Ressources en Eau signifie un premier effort pour connaître la distribution et l'état actuel de conservation des cours d'eau. Cette première version du PNRH étant encore très généraliste, le gouvernement envisage pour les prochaines années la reformulation du plan à une échelle plus détaillée, et la construction des plans de ressources en eau au niveau des états.

L'aménagement des ressources en eau au Brésil n'est pas simple et se confronte à l'absence de données. Les bassins versants brésiliens couvrent de grandes surfaces ; la plupart d'entre eux ne possèdent pas de longues séries d'informations hydrologiques ; certains bassins versants ne possèdent pas d'informations sur la production et le transport de sédiments ; les documents cartographiques disponibles sont souvent à des échelles trop petites. La construction d'une méthode de travail pour l'aménagement des bassins versants brésiliens doit prendre en compte toutes ces particularités. Il n'était pas raisonnable de choisir une méthode parmi celles qui existent et de l'appliquer au Brésil ; il était préférable d'utiliser l'expérience des travaux faits dans certains pays pour construire une méthode adaptée aux bassins versants du Brésil.

En considérant ces limites, la méthode des écorégions semble bien adaptable au cas brésilien. Elle ne demande pas une grande quantité d'informations, elle s'adapte à plusieurs échelles spatiales (échelles emboîtées), elle donne une bonne idée du fonctionnement des hydrosystèmes et elle peut orienter l'aménagement des ressources en eau. Ainsi, l'utilisation du concept d'écorégion peut-il être une bonne alternative aux besoins du gouvernement brésilien.

L'utilisation de la télédétection semble aussi bien adaptable au cas brésilien. La télédétection est utile dans les bassins versants étendus ou dans les bassins versants dépourvus de documents cartographiques de bonne qualité (BOTHALE *et al.*, 1998).

Deuxième partie - L'hydrosystème Ivaí et ses facteurs de contrôle

2.1. Le bassin versant de l'Ivaí

Le bassin versant de l'Ivaí (Figure 12) est situé dans la partie sud du territoire brésilien, dans l'Etat du Paraná. Ce bassin versant est, après le bassin versant de l'Iguaçu, le deuxième plus important de l'état ; il occupe une surface de 36 553 km², qui correspond à environ 18 % de la surface de l'état du Paraná.

L'Etat du Paraná a été géomorphologiquement divisé par Maack (1969) en cinq unités : trois plateaux plus la *Serra do Mar* (chaîne de montagnes côtières), et la plaine côtière (Figure 13). Les limites du bassin versant de l'Ivaí correspondent à d'importantes lignes de partage des eaux de l'Etat du Paraná. La partie méridionale du bassin versant, proche des sources de l'Ivaí, est située sur le 2^{ème} « Plateau Paranaense³ » (MAACK, 1969), et est délimitée par la ligne de partage des eaux placée entre les bassins versants de l'Ivaí et de l'Iguaçu. Cette ligne est orientée ENE et possède des altitudes comprises entre 1 250 m et 1 000 m.

A partir de ce secteur la partie du bassin versant située en rive droite est orientée nord ; elle passe par la *Serra dos Dias* et la *Serra dos Macacos*, en direction des monts de la *Serra da Ortigueira*. Les altitudes oscillent entre 1 000 m et 900 m. A partir des monts de la *Serra da Ortigueira*, la limite droite du bassin versant s'oriente nord-ouest, en passant encore par la *Serra da Ortigueira*, et ensuite par les monts de la *Serra do Cadeado*, jusqu'à la ville d'Apucarana. La *Serra do Cadeado* est une dénomination locale donnée à l'escarpement qui marque le contact entre le 2^{ème} et le 3^{ème} Plateau Paranaense (MAACK, 1969). En fonction de cet escarpement, les altitudes, très variées, sont comprises entre 800 m et 1 000 m.

Après avoir traversé la ville d'Apucarana, la limite, qui est déjà sur le 3^{ème} Plateau Paranaense, fait une inflexion vers le sud-ouest, et prend cette direction jusqu'à la ville de Jandaia do Sul. Les altitudes sont autour de 800 m. À partir de la ville de Jandaia do Sul, la limite prend la direction nord-ouest et suit la grande ligne de partage des eaux qui va de la ville de Mandaguari à la ville de Paranaíba, en passant par la ville de Maringá. Cette grande ligne de partage des eaux représente le sommet du Plateau d'Apucarana, un des grands blocs du 3^{ème} Plateau Paranaense définis par Maack (1968). Sur ce bloc, les altitudes varient entre 800 m et 500 m.

³ Le mot *paranense* est l'adjectif correspondant à l'Etat du Paraná, dans la région sud du Brésil. Ce mot sera utilisé au long de cette thèse.

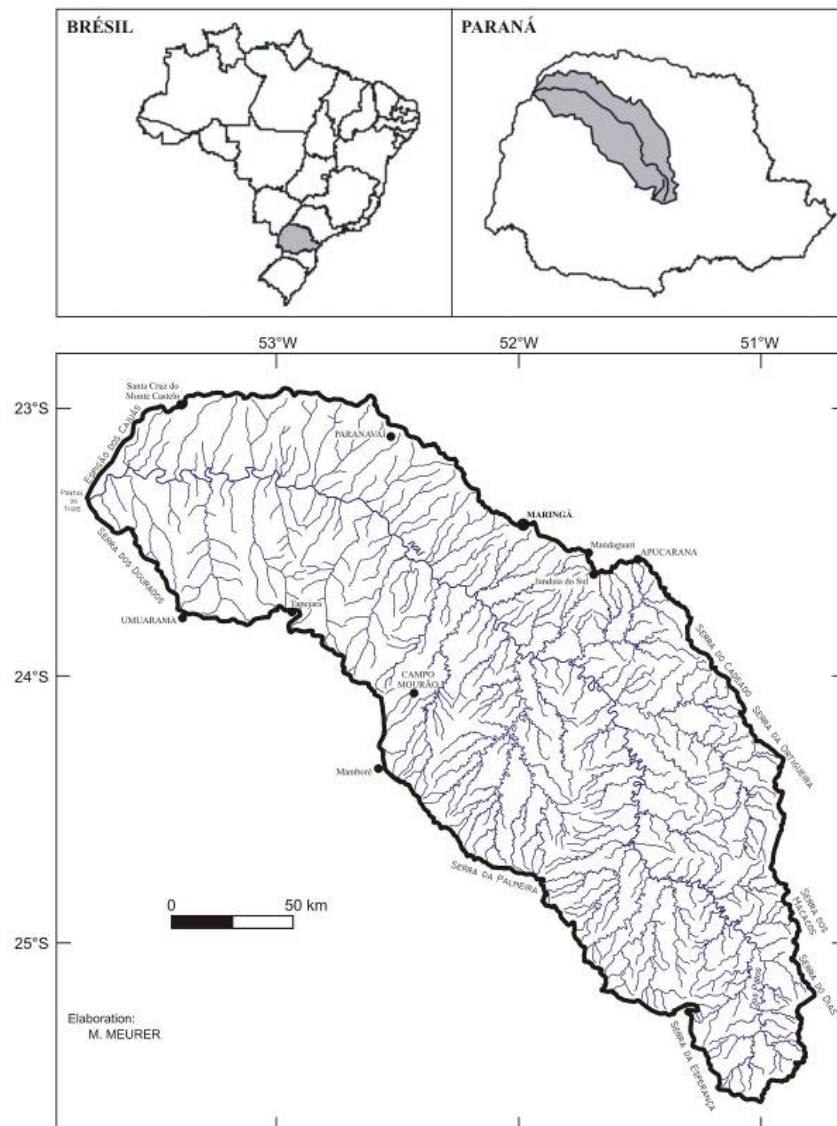


Figure 12. Le bassin versant de l'Ivaí.

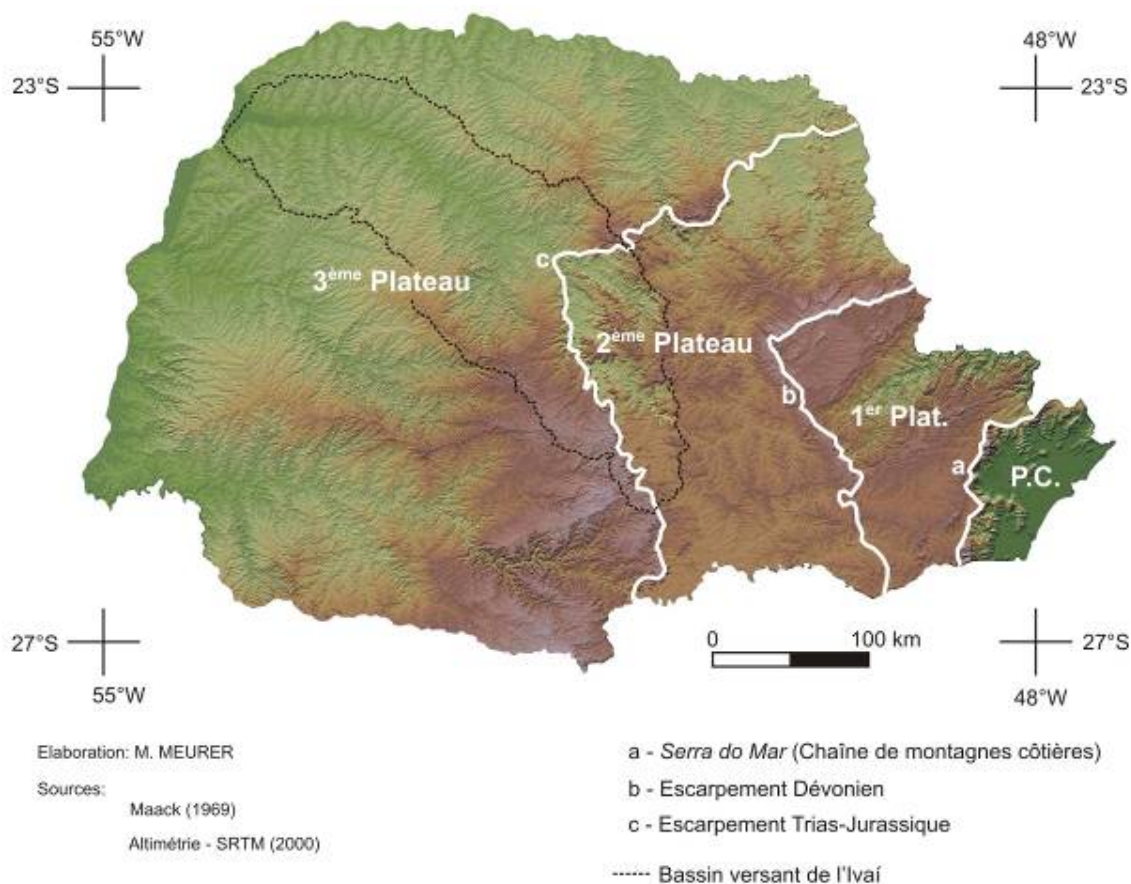


Figure 13. Localisation du bassin versant de l'Ivaí par rapport aux unités géomorphologiques de l'Etat du Paraná.

Ensuite, environ 15 km après la ville de Paranavaí, la limite du bassin versant prend la direction est jusqu'à la ville de Santa Cruz do Monte Castelo. Dans ce secteur, les altitudes varient entre 500 m et 400 m. Depuis la ville de Santa Cruz do Monte Castelo, la limite tourne vers le sud-ouest, en suivant une ligne de hauteurs, l'Espigão dos Caiuás, aux altitudes comprises entre 400 m et 250 m. De là, la limite du bassin versant arrive au Pontal do Tigre, où se trouve la confluence de l'Ivaí et du Paraná.

La limite gauche du bassin versant part du 2^{ème} Plateau Paranaense via les hautes terres de la Serra da Esperança. La Serra da Esperança est la dénomination locale donnée à l'escarpement qui marque le contact entre le 2^{ème} et le 3^{ème} Plateau Paranaenses (Maack, 1969). La ligne de partage des eaux suit la direction préférentielle nord-ouest, en passant par la Serra das Palmeiras jusqu'aux alentours de la ville de Mamborê. Cette ligne de partage des eaux représente le sommet du bloc-plateau de Campo Mourão, un des blocs du 3^{ème}

Plateau Paranaense définis par Maack (1968). Sur ce bloc, les altitudes se trouvent entre 1 000 m et 700 m.

A partir de la ville de Mamborê, la limite suit une direction préférentielle nord-ouest jusqu'à la ville de Tapejara, avec des altitudes comprises entre 700 m et 500 m. Après la ville de Tapejara, la limite du bassin versant s'oriente à l'ouest et suit cette direction jusqu'aux alentours de la ville d'Umuarama.

De ce secteur, la limite tourne en direction du nord-ouest et suit la Serra dos Dourados jusqu'au Pontal do Tigre, où se trouve la confluence entre l'Ivaí et le Paraná. Les altitudes décroissent de 450 m, sur la Serra dos Dourados, à 230 m à la confluence.

L'Ivaí, le cours d'eau qui donne son nom au bassin versant, est un important affluent de rive gauche du Paraná. Il s'appelle Ivaí seulement à partir de la confluence des rivières São João et Dos Patos. A partir de ce point, il court sur 680 km (DESTEFANI, 2005) en suivant une direction préférentielle nord-ouest jusqu'au Paraná. Le débit moyen mesuré à la station située la plus en aval (Station de Novo Porto Taquara), à environ 77 km de la confluence avec le Paraná, est de $686,82 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit maximum mesuré à la même station était de $3\,990 \text{ m}^3/\text{s}$ le 04/10/1993. Quant au débit maximum mesuré sur l'Ivaí, il a été enregistré à la Station de Porto Bananeiras avec $6\,027 \text{ m}^3/\text{s}$ le 19/09/1983 (HIDROWEB, 2006).

Les chenaux de la Dos Patos et de l'Ivaí, qui forment l'axe principal de drainage, présentent une certaine variabilité morphologique amont-aval (Figures 15 et 16). En général, ils sont sinueux mais cette sinuosité est fortement contrôlée par la structure. Les chenaux présentent aussi d'importantes variations de pente et de largeur du lit mineur, qui seront présentées de façon plus détaillée dans les parties suivantes de ce travail. Dans les derniers 100 km, le chenal de l'Ivaí est longé des deux côtés par une plaine alluviale d'une largeur maximale de 10 km. A certains endroits, cette plaine se trouve à un niveau un peu plus élevé que le chenal ; on pense qu'elle a été créée dans des conditions de drainage qui ne sont pas celles qu'on observe aujourd'hui.

Les paysages du bassin versant sont aussi très variables (Figure 16). On retrouve dans le bassin un important escarpement, des collines avec différentes morphologies (tabulaires, arrondies, plus ou moins élevées), différents types de vallées (plus ou moins fermées), différents types d'usage et d'occupations avec différents degrés d'intensité. Tout ceci forme une complexe mosaïque qui sera étudiée au long de ce travail de recherche.

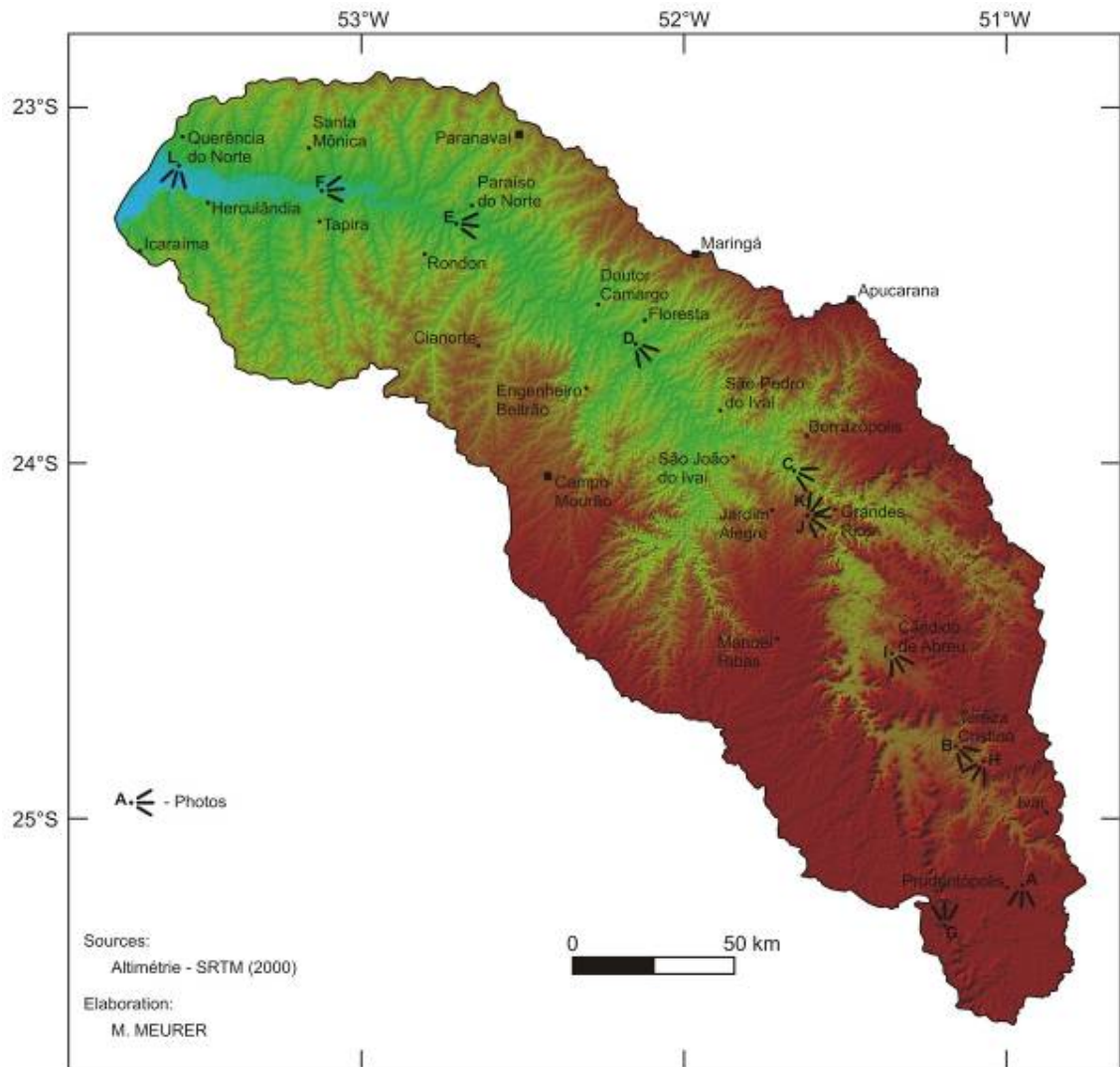


Figure 14. Localisation des photos prises sur le terrain (Figures 15 et 16).



Figure 15. Vues du chenal de l'Ivaí. A) La Dos Patos à Prudentópolis; B) l'Ivaí à Tereza Cristina; C) l'Ivaí à Ubá do Sul; D) l'Ivaí à Engenheiro Beltrão; E) l'Ivaí à Porto Paraíso do Norte; F) l'Ivaí à Tapira.



Figure 16. Les différents paysages du bassin de l'Ivaí. G) Vue du 2^{ème} Plateau à partir de l'escarpement du 3^{ème} Plateau ; H) vue de la vallée de l'Ivaí proche dans la région de la ville d'Ivaí ; I) L'Ivaí vue du pont de Cândido de Abreu ; J) la vallée de l'Ivaí entre les villes de Jardim Alegre et Grandes Rios ; K) Détail de la vallée et du chenal de l'Ivaí entre les villes de Jardim Alegre et Grandes Rios ; L) vue de la basse vallée de l'Ivaí pendant la crue de janvier 2007.

2.2. Histoire géologique du bassin versant de l'Ivaí

Le bassin versant de l'Ivaí est inséré dans les unités du bassin sédimentaire du Paraná (Figures 17 18 et 19). Pour bien comprendre l'histoire géologique du bassin versant, il faut d'abord recourir à l'histoire géologique du socle sous-jacent et du bassin sédimentaire.

2.2.1. Le socle et le bassin de subsidence

Les roches qui constituent le substrat du bassin du Paraná ont été formées du Précambrien à l'Ordovicien, entre 700 Ma et 450 Ma, et font partie du socle de la plateforme sud-américaine. Selon Ab'Saber (2000) « le socle a constitué des mega-dômes de vieux terrains qui sont devenus comme des matrices fournissant des sédiments aux principaux bassins intracratoniques ».

Le bassin du Paraná a commencé à se former à l'Ordovicien, vers 450 Ma (QUINTAS et al., 1999), alors que les roches du socle étaient soumises à un mouvement de subsidence. Cette subsidence a créé une zone surbaissée de la plaque sud-américaine, en donnant des conditions favorables à l'accumulation de sédiments provenant des secteurs les plus élevés ; ils ont été apportés par des glaciers et par des transgressions et régressions marines. La séquence de dépôts des sédiments commence au Siluro-dévonien, période où le bassin du Paraná était un golfe ouvert sur le paléo-Pacifique. C'est à partir de cette période que débute le dépôt des sédiments du Groupe Paraná.

2.2.2. Le Groupe Paraná

Le Groupe Paraná est formé de deux séquences sédimentaires clastiques. La séquence basale, préférentiellement sableuse, constitue la Formation Furnas ; la séquence supérieure est plus argileuse et constitue la Formation Ponta Grossa (SCHNEIDER et al., 1974).

La **Formation Furnas** repose de façon discordante sur le socle ; elle est constituée par des grès moyens et grossiers, à grains de quartz bien triés, anguleux et sub-anguleux, pris dans une matrice kaolinique. On observe la présence discontinue de conglomérats, de grès conglomératiques et de siltites intercalés dans les grès. Les sédiments de la Formation Furnas ont été déposés dans des environnements fluviaux et côtiers, qui expliquent la présence commune de stratifications horizontales et entrecroisées (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; MELO *et al.*, 2003 ; MINEROPAR, 2006). Selon Assine *et al.* (1994), il existe une grande variété d'unités sédimentaires qui ont été mises en relation avec les environnements de dépôt de la Formation Furnas. Pour cet auteur, la Formation Furnas a été déposée dans des conditions de mer transgressive, avec direction ouest-est de remontée marine. Les sédiments des couches les plus profondes sont sous l'influence des environnements fluviaux et marins, tandis que les sédiments des couches supérieures sont davantage sous influence marine.

Au cours du Dévonien Moyen et Supérieur, soit entre 400 Ma et 375 Ma, la fin de la transgression marine apporte un nouvel ensemble sédimentaire : la **Formation Ponta Grossa**. Elle se forme d'abord dans un environnement marin de plateforme peu profonde, puis passe à un environnement marin influencé par des vagues, enfin à un environnement marin plus tranquille.

La Formation Ponta Grossa est constituée de marnes, de siltites et d'argilites foncés ou noirs. Parfois, on observe des intercalations de grès fins à très fins, qui peuvent former des bancs d'une épaisseur pouvant atteindre jusqu'à 5 m. Selon Assine *et al.* (1994), les couches sableuses représentent d'anciens dépôts deltaïques de la Formation Furnas.

Quand elle est altérée, la formation peut présenter des couleurs variées, avec une prédominance des tonalités jaunes, pourpres et brunes. L'épaisseur totale de la formation peut atteindre jusqu'à 653 m, mais 200 m à 300 m seulement sont exposés en surface (SCHNEIDER *et al.* 1974).

Après le dépôt des sédiments du Groupe Paraná, le bassin sédimentaire est passé par un épisode érosif, enregistré par le contact discordant avec les sédiments du Groupe Itararé.

2.2.3. Le Groupe Itararé

Le dépôt du Groupe Itararé a débuté à la transition du Carbonifère Supérieur et du Permien Inférieur, autour de 300 Ma avant l'actuel. Ce dépôt s'est produit pendant la glaciation permo-carbonifère, quand des parties du Gondwana étaient recouvertes par la glace. Déposés dans des environnements fluviaux, marins et glaciaires, les sédiments du Groupe Itararé ont enregistré les différents processus qui ont modelé le paysage sud-américain.

Selon Schneider *et al.* (1974), le Groupe Itararé peut-être divisé en trois formations : la Formation Campo do Tenente, la Formation Mafra et la Formation Rio do Sul. Chaque formation est liée à un des différents types d'environnements dans lesquels ont été déposés les sédiments.

La séquence de dépôt des sédiments du Groupe Itararé commence avec la **Formation Campo do Tentente**, au Carbonifère Supérieur. Cette formation est en position discordante sur la Formation Ponta Grossa. A la base de la formation on rencontre des grès jaunâtres, à granulométrie fine à moyenne, avec un mauvais tri, et des laminations planes-parallèles, entrecroisées. Ces grès présentent quelquefois des stries glaciaires. Outre les grès, l'essentiel de la Formation Campo do Tenente est constitué principalement par des argilites brunes à rougeâtres et secondairement par des rythmites et des diamictites. On pense que ces sédiments ont été déposés dans un environnement lacustre sous influence glaciaire (SCHNEIDER *et al.*, 1974). L'ensemble des grès et sédiments fins forme une couche 200 mètres d'épaisseur au maximum.

La partie intermédiaire du Groupe Itararé est constituée de la **Formation Mafra**. Placée aussi de façon discordante sur la Formation Campo do Tenente, la Formation Mafra date du Permien Inférieur et présente un caractère sableux, avec prédominance des grès blanchis, jaunâtres et rougeâtres, aux granulométries très variées. La Formation Mafra présente aussi des diamictites, des conglomérats, des rythmites, des argilites et des argilites varvées. Selon Schneider *et al.* (1974) l'ensemble du dépôt forme une couche de 350 mètres d'épaisseur. La partie inférieure a été formée dans un environnement fluvial et les parties supérieures ont été formées dans un environnement marin et glaciaire.

La partie supérieure du Groupe Itararé est composée de la **Formation Rio do Sul** qui, mise en place dans un environnement essentiellement marin, est discordante sur la Formation Mafra.

Le dépôt des sédiments a débuté au Permien Moyen, autour de 275 Ma La grande quantité de matériel transportée par les glaciers a été déposée dans les secteurs périphériques du bassin sédimentaire. Dans la mer qui occupait la partie méridionale du continent sud-américain, la séquence de dépôt a connu différentes phases.

Pendant la première phase, les sédiments fins ont été déposés au fond de la mer, à grande profondeur, hors de l'influence des vagues. Cette partie correspond aux marnes foncées (appelées localement de Folhelho Lontras) qui se trouvent à la base de la formation Rio do Sul. Dans une deuxième phase, les sédiments continentaux transportés par les glaciers ont formé des cônes sablo-argileux. L'instabilité de ces dépôts a permis le déclenchement de glissements et de courants de turbidité. Sur les marnes précédemment déposées, on trouve des turbidites sablo-argileuses, associées à des diamictites et à des grès fluidisés.

Dans une troisième phase, une séquence de varves et des dépôts de front deltaïque s'est déposée sur les formations des deux phases précédentes. Ce front deltaïque faisait partie d'un système fluvial progradant dans la mer, se mêlant aux sédiments fins déjà déposés. Ce niveau représente la partie supérieure de la Formation Rio do Sul constituée par des argilites, des marnes, des varves, des rythmites, des grès fins à moyens et des diamictites (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; CPRM, 2002).

2.2.4. Le Groupe Guatá

Le dépôt du Groupe Guatá a commencé au Permien, autour de 270 Ma. Il enregistre la séquence de la mer transgressive permienne, après une courte période de régression marine.

Le terme inférieur du Groupe Guatá est représenté par la **Formation Rio Bonito**. Cette formation enregistre la transgression marine sur les dépôts précédents, avec des couches organiques, notamment d'importants dépôts charbonneux. La formation Rio Bonito a été subdivisée en trois membres : Triunfo, Paraguassu et Siderópolis.

A la base, le Membre Triunfo, concordant sur les sédiments du Groupe Itararé, est formé de sédiments fluvio-deltaïques : des grès blanchâtres, fins à moyens, localement grossiers, bien classés. On rencontre aussi des grès très fins, des siltites, des argilites, des marnes charbonneuses, quelques couches de charbon et conglomérats. L'épaisseur maximale de cette couche est de 100 mètres (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Placé de façon concordante sur le Membre Triunfo, le Membre Paraguassu constitue la partie intermédiaire de la formation Rio Bonito. Cette couche a été déposée dans un système de type île-barrière, sous conditions marines transgressives, avec influence des milieux lagunaires et lacustres. Elle est formée par des siltites et de marnes grises, intercalées avec des couches de grès fins et des roches carbonatées. L'épaisseur maximale des dépôts du Membre Paraguassu est de 100 mètres.

La partie supérieure de la formation Rio Bonito est formée par le Membre Siderópolis. Il s'agit de la séquence marine côtière qui a recouvert de façon concordante la séquence transgressive du Membre Paraguassu. Le Membre Siderópolis est formé principalement de grès fins à très fins, gris foncés, intercalés avec des argilites, des marnes charbonneuses et des couches de charbon et localement des couches de grès moyen et grossier (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Toujours au Permien, autour de 270 Ma, débute le dépôt d'une nouvelle formation : la **Formation Palermo**. Elle a été formée dans un milieu marin de plateforme peu profonde, sous l'influence des vagues et marées, et elle a recouvert de façon concordante les dépôts précédents. La Formation Palermo est constituée de siltites en partie sableuses, généralement de couleur grise à jaunâtre après l'altération. Localement, des grès fins sont intercalés. L'épaisseur des dépôts varie entre 50 et 280 mètres (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; CPRM, 2002).

2.2.5. Le Groupe Passa Dois

Le Groupe Passa Dois regroupe les Formations Irati, Serra Alta, Teresina et Rio do Rasto (ou Rio do Rastro) et représente le passage progressif d'un milieu marin à un milieu fluvial, dans la deuxième moitié du Permien, à partir de 260 Ma.

La partie inférieure du Groupe Passa Dois correspond à la **Formation Irati** composée de marnes foncées, formées sous conditions marines tranquilles, au-dessous du niveau d'action des vagues. L'ensemble de la Formation Irati a été subdivisé en deux couches, qui correspondent aux Membres Taquaral et Assistência.

A la base, le Membre Taquaral est constitué par des argilites et des marnes grises. Placés de façon concordante sur les dépôts de la Formation Palermo, ces sédiments ont été déposés dans des conditions de basse énergie.

Le Membre Assistência, correspondant à la partie supérieure de la formation, est constitué de marnes sombres, associées secondairement à des calcaires et dolomites. Les conditions de dépôt sont celles de milieux marins tranquilles, faiblement oxygénés, favorables à des dépôts piro-bitumineux associés aux calcaires, voire à la formation d'évaporites (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; CPRM, 2002).

Après le dépôt de la Formation Irati, une nouvelle couche sédimentaire se dépose toujours en milieu marin. C'est la **Formation Serra Alta**, concordante sur les sédiments de la Formation Irati, et constituée de marnes et siltites gris foncés et noirs. (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; CPRM, 2002).

La **Formation Teresina** est ensuite constituée d'argilites, marnes et siltites gris foncés et verdis, intercalés rythmiquement avec des grès très fins, de couleur gris clair à lentilles et concrétions carbonatées. L'ensemble des dépôts sédimentaires de la Formation Teresina illustre bien la transition d'un milieu marin profond à un milieu marin perturbé par des vagues, jusqu'à un milieu continental sous l'influence des marées (SCHNEIDER *et al.*, 1974 ; CPRM, 2002).

Dans le milieu transitionnel de la fin du Permien, autour de 250 Ma, commence le dépôt de la **Formation Rio do Rasto (ou Rio do Rastro)**, composée principalement de grès et de siltites ; cette formation a été divisée en deux membres, en fonction des différents environnements de dépôt.

La partie inférieure est le Membre Serrinha, avec des sédiments déposés dans une mer peu profonde. Cette couche est formée principalement par des grès fins, bien classés et intercalés avec des siltites et des argilites qui présentent une altération en boules bien développée.

La partie supérieure de la formation est le Membre Morro Pelado, de mise en place continentale, avec des sédiments lacustres, lacunaires, deltaïques et de plaine fluviale, ultérieurement recouverts par des dépôts éoliens sous conditions climatiques plus arides. Il est constitué par des lentilles de grès fins rougeâtres, intercalés avec des siltites et des argilites (CPRM, 2002).

La transition entre la Formation Rio do Rasto (Groupe Passa Dois) et la Formation Pirambóia (Groupe São Bento) est marquée par une discordance érosive.

2.2.6. Le Groupe São Bento

Le Groupe São Bento regroupe deux séquences sédimentaires et une importante séquence magmatique. La chronologie de ces événements n'est pas bien déterminée, mais on sait qu'ils se sont passés entre la transition Permien-Trias, autour de 253 Ma, et le Crétacé Inférieur, autour de 126 Ma.

La partie inférieure du Groupe São Bento est constituée par la **Formation Pirambóia**, principalement des grès moyens et fins et des silts-argileux intercalés de couches de siltites

et argilites. Localement, on rencontre des grès conglomératiques et une couche sable-argileuse de 1 à 2 mètres d'épaisseur à la base de la formation (SCHNEIDER *et al.*, 1974). L'environnement de dépôt de la Formation Pirambóia a été initialement défini comme fluvial (SCHNEIDER *et al.*, 1974), mais des études plus récentes indiquent la prédominance de processus de dépôt éoliens, avec des environnements fluviaux secondaires associés (CAETANO-CHANG et WU, 2003 ; GIANNINI *et al.*, 2004). A la fin de la période de dépôt de la Formation Pirambóia débute un nouveau cycle érosif. La transition entre les Formations Pirambóia et Botucatu possède donc un caractère discordant.

La **Formation Botucatu** est constituée par de grès moyens à fins, bien classés, localement grossiers ou conglomératiques à ciments siliceux ou ferrugineux. La Formation Botucatu possède à la base des sédiments d'origine fluviale, avec intercalations d'argile. Par contre, les couches supérieures présentent des faciès de transition vers un milieu semi-aride, ultérieurement désertique. Pendant le Jurassique et le Crétacé, le pré-continent sud-américain, déjà séparé de l'Amérique du Nord depuis la fin du Trias, était soumis à des climats plus chauds et secs, et la plaque sud-américaine était couverte par un désert à grands champs de dunes. A la fin du cycle de dépôt de la Formation Botucatu, un nouvel épisode érosif s'est établi. Le contact supérieur de la Formation Botucatu est donc discordant (CPRM, 2002, 2004).

Pendant le Jurassique Moyen, autour de 180 Ma, des perturbations thermiques dans le manteau terrestre ont causé la surélévation de secteurs de la lithosphère et des intrusions de matériel magmatique dans la croûte (ALMEIDA *et al.*, 1996). Selon le CPRM (2004), au début du Crétacé, autour de 135 Ma, ont débuté les activités magmatiques liées à l'installation du *hot spot* de Tristão da Cunha. Les coulées de lave étaient alimentées par des *dikes* et *sills* sur les discontinuités du bassin sédimentaire. Une séquence de *rift* vers 120 Ma a amorcé le processus d'ouverture de l'Océan Atlantique et la séparation de l'Amérique du Sud et de l'Afrique. C'était le début de l'événement magmatique majeur de l'histoire de la planète.

La **Formation Serra Geral** regroupe toutes les roches volcaniques mises en place au cours de cet événement qui a concerné le Bassin du Paraná pendant le Jurassique et le Crétacé. Ces roches volcaniques sont le résultat d'un même événement, mais elles ne sont pas homogènes et elles présentent des variations de composition, structure et chronologie. Quelques faciès ont été individualisés : le magma issu des fractures de la croûte terrestre a donné des basaltes et des basaltes-andésitiques dans les six premières couches (faciès Gramado, Paranapanema, Pitanga, Esmeralda, Campo Erê et Lomba Grande), et des rhyolites et des rhyodacites dans les quatre derniers étages (faciès Palmas, Chapecó, Várzea do Cedro et Alegrete) (CPRM, 2004).

Les premières couches de la Formation Serra Geral présentent des intercalations dans les grès de la formation Botucatu. Ceci démontre qu'au début des événements volcaniques, les climats étaient plus arides et le transport éolien très important. Par contre, on ne trouve pas d'intercalations de grès dans les couches supérieures. Dans l'État du Paraná, un ensemble de *dikes* orientés nord-ouest recoupe les formations précédentes, avec une importante influence sur la morphologie. L'épaisseur maximale de la Formation Serra Geral est de 1700 mètres, mesurés dans l'ouest de l'État du Paraná. Est remarquable le système de fractures d'orientation préférentielle NE-SO, et secondairement NO-SE, qui s'est formé dans tout le bassin ; il a conditionné d'autres événements, comme par exemple l'installation du réseau hydrographique.

Après la séparation des continents et les événements volcaniques du Jurassique et du Crétacé, le Bassin du Paraná a subi quelques changements structurels, avec la surélévation

graduelle de la zone côtière au sud-est du Brésil, et des mouvements verticaux pendant des épisodes tectoniques. Dans la partie nord de l'Etat du Paraná, le bloc que constitue le soubassement a été déterminant dans l'organisation spatiale des dépôts du Groupe Bauru.

2.2.7. Le Groupe Bauru

Le Groupe Bauru n'est pas encore bien défini par la littérature géologique brésilienne. Selon la classification géologique présentée par DNPM et MINEROPAR (1989), utilisée dans la carte géologique de l'Etat du Paraná, le Groupe Bauru peut être subdivisé en trois formations : la Formation Caiuá, la Formation Santo Anastácio et la Formation Adamantina. On présente ici seulement la Formation Caiuá, parce que les autres formations citées ne sont pas représentées dans le bassin versant de l'Ivaí.

La **Formation Caiuá**, discordante sur les roches volcaniques de la Formation Serra Geral, est formée de grès rougeâtres fins à moyens, quartzeux, bien classés (DNPM et MINEROPAR, 1989 ; FERNANDES et COIMBRA, 1994 ; SILVA et. al. 2005). L'environnement de dépôt a été défini comme désertique, avec prédominance de l'activité éolienne (DNPM et MINEROPAR, 1989). Fernandes et Coimbra (1994) ont divisé le Groupe Bauru en plusieurs formations. Pour eux, la Formation Rio Paraná (qui correspond à la Formation Caiuá) était la partie centrale de grands champs de sable, avec formation de dunes et d'inter-dunes. Cependant, pour Silva et. al. (2005), les grès de la Formation Caiuá présentent des structures de milieu sous-aquatique, avec des dépôts éoliens secondaires.

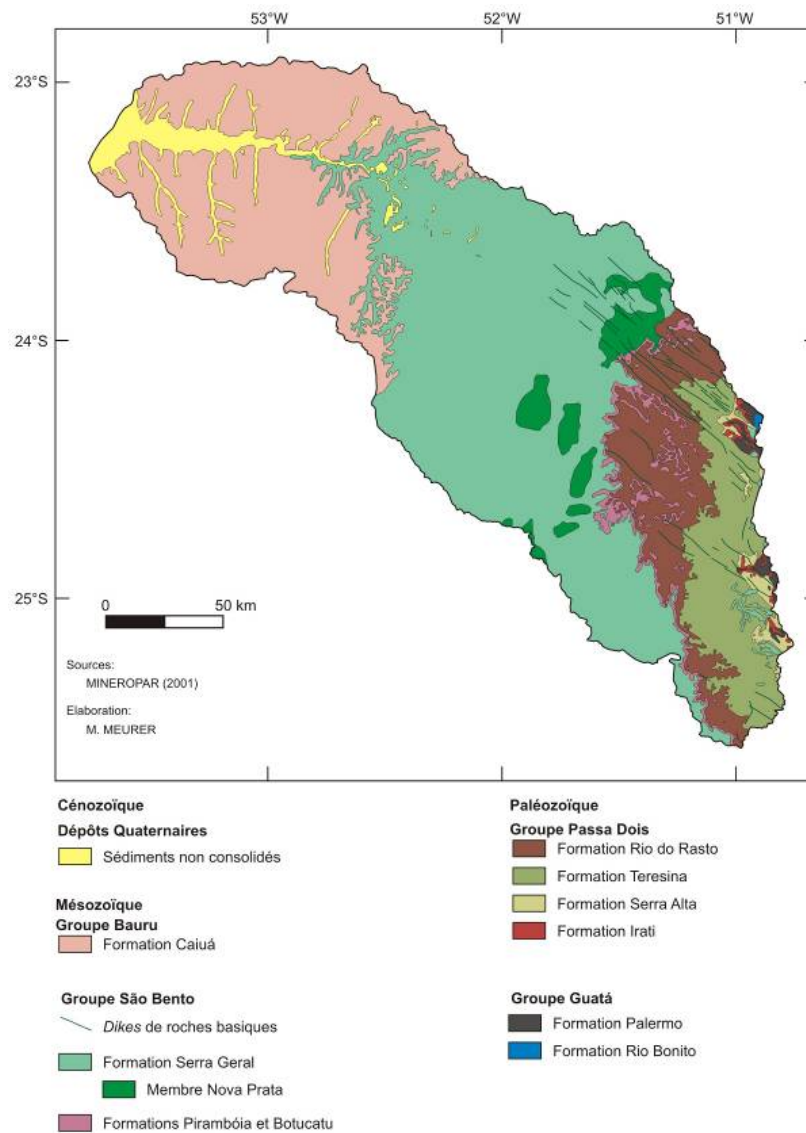


Figure 17. Géologie du bassin versant de l'Ivaí

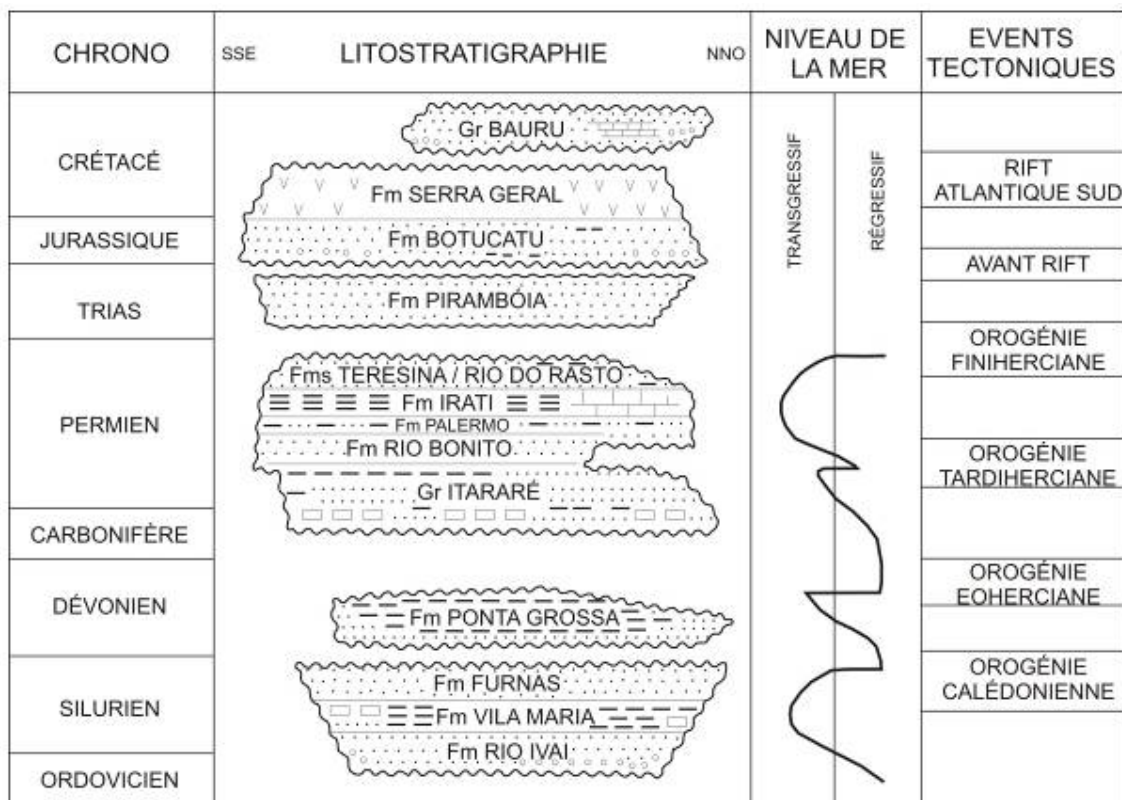


Figure 18. Stratigraphie du Bassin Sédimentaire du Paraná, selon une coupe théorique SSE–NNO, et variations du niveau de la mer. Les formations Rio Ivaí et Vila Maria ne sont pas présentes dans le bassin versant de l'Ivaí. (ZALAN et. al., 1990)

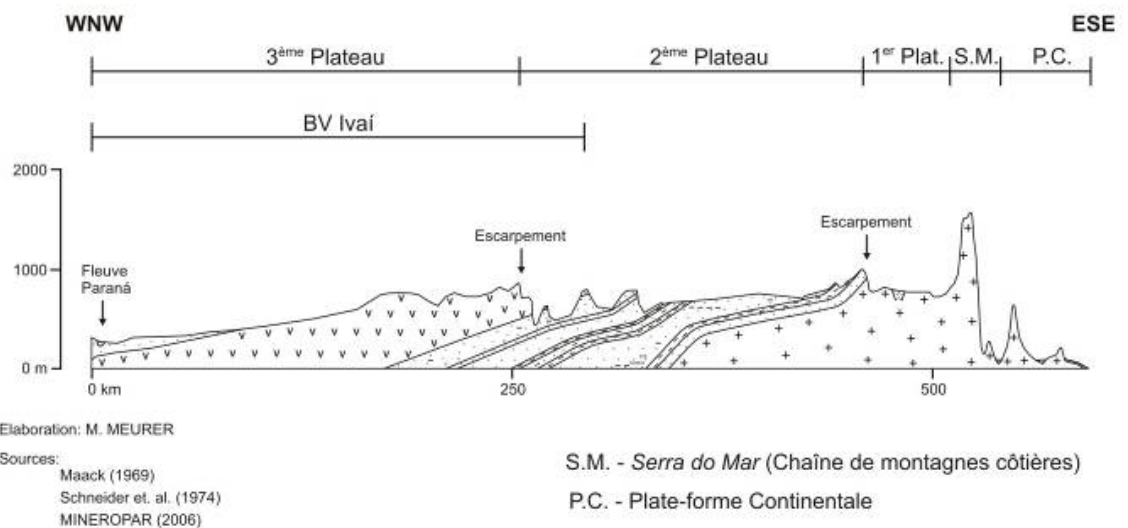


Figure 19. Coupe géologique de l'Etat du Paraná avec les trois plateaux et le bassin de l'Ivaí. Pour les figurés, consulter la stratigraphie du bassin du Paraná (Figure 18).

2.3. La Distribution des climats dans le bassin versant

Pour comprendre la distribution des climats sur le bassin versant de l'Ivaí, il est important de figurer ce bassin versant à l'échelle du territoire brésilien et de considérer la façon dont les éléments et facteurs climatiques se combinent pour donner les types de climats.

Le Brésil, traversé par l'Equateur et le Tropique du Capricorne, est pour l'essentiel dans la zone tropicale (Figure 20). Sur la plus grande partie du territoire brésilien les températures moyennes annuelles sont au-dessus de 21°C, et les précipitations totales annuelles sont supérieures à 1 200 mm.

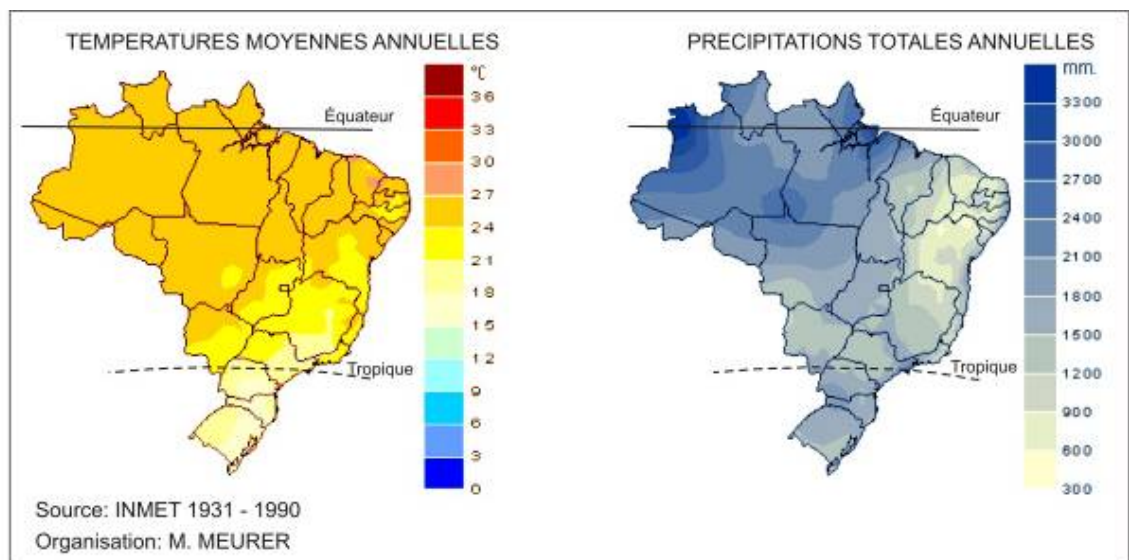


Figure 20. Températures moyennes et précipitations totales annuelles sur le territoire brésilien.

L'État du Paraná est situé dans la région sud du Brésil, à la transition de la zone tropicale et de la zone subtropicale. Recoupé par le Tropique du Capricorne, son territoire peut être divisé en deux zones : une au nord du tropique, où les températures moyennes annuelles sont comprises entre 22°C et 24°C, et une autre au sud du tropique, qui correspond à la majeure partie de l'Etat du Paraná, où les températures moyennes annuelles sont comprises entre 18°C et 22°C. Les précipitations totales annuelles dans la zone située au nord du tropique s'élèvent à 1 600 mm, tandis que dans la zone subtropicale les précipitations sont comprises entre 1 600 et 1 800 mm (IAPAR, 2000).

Du fait de son positionnement, dans la transition entre la zone tropicale et la zone subtropicale, l'Etat du Paraná est influencé par la masse d'air « Equatoriale Continentale », formée au nord du Brésil, sur l'Amazonie, qui apporte de l'air chaud et humide par la masse d'air « Tropicale Atlantique », formé sur l'Océan Atlantique, et qui apporte aussi de l'air chaud et humide, ainsi que par les fronts polaires, formés sur l'océan, au sud de l'Argentine, et qui apportent de l'instabilité, des précipitations, parfois des orages, et qui sont responsables de températures plus basses (Figure 21).

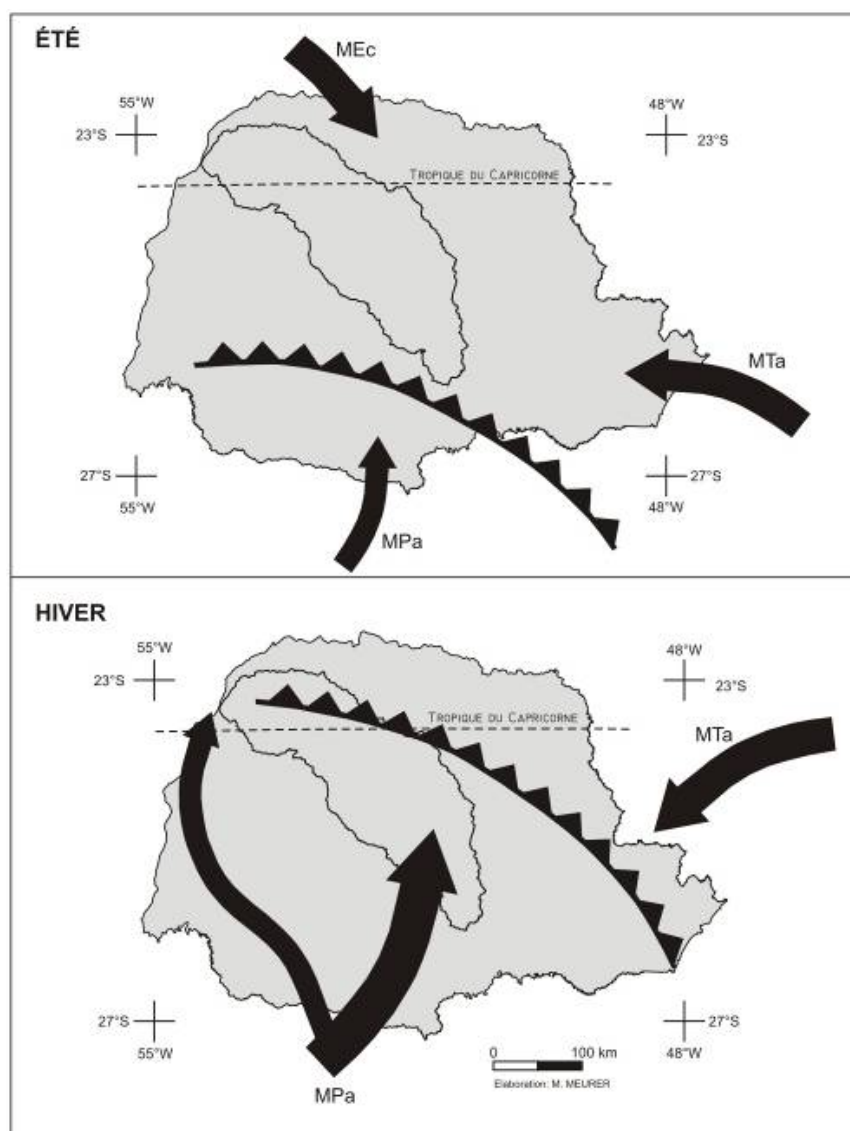


Figure 21. Influence des masses d'air sur l'Etat du Paraná et le bassin de l'Ivaí. MTa – Masse Tropicale Atlantique ; MEc – Masse Equatoriale Continentale; MPa – Masse Polaire Atlantique.

Le nombre d'études déjà faites sur les types de climats à l'échelle de l'Etat du Paraná est très réduit. Parmi les études existantes, deux sont considérées comme des classiques de la littérature climatologique : les travaux de Maack (1968) et de Nimer (1979). Maack (1968) a élaboré une cartographie pluviométrique basée sur les grandes lignes orographiques qui structurent le territoire du Paraná. Cette division pluviométrique a été utilisée pour l'élaboration de la classification climatique du Paraná, basée sur la classification climatique de Köppen et complétée par des informations sur la végétation originale et les usages agricoles de l'époque. Selon ce classement, l'Etat du Paraná serait divisé en quatre types de climats (Figure 22).

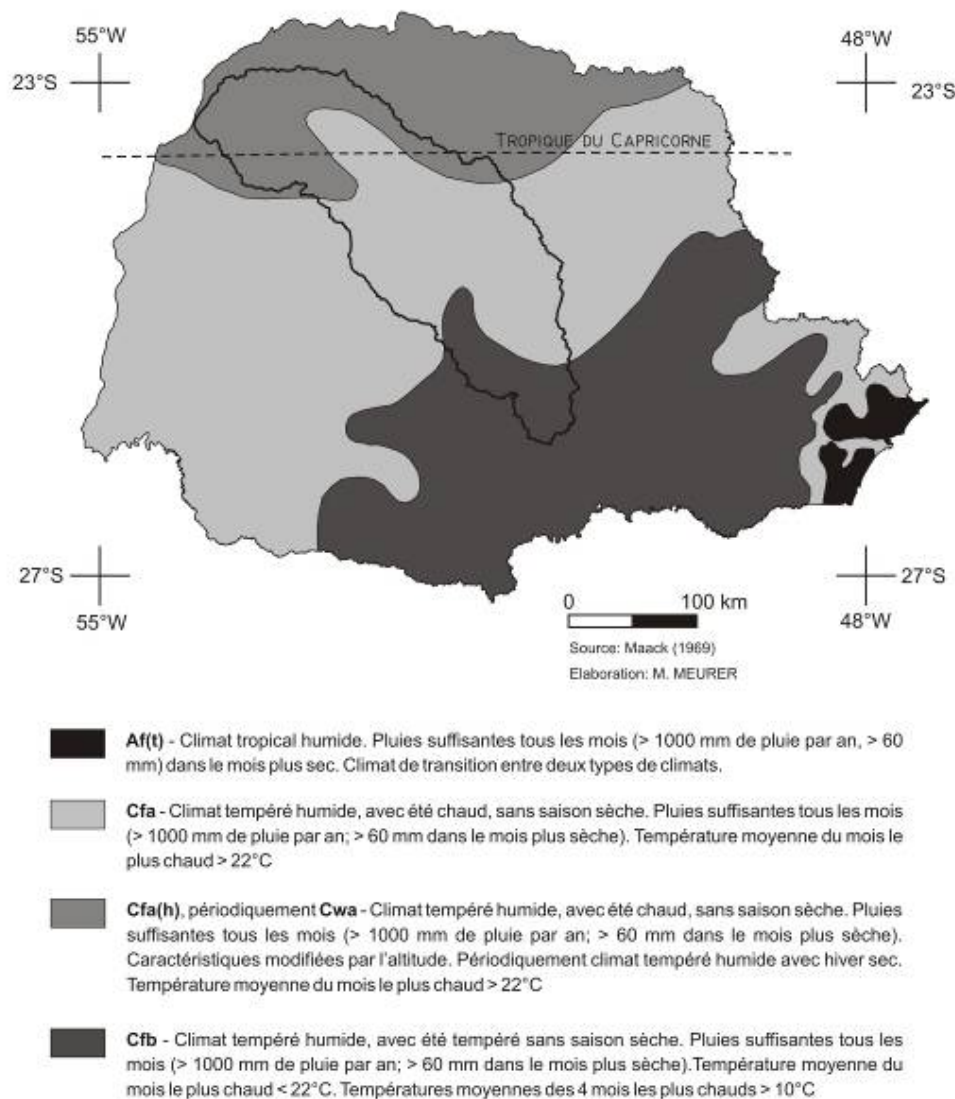


Figure 22. Division climatique de l'Etat du Paraná, selon la proposition de Maack (1968), basée sur la classification climatique de Köppen.

Les études climatiques réalisées par Nimer (1979) concernent la région sud du Brésil, à une échelle plus générale. Néanmoins, la division climatique proposée par Nimer (1979) pour l'Etat du Paraná est relativement semblable à l'étude précédente, avec quelques changements dans l'aire côtière et au nord-ouest, à la transition des climats subtropicaux et tropicaux. Au-delà de ces différences, la contribution majeure des études de Nimer a été la prise en compte de la climatologie dynamique, en décrivant le rôle joué par les masses d'air dans la distribution des climats au sud du Brésil.

A partir de ces deux études climatologiques, il est possible d'affirmer que la distribution des climats dans l'Etat du Paraná est conditionnée par deux facteurs principaux : la dynamique des masses d'air et l'orographie.

La dynamique des masses d'air joue un important rôle dans le volume des précipitations tombant sur l'Etat du Paraná. Selon Galvani et Azevedo (2003), la Masse Polaire Tropicale qui traverse le centre-sud du Brésil fournit une importante contribution aux totaux pluviométriques mesurés dans cette région. Nimer (1979) affirme que la partie ouest du Paraná présente une variabilité pluviométrique plus importante du fait du passage des fronts polaires.

Les fronts polaires sont formés aux hautes latitudes du continent sud-américain et précèdent l'arrivée de l'air polaire, en apportant beaucoup d'instabilité au centre-sud du Brésil. L'arrivée de ces fronts se produit toute l'année, mais pendant les mois d'hiver le déplacement des systèmes de pression vers le nord permet aux fronts d'avancer plus à l'intérieur du territoire brésilien. Pendant l'été, les fronts traversent le territoire du Paraná selon une direction sud-ouest – nord-est et se dissipent dans l'océan, près du littoral de l'Etat de São Paulo. Pendant l'hiver, ils traversent le Paraná selon une direction sud-nord. Parfois ces fronts utilisent la vallée du Fleuve Paraná comme un couloir, ce qui permet à ces systèmes d'avancer encore plus au nord, parfois jusqu'à l'Amazonie.

La distribution des pluies est contrôlée aussi par la topographie. L'Etat du Paraná possède trois importantes lignes orographiques : la Serra do Mar et les escarpements du 2^{ème} et 3^{ème} Plateaux. La Serra do Mar est une importante chaîne cristalline localisée dans la région côtière du Paraná, avec des altitudes qui dépassent les 1 800 mètres. Les vents humides de la Masse Tropicale Atlantique sont bloqués par cette forte barrière orographique qui retient une grande partie de cette humidité. Ainsi, les totaux pluviométriques les plus élevés du Paraná, qui dépassent les 3 600 mm annuels, sont-ils observés sur le flanc oriental de la Serra do Mar. Est remarquable aussi le rôle joué par les escarpements des 2^{ème} et 3^{ème} Plateaux. L'escarpement du 2^{ème} Plateau, appelé aussi escarpement dévonien, possède la forme d'une cale, et traverse le territoire du Paraná selon les directions sud-est/nord-ouest et sud-ouest/nord-est ; il présente des altitudes qui culminent à 1 200 mètres, et les totaux pluviométriques annuels dans ce secteur peuvent dépasser les 1 500 mm. L'escarpement du 3^{ème} Plateau, appelé aussi Serra da Esperança, possède la forme d'une cale un peu plus ouverte, et traverse le Paraná selon les directions sud-est/nord-ouest et sud-ouest/nord-est. Les altitudes du sommet de l'escarpement dépassent 1 200 m et les précipitations totales annuelles peuvent excéder les 1 600 mm. Dans la partie sud du 3^{ème} Plateau, sur le bloc du Plateau de Palmas, les altitudes sont autour de 1 000 mètres, et les précipitations totales annuelles dépassent les 2 100 mm. Sur le reste du 3^{ème} Plateau, les précipitations varient entre 1 400 mm et 2 000 mm annuels.

Le bassin versant de l'Ivaí est disposé sur le territoire du Paraná selon une direction préférentielle sud-est/nord-ouest, et est recoupé dans la partie nord par le Tropique

du Capricorne. La distribution des climats dans le bassin versant suit bien les zones climatiques, mais se calque principalement sur les contrôles orographiques. Il est important de rappeler que l'escarpement du 3^{ème} Plateau, une importante ligne orographique, traverse le bassin versant, ce qui a une influence sur la distribution des précipitations et des types de climats.

Pour l'étude des climats dans le bassin versant de l'Ivaí, il convient de se concentrer principalement sur le volume et la distribution des précipitations parce que, dans les régions tropicales, les précipitations sont un des éléments qui présentent la plus grande variabilité saisonnière et inter annuelle.

Selon Andrade (2003) et Andrade et Nery (2003), le bassin versant de l'Ivaí présente des saisons humides et sèches bien définies (Figure 23). Les six mois les plus pluvieux sont compris entre septembre et février, et les précipitations mensuelles moyennes dépassent toujours les 140 mm. Le trimestre le plus pluvieux couvre les mois de décembre à février. Pendant ce trimestre, se produisent de 6 à 12 jours de pluie par mois. Les six mois estivaux vont de mars à août, et le trimestre le plus sec de juin à août. Pendant ce trimestre, se produisent de 3 à 8 jours de pluie par mois.

Dans le cas du bassin versant de l'Ivaí, la variabilité pluviométrique n'est pas élevée, l'amplitude de précipitations étant comprise entre 400 mm et 600 mm. Le secteur doté de la plus forte amplitude se trouve dans la partie centrale du bassin versant, du côté sud de l'Ivaí, sur la ligne de partage des eaux, aux alentours des communes de Campo Mourão et Mamborê (ANDRADE, 2003 ; ANDRADE et NERY, 2003).

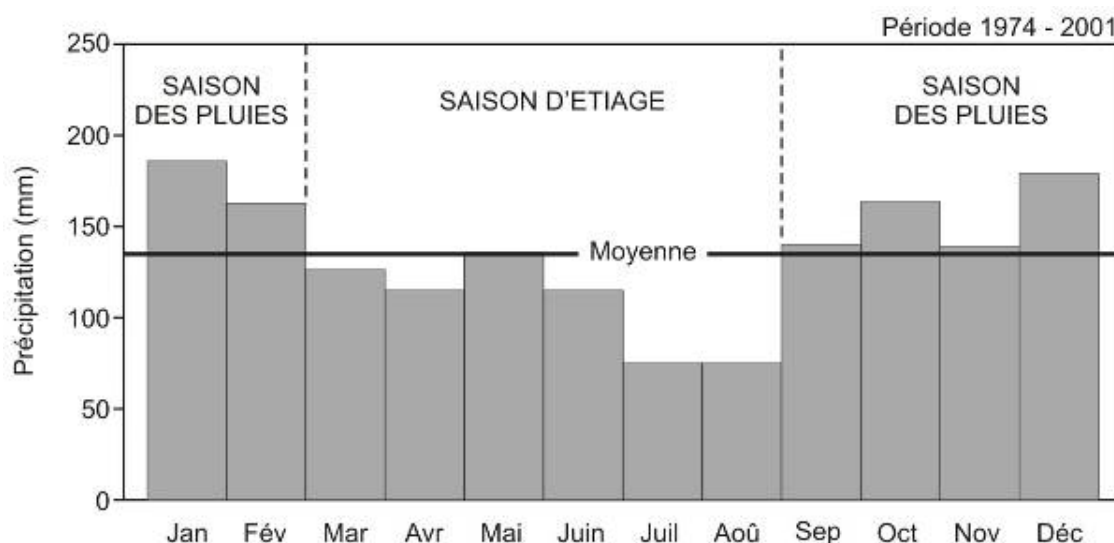


Figure 23. Précipitations Moyennes Mensuelles pour le bassin versant de l'Ivaí. Calculé sur 19 stations de mesure, pour la période 1974 - 2001. Source : ANDRADE et NERY (2003).

En considérant les précipitations totales (Figure 24), le bassin de l'Ivaí peut être séparé à première vue en deux secteurs : un secteur plus arrosé, entre les sources des rivières Dos Patos et São João et l'escarpement du 3^{ème} Plateau, avec des précipitations totales annuelles au-dessus de 1 600 mm ; et un secteur moins arrosé, qui va de la transition du 3^{ème} Plateau à la confluence du Paraná, où les précipitations totales annuelles vont de 1 400 mm à 1 600 mm.

Le rôle joué par la topographie dans la distribution des précipitations sur le bassin versant de l'Ivaí est net. Sur les cartes et profils pluviométriques (Figure 24, 25 et 26), on observe que les secteurs les plus élevés correspondent aux secteurs dotés des plus fortes précipitations totales. On observe aussi que les courbes de précipitations de 1 600 et 1 700 mm sont sujettes à des inflexions dans les secteurs proches des marges du bassin versant, en raison de l'effet orographique des surfaces plus élevées. Ainsi, les endroits les plus arrosés du bassin versant ne sont-ils pas les sources, mais la bordure de l'escarpement du 3^{ème} Plateau et la ligne de partage des eaux qui longe la commune de Mamborê, au sud du bassin versant.

Andrade et Nery (2003) ont élaboré une classification des 19 stations de mesure pluviométrique du bassin de l'Ivaí, en utilisant comme méthode de découpage l'analyse multivariée. A partir des résultats de cette analyse, le bassin versant de l'Ivaí a été divisé en quatre groupes homogènes de précipitations (Figure 27). On observe que les Groupes I, III et IV sont disposés selon un gradient amont-aval de précipitations. Le Groupe II caractérise les stations de mesure qui se trouvent dans la partie sud du bassin versant, proche de la commune de Mamborê, où sont enregistrés des totaux pluviométriques élevés.

Selon Andrade et Nery (2003) les totaux pluviométriques annuels dans le bassin versant de l'Ivaí subissent l'influence des événements *El Niño* et *La Niña*. Dans les années d'occurrence d'un des ces phénomènes, considérées comme des années anormales, la variabilité des précipitations est remarquable. Pendant les années d'*El Niño*, lorsque les eaux tropicales de l'Océan Pacifique se réchauffent, le nombre de jours de pluie dans le bassin versant peut augmenter en plus de 30 %. Pendant les années d'occurrence de *La Niña*, lorsque les eaux de l'Océan Pacifique se refroidissent, le nombre de jours de précipitation enregistre une nette réduction, qui peut atteindre 20 % (ANDRADE 2003 ; ANDRADE et NERY, 2003 ; NERY *et al.*, 2004 ; NERY *et al.*, 2005).

Outre les précipitations, un autre élément climatique possède une grande importance dans le bassin versant de l'Ivaí : **les gelées**. Les gelées se produisent quand la température du point de rosée de l'air est au-dessous de 0° C, et le vapeur d'eau passe directement du stade gazeux au stade solide, avec la formation de cristaux de glace sur les surfaces refroidies (KIM *et al.*, 2003). On peut distinguer trois facteurs de formation des gelées : **le rayonnement, l'advection et l'évaporation** (METEO FRANCE, 2006). Les **gelées de rayonnement** sont liées au refroidissement du sol et de la couche d'air proche du sol, en raison d'un bilan négatif de radiation. Ces gelées se forment sous conditions de vent faible ou absent, de ciel clair, sans couverture de nuages. En recouvrant le sol de cristaux de glace, la végétation et d'autres surfaces refroidies, ce genre de gelée est qualifié de **gelée blanche**. Les **gelées d'advection** se forment avec l'arrivée d'une masse d'air froid et sec, en général accompagnée de vents forts. Le refroidissement se passe de façon très rapide et les dégâts sur la végétation sont en général plus intenses. Ce type de gelée est appelé aussi **gelée noire** à cause de l'apparence de la végétation qui semble morte après un événement de ce type, mais aussi à cause du caractère destructif de cet événement. Enfin les **gelées d'évaporation** sont dues au refroidissement provoqué par l'évaporation de l'eau d'un sol humide quand ce sol est recouvert par une couche d'air plus sèche (GRODZKI *et al.*, 1996 ; KIM *et al.*, 2003 ; METEO FRANCE, 2006).

L'occurrence de gelées dans l'Etat du Paraná pendant l'hiver est assez fréquente. Quelques événements ont marqué la mémoire des citoyens *paranaenses*. Le Paraná a connu de très fortes gelées, principalement dans les années 1942, 1964, 1969, 1975 et 1979. La gelée du 18 juin 1975 a été particulièrement remarquable, parce qu'elle a détruit pratiquement la totalité des plantations de café du nord-ouest de l'Etat.

Des études sur les gelées au Paraná ont été faites par Maack (1968) et Nimer (1979). Quelques essais de délimitation de régions homogènes d'occurrence de gelées ont été réalisés, mais la diversité d'altitude et d'exposition au soleil rend cette tâche difficile (KIM *et al.*, 2003). Plus récemment, des études sur les gelées se sont concentrées sur la distribution de ces événements dans l'année et sur leur probabilité d'occurrence.

Dans le bassin versant de l'Ivaí, les gelées surviennent le plus souvent sur les territoires de rive gauche. Dans la partie amont du bassin versant, où les températures sont plus basses en raison de l'altitude, les gelées sont aussi très fréquentes. Selon Kim *et al.* (2003), pour la période de 1976 à 2000, 331 gelées ont été observées par la station de la commune de Guarapuava, qui se trouve en dehors du bassin versant, sur l'escarpement du 3^{ème} Plateau, à 40 km à l'ouest des sources de l'Ivaí. Pour la même période, seulement 76 gelées ont été observées dans la commune d'Apucarana, également proche de l'escarpement du 3^{ème} Plateau, mais située plus au nord. La période d'occurrence des gelées est comprise entre mai et septembre, mais peut s'élargir aux mois d'avril et novembre dans les endroits les plus froids. De toute façon, la plupart des événements se passent pendant les mois de juillet et juin, respectivement (GRODZKI *et al.*, 1996).

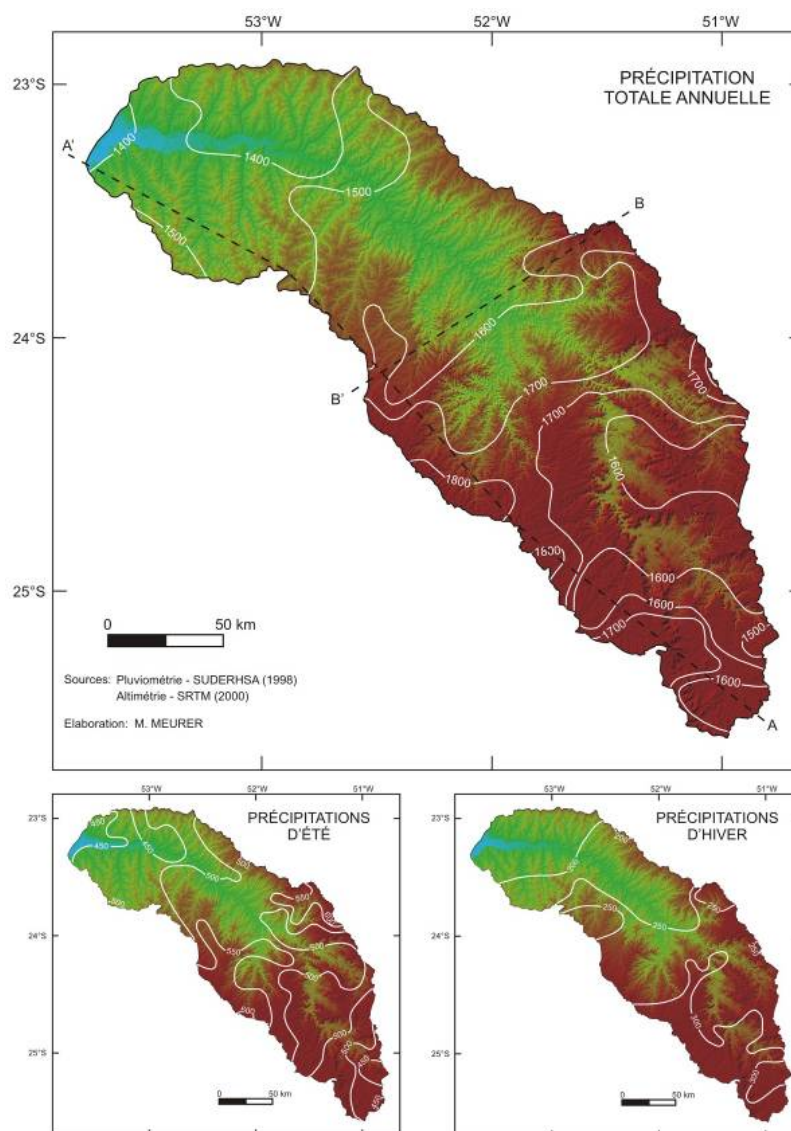


Figure 24. Précipitations totales annuelles, précipitations des mois d'été et d'hiver sur le bassin versant de l'Ivaí.

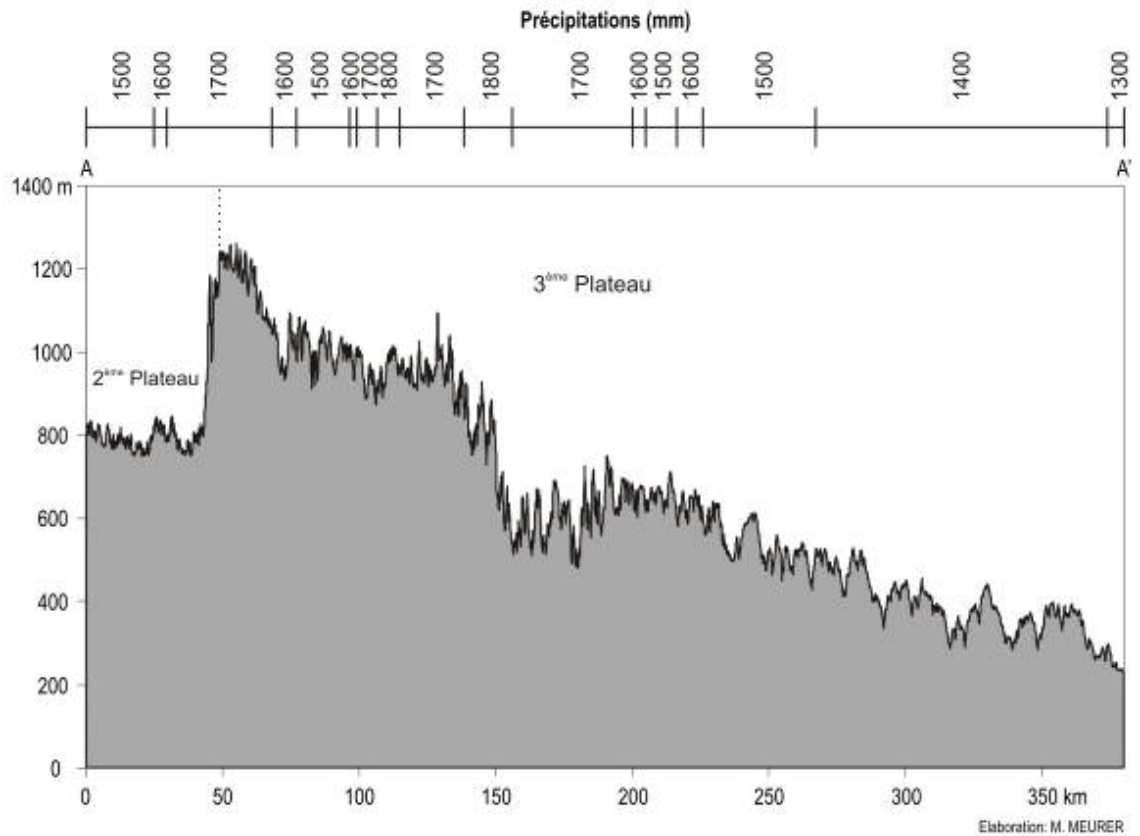


Figure 25. Distribution des précipitations totales sur le profil en long du bassin versant de l'Ivaí.

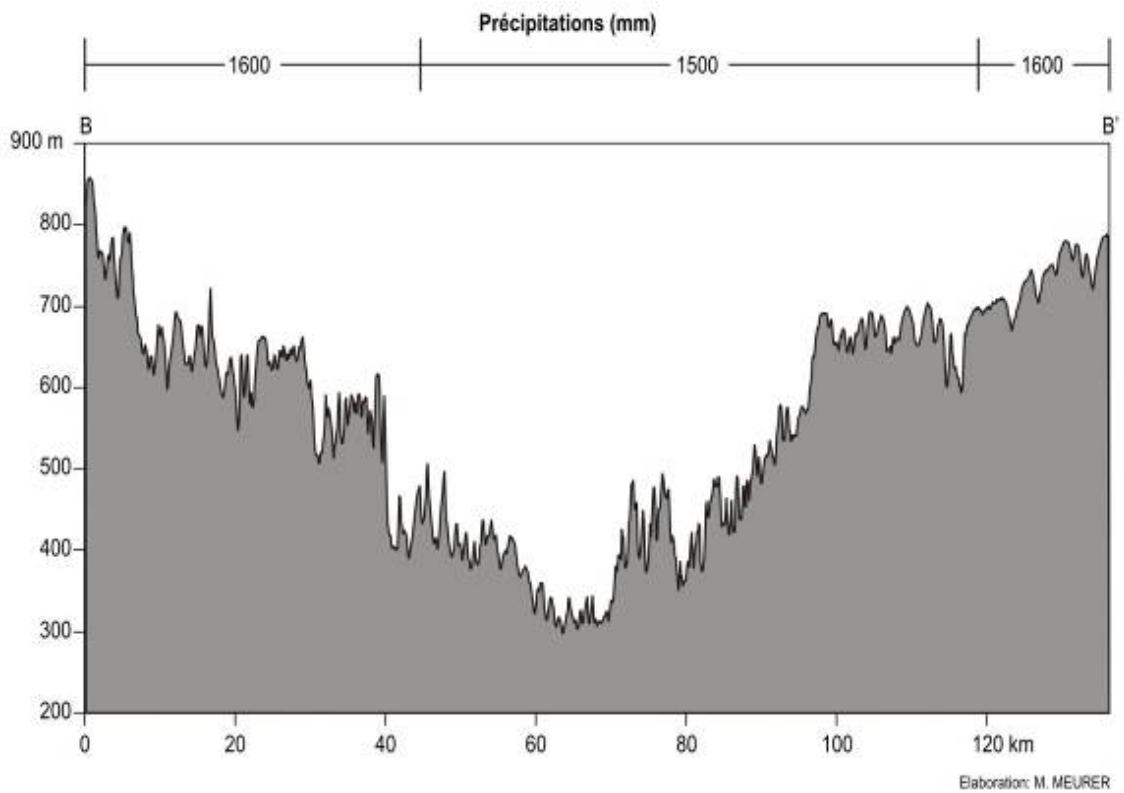


Figure 26. Distribution des précipitations totales sur le profil en travers du bassin versant de l'Ivaí.

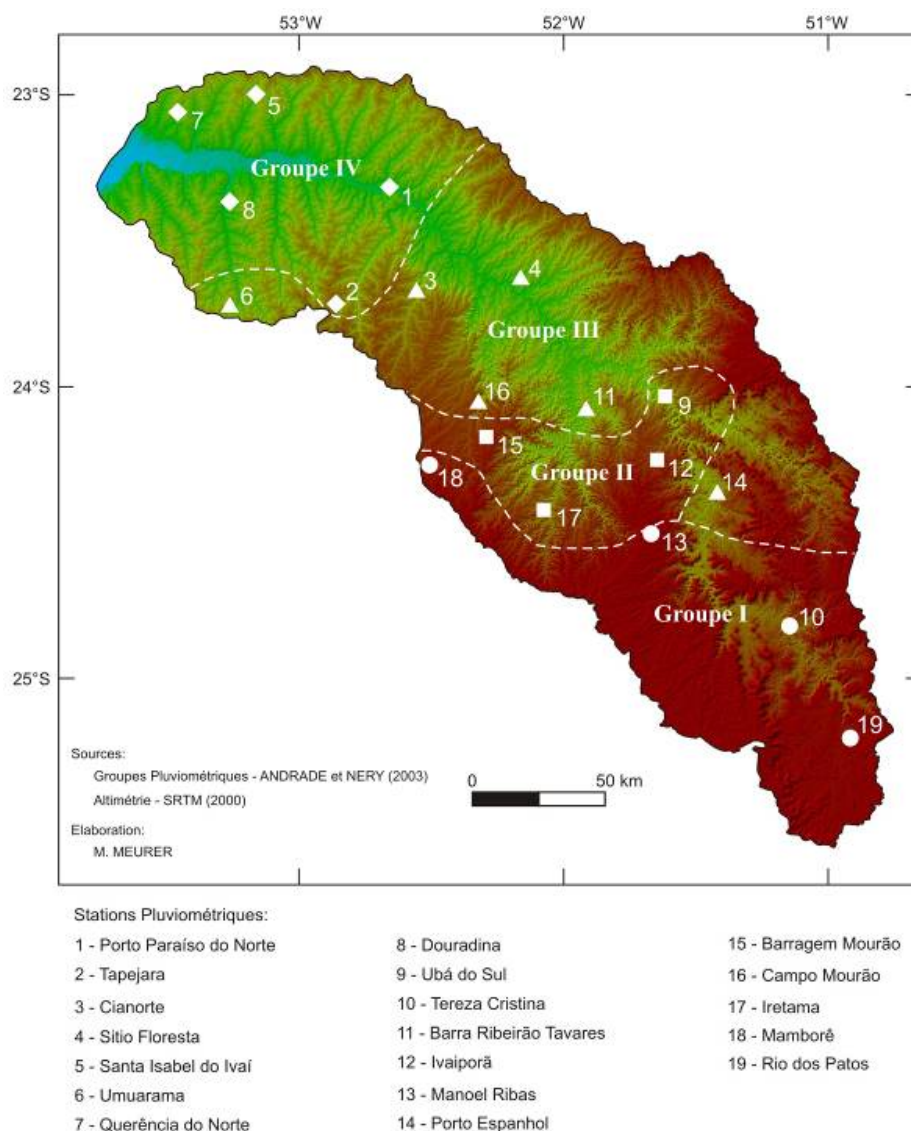


Figure 27. Régions de précipitations homogènes et stations de mesure utilisées pour la définition de ces régions.

2.4. La couverture pédologique

La couverture pédologique est le résultat de l'interaction de la géologie, de climat, de la topographie et de l'action des organismes. C'est à partir de la combinaison de tous ces facteurs que se forment les différents types de sols.

Présentant une importante diversité géologique, topographique et climatique, le bassin versant de l'Ivaí possède les conditions requises pour la formation d'une couverture pédologique diversifiée dans l'espace. La dimension temporelle est essentielle pour comprendre le degré d'évolution des sols sur la longue durée dans les milieux stables au plan géomorphologique ; la durée conditionne l'épaisseur de l'altération et le degré d'évolution.

Selon la Carte des Sols du Brésil (EMBRAPA et IBGE, 2003), sept types de sols sont identifiés dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28) : *Latosol Vermillon dystrophique*, *Nitosol Vermillon eutrophe*, *Néosol Litholique eutrophe*, *Argisol Vermillon-Orange dystrophique*, *Cambisol Humique dystrophique*, *Nitosol « Háplico » dystrophique*, *Sol à Gley « Háplico » dystrophique*. On leur ajoute les *Néosols Aréniques Quartzeux*, d'occurrence ponctuelle dans le bassin de l'Ivaí, non susceptibles de représentation à l'échelle de la carte consultée, mais cependant importants dans le secteur d'étude.

2.4.1. Latosol vermillon dystrophique

Les *Latosols* sont des sols typiques des régions tropicales, formés d'un matériel minéral. Ce sont généralement des **sols très profonds, bien évolués, à degré avancé d'altération**, d'une épaisseur rarement inférieure à 1 m. La séquence d'horizons A, B, C présente une **très faible différenciation par la couleur (rouge et rouge foncé) et les transitions entre horizons sont en général très diffuses**.

En raison de conditions climatiques agressives, les *Latosols* présentent des teneurs en bases inférieures à 50 % (sols dystrophiques), avec absence de silice et de minéraux primaires : restent de l'argile à basse activité et des oxydes de fer et d'aluminium. L'horizon B *latossolico*, qui caractérise les *Latosols*, est un horizon généralement homogène, avec des concentrations d'argile plus ou moins constantes et une **structure de type micro-agrégée**. (EMBRAPA, 1999)

Dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28), les *Latosols* occupent principalement les sommets des collines et les parties les plus élevées des reliefs tabulaires où les processus de lessivage et d'éluviation prédominent face aux processus d'accumulation de matière.

2.4.2. Nitosol « háplico » dystrophe

Selon le système brésilien de classification des sols, le terme *háplico* est utilisé pour les sols les plus simples dans un groupe ; ce terme désigne les sols qui ne possèdent pas des caractéristiques particulières permettant de détailler la classification (EMBRAPA, 1999),

Les *Nitosols* sont des sols formés par du matériel minéral qui présentent un **horizon B *nítico*** caractéristique, à **texture argileuse ou très argileuse** (argile de basse activité) et à **structure en blocs angulaires ou prismatiques, modérée à forte** ; la **surface des agrégats est brillante**, en relation avec la **sérosité** ou avec des **surfaces de compression**. La transition entre les horizons A et B *nítico* est nette ou graduelle, mais les transitions entre les sub-horizons de l'horizon B sont diffuses. Ce type de sol présente une saturation en bases inférieure à 50 % et pour cette raison il est aussi appelé dystrophe (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28), le *Nitosol « Háplico » dystrophe* caractérise une aire limitée dans la partie amont du bassin versant. En général, les *Nitosols* se localisent dans les secteurs intermédiaires des versants, où les processus de transport de matériel dans les horizons du sol permettent la formation d'un horizon B riche en argile. Etant soumis à des totaux pluviométriques élevés, ces sols sont lixiviés, ce que explique leur caractère dystrophe.

2.4.3. Nitosol vermillon eutrophe

Le *Nitrosol vermillon eutrophe* fait aussi partie du groupe des *Nitrosols* et pour cette raison il présente des caractéristiques très semblables au type de sol décrit précédemment : **horizon B nítico en dessous d'un horizon A, texture argileuse** dans cet horizon, **structure forte en blocs angulaires ou prismatiques, surfaces d'agrégats brillantes** en relation avec la **sérosité** ou avec des **surfaces de compression**. Le *Nitrosol vermillon eutrophe* est aussi populairement connu sous le nom de « *Terra Roxa* » (Terre Violette, en libre traduction), en raison de sa couleur rouge foncée et violette. Ce type de sol présente une saturation en bases supérieure à 50 % (sols eutrophes) (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28), le *Nitrosol vermillon eutrophe* occupe une surface importante dans la partie intermédiaire du bassin versant, où prédomine le substrat volcanique. Comme les *Nitrosols* « *háplicos* » *dystrophes*, les *Nitrosols vermillons eutrophes* sont disposés au milieu des versants, là où les processus de transport de matériel dans les horizons du sol permettent la formation d'un horizon B riche en argile. Localisés dans des secteurs moins arrosés, ces sols ne subissent pas des processus de lixiviation intenses, ce qui explique leur caractère eutrophe.

2.4.4. Argisol vermillon-orange dystrophe

Les *Argisols vermillon-orange dystrophes* sont des sols composés de matériel minéral, qui présentent de l'argile de basse activité. L' **horizon B textural** possède une **texture sableuse ou plus fine, avec une proportion d'argile significative (minimum 15 % d'argile)** et la présence de **sérosité**. Généralement, cet horizon est **placé en-dessous d'un horizon d'éluviation E** sableux. Ainsi, **la transition entre les horizons superficiels et l'horizon B textural est abrupte**. L'épaisseur de ces sols est variable et les couleurs varient de rougeâtre, jaunâtre à brun (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28), les *Argisols vermillons-oranges dystrophes* occupent les parties hautes et intermédiaires des versants dans les secteurs où le substrat est formé par le grès Caiuá. Les processus de transport interne aux profils des sols permettent la formation d'un horizon éluvial E et la formation d'un horizon d'accumulation B *textural* en dessous. Le teneur en bases est inférieur à 50 %, ce qui caractérise des sols dystrophes.

2.4.5. Néosol lithique eutrophe

Les Néosols lithiques eutrophes sont des sols formés par du matériel minéral ou organique, **peu épais, à modifications du matériel d'origine peu exprimées, les processus pédogénétiques n'étant pas très intenses**. Plusieurs facteurs sont responsables du faible développement de ces sols, par exemple la résistance aux processus d'altération ou le relief qui favorise l'érosion.

Dans le bassin de l'Ivaí (Figure 28), les Néosols lithiques se trouvent sur les reliefs à forte pente, principalement proches de l'escarpement du 3^{ème} Plateau. En raison de la lenteur de l'altération, ces profils conservent encore une teneur en bases élevée, ce qui donne leur caractère eutrophe.

2.4.6. Sol à Gley « háplico » dystrophe

Les *Sols à Gley* « *háplicos* » *dystrophes* sont des sols hydromorphes formés par du matériel minéral, qui présentent un horizon à *gley* proche de la surface ou placé juste en-dessous des horizons superficiels. Ces sols sont soumis à une saturation en eau périodique ou permanente, avec des niveaux d'oxygène très bas. Ces conditions de saturation conduisent à la solubilisation et à la réduction du fer (ce processus est appelé *gleyfication*), dont résulte une coloration grise, gris bleuâtre et gris verdâtre, parfois avec des tâches brunes, brun jaunâtre et noires. La texture est sableuse dans les horizons superficiels, plus fine dans les horizons inférieurs. La structure des horizons superficiels peut être en blocs anguleux ou sub-anguleux.

La désignation *háplico* le caractérise comme le sol le plus simple de son groupe, sans d'autres caractéristiques permettant de le subdiviser (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin de l'Ivaí (Figure 28), les *Sols à Gley* « *háplicos* » *dystrophes* sont limités à la plaine alluviale qui longe les derniers kilomètres de la rivière, soumise aux fluctuations de la nappe phréatique.

2.4.7. Cambisol humique dystrophe

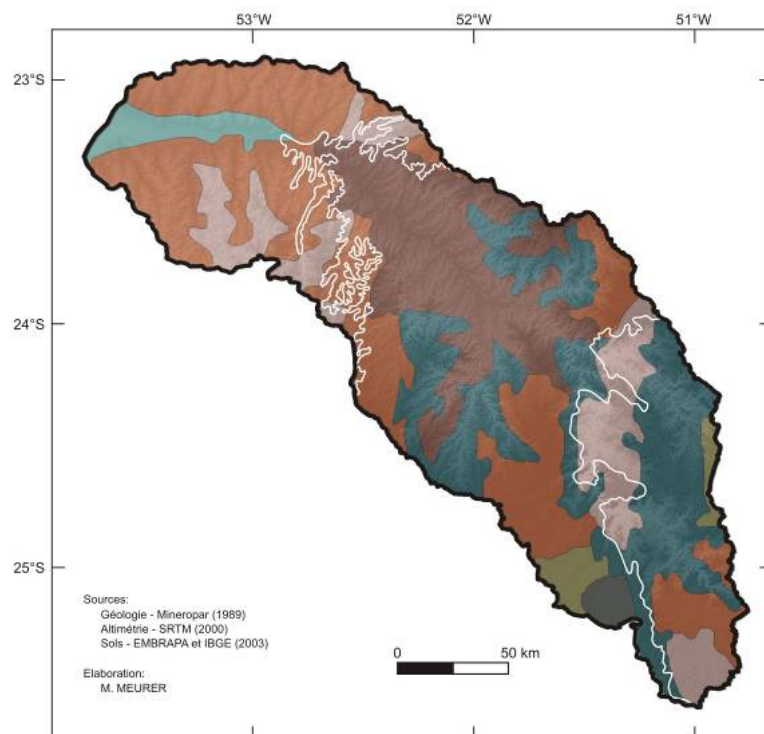
Le groupe des *Cambisols* rassemble tous **les sols qui possèdent un horizon B incipient en-dessous d'un horizon superficiel**. Ce type de sols se forme sous plusieurs conditions de matériel d'origine, de climat et de relief, de sorte que ses caractéristiques sont très hétérogènes (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin de l'Ivaí (Figure 28), les *Cambisols* sont limités aux versants de forte pente dans la région de l'escarpement du 3^{ème} Plateau. Classés comme *Cambisols humiques dystrophes*, ces sols **sont riches en matière organique (humus)** dans l'horizon supérieur, et **pauvres en bases (dystrophie)** dans l'horizon B. Ce ne sont pas des sols bien développés.

2.4.8. Néosols aréniques quartzeux

Les *Néosols aréniques quartzeux* sont les sols constitués par du matériel minéral, **peu épais, sans l'expression de l'activité des processus pédogénétiques**. En fait, les *Néosols aréniques quartzeux* possèdent une fraction sableuse importante, presque sans matériel organique (EMBRAPA, 1999).

Dans le bassin versant de l'Ivaí (Figure 28) ces sols sont présents de façon ponctuelle. A l'échelle du versant, ils sont généralement placés dans la partie basse et dans les fonds de vallées, sur des terrains ayant le grès Caiuá comme substrat.



- LATOSOL VERMILLON distrophe
- NITOSOL VERMILLON eutrophe
- NEOSOL LITHIQUE eutrophe
- ARGISOL VERMILLON-ORANGE distrophe
- CAMBISOL HUMIQUE distrophe
- NITOSOL distrophe
- SOL A GLEY distrophe

* NEOSOL ARENIQUE QUARTZEUX (inexpressifs à cette échelle)

Figure 28. Distribution des sols dans le bassin versant de l'Ivaí. Les lignes blanches indiquent les limites entre les trois grands compartiments lithologiques du bassin versant.

2.5. La végétation originelle

Le territoire brésilien s'étire entre les latitudes 5° N et 53° S, et les altitudes y varient entre 0 m et 2 994 m, ce qui permet une grande variabilité de conditions pour le développement de la végétation. Le bassin versant de l'Ivaí se trouve à la transition entre la zone tropicale et la Zone Subtropicale (ou Tempérée), et les altitudes varient entre 230 m et 1 250 m. Les types de végétation que l'on y rencontre appartiennent autant à une zone qu'à l'autre.

Selon Hertel (1969), les premières études sur la végétation originale de l'État du Paraná (et par conséquent la végétation du bassin versant de l'Ivaí) datent de 1929, et ont été réalisées par le botaniste Gonzaga de Campos. Évidemment, le degré de précision de ces travaux était particulièrement faible, mais ceci était parfaitement acceptable compte

tenu des conditions de travail. Ultérieurement, entre 1932 et 1969, de nouveaux travaux de cartographie de la végétation du Paraná ont été faits par Maack, qui a détaillé les types de végétation, leurs limites, et les transformations observées au fil de la recherche. La carte de la végétation élaborée par Maack pour l'Etat du Paraná est jusqu'à aujourd'hui la plus détaillée qui ait été faite et pour cette raison elle a été choisie pour la représentation de la végétation du bassin versant de l'Ivaí dans cette recherche (Figure 33).

Pour comprendre la nomenclature et la distribution des types de végétation dans le bassin versant de l'Ivaí, il faut d'abord comprendre les critères utilisés par l'IBGE (2004b) pour l'élaboration de la Carte de Végétation du Brésil, à l'échelle du 1/5 000 000^{ème}, le document officiel le plus récent concernant la classification de la végétation brésilienne. Selon l'IBGE (2004b), cette cartographie des types de végétation du Brésil a été basée sur des critères physiologiques et écologiques, la hiérarchie des formations étant fondée sur les paramètres des milieux écologiques, en suivant une clé de classification. Le travail a commencé par une révision des cartes et documents bibliographiques précédemment produits, et s'est poursuivi avec l'application de la clé de classification.

Dans une première étape, la végétation a été séparée en deux types : **forêts** et **champs**. Ensuite, la végétation forestière a été subdivisée en zones, puis en tranches d'altitude (Tableau 3).

Tableau 3 – Critères de zone et altitude utilisées par l'IBGE (2004b) pour la distinction des forêts dans les Régions Phytoécologiques

Zone	Terres Basses	« Sub-montagnard »	Montagne	Haute-montagne
5° N – 16° S	5 m– 100 m	100 m – 600 m	600 m – 2000 m	Au-dessus de 2000 m
16° S – 24° S	5 m – 50 m	50 m – 500 m	500 m – 1500 m	Au-dessus de 1500 m
24° S – 53° S	5 m – 30 m	30 m – 400 m	400 m – 1000 m	Au-dessus de 1000 m

Les derniers niveaux de classification ont pris en compte des informations obtenues à partir des diagrammes ombrothermiques, des isolignes du nombre de jours secs, des données de température et humidité, des images satellitales et des travaux sur le terrain.

Dans le cas de la végétation des « champs », ceux-ci ont été classés selon des critères physiologiques, comme la densité et la taille de la végétation, et ont été subdivisés dans les catégories suivantes : forêt, formation arborée, formation arbustive, parc et faciès herbacé-arbustif.

Selon la Carte de la Végétation du Brésil (IBGE, 2004b), le bassin versant de l'Ivaí était originalement recouvert presque entièrement par deux types de végétation : la **Forêt saisonnière semi-décidue** et la **Forêt ombrophile mixte ou Forêt d' Araucárias**. De façon secondaire, deux autres domaines végétaux étaient présents de façon plus localisée : la **Steppe ou Campo** et la **Savane ou Cerrado** (Figure 33).

2.5.1. Forêt saisonnière semi-décidue

La **Forêt saisonnière semi-décidue** (Figure 29) est directement liée aux conditions climatiques. Dans la zone subtropicale, cette région phytoécologique est conditionnée par

deux saisons, une saison pluvieuse à températures moyennes autour de 21° C, et une courte saison sèche dont les températures moyennes peuvent se maintenir au-dessous de 15° C. Pendant ces conditions de climat plus froid et sec, la végétation est soumise à un repos physiologique, provoqué surtout par les basses températures ; autour de 20 % à 50 % de la végétation perd ses feuilles (IBGE, 2004a et b).

Les genres prédominants sont tous d'origine néotropicale, comme par exemple *Tabebuia spp.* (Ipê), *Swietenia spp.* (Mogno ou Acajou d'Amérique), *Paratecoma spp.* (Peroba) et *Carinana spp.* (Jequetibá). D'autres genres d'origine paléotropicale sont aussi présents, comme *Terminalia spp.* (Pau-louro, Capitãozinho) et *Erythrina spp.* (Corticeira). Les genres d'origine australasienne sont aussi représentés, comme *Cedrela spp.* (Cèdre) et *Sterculia spp.* (Chichá ou Achichá).

Dans le bassin versant de l'Ivaí, la Forêt saisonnière semi-décidue est présente dans les deux tiers inférieurs du bassin versant, principalement dans les secteurs d'altitudes plus réduites. Parfois, ce type de végétation entre par les vallées, en étendant ses limites vers la partie amont du bassin versant.

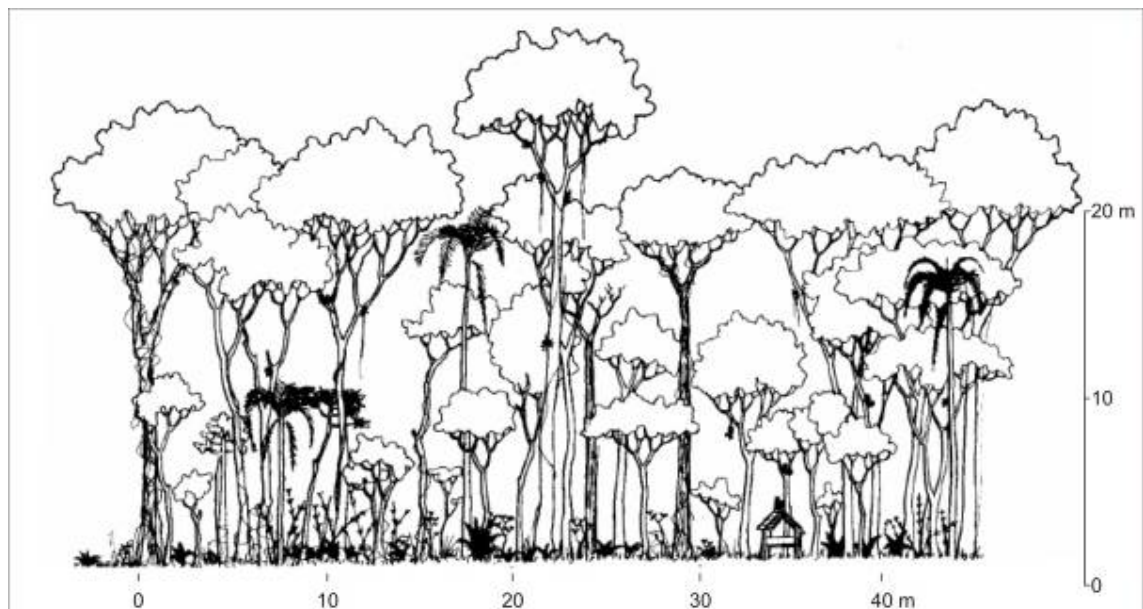


Figure 29. Profil schématique de la Forêt Saisonnière Semi décidue. Source : Roderjan et. al. (2002)

2.5.2. Forêt ombrophile mixte ou Forêt d'Araucárias

La **Forêt ombrophile mixte** (Figure 30), aussi connue comme la **Forêt d' Araucárias** , est présente dans les régions de climat ombrophile, sans saison sèche, où les températures moyennes sont autour de 18°C et où sont caractérisés 3 à 6 mois plus froids, avec des températures moyennes au-dessous de 15°C. Cette région phytoécologique est limitée aux plateaux du sud du Brésil, dans les terrains placés à des altitudes supérieures à 500 m. Quelques boisements de Forêt ombrophile mixte peuvent être rencontrés sur les terrains les plus élevés de la région sud-est du Brésil, comme par exemple sur les hauts escarpements de l'intérieur de l'Etat de São Paulo (IBGE, 2004 a et b).

Dans la Forêt ombrophile mixte, on trouve les deux seules espèces de conifères du Brésil : *Araucaria angustifolia* (Araucária, Pin du Paraná ou Pin du Brésil) et *Podocarpus*

lambertii (Pinheirinho). L'*araucária* est l'espèce-type de cette région phytoécologique, car elle représente autour de 40 % des individus arborés. Outre l'*araucária*, on rencontre aussi des groupements d'individus des genres *Ocotea spp.* (Imbuia) et *Nectandra spp.* (Canela), et d'autres groupements peu développés, avec prédominance de *Podocarpus lambertii* (Pinheirinho), *Drimys brasiliensis* (Casca-d'anta), *Capiscondendron dinisii* (Pimenteira) et *Ilex spp.* (Erva-mate, Caunas e Congonhas).

Dans le bassin de l'Ivaí, la Forêt ombrophile mixte est présente dans le tiers supérieur du bassin versant, où les altitudes imposent des climats plus froids. Dans la partie intermédiaire du bassin versant, la Forêt ombrophile mixte est aussi présente dans les secteurs les plus élevés aux alentours de la commune de Campo Mourão, qui donnent les conditions nécessaires à ce type de végétation.

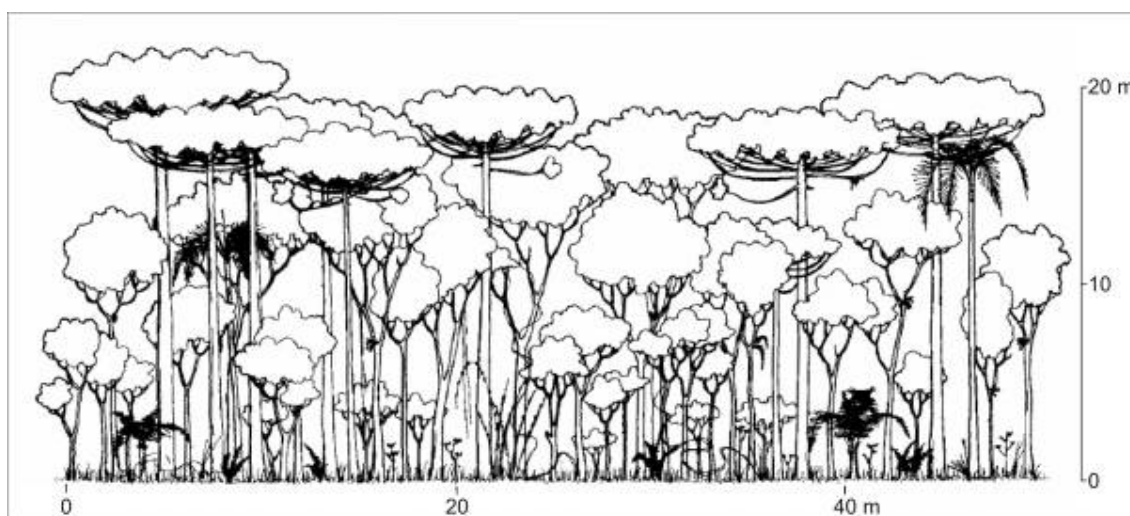


Figure 30. Profil schématique de la Forêt ombrophile mixte ou Forêt d'Araucarias. Source : Roderjan et al. (2002).

2.5.3. Steppe ou campo

Les **Steppes** du sud du Brésil (Figure 31), appelées localement **Campos** (l'équivalent de la **Pampa** en Argentine et Uruguay), sont les terrains recouverts par de la végétation herbacée et soumis à des climats subtropicaux, sans saison sèche, mais avec des températures très froides pendant les mois d'hiver et le passage fréquent des fronts polaires. Ce froid intense, associé au vent des fronts polaires, provoque une limitation physiologique pour la végétation qui ressemble à celle des climats secs à évapotranspiration intense. Les fréquents incendies provoqués par les bergers pour le renouvellement des pâturages naturels fonctionnent aussi comme une limite à la croissance de la végétation. En fait, les *campos* sont l'héritage d'une période plus froide et sèche antérieure, mais les conditions climatiques actuelles, plus chaudes et humides, favorisent l'avancée des forêts au détriment de la végétation herbacée (IBGE, 2004 a et b).

La végétation des *campos* est formée surtout par des graminées des genres *Stipa spp.* et *Agrotis spp.* D'autres genres sont aussi présents, comme *Paspalum spp.* et *Axonopus spp.*

Dans le bassin versant de l'Ivaí, les steppes se trouvent ponctuellement mêlées à d'autres types de végétation, surtout avec la Forêt ombrophile mixte dans les secteurs les

plus élevés du bassin versant, où les climats plus froids limitent le développement des autres types de végétation.

Un autre type de végétation herbacée est aussi présent dans le bassin versant de l'Ivaí, celui qui occupe la plaine inondable qui longe les derniers kilomètres du chenal fluvial. Cette végétation est conditionnée par la saturation des sols et les fréquentes montées des eaux, de sorte que le terme « steppe » n'est pas le meilleur pour dénommer ces champs inondables et la végétation de leurs marécages.

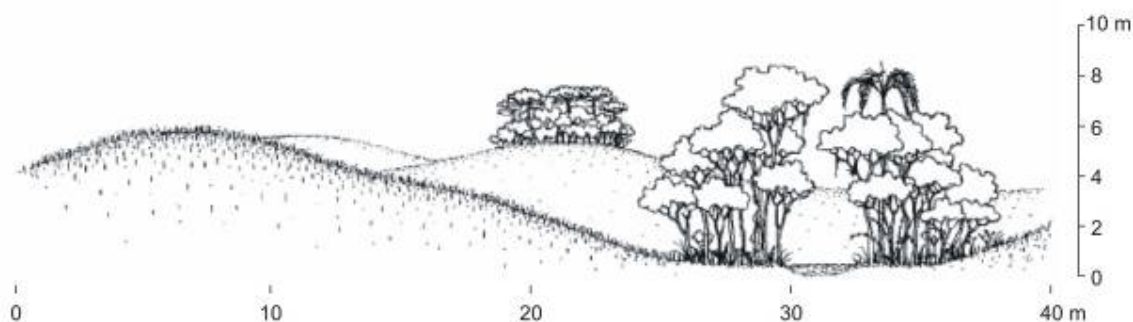


Figure 31. Profil schématique de la Steppe ou Campo. Source : Roderjan et. al. (2002).

2.5.4. Savane ou cerrado

La **Savane** (Figure 32), qui au Brésil reçoit le nom de **cerrado**, est la végétation qui s'est formée sous un climat tropical chaud, avec des températures moyennes comprises entre 22°C et 27°C, des caractéristiques sub-humides, une saison de pluies estivales et une saison sèche hivernale. La couverture végétale est formée par deux strates, l'une arborée-arbustive et l'autre herbacée. Dans la strate arborée-arbustive prédominent les individus de petite taille, jusqu'à 12 mètres de hauteur, avec des branches à écorces épaisses, tordues, parfois épineuses. Les feuilles, épaisses, peuvent être brillantes ou recouvertes de poils. La strate herbacée est dominée par des graminées, mais présente aussi des herbes et de petits arbustes. Quelques facteurs limitent le développement d'une végétation de grande taille : les sols sont très acides et possèdent une importante toxicité liée à l'excès d'aluminium ; le climat a une saison sèche bien marquée et les incendies sont très fréquents pendant la période estivale (IBGE, 2004 a et b).

L'Etat du Paraná n'est pas compris dans les limites du biome qui constitue le **cerrado** mais cette végétation est présente dans des secteurs isolés de son territoire. Des théories ont été élaborées pour expliquer cette occurrence du **cerrado** au Paraná ; elles sont basées sur des arguments comme le déficit en eau (théorie climatique), l'interférence humaine (théorie anthropique), la pauvreté des sols (théorie édaphique), ou l'histoire climatique (théorie paléoclimatique) (STRAUBE, 1998 ; LIBERALI, 2003). La diversité des espèces a été étudiée par Liberali (2003) dans un petit territoire relictuel formé de **cerrado**, situé dans la commune de Campo Mourão.

Selon Straube (1998), l'occurrence du **cerrado** dans le bassin versant de l'Ivaí a été observée par Maack en 1941. Cette végétation occupait quelques secteurs dans la commune de Campo Mourão et d'autres dans le tiers inférieur du bassin versant. Les restes du **cerrado** de Campo Mourão sont aujourd'hui protégés dans une Station écologique, tandis que les reliques présentes dans la partie inférieure du bassin versant sont presque

inconnues. A environ 50 km avant l'extrémité aval de l'Ivaí, Straube (1998) a décrit un paysage de *cerrado* bien préservé, sur une surface d'à peu près 700 ha.

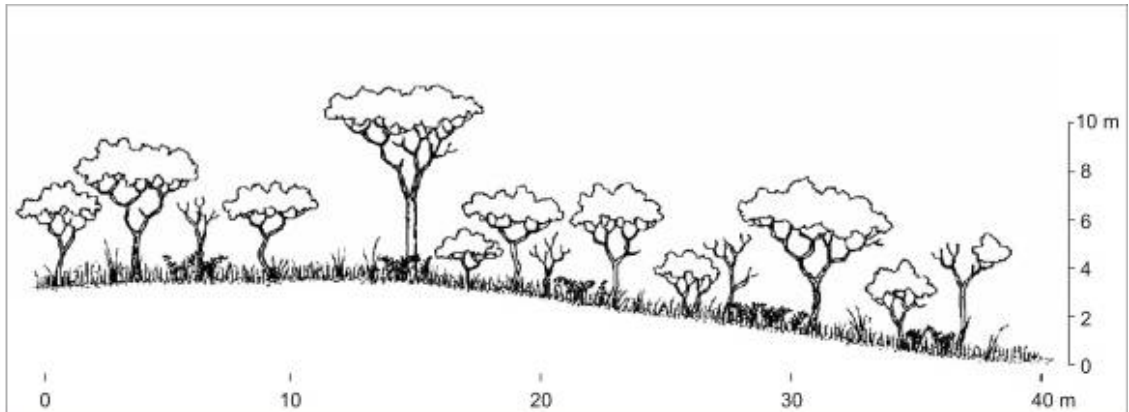
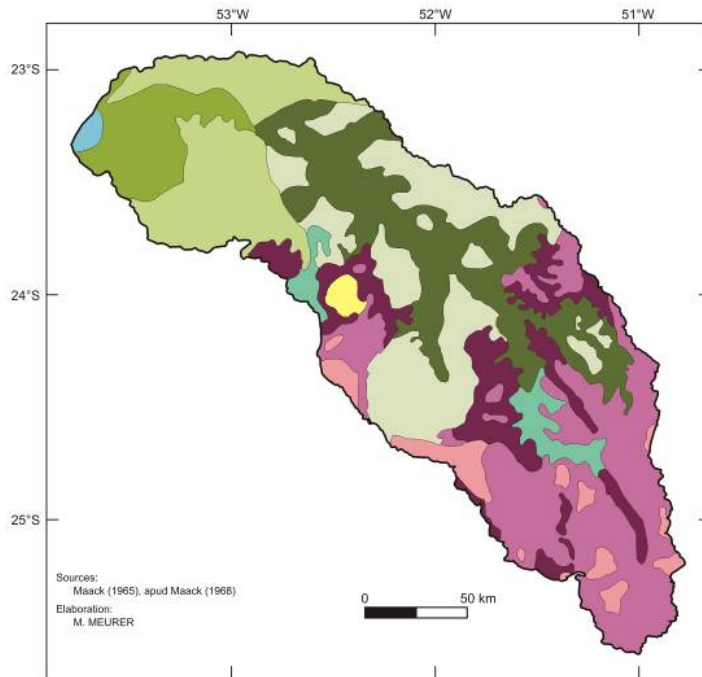


Figure 32. Profil schématique de la Savane ou cerrado. Source : Roderjan et. al. (2002).



- | | | |
|--|---|--|
| Sources:
Maack (1965), apud Maack (1968)
Elaboration:
M. MEURER | <p>IBGE (2004)</p> <ul style="list-style-type: none"> Forêt Ombrophile Mixte (Forêt d'Araucárias) Forêt Saisonnière Semi-décidue Savanne (Cerrado) Steppe (Campo) | <p>MAACK (1968)</p> <ul style="list-style-type: none"> Forêt d'Araucárias avec bambous (<i>taquara</i>) et palmiers, riches en <i>Dicksonias</i> avec prédominance des <i>Arecastrum romanzoffi</i>, mais aussi avec <i>Euterpe edulis</i> dans les régions chaudes. Sols fertiles. Forêt secondaire avec prédominance de <i>Sambaias</i> dans les zones d'Araucárias. Région principale de colonisation, avec des terres usées périodiquement. Système de "roças" (petit labours) avec faible rotation des cultures Zones primaires d'Erva Mate (<i>Ilex paraguariensis</i>) dans la région de Forêt d'Araucárias Forêt Pluviale Sub-tropicale d'intérieur, épiphytes et lianes en mineure quantité. Riche en <i>Cyatheaceas</i>. Forêt Pluviale Tropicale moins exubérant avec nette pénurie de palmiers (prédominance d'<i>Arecastrum romanzoffiana</i>. Rarement <i>Euterpe</i>) Forêts Pluviales Tropicales dévastées avec pâturages artificielles, cultures de coton, céréales, etc Forêt Pluviale Tropicale des plateaux d'intérieur e de la vallée de l'Ivaí, riche en épiphytes, lianes et palmiers (prédominance d'<i>Euterpe edulis</i>) Forêt Pluviales Tropicales d'intérieur secondaires dévastées, substituées par café, pâturages et d'autres cultures Campos cerrados du type des savanes du Plateau Central du Brésil (steppe arbustive) Marécages et végétation herbacée de la plaine d'inondation du Fleuve Parana avec prédominance des graminées et bambous (du type <i>taquaruçu</i>) |
|--|---|--|

Figure 33. Végétation originale du bassin versant de l'Ivaí, selon la cartographie faite par Maack. (1965, 1968). Corrélation avec la Carte de Végétation du Brésil (IBGE, 2004).

2.6. Histoire de l'occupation et de l'usage du sol

Le bassin versant de l'Ivaí présente une importante hétérogénéité en ce qui concerne les facteurs de contrôle naturels, néanmoins l'étude des facteurs de contrôle naturels ne suffit pas si on veut comprendre l'origine et le fonctionnement des paysages qu'on observe actuellement. Au fil du temps, la superposition des différents épisodes de l'histoire de l'occupation du bassin versant a progressivement transformé certaines de ses caractéristiques naturelles : la couverture végétale a été fortement défrichée, plusieurs zones habitées d'importance majeure ou secondaire sont apparues, et les sols ont été utilisés pour des activités agricoles et économiques plus ou moins intensives. Il en résulte que le bassin de l'Ivaí qu'on voit à présent est une mosaïque de paysages avec différents degrés d'interférence humaine. Afin de comprendre comment cette mosaïque de paysages a été créée, on va présenter ici les principales étapes de l'histoire de l'occupation du bassin versant.

2.6.1. La période exploratoire

Les territoires du continent américain ont été objets de conflits entre les royaumes de Portugal et d'Espagne dans les années qui ont suivi la période des découvertes, à la fin du XV^e siècle et au début du XVI^e siècle. Dans la partie sud du Brésil, ces conflits ont été intenses, et les frontières entre les deux royaumes ont changé plusieurs fois, soit par la signature d'accords entre les deux parties, soit par la prise de possession des terres vides.

Au début du XVI^e siècle, le territoire qui correspond à l'Etat du Paraná était immense et vide, occupé seulement par les populations indigènes autochtones. Malgré cette tranquillité apparente, les royaumes de Portugal et Espagne envoyaient des expéditions de reconnaissance des nouvelles terres à fin de les occuper ultérieurement. En 1524, le portugais Aleixo Garcia organisa une expédition en direction du Pérou afin de trouver la mythique Montagne d'Argent (*Potosi*). Accompagné par à peu près 2 000 indigènes, ils partirent de São Vicente, port de la côte de l'Etat de São Paulo, en traversant l'intérieur du Paraná par le Chemin de Peabiru. Il s'agissait en fait d'un ensemble de chemins probablement utilisés par les peuples précolombiens qui reliaient les Andes péruviennes au littoral brésilien en passant par l'intérieur de l'Etat du Paraná.

En 1531, une expédition coordonnée par le portugais Pero Lobo partit de la côte de la Cananéia (Etat de São Paulo) et traversa le territoire du Paraná pour arriver jusqu'au fleuve Paraná. Pero Lobo a probablement utilisé le même chemin que Aleixo Garcia, celui de Peabiru (NOELLI et MOTA, 1999).

Une des expéditions les plus importantes dans l'histoire du Paraná a été celle faite en 1541 par l'Espagnol Álvar Nuñez Cabeza de Vaca. Avec pour objectif de prendre possession des terres vides au profit du royaume d'Espagne, Cabeza de Vaca partit de la côte sud du Brésil (actuel Etat de Santa Catarina), en traversant l'Etat du Paraná dans le sens est-ouest, par le Chemin de Peabiru, en direction de la ville d'Asunción (Paraguay). Pendant

cette traversée, Cabeza de Vaca prit des variantes du Chemin de Peabiru, et il visita les vallées de la Tibagi, de l'Iguaçu et de l'Ivaí.

Une autre expédition importante qui ait traversé l'intérieur du territoire du Paraná fut celle de l'allemand Ulrich Schmidel en 1552. Schmidel partit du Paraguay pour aller au port de São Vicente. Le trajet suivi par Schmidel est un peu controversé, mais en tout cas les descriptions qu'il a laissées des tribus indigènes et leurs habitudes ont été d'une grande valeur pour les explorateurs ultérieurs.

D'autres expéditions ont parcouru le territoire du Paraná, mais sans la même préoccupation d'enregistrer en détail les observations faites au long du chemin. Ainsi, les documents et les carnets de voyage des explorateurs cités ci-dessus constituent les témoignages les plus importants sur le territoire du Paraná aux XV^e et XVI^e siècles.

2.6.2. La colonisation espagnole et les Réductions jésuites

Après la période des premières explorations, dans la deuxième moitié du XVI^e siècle, les royaumes de Portugal et Espagne ont commencé à faire des efforts effectifs d'occupation des territoires récemment découverts. Ces efforts d'occupation se sont exprimés par la fondation des premières villes de ces nouvelles terres.

Selon le Traité de Tordesillas, signé par le Portugal et l'Espagne en 1494, les nouveaux territoires situés à l'ouest du méridien tracé à 370 lieues (1 770 km) à l'ouest des îles de Cap Vert étaient la propriété du royaume d'Espagne, tandis que les terres situées à l'est de ce méridien étaient la propriété du royaume de Portugal.

Les Espagnols occupaient déjà la ville d'Asunción, au Paraguay, mais ils étaient confinés à l'intérieur du continent, sans une bonne sortie vers la mer, tandis que les Portugais occupaient la partie est du continent sud-américain, en contrôlant toute la côte. Entre les deux royaumes, étaient les territoires dits « vides », peuplés en fait de tribus indigènes et encore peu connus.

L'occupation espagnole du territoire du Paraná a commencé en 1554, avec l'établissement du village d'Ontiveiros, sur les berges du Paraná (Figure 34). En 1557, ce village a été déménagé à la confluence de la Piquiri et du Paraná, et son nom a été changé en Ciudad Real del Guayra (actuellement la ville de Guaíra, dans l'Etat du Paraná). A partir de cet établissement, les Espagnols sont entrés dans l'intérieur du Paraná, en utilisant les vallées de l'Ivaí et du Piquiri comme axe principaux de déplacement. En 1576 ils ont établi sur les berges de la Corumbataí la ville de Vila Rica del Espiritu Santo et, en 1579, ils ont déplacé cette ville à la confluence de la Corumbataí et de l'Ivaí (actuellement la ville de Fênix, Etat du Paraná).

A la fin du XVI^e siècle, les missionnaires jésuites avaient souhaité faire œuvre de pacification et d'évangélisation des indigènes, de façon semblable à ce qui était déjà en cours dans les villes de la côte nord-est du Brésil. En profitant de cette occasion pour renforcer son domaine sur les territoires récemment occupés, le roi d'Espagne donna en 1608 l'autorisation aux Jésuites de commencer leurs travaux. Au cours des années suivantes, les missionnaires jésuites installèrent des « réductions » sur le territoire du Paraná. Selon Maack (1968), il y avait sept réductions dans la vallée de l'Ivaí et deux dans la vallée de la Corumbataí (un affluent de l'Ivaí) ; selon Noelli et Mota (1999) il y avait seulement quatre réductions dans la vallée de l'Ivaí.

Les réductions ou missions étaient des villages organisés par des Jésuites, où étaient rassemblés les indigènes, et qui avaient pour but premier l'évangélisation. Outre les activités religieuses, les réductions avaient une économie autonome et auto-suffisante, basée sur l'agriculture de subsistance, l'élevage du bétail, la récolte d'*erva-mate*⁴, la production de coton pour le tissage des vêtements, et d'autres activités. Dans les réductions, les indigènes étaient soumis à l'enseignement catholique, ce qui effaçait les traces de leur ancienne culture. En raison de l'existence de ces réductions dans le bassin versant de l'Ivaí et dans les bassins versants voisins, les déplacements des missionnaires et indigènes dans la région devinrent beaucoup plus fréquents. Pour se déplacer d'une réduction à l'autre ou pour aller jusqu'aux villages indigènes encore existantes, le chemin utilisé était les vallées des cours d'eau (NOELLI et MOTA, 1999).

Si pour les missionnaires les réductions étaient importantes comme instruments d'évangélisation, pour les Espagnols elles étaient importantes puisqu'elles occupaient les territoires vides et assuraient une relative paix avec les indigènes (BARCELOS, 2000 ; COSTA et MENEZES, 2002). Malgré cette situation de paix, les indigènes étaient encore capturés par les explorateurs portugais, pour être utilisés comme main-d'œuvre esclave.

La présence des réductions du territoire du Paraná attira l'attention des Portugais qui cherchaient des richesses et des indigènes pour l'esclavage. Dès lors, les réductions souffrirent des attaques de groupes d'explorateurs organisés, qui partageaient les richesses acquises de façon proportionnelle au pourcentage investi dans l'organisation de l'expédition

Ces expéditions, les *Bandeiras*⁵, s'organisaient principalement dans l'Etat de São Paulo, d'où elles partaient en direction des réductions jésuites situées plus à l'ouest. Très vite, ces expéditions se sont révélées être un enjeu très rentable, de sorte que la fréquence des *Bandeiras* augmentait d'année en année. Il en résultait que les réductions jésuites étaient de plus en plus attaquées, pillées, écrasées, ce qui empêchait les missionnaires d'assurer la continuation de l'œuvre d'évangélisation. Ainsi, les réductions chutaient-elles les unes après les autres. L'année 1632 fut marquée par la destruction des réductions de la région de Guairá, et elle marque la fin de la période des Jésuites sur le territoire du Paraná. Après ces événements, les Jésuites quittèrent le territoire du Paraná en direction du sud, en traversant la rivière Uruguai et en occupant la partie ouest du plateau de l'Etat du Rio Grande do Sul. Avec la fin des réductions jésuites, une nouvelle période commença pour les *Bandeiras*. Ces expéditions avaient encore pour but la recherche de richesses et d'indigènes, mais elles cherchaient aussi des endroits qui permettraient l'occupation des terres vides de l'intérieur du Paraná. Ainsi, plusieurs expéditions furent organisées entre le milieu du XVII^e et le milieu du XVIII^e siècles, et plusieurs villes furent créées.

⁴ L'Erva-mate (*Ilex paraguariensis*) est un genre de thé vert beaucoup consommé au sud du Brésil, en Argentine, Uruguay et Paraguay.

⁵ Drapeaux

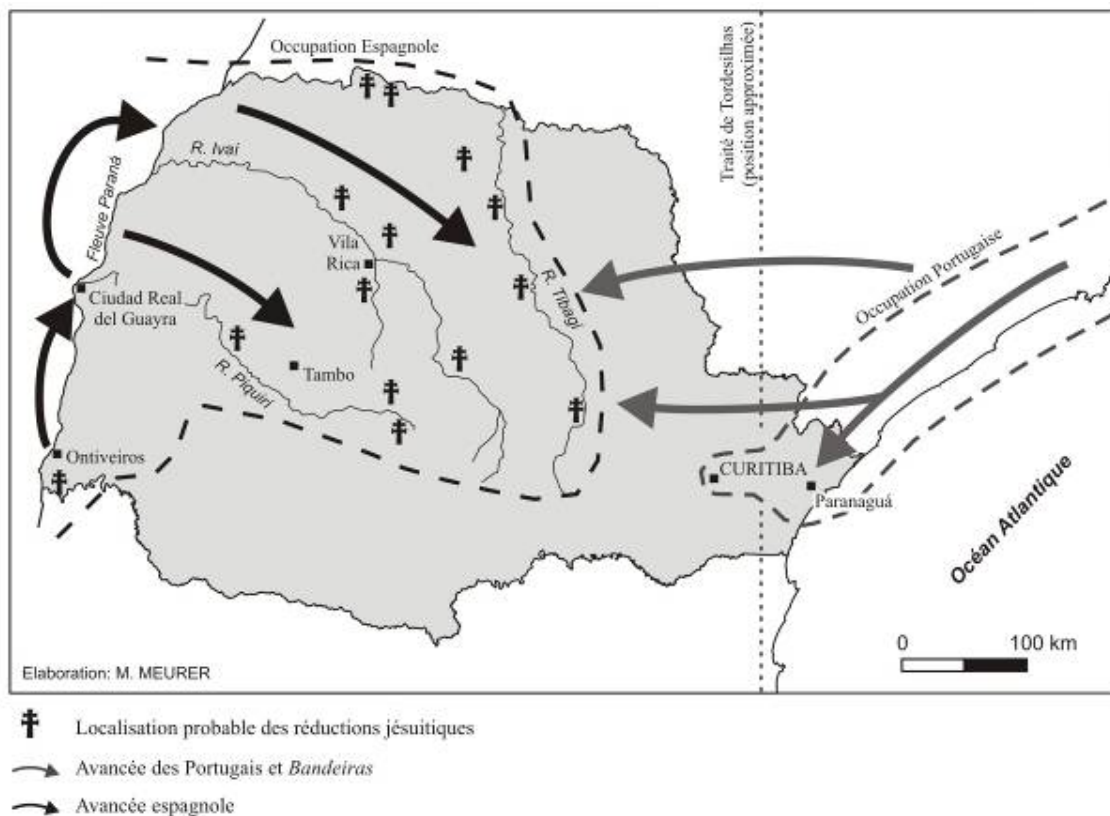


Figure 34. La dynamique d'occupation du territoire du Paraná par les Espagnols et Portugais aux XVI^e et XVII^e siècles.

2.6.3. L'occupation portugaise, le cycle de l'or et le *tropeirismo*

L'occupation portugaise du territoire du Paraná a commencé par la région côtière, où les mineurs, venus du littoral de l'Etat de São Paulo, s'installaient, attirés par des rumeurs quant à la présence de l'or. Au milieu du XVII^e siècle, ces mineurs ont fondé la première ville sur le territoire du Paraná : la ville de Paranaguá. Peu temps après, quelques mineurs sont partis à la recherche de l'or sur le 1^{er} Plateau, où ils ont fondé un village, Nossa Senhora da Luz e Bom Jesus dos Pinhais, qui ultérieurement a été appelé Curitiba.

L'activité minière dans l'Etat du Paraná n'était pas très rentable car la quantité d'or exploité dans les cours d'eau de la région était limitée. A la fin du XVII^e siècle, une importante zone aurifère a été découverte dans le Brésil central, dans l'Etat de Minas

Gerai, ce qui a décalé l'activité minière dans cette direction et mis fin au cycle de l'or dans le Paraná. Dès lors, la ville de Paranaguá s'est mise à vivre seulement de l'agriculture (surtout du manioc), tandis que Curitiba est passé à l'élevage de bétail. Les deux villes échangeaient leurs produits afin d'assurer leur approvisionnement et d'établir un commerce de complémentarité.

Avec l'expansion de l'activité minière au centre du pays, la demande en bêtes pour le transport, l'alimentation et la manufacture d'articles en cuir a augmenté. Les explorateurs paulistes ont organisé des voyages pour prendre des bêtes au sud du pays, principalement dans l'Etat du Rio Grande do Sul et les emmener jusqu'au marché de la ville de Sorocaba, dans l'Etat de São Paulo, qui approvisionnait les zones minières situées plus au nord. C'était l'émergence d'une nouvelle activité : le *tropeirismo*.

La ville de Curitiba, placée sur ce trajet, est devenue le point obligatoire de passage et d'arrêt des troupes venues du sud. De cette façon, l'économie de Curitiba s'est déconnectée partiellement du littoral et elle s'est davantage intégrée au commerce avec le Sud et le Centre du pays, et la ville a accru son importance comme centre de peuplement, et comme centre politique et économique du Paraná (Figure 35).

Avec le *tropeirismo*, l'élevage de bétail est devenu une activité si rentable qu'elle s'est étendue au-delà des environs de Curitiba, en direction du 2^{ème} Plateau. De nouvelles villes ont été créées, comme Campo do Tenente et Castro, et de nouveaux chemins ont été ouverts pour le transport des troupes. Le long de ces chemins, des commerces, des fermes et des villages sont apparus. En 1820, le naturaliste français Auguste de Saint-Hilaire a enregistré dans son carnet de voyages l'importance du *tropeirismo* pour l'occupation des terres du 2^{ème} Plateau Paranaense (SAINT-HILAIRE, 1995).

Le déclin de l'activité minière au Brésil central a commencé à partir de 1750 mais le cycle économique du *tropeirismo* a persisté jusqu'à 1870, quand a débuté le système de transport par chemins de fer.

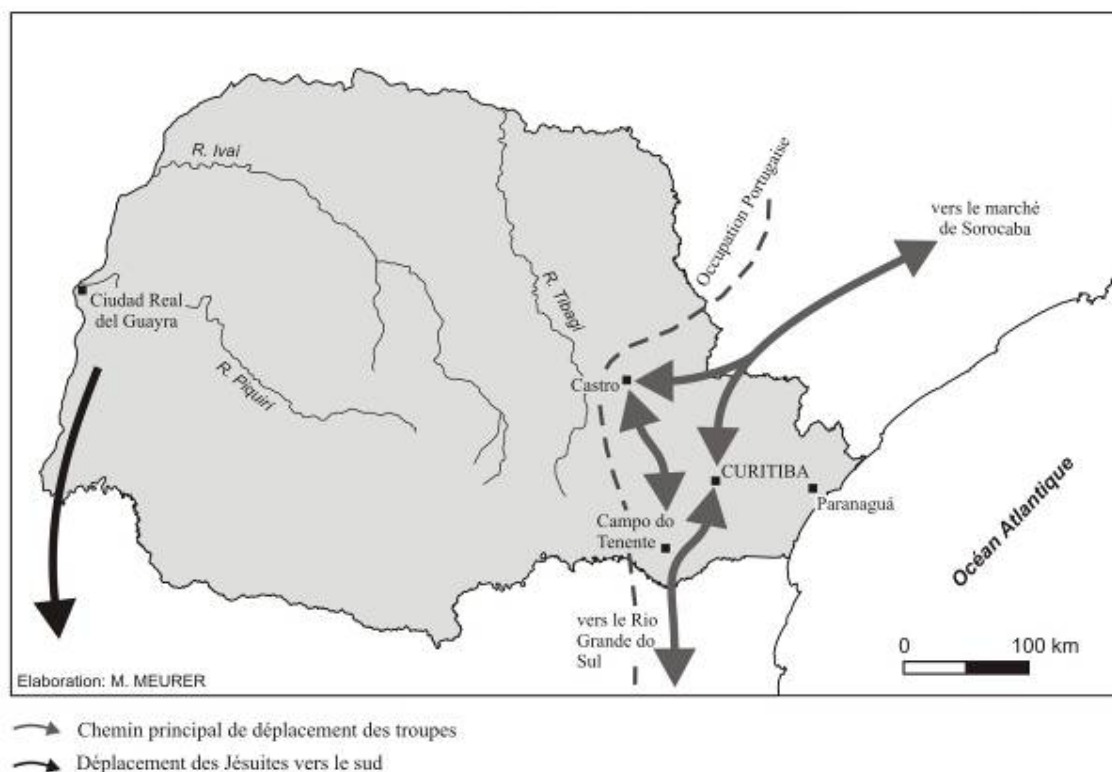


Figure 35. La dynamique d'occupation du territoire du Paraná aux XVII^e et XVIII^e siècles.

2.6.4. L'occupation du Paraná traditionnel et les cycles du bois e de l'erva-mate

A la fin du XVIII^e siècle, la situation politique au sud du pays était très instable. Inquiets d'une instabilité aussi proche, les Portugais ont décidé de stimuler l'occupation des territoires de l'intérieur du Paraná. En 1780, ils avaient rassemblé des documents et des cartes sur les vallées du Tibagi et de l'Ivaí, en ayant pour objectif l'organisation d'expéditions de reconnaissance et d'occupation. En 1781, une lettre du Ministre de la Marine adressée au Gouverneur commentait les difficultés du peuplement des vallées du Tibagi et de l'Ivaí, et demandait que fût prêtée attention aux vols qui survenaient le long de la Route de Viamão, le chemin utilisé par les *tropeiros* pour traverser l'Etat du Paraná (SIARQ, 2002).

En 1810, une expédition militaire franchit le territoire de Guarapuava, au centre du Paraná, sur le 3^{ème} Plateau, près des sources de l'Ivaí (Figure 39). Ces terres récemment conquises furent été distribuées à des colons selon le système de *sesmarias*. Les *sesmarias* étaient de grandes propriétés concédées par le gouvernement sous certaines conditions : le *sesmeiro*, qui recevait les droits sur la *sesmaria*, était obligé d'y fixer sa maison et de rendre les terres productives dans une période de temps préétablie, sous peine d'être exproprié. Le système de *sesmarias* a été annulé en 1822, mais il a persisté de façon non officielle jusqu'à 1850, quand la nouvelle loi sur les terres a été promulguée.

Entre 1814 et 1819, une nouvelle expédition a cherché un chemin qui puisse relier le territoire de Guarapuava à l'Etat du Rio Grande do Sul, où les *tropeiros* prenaient les bêtes

pour les vendre au marché de Sorocaba. Cette expédition a traversé la région de Palmas, située dans la partie sud de l'État du Paraná. En 1839, deux autres expéditions originaires de Guarapuava sont arrivées sur le territoire de Palmas. Ces deux expéditions avaient pour but la conquête du territoire qui était occupé à l'époque par des tribus indigènes. Les deux expéditions ont déclenché une dispute pour ces terres à peine conquises. En 1855, il a été décidé que les deux groupes seraient responsables de l'occupation de Palmas, l'un du côté est et l'autre du côté ouest. Le système de *sesmarias* a permis la colonisation de Guarapuava et Palmas, mais il n'a pas assuré la productivité attendue par le gouvernement. Les *sesmeiros* étaient surtout des gens déjà importants (politiciens, militaires, etc.) qui voyaient dans la possession de la terre une façon d'accéder aux niveaux les plus élevés de la société. L'intérieur du Paraná restait donc un espace inexploré.

Dans le bassin de l'Ivaí, un projet de peuplement a été mené en 1847 par le français Jean-Maurice Faivre. Faivre a reçu du gouvernement brésilien des terres pour établir une colonie française sur la rive droite de l'Ivaí. En dépit de tous ces efforts pour fixer ses compatriotes dans les nouvelles terres de la *Colônia Tereza* (actuellement Tereza Cristina), Faivre voyait les familles désertir jour après jour. Après sa mort, le gouvernement brésilien a assumé la direction de la colonie, mais peu a été fait pour garantir le succès de ce projet.

Entre 1872 et 1875, l'explorateur anglais Bigg-Wither a réalisé une expédition dans les vallées de la Tibagi et de l'Ivaí, afin de reconnaître la partie intérieure du territoire du Paraná quant à la viabilité d'un chemin de fer. Bigg-Wither a rédigé un journal décrivant de façon détaillée son aventure à l'intérieur du Paraná (BIGG-WITHER, 1974). Il a aussi élaboré une carte topographique des territoires parcourus par l'expédition (Figure 36).



Figure 36. Carte des vallées des rivières Tibagi et Ivaí, élaborée par Bigg-Wither entre 1872 et 1875.

Dans ses récits, l'anglais raconte sur son arrivée à *Colônia Tereza*, l'unique village existant dans la vallée de l'Ivaí à l'époque. Il enregistre la présence de 400 habitants colons

et de 40 indigènes (BIGG-WITHER, 1974). A partir de *Colônia Tereza*, l'expédition se lance en direction des vallées de l'Ivaí et de quelques affluents. Au long de ce trajet, des contacts avec des indigènes sont établis, ce qui montre que l'intérieur du territoire du Parana était encore occupé par les indigènes. Des membres de l'expédition trouvent la mort et quelques dessins de paysage, de plantes et de costumes indigènes sont réalisés. Deux de ces dessins montrent le paysage du bassin versant de l'Ivaí (Figures 37 et 38), et donnent une idée du paysage vers 1875.

La première scène (Figure 37) montre un indigène qui pêche à l'arc dans l'Ivaizinho, un affluent du haut bassin de l'Ivaí. Dans cette représentation d'une forêt très dense, on remarque des *Araucárias* (le sapin du Paraná) mélangés à quelques palmiers, quelques arbres non reconnaissables, des herbacées et des lianes. On note aussi un cours d'eau avec des rapides et petites chutes, peu profond. La deuxième scène (Figure 38) montre un cimetière à côté d'un campement dans la moyenne vallée de l'Ivaí. Sur ce dessin il est une nouvelle fois possible d'observer la forêt très dense, avec des palmiers, mais sans la présence de l'*Araucária*, cette espèce ne poussant qu'en altitude, sous un climat moins chaud. Au loin, il est possible de voir un cours d'eau, peut-être l'Ivaí, qui s'écoule sans chutes ou rapides, dans un chenal à petites îles ou bancs.

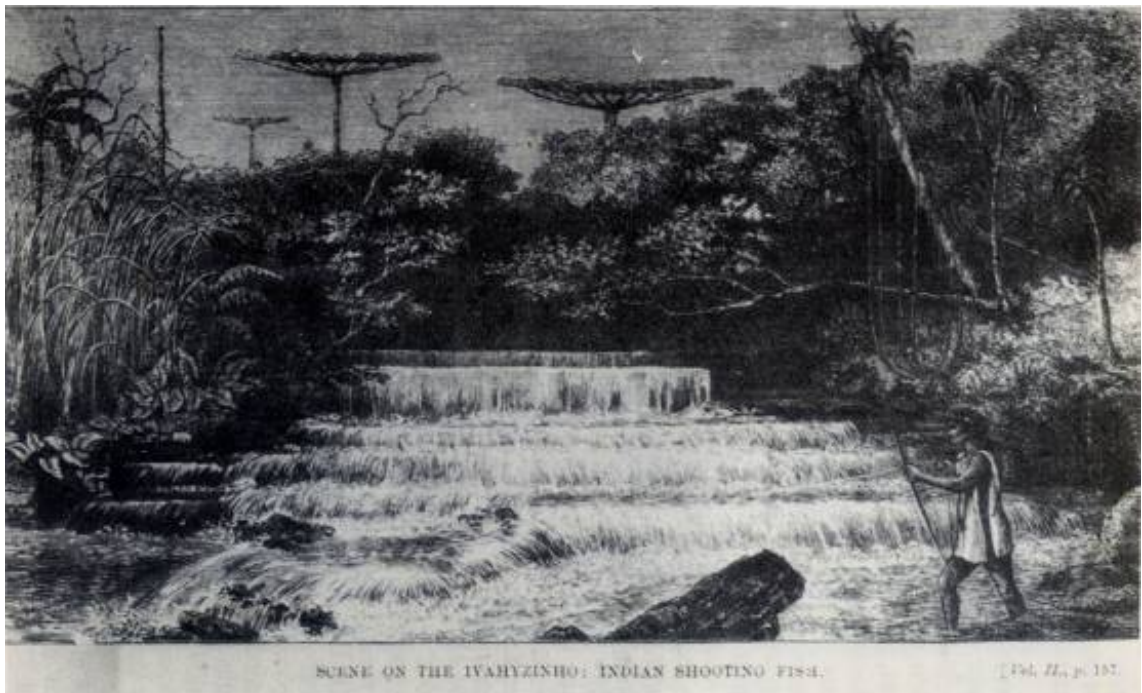


Figure 37. « Scène de la rivière Ivaizinho : Indigène tirant sur un poisson ». Dessin de Bigg-Wither.



Figure 38. « Notre cimetière dans le campement Ariranha ». Dessin de Bigg-Wither.

Sur la carte présentée par Bigg-Wither (Figure 36), il est possible d'observer les rivières Ivaí, Tibagi, Pirapó, quelques affluents, et aussi une partie de la Parapanema et du Parana représentées avec une remarquable exactitude. Le relief est figuré aussi de façon détaillée, montrant les deux grands escarpements qui traversent l'état du Paraná, mais aussi les plateaux et les collines de la vallée de l'Ivaí. La carte montre encore la position du Tropicque du Capricorne, les noms locaux de quelques escarpements et des indications sur les territoires occupés par les indigènes *Coroados*.

En 1850, le Paraná obtient son indépendance vis-à-vis de l'Etat de São Paulo. Dès lors le gouvernement du Paraná commence une nouvelle politique d'immigration afin d'occuper les territoires non explorés. Ainsi, entre 1853 et 1886 le Paraná a reçu autour de 20 000 immigrants (PARANÁ, 2007). Le haut bassin versant de l'Ivaí a reçu principalement des immigrants ukrainiens et polonais qui se sont consacrés à l'agriculture de subsistance, à l'exploitation de bois et à l'exploitation de l'*erva-mate*.

Avec l'arrivée des immigrants, s'est joué le scénario de la partie centrale du Paraná, connue aussi comme le Paraná Traditionnel. Ce dernier est caractérisé par le contraste entre les grosses propriétés improductives (héritage des premières *sesmarias*) et les petites parcelles occupées par les immigrants, avec une agriculture peu compétitive, en retard

par rapport aux autres régions. Les cycles économiques de l'exploitation du bois et de l'exploitation de l'*erva-mate* ont donné un nouveau sens à l'économie de la région, mais ils n'ont pas contribué au développement des infrastructures (SERRA, 1992). Ainsi, le Paraná Traditionnel reste-t-il une région peu développée, aux densités humaines très faibles, sauf dans les petits centres urbains qui concentrent les services, mais dont le commerce est peu développé (IPARDES, 2004).

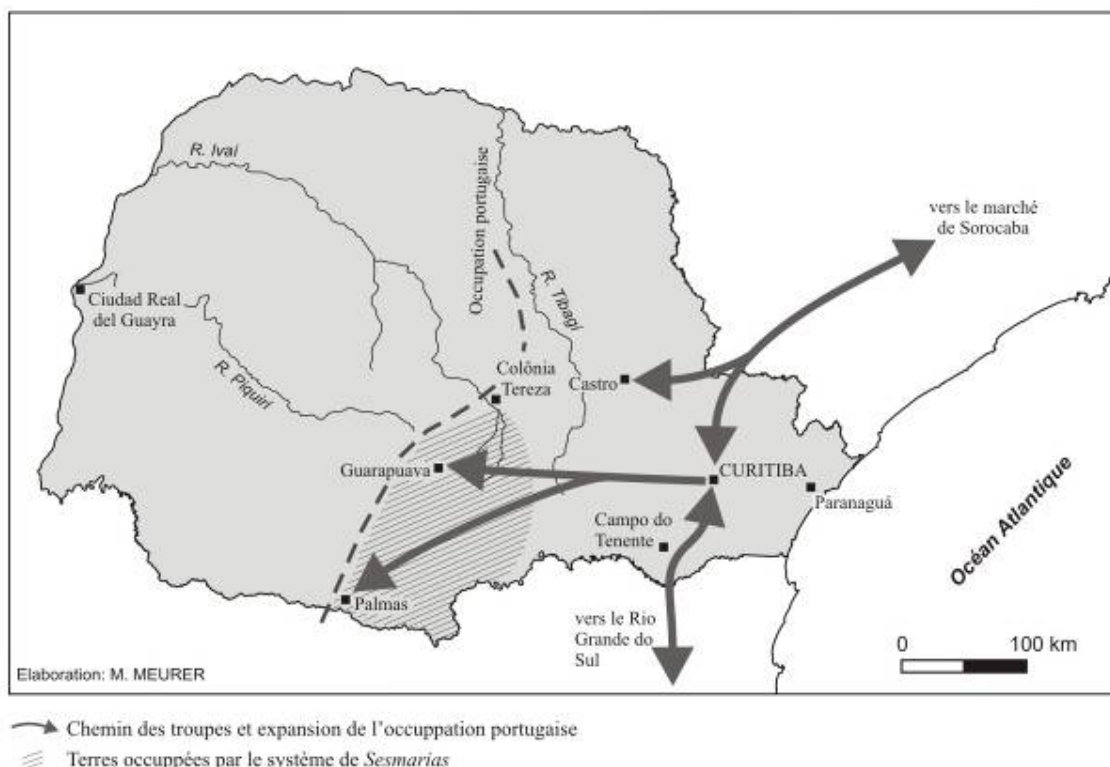


Figure 39. La dynamique d'occupation du territoire du Paraná aux XVIII^e et XIX^e siècles.

2.6.5. L'occupation du Nord et du Nord-Ouest du Paraná et le cycle du café

***“Paraná celeiro do Café Pelo teu glorioso passado Aqui vai a mensagem de fé
 Desta viola que chora o teu triste fato Sou um caboclo que vê com tristeza O
 teu café pela geada queimado Mas que sabe que o teu povo forte Nem diante
 da morte se vê derrotado” “Paraná cellier du Café Par ton glorieux passé Voici
 un message de foi De cette viole qui pleure ton triste sort Je suis un caboclo
 qui voit avec tristesse Ton café par le gel brûlé Mais qui sait que ton peuple fort
 Même en face de la mort ne sera vaincu” Geada do Paraná, musique composée
 par Teddy Vieira, interprétée par Tião Carreiro et Pardinho, 1964.***

Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, après sa séparation d'avec l'Etat de São Paulo, le Paraná fait des efforts pour occuper son territoire et développer son économie. Malgré la décadence de l'élevage de bétail, en raison de l'arrêt de l'activité minière au Brésil central et de l'implantation des chemins de fer, l'exploitation de l'*erva-mate* se révèle être

une activité extrêmement rentable et assure une part importante du budget du Etat. Les premières tentatives d'occuper le nord du Paraná ont été faites dans ce contexte, quand le gouvernement brésilien y a implanté une colonie militaire, afin d'établir une liaison avec l'Etat de Mato Grosso (SERRA, 1992).

A la fin du XIX^e siècle, la caféiculture des Etats de Minas Gerais et São Paulo était en pleine expansion, mais les terres encore disponibles ne présentaient pas de bons sols. Ainsi, la pression sur les terres vacantes du nord et nord-ouest du Paraná, qui possédaient de très bons sols, augmentait année après année. En raison de l'absence d'une politique nationale de colonisation des terres inoccupées, les caféiculteurs ont commencé à prendre possession de terres de façon irrégulière. Afin de contenir ces irrégularités et discipliner le processus d'occupation, le Paraná institutionnalise en 1893 la vente des terres vacantes, les prix des terres étant aussi établis par le gouvernement. Pendant cette première phase de colonisation, le gouvernement donne la priorité aux immigrants, avec l'idée que ces derniers rendront la terre plus vite productive.

A partir des années 1920 débute une nouvelle phase du processus d'occupation du nord du Paraná. L'Etat transfère la tâche de la colonisation aux entreprises privées, s'occupant seulement de la réglementation et de la fiscalisation de ces activités. La majeure partie des terres du nord-ouest du Paraná est alors achetée par deux compagnies de colonisation : la BRAVIACO – *Companhia Brasileira de Viação e Comércio* (Compagnie Brésilienne de Transport et Commerce) et la CMNP – *Companhia Melhoramentos Norte do Paraná*⁶ (Compagnie pour l'Amélioration du Nord du Paraná, en libre traduction).

La BRAVIACO était une branche de la *Brazil Railway Company*, une entreprise brésilienne propriété d'un groupe américain responsable de la construction du chemin de fer entre São Paulo et Rio Grande. Quant à la CMNP, c'était une branche de la *Paraná Plantations*, une entreprise anglaise qui était active dans la culture du coton, la construction de chemins de fer et l'achat et la vente de terres. Les deux entreprises reçurent le droit de défricher la forêt, de délimiter les terres vacantes et de promouvoir l'occupation du nord-ouest du Paraná, en ayant en échange de l'obligation de créer des villes et toute l'infrastructure nécessaire au développement de la région (Figure 40).

L'expérience de colonisation de la BRAVIACO a commencé avec l'ouverture d'un chemin entre la ville de Presidente Prudente, dans l'Etat de São Paulo, et les terres destinées à la colonisation, qui se trouvaient placées entre la Paranapanema et Ivaí, dans l'Etat du Paraná. Sur ces nouvelles terres, la compagnie a introduit le café, en faisant venir des migrants du nord-est du Brésil pour travailler dans les plantations. Petit à petit, des villes ont été créées et la forêt a cédé la place aux champs de café. Dans les années 1930, malgré les bons résultats obtenus, les terres concédées à la BRAVIACO ont été récupérées par le gouvernement en raison d'un manquement au contrat. De son côté, la CMNP a commencé le processus d'occupation du nord du Paraná en vendant des petites parcelles destinées à l'agriculture, surtout pour des caféiculteurs venus des Etats de Minas Gerais et São Paulo, attirés par la bonne qualité des sols.

Depuis le début de la colonisation, la caféiculture se développait bien sur les terres du nord du Paraná. Néanmoins, en 1929, en raison de la crise de la bourse de New York et de la surproduction de café, les prix ont chuté sur le marché mondial et les caféiculteurs ont affronté de grosses difficultés. Afin de forcer les prix à la hausse, le gouvernement brésilien a ordonné la destruction des stocks et de champs de café de sorte que les années suivantes,

⁶ Ancienne CTP – *Companhia de Terras do Paraná* (Compagnie de Terres du Paraná).

la caféiculture a retrouvé son importance. La reprise des exportations a donné une nouvelle impulsion à l'occupation du nord-ouest du Paraná (SERRA, 1992). A partir des années 1940, la CMNP a amorcé la création des centres urbains. Selon la planification faite par la CMNP, des noyaux urbains majeurs ont été créés, séparés d'environ 100 km les uns des autres ; entre ces noyaux urbains, de petites villes étaient fondées. Ce n'est qu'au début des années 1950 que des villes comme Londrina, Maringá, et Umuarama ont été bâties.

En raison de la récupération économique de la caféiculture dans les années 1950, l'intérêt pour les terres situées plus à l'ouest a augmenté. Ainsi, la forêt a cédé devant les labours, la caféiculture a avancé dans la vallée de l'Ivaí et de nouveaux noyaux urbains ont été créés. Dans la moyenne vallée de l'Ivaí, près de la ville de Campo Mourão, les fronts d'occupation de la caféiculture, venu du nord, et de l'élevage de bétail, venu du sud, se sont rencontrés. C'est pour cette raison que l'économie de cette région est des plus diversifiées (SERRA, 1992).

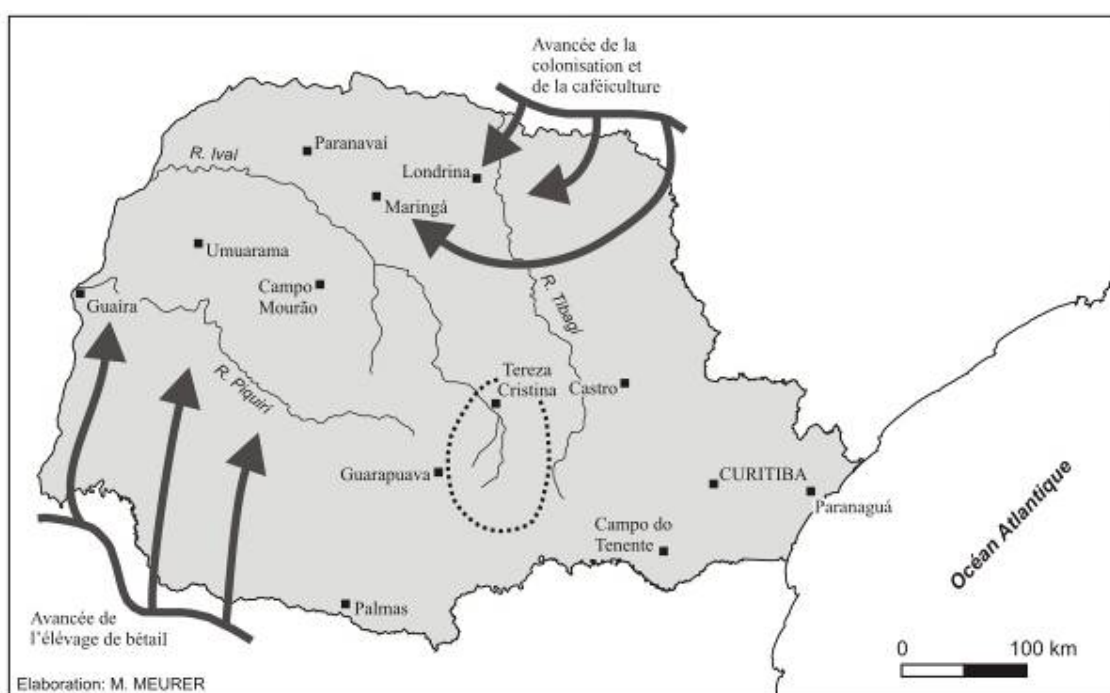


Figure 40. La dynamique d'occupation du territoire du Paraná dans la première moitié du XX^e siècle.

Les années 1960 ont été marquées par de fortes restructurations dans le pays. La capitale a été déplacée à Brasília afin de promouvoir l'intégration du territoire national ; les militaires ont pris le pouvoir en 1964 et l'économie a été réorganisée pour développer l'industrie de base. En ce qui concerne la caféiculture, en 1962 les plants de café non productifs ont été détruits et des politiques de protection économique des producteurs ont été mis en place pour augmenter les prix de vente à l'étranger. Au Brésil, des politiques d'incitation à la consommation du café ont été créées. Dans le Paraná, la caféiculture s'est étendue et cet état est devenu le premier producteur de café du pays, dépassant l'Etat de São Paulo. Avec le soutien du gouvernement, la caféiculture a conforté sa place de produit agricole le plus important du pays. Néanmoins, les producteurs de café ont eu quelques

problèmes inattendus avec les gels. En 1964, un fort gel a touché le sud du pays ; en 1969 un très fort gel a affecté le Paraná, détruisant environ 80 % de la récolte de l'année suivante (CIC, 2007).

Dans les années 1970, le Brésil a connu une période de très forte croissance, jamais vue précédemment, résultat des politiques économiques instaurées à la fin des années 1960. Cette période est connue comme celle du « miracle économique ». Le gouvernement militaire faisait de gros investissements dans les infrastructures. En ce qui concerne l'agriculture, le soja arrivait au Brésil avec la promesse d'être une culture des plus rentables. Beaucoup d'agriculteurs ont tout abandonné et migré vers l'ouest du pays, pour y travailler le soja. Ceci, conjointement avec la modernisation des techniques de production, a mis au chômage une fraction considérable de la population rurale brésilienne. En conséquence, les centres urbains ont connu une croissance démographique inattendue et les bidonvilles se sont multipliés autour des grandes villes.

L'année 1975 marque une rupture dans l'histoire de l'occupation du bassin versant de l'Ivaí. Au mois de juin, un très fort gel touche le sud du Brésil et la presque totalité des champs de café du Paraná est détruite. L'étendue des dégâts provoqués par le gel n'est enregistrée que l'année suivante (Figure 41). En 1976, la production de café au Brésil a chuté de 1 380 000 tonnes à environ 558 000 tonnes (CIC, 2007). Avant le gel de 1975, les agriculteurs se partageaient entre la production de café et la culture du soja ; après le gel, les caféiculteurs ont tout perdu. Ceux qui ont encore de l'argent se tournent vers le soja, tandis que ceux qui n'en ont plus ont vendu leurs terres migrent vers les centres urbains proches ou vers les autres états du pays. Dans la deuxième moitié des années 1970, le paysage du nord-ouest du Paraná a de ce fait brusquement changé. Le café a laissé la place aux cultures commerciales, de sorte qu'à la fin des années 1970, l'Etat du Paraná est déjà le plus grand producteur de blé et un des plus grands producteurs de soja du pays. La canne au sucre commence aussi à occuper le nord-ouest du Paraná, principalement sur le grès Caiuá, dans les régions de sols plus sableux, où le soja et le blé ne réussissent pas bien.

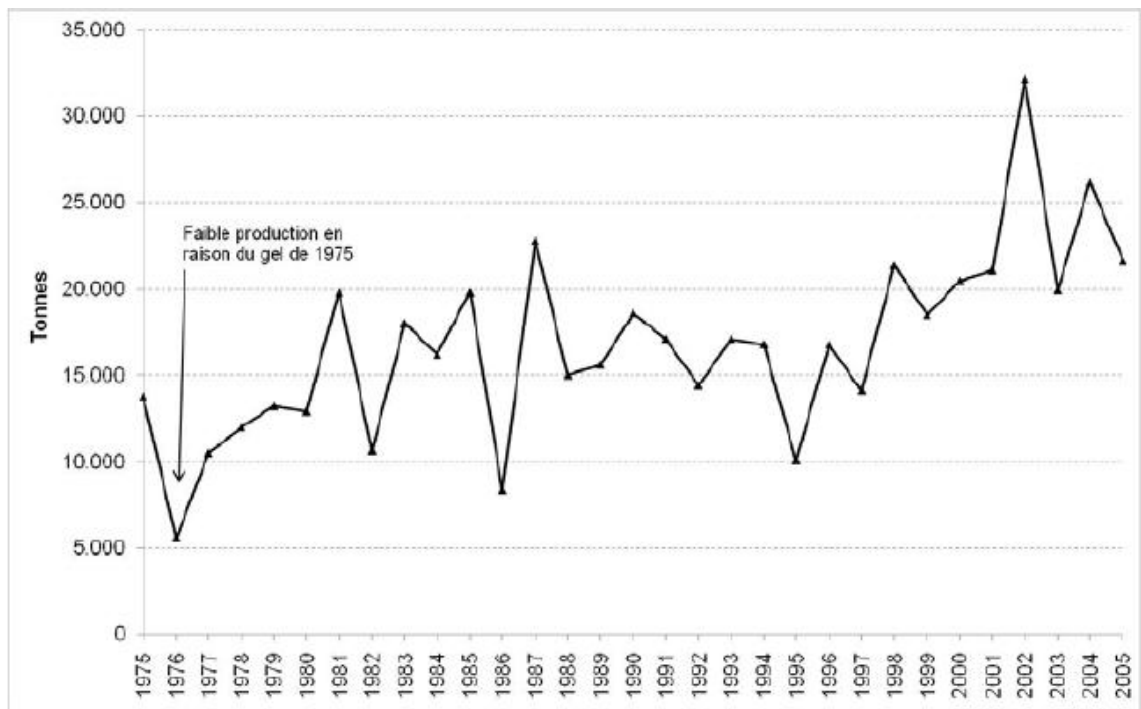
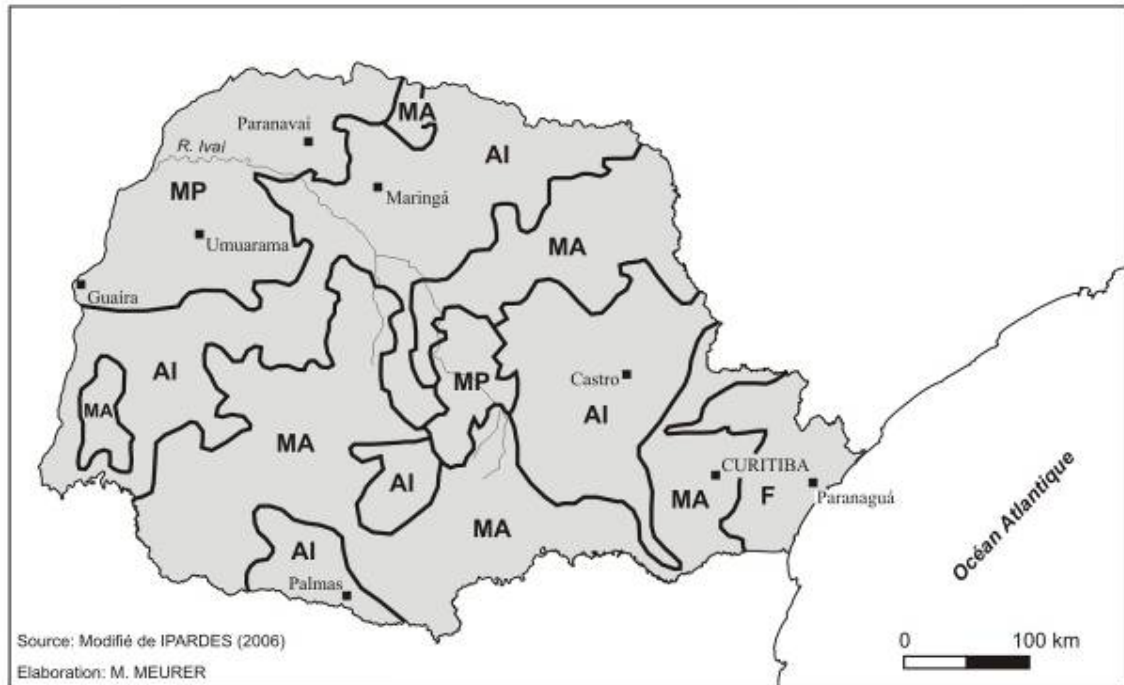


Figure 41. Production de café au Brésil, entre 1975 et 2005. On observe la chute de production résultant du gel de 1975. Source : CIC, 2007.

En raison de la crise internationale du pétrole des années 1970, une nouvelle politique énergétique a été instituée par le gouvernement brésilien. Cette politique se basait sur la substitution l'alcool aux carburants dérivés du pétrole. La monoculture de la canne au sucre a dès lors pris une importance stratégique, l'augmentation des surfaces étant stimulée par l'Etat, ce qui explique l'arrivée et l'expansion de la canne au sucre dans le nord-ouest du Paraná. Outre la canne à sucre, les sols sableux du grès Caiuá ont été utilisés aussi pour des pâturages destinés à l'élevage du bétail. La combinaison de ces deux activités a déterminé la physionomie du paysage de cette région.

Au cours des années 1980, le paysage du nord-ouest du Paraná a changé en fonction des prix du soja, du blé et du maïs sur le marché international. L'utilisation des techniques de correction des sols, de contrôle de l'érosion et le développement de nouvelles techniques de production ont augmenté la productivité des terres cultivées. Au début des années 1990, ces nouvelles techniques ont permis l'expansion du soja sur les sols gréseux, ce qui a donné une nouvelle impulsion aux centres urbains de ces régions (Figure 42).



- AI** - Agriculture intensive (soja, maïs, blé)
- MA** - Usage mixte, avec prédominance de l'agriculture
- MP** - Usage mixte, avec prédominance de l'élevage ou de pâturages abandonnés
- F** - Forêt, avec agriculture traditionnelle sur la plaine côtière

Figure 42. Schéma de l'usage du sol actuel dans le territoire du Paraná.

2.6.6. Les problèmes d'érosion au nord-ouest du Paraná

La région nord-ouest du Paraná, où prédomine le substrat gréseux, peut être considérée comme une région naturellement fragile. Les sols provenant de la décomposition de la Formation Caiuá, qui possèdent de faibles pourcentages d'argile, une forte friabilité et sont pauvres en nutriments, sont considérés comme très défavorables à un usage intensif (FONSECA et CZUY, 2005). Sur la carte des Aires Potentielles de Dégradation du Sol (Figure 43), présentée par l'IPARDES (2006), la région en question a été cartographiée comme une zone potentiellement soumise aux processus érosifs.

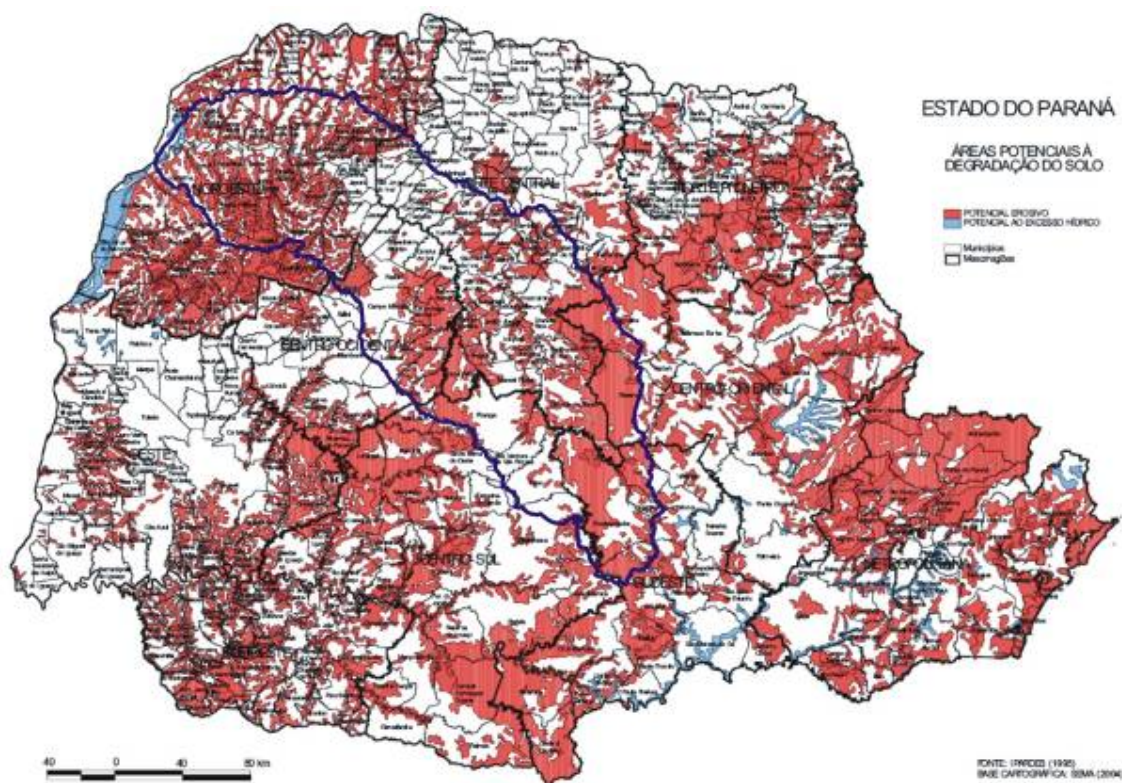


Figure 43. Aires Potentielles de Dégradation des Sols. Carte élaborée par l'IPARDES (2006). Les zones en rouge possèdent des sols à fort potentiel érosif ; les zones en bleu ont des sols à potentiel d'excédent hydrique. La ligne bleu foncé marque la limite du bassin versant de l'Ivaí.

Au cours du XX^e siècle, le Paraná est devenu l'un des principaux états agricoles du pays. La disponibilité des terres et la bonne fertilité des sols sur basalte ont été des facteurs fondamentaux de l'attraction des agriculteurs de la région sud-est (venues principalement des Etats de São Paulo et Minas Gerais) et du développement économique du nord et du nord-ouest du Paraná. Cependant, dans la région nord-ouest, la fragilité potentielle des sols vis-à-vis des processus érosifs est devenue une réalité à partir du moment où les agriculteurs ont coupé la forêt pour la remplacer par les plantations de café (Figure 44).

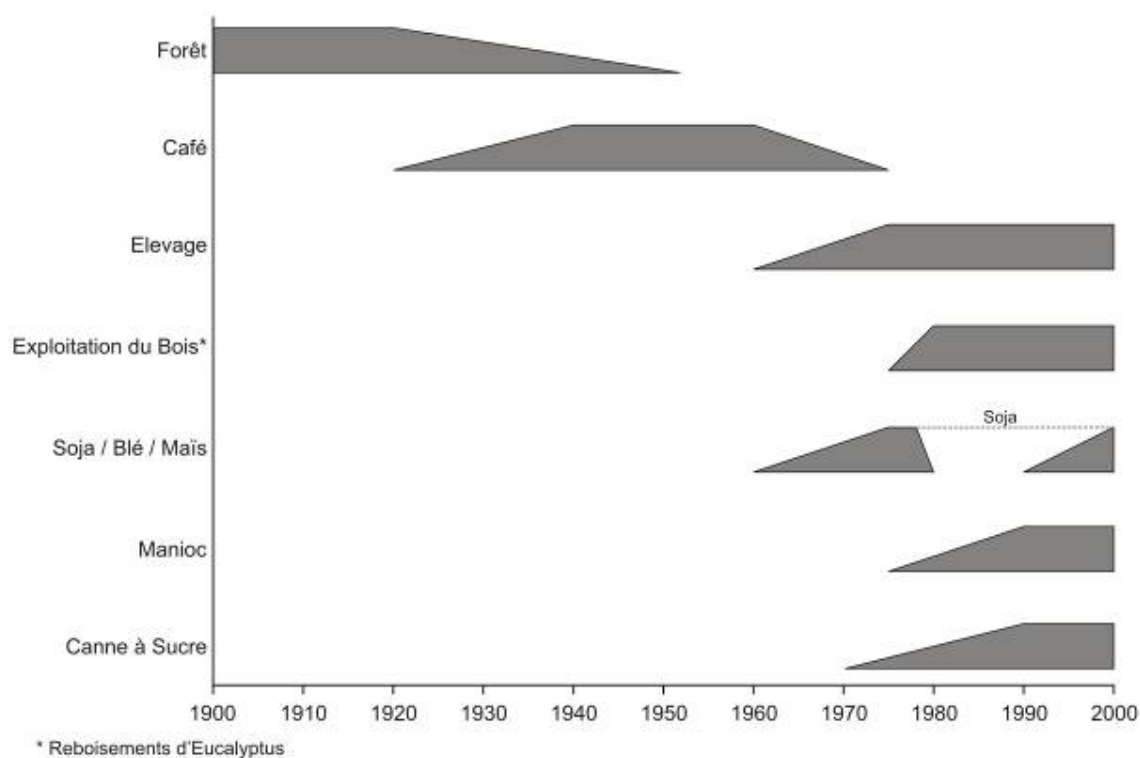


Figure 44. Evolution de l'usage du sol dans le nord-ouest du Paraná au cours du XX^e siècle.

L'occupation par la caféiculture exposait les sols naturellement fragiles à des labours pratiqués avec une faible mécanisation, mais avec une intense utilisation de main d'œuvre. Cette mauvaise combinaison a eu pour résultat une intensification des processus érosifs dans les zones rurales. De plus, dans les zones urbaines, l'accroissement des aires imperméabilisées a modifié la direction et la concentration des flux sur les versants, créant des problèmes d'érosion dans les villes d'Umuarama, Cidade Gaúcha et Paranavaí (ZAMUNER *et al.*, 2002).

Dans les années 1960, en raison d'une baisse des prix, le gouvernement brésilien avait décidé de détruire une partie des plantations de café, et le nord-ouest du Paraná avait profité de cette occasion pour substituer progressivement au café les pâturages, la canne au sucre ou les labours mécanisés de soja, maïs et blé. A cause de la faible fertilité des sols et de l'érosion, ces labours fortement mécanisés n'ont pas obtenu une bonne productivité sur les sols gréseux, et pour cette raison ces cultures ont été rapidement remplacées par l'élevage, le manioc et les reboisements d'eucalyptus. Après le gel de 1975, la caféiculture a pratiquement disparu du nord-ouest du Paraná.

Malgré le changement de scénario agricole, qui a donné une meilleure couverture aux sols, le problème de l'érosion au nord-ouest du Paraná restait encore assez préoccupant. En 1975, le gouvernement du Paraná a créé le PROICS – *Programa Integrado de Proteção dos Solos* (Programme Intégré de Protection des Sols). Le PROICS avait pour objectif de mettre en œuvre des mesures pour le contrôle de l'érosion dans les régions sous agriculture intensive. En dépit de tous ces efforts, le programme a échoué dans le contrôle de l'érosion hydrique (MUZILLI, 2002). Au début des années 1980, les agriculteurs ont développé un système de terrassement, qui peu temps après a été adopté officiellement par les Services liés à l'agriculture. En 1984, le gouvernement du Paraná a lancé le PMISA

– *Programa de Manejo Integrado do Solo e Água* (Programme d'Aménagement Intégré du Sol et de l'Eau), dans le but d'intervenir sur plusieurs fronts, avec l'utilisation de nouvelles techniques agricoles, la correction des sols, la reforestation et la correction des systèmes d'écoulement des eaux issues des routes. Ce programme, qui prévoit aussi la participation des agriculteurs dans les processus de décision, a été bien accepté ; par la suite il a été à l'origine du sous-programme d'aménagement de micro-bassin versants du PARANARURAL – *Programa de Desenvolvimento Rural do Paraná* (Programme pour le Développement Rural du Paraná).

Ces dernières années, l'occupation des sols du nord-ouest du Paraná est concernée principalement par l'élevage extensif (il y a aussi quelques pâturages abandonnés), et par la culture labourée du manioc et de la canne à sucre. En raison des progrès scientifiques et techniques, de nouveaux projets d'occupation du nord-ouest avec des labours commerciaux (soja, maïs et blé) sont apparus.

En ce qui concerne le bassin versant de l'Ivaí, son tiers aval se trouve dans la zone naturellement fragile, soumise à de forts processus érosifs. Sur cette problématique, Santos *et al.* (1999) ont élaboré une étude des pertes de sol dans le bassin versant de l'Ivaí, en utilisant comme méthode l'équation universelle de perte en sol. Sur la carte d'érodibilité naturelle des sols présentée par les auteurs (Figure 45), on observe que les sols de la partie aval du bassin versant possèdent un très fort potentiel érosif naturel.

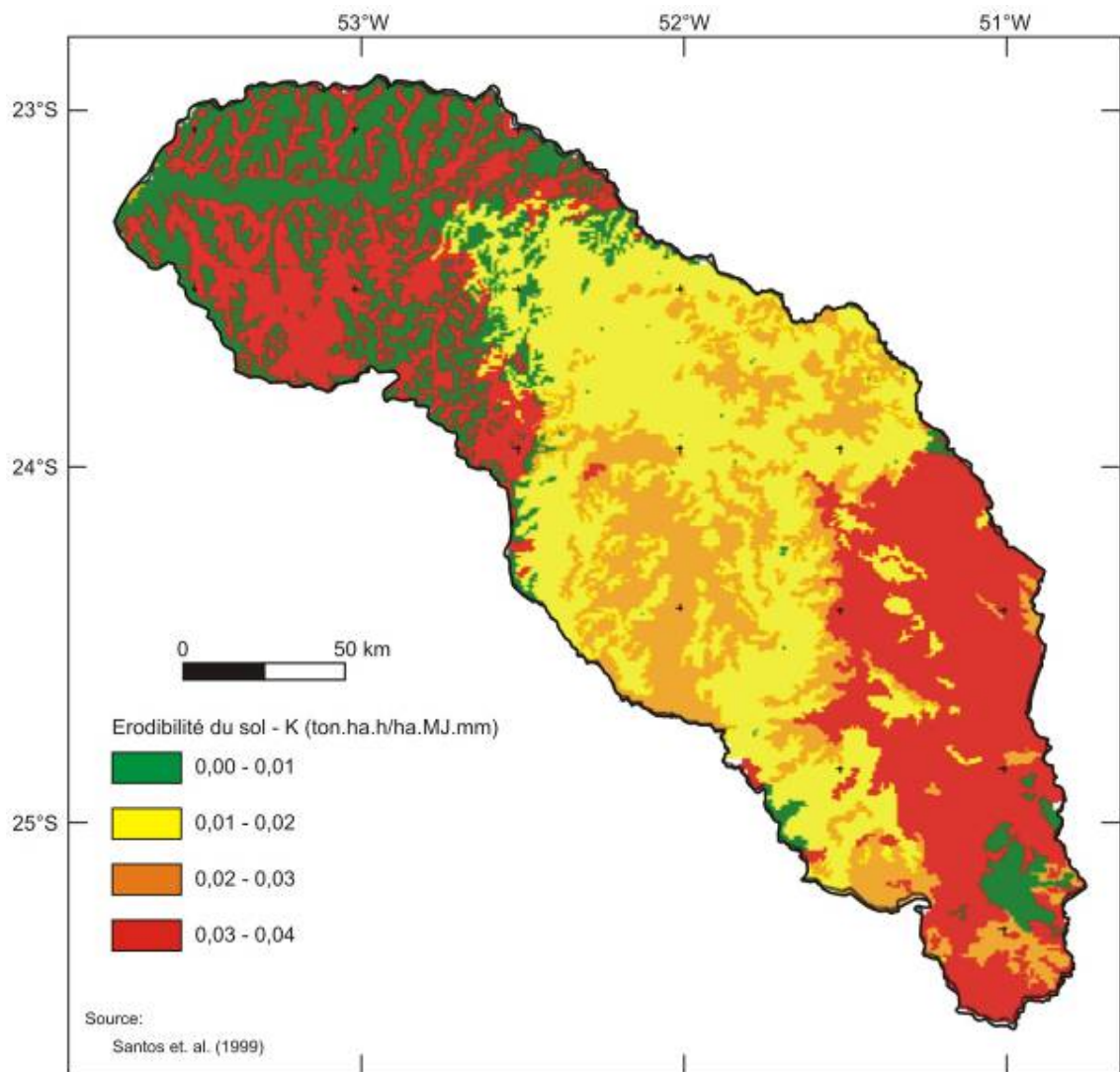


Figure 45. Erodibilité naturelle des sols du bassin versant de l'Ivaí (source : Santos et al., 1999).

Par contre, sur la carte de synthèse (Figure 46) qui présente le résultat de l'application de l'équation universelle de perte en sol, la partie aval du bassin n'a pas été délimitée comme une zone de forte perte. Selon les auteurs, cette équivoque s'explique en raison de la qualité des données utilisées pour le calcul de l'équation. Certains paramètres utilisés dans le calcul ont été extrapolés à partir d'expertises réalisées à l'échelle locale, ce qui limite leur représentativité à l'échelle de la région. Il en résulte des pertes nettement sous-estimées (SANTOS et al., 1999).

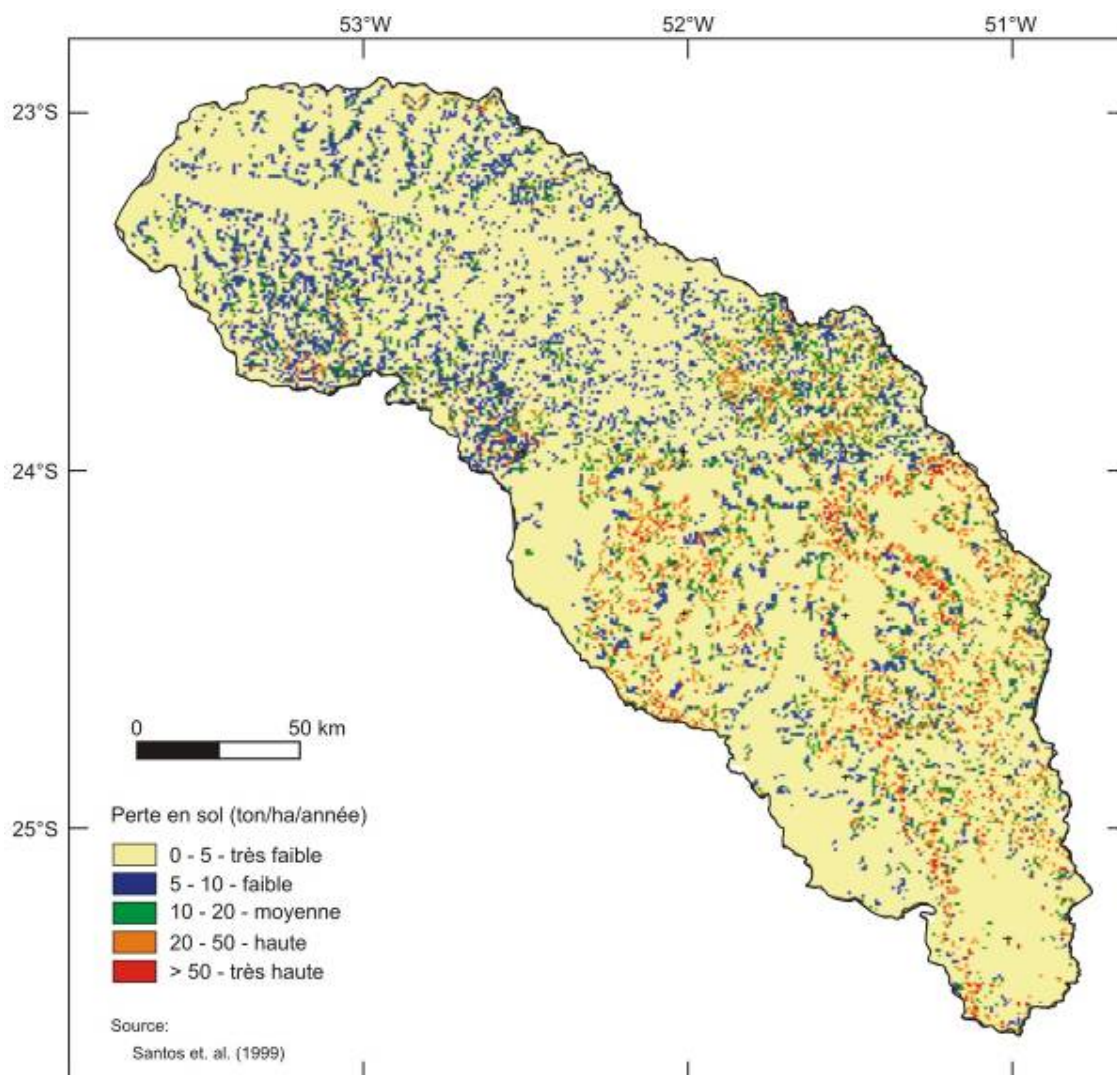


Figure 46. Perte en sol estimé par Santos et al. (1999) pour le bassin versant de l'Ivaí, en utilisant l'équation universelle de perte en sols.

A l'échelle plus locale, l'observation des images satellitales de la partie aval du bassin versant de l'Ivaí attire l'attention sur un autre phénomène : l'érosion dans les têtes de bassins des affluents de l'Ivaí. La destruction presque totale de la couverture végétale et l'occupation indiscriminée des têtes de bassin versant par le café ont déclenché de forts processus érosifs dans ces secteurs. Sur l'image du nord-ouest du Paraná prise en 1973 par le satellite Landsat 1 MSS (Figure 47), il est possible de voir les versants presque entièrement défrichés, les labours et champs qui occupent tous les secteurs des sous-bassins, et les figures d'érosion autour des sources. L'image prise en 2005 par le satellite CBERS 2 CCD (Figure 47) montre un scénario un peu différent : les versants sont encore occupés par les labours et champs, mais les grandes zones d'érosion localisées autour des sources ont été abandonnées, et la végétation (en rouge sur l'image) commence à reprendre ces espaces. Les fonds de vallée sont aussi occupés par la végétation à cause de la loi sur les forêts riveraines, qui oblige au maintien de la végétation autour des cours d'eau. Sur la mosaïque des images prises en en 2007 par les satellites Quickbird (image

de haute résolution) et Landsat 7 ETM⁺ (Figure 47), il est possible de voir plus nettement la reprise de la végétation sur les anciennes zones d'érosion. Il est possible de voir aussi qu'en quelques endroits les propriétaires essaient de réoccuper ces terrains, en les destinant aux pâturages.

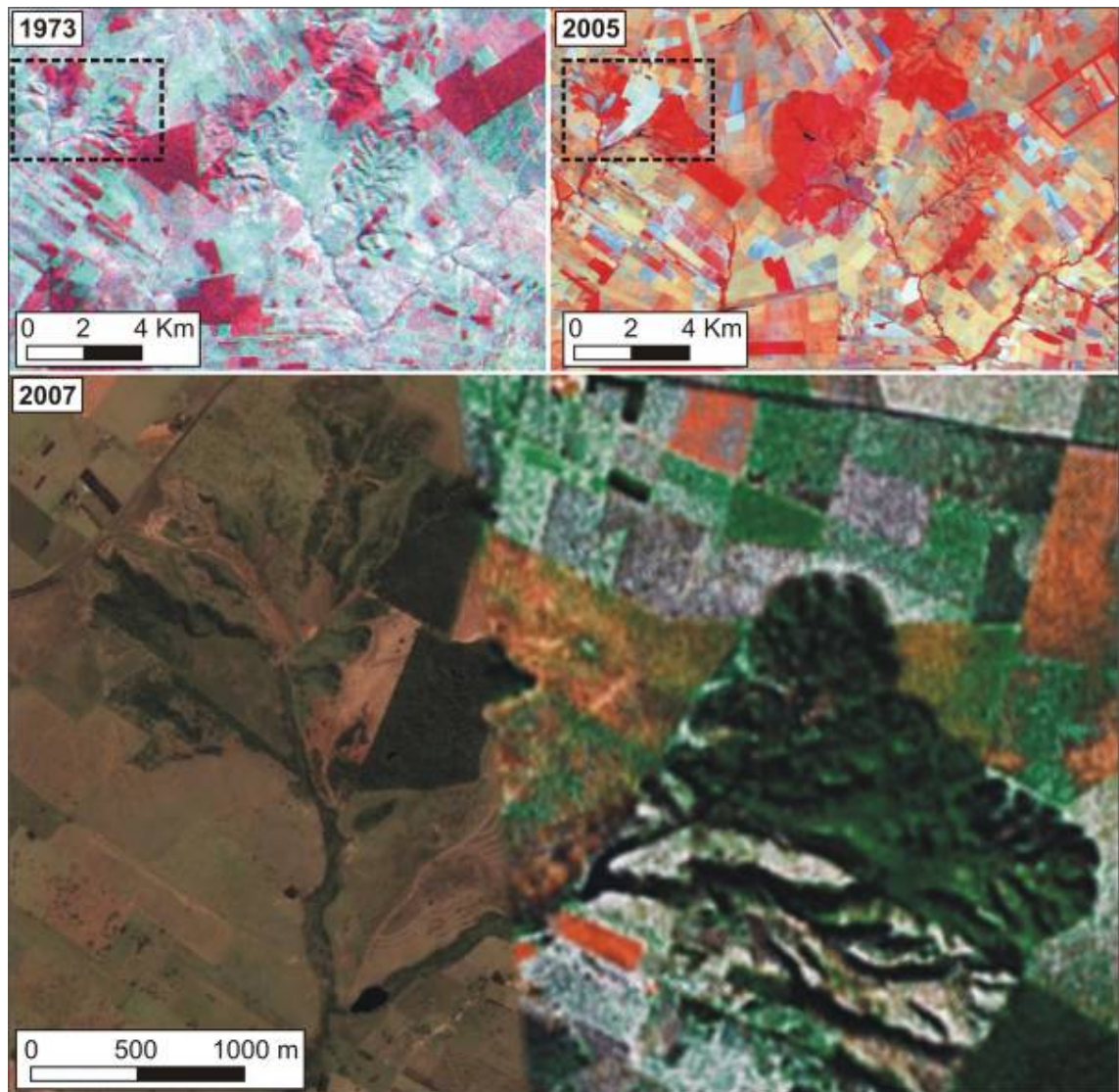


Figure 47. Processus érosifs dans les têtes de bassin versant, près de la ville de Loanda. 1973 – Image Landsat 1 MSS ; 2005 – Image CBERS 2 CCD ; 2007 - Images Quickbird (haute résolution) et Landsat 7 ETM+.

2.6.7. Les conséquences possibles des changements d'usage du sol sur la dynamique du réseau hydrographique

L'occupation des parties moyenne et aval du bassin versant de l'Ivaí est relativement très récente mais, en moins d'un siècle ces régions ont expérimenté d'importants changements dans l'usage du sol. Les conséquences de ces changements sur le réseau hydrographique du nord-ouest du Paraná sont encore méconnues, mais la connaissance des aspects

naturels et de l'occupation du bassin versant de l'Ivaí nous permet de formuler quelques hypothèses.

L'usage du sol interfère avec la vitesse de transfert de l'eau des versants aux cours d'eau et avec la production de sédiments. La suppression des forêts qui occupaient les collines gréseuses a probablement réduit le temps de transfert de l'eau entre les versants et le réseau hydrographique. Ceci a dû exagérer les pics de crue sur les affluents de l'Ivaí, tout en réduisant la durée de la crue.

Les changements les plus remarquables sont probablement intervenus d'une part dans la production et le transport de sédiments et d'autre part dans la morphologie fluviale. La combinaison de sols naturellement fragiles et d'une couverture végétale plus éparse a fortement augmenté les processus érosifs. Les sédiments des versants ont été transportés vers les fonds de vallées avec comme résultat la formation de grands dépôts colluviaux sur la partie inférieure des versants. Le remblaiement des fonds de vallée par des couches successives de sédiments a modifié le transit sédimentaire et la morphologie des affluents de l'Ivaí ; ils sont probablement devenus plus larges et moins profonds (Figure 48).

Après le gel de 1975, le café a été remplacé par l'élevage et par les labours des cultures commerciales. Celles-ci ont rapidement échoué sur le grès et elles ont été remplacées par l'élevage, la canne au sucre, le manioc et les reboisements d'eucalyptus. Ceci, combiné avec les nouvelles techniques de terrassement, a augmenté la protection des versants, en réduisant l'érosion et le transport de sédiments vers les fonds de vallée. Les cours d'eau ont dû s'ajuster à une nouvelle condition de déficit sédimentaire, en devenant plus étroits, plus profonds et en incisant leurs chenaux dans les dépôts colluviaux des versants et des fonds de vallées (Figure 48).

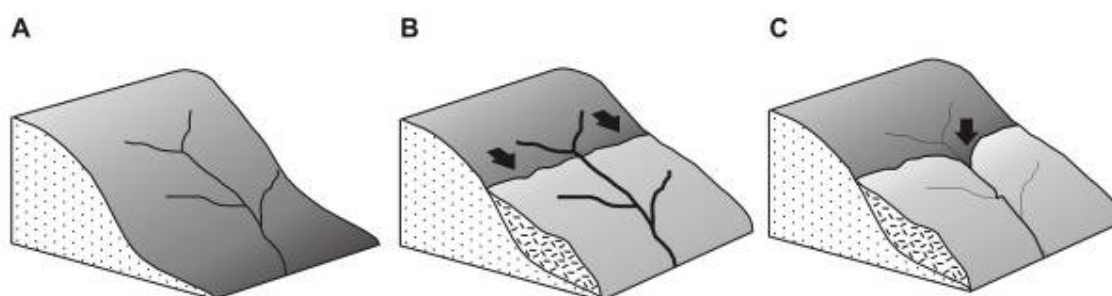


Figure 48. Schéma d'évolution des versants et du réseau hydrographique dans le nord-ouest du Paraná. A) Les collines gréseuses ont été défrichées ; B) La forte érosion mène à la formation de dépôts colluviaux sur la moitié inférieure des versants. Les cours d'eau deviennent moins profonds et plus larges ; C) En raison de la réduction de l'érosion, les cours d'eau s'enfoncent sur les dépôts colluviaux, et deviennent plus étroits et profonds.

2.7. Conclusions de la Deuxième Partie

La caractérisation du bassin versant de l'Ivaí et de ses facteurs de contrôle a permis une meilleure compréhension de la complexité de ce hydrosystème. L'intégration des facteurs de contrôle est à l'origine des différents paysages qui forment le bassin versant étudié.

L'histoire géologique du bassin versant est longue et complexe. La succession d'événements qui s'est produite dans la longue durée géologique a créé trois régions lithologiques bien distinctes : une région amont dominée par des séquences sédimentaires dévoniennes, une région intermédiaire recouverte par les roches volcaniques de la Formation Serra Geral, et une région aval dominée par le grès de la Formation Caiuá, avec le développement d'une plaine inondable dans les derniers kilomètres de la rivière. Ces trois régions présentent des comportements distincts face au climat et aux processus hydrologiques.

La distribution des climats dans le bassin versant est le résultat de la combinaison de la zonalité, de la dynamique des masses d'air et de la topographie. La zonalité détermine le type de climat, tropical ou tempéré ; la dynamique de masses d'air donne le comportement des températures et des précipitations à l'échelle régionale ; la topographie conditionne la distribution des précipitations à l'intérieur du bassin versant.

Les précipitations moyennes annuelles pour le bassin de l'Ivaí sont de 1 609 mm (Andrade 2003). Néanmoins, en raison des caractéristiques topographiques, cette pluviométrie n'est pas distribuée de façon homogène. Les régions les plus élevées, comme les lignes de partage des eaux et le sommet de l'escarpement du 3^{ème} Plateau, sont des zones plus arrosées, tandis que les régions les plus basses, comme les vallées et la partie plus ouest du 3^{ème} Plateau, sont des régions plus sèches. Ce comportement différencié a permis à Andrade (2003) de rassembler les stations pluviométriques en groupes homogènes, comme cela a été déjà présenté (Figure 27). Cette variabilité pluviométrique a permis aussi à Maack (1968) de séparer les climats du bassin versant en trois types : un climat tempéré humide plus frais dans la partie amont, un climat tempéré humide plus chaud dans la partie intermédiaire, et un climat tempéré humide à été chaud et hivers périodiquement secs dans la partie aval.

La combinaison de la géologie, des climats et de la morphologie (surtout les pentes) a permis la compréhension de la distribution de la couverture pédologique. A partir de la carte des sols présentée précédemment (Figure 28), on voit bien que les types de sols possèdent une étroite liaison avec la géologie. Cette liaison n'est pas très nette parce que les deux documents cartographiques utilisés pour l'élaboration de cette représentation ne possèdent pas le même niveau de détail.

Dans la partie amont du bassin versant prédominent les lithosols et les argisols. La prédominance des lithosols peut être expliquée par la combinaison du relief à fortes pentes, ce (qui ne permet pas le développement des profils pédologiques plus profonds), et par le climat tempéré plus frais, les processus pédologiques étant plus lents en raison des basses températures. Les argisols peuvent être expliqués par l'abondance de sédiments fins disponibles dans les séquences sédimentaires qui forment le Bassin du Paraná. Sous un climat tempéré à précipitations abondantes, les sédiments fins sont transportés par l'eau le long du profil. Un horizon d'accumulation de sédiments fins se forme juste en-dessous d'un horizon d'éluviation, ce dont résulte un sol du type argisol.

La partie intermédiaire du bassin versant présente des basaltes soumis à un climat tempéré humide et chaud. La désintégration des basaltes sous ces conditions rend compte de la prédominance des sols très argileux et profonds, comme les latosols au sommet des collines et les nitosols dans le moyen et bas versant.

La partie aval du bassin versant présente des argisols au sommet des collines, et des latosols en milieu de versant. Au fond des vallées, on retrouve des sols très sableux et

des sols du type gley. L'action du climat tempéré chaud et humide sur les grès a permis la formation d'argisols au sommet des collines, tandis que les latosols en milieu de versant sont expliqués par l'action du climat sur les basaltes, qui se trouvent juste en dessous du grès, et qui affleurent dans la partie moyenne des versants. Les sols sableux en bas de versants se forment par l'accumulation des sédiments colluviaux. Les sols du type gley se forment dans les zones les plus basses, soumises aux fluctuations de la nappe phréatique.

En ce qui concerne la distribution de la végétation originelle, elle est aussi influencée par des facteurs de contrôle à l'échelle du bassin versant. Dans le tiers amont du bassin de l'Ivaí, l'altitude et le climat plus frais et pluvieux donnent des conditions favorables au développement de la forêt ombrophile mixte. La végétation est conditionnée par un régime de pluies abondantes et l'*Araucária*, l'espèce-type de cette région phytoécologique, pousse seulement sur les régions hautes, où les températures sont plus froides pendant l'hiver.

Dans la partie intermédiaire du bassin versant, la transition entre les zones tempérée et tropicale donne les conditions du développement de la forêt saisonnière semi-décidue. La végétation est conditionnée par changements saisonniers et une partie des arbres perd les feuilles pendant l'hiver.

Dans la partie aval du bassin versant, la Forêt Saisonnière Semi-décidue est aussi présente, mais le climat tempéré plus chaud et à saison sèche donne à la végétation des caractéristiques plus tropicales, comme par exemple l'abondance de palmiers.

La combinaison des facteurs de contrôle donne à chaque partie du bassin versant un potentiel naturel de stockage de l'eau dans la nappe phréatique, une vitesse d'écoulement d'eau et un potentiel de production de sédiments. Ainsi, en raison des fortes quantités de sédiments fins dans les sols et de l'imperméabilité des roches sous-jacentes, on peut estimer que les deux tiers supérieurs du bassin versant, dominés par les séquences sédimentaires et les basaltes, présentent une faible capacité de stockage de l'eau et une forte vitesse d'écoulement par rapport au tiers inférieur, dominé par le grès. Quant à la production de sédiments, on peut estimer que les deux tiers supérieurs du bassin versant contribuent principalement à la fourniture en limon et argile, tandis que le tiers inférieur contribue à celle de sédiments sableux.

Le processus d'occupation du bassin versant a progressivement modifié la couverture végétale, un des facteurs de contrôle de l'hydrosystème. En reprenant l'histoire de l'occupation du bassin versant, on voit que ces modifications ne se sont pas produites en même temps et avec la même intensité dans les trois régions du bassin versant précédemment définies. Au début de l'exploration du Paraná, l'occupation était plus concentrée dans la partie aval du bassin versant, avec quelques incursions vers l'intérieur en suivant le réseau hydrographique. Les Jésuites sont arrivés jusque dans le moyen bassin versant, mais les *bandeiras* ont freiné l'avancée en direction de l'amont. Après le retrait des Jésuites, l'intérieur du Paraná a été oublié pendant une longue période. L'occupation a été reprise seulement dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle dans la partie amont du bassin versant en raison de l'expansion de l'élevage du bétail. Au XIX^e siècle, l'occupation par des immigrants et les cycles de l'*erva-mate* et du bois ont donné une impulsion au défrichement dans cette région.

La partie moyenne du bassin versant a été occupée à partir de la fin du XIX^e siècle sous la pression de la progression de la caféiculture. Le défrichement s'est passé d'une façon très rapide et, dans les régions les plus sensibles, le recul de la couverture végétale a produit de remarquables processus érosifs. Le gel de 1975 marque une importante rupture

dans l'histoire de l'usage du sol dans cette région, quand la caféiculture a cédé sa place aux cultures commerciales du soja, du blé et du maïs. Ce changement de couverture du sol a été accompagné par un changement des méthodes de travail, avec l'adoption des techniques de correction des sols et de contrôle de l'érosion. Toutes ces modifications ont probablement altéré le comportement des sous-bassins de cette région en ce qui concerne la contribution sédimentaire.

Dans la partie aval du bassin versant, la substitution de l'élevage de bétail et la canne au sucre à la caféiculture, ainsi que l'adoption des techniques de contrôle de l'érosion, ont permis une relative stabilisation des processus érosifs les plus intenses. Néanmoins, les pâturages présentent encore des formes d'érosion, surtout sur les sentiers parcourus par les animaux.

Les bassins versants sont souvent utilisés comme unités spatiales dans l'aménagement du territoire. A la fin de cette étude des facteurs de contrôle de l'hydrosystème Ivaí, on observe que le bassin versant présente une hétérogénéité importante entre les régions et les sous-bassins qui le constituent. Ceci doit avoir une correspondance dans le comportement hydrologique et sédimentaire du système qui sera étudié dans les chapitres suivants.

Troisième partie - Les flux dans le bassin versant

3.1. Les Flux d'eau et le régime de débits de l'Ivai

Pour comprendre le fonctionnement d'un bassin versant, il est fondamental de connaître le régime hydrologique (ou des flux) des cours d'eau étudiés. Selon Arnell (2002), « le régime des flux » décrit la variation des flux d'un cours d'eau au long de l'année, et il est généralement représenté par l'écoulement mensuel. Pour Pardé (1933), le régime hydrologique est « l'ensemble des phénomènes qui concernent l'alimentation des cours d'eau et les variations de leurs débits ». D'après ces deux concepts, on peut dire que le régime d'un cours d'eau est donné par la distribution des débits au long de l'année, cette distribution étant liée à plusieurs contributions issues des différentes sources d'alimentation disponibles.

A partir de la fin du XIX^{ème} siècle, plusieurs propositions de typologie des régimes ont été faites. La classification proposée par Pardé (1933), basée sur la source des flux et la distribution des débits au long de l'année est une des plus utilisées. Selon cette classification, les régimes se divisent en trois types : les **régimes simples**, les **régimes complexes de première ordre (ou originels)** et les **régimes complexes de deuxième ordre (ou changeants)**. Les régimes simples sont ceux qui présentent seulement deux saisons hydrologiques, une d'abondance et une de pénurie, avec la prépondérance d'un seul mode d'alimentation. Les régimes complexes de premier ordre (ou originels) sont ceux qui ont plus d'une période d'abondance et d'étiage, en raison de deux ou plusieurs modes d'alimentation dominants au long de l'année. Les régimes complexes de deuxième ordre (ou changeants) caractérisent les bassins très étendus, dont la partie supérieure présente un régime simple ou même complexe ; au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'aval, la complexité du régime augmente, en raison des différentes influences que subit le bassin versant. Parfois les différents régions d'un bassin versant peuvent présenter des comportements contradictoires entre eux, mais c'est l'effet cumulé de toutes ces dynamiques ponctuelles qui détermine le régime des flux (PARDE, 1933 ; ARNELL, 2002).

En général, les études sur le régime des cours d'eau font l'analyse de séries de débits en s'appuyant sur différents critères, comme la distribution saisonnière des débits, leur magnitude, leur fréquence et leur durée. Dans la plupart des cas, le régime des débits est basé sur les conditions moyennes de fonctionnement du cours d'eau ; néanmoins ceci n'empêche pas qu'on puisse s'intéresser à d'autres conditions de flux. On peut faire, par exemple, une étude du régime de crues ou du régime des étiages d'un cours d'eau.

Pour bien caractériser le régime de l'Ivai, on a travaillé les séries hydrométriques sous plusieurs aspects afin d'extraire une quantité significative d'informations portant sur le fonctionnement de ce système hydrographique. Les paramètres de la statistique descriptive présentent les mesures de tendance centrale (moyennes, modules et médianes) et de dispersion (écart-type) dans chaque section. A une autre échelle temporelle, la distribution des débits à l'échelle du mois permet une compréhension du fonctionnement saisonnier du

système hydrologique. L'application de certains coefficients adimensionnels aide à renforcer les observations faites et donne au bassin de l'Ivaí un ensemble de valeurs comparables à celles d'autres bassins versants. La caractérisation du régime de l'Ivaí ne se limite pas à étudier le comportement moyen de la rivière, mais explore aussi les comportements extrêmes, à travers l'étude des débits caractéristiques de crue et d'étiage. D'autres sujets importants sont aussi travaillés au long de ce chapitre, dans le but de systématiser le fonctionnement hydrologique amont-aval du bassin versant.

3.1.1. Considérations sur les stations de mesure et les séries de données hydrologiques

La dynamique hydrologique du bassin versant de l'Ivaí est enregistrée par 17 stations de mesure (Tableau 4, Figure 49). Il existe 2 stations sur la rivière dos Patos, une des sources de l'Ivaí, 8 stations sur l'Ivaí, à partir de la moyenne vallée, ainsi que 7 stations distribuées sur quelques tributaires, tous affluents de rive gauche de l'Ivaí. Les données hydrométriques de ces stations ont été obtenues par téléchargement de la base de données HIDROWEB, base gérée par l'ANA – Agência Nacional de Águas (Agence Nationale des Eaux), MMA – Ministério do Meio Ambiente e Amazônia Legal (Ministère de l'Environnement et de l'Amazonie Légale).

Tableau 4 - Stations fluviométriques et séries de débits utilisées

Code	Nome	Cours d'Eau	Début de la série	Fin de la série	Responsable
64619950	São Pedro	dos Patos	24/11/1983	31/12/2003	ANA / SUDERHSA
64620000	Rio dos Patos	dos Patos	20/05/1930	31/12/2003	ANA / SUDERHSA
64625000	Tereza Cristina	Ivaí	07/08/1956	30/08/2002	ANA / SUDERHSA
64645000	Porto Espanhol	Ivaí	13/08/1965	30/06/2003	COPEL / SUDERHSA
64655000	Ubá do Sul	Ivaí	16/04/1967	31/11/2002	ANA / SUDERHSA
64660500	Vila Rica	Ivaí	15/08/1985	30/09/2003	ANA / SUDERHSA
64675002	Porto Bananeiras	Ivaí	19/02/1974	30/04/2003	COPEL / SUDERHSA
64685000	Porto Paraíso do Norte	Ivaí	14/03/1953	30/11/2002	ANA / SUDERHSA
64689005	Tapira Jusante	Ivaí	01/12/1990	31/12/2003	ANA / SUDERHSA
64693000	Novo Porto Taquara	Ivaí	18/07/1974	31/12/2003	ANA / SUDERHSA
64652000	Porto Monteiro*	Alonso	11/01/1974	22/03/2005	SUDERHSA
64659000	Barbosa Ferraz	Corumbataí	13/08/1974	31/12/2003	ANA / SUDERHSA
64660000	Barra Ribeirão Raposo Tavares*	Corumbataí	19/09/1965	13/05/2005	COPEL
64671000	Salto Natal*	Mourão	18/02/1974	20/03/2005	SUDERHSA
64673000	Quinta do Sol	Mourão	08/08/1974	30/04/2005	ANA / SUDERHSA
64680000	Jussara	Ligeiro	24/07/1976	31/10/1987	ANA / SUDERHSA
64682000	Japurá	dos Índios	01/01/1977	30/06/2005	ANA / SUDERHSA

* Le résumé de la série de débits est seul disponible

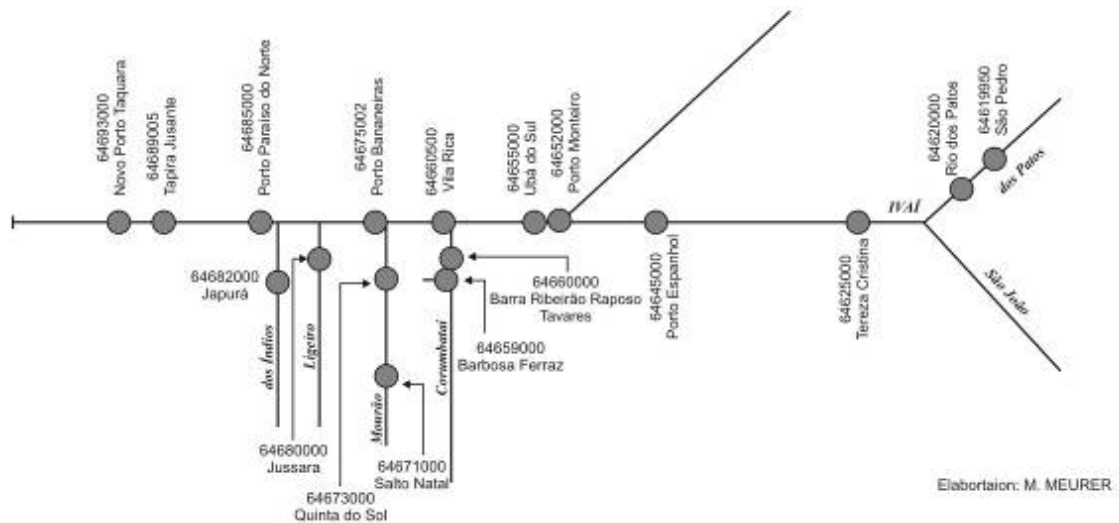


Figure 49. Schéma de distribution des stations fluviométriques dans le bassin versant de l'Ivaí.

La durée du suivi hydrométrique pour chaque station est très variable (Figure 50). La plupart des séries ont moins de 30 ans, et beaucoup de stations ont des séries discontinues. De façon générale, les séries de stations placées sur l'Ivaí présentent un temps de suivi un peu plus étendu que celui des stations placées sur les affluents. Quelques stations n'ont pas la disponibilité de toute la série des débits journaliers, mais seulement un résumé des débits et des hauteurs d'eau à une échelle locale. C'est le cas des stations de Porto Monteiro, Barra Ribeirão Raposo Tavares et Salto Natal, toutes localisées sur les affluents de l'Ivaí.

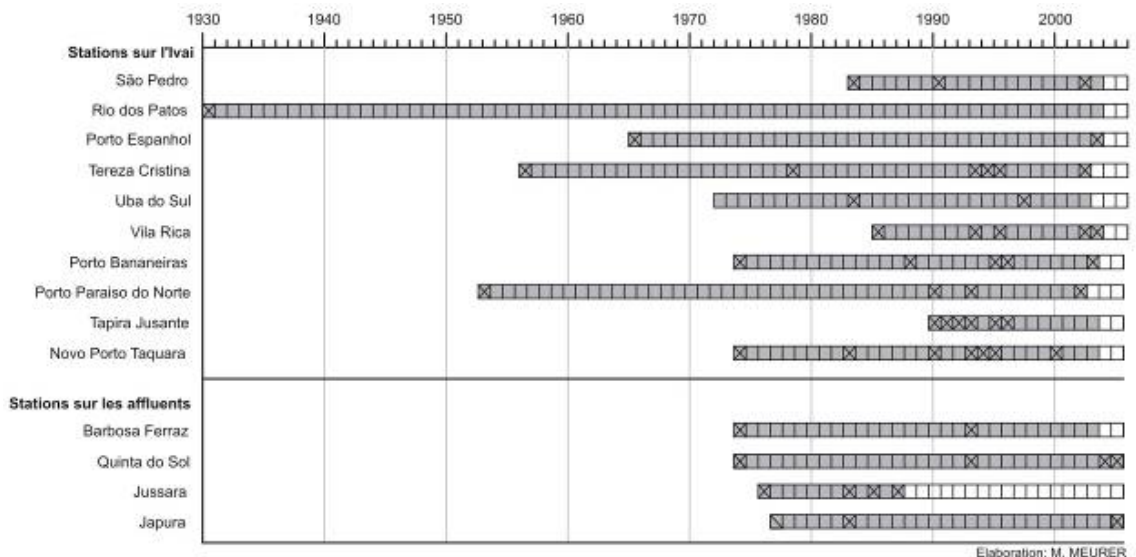


Figure 50. Période couverte pour chaque série de débits. Les années signalées par un « X » ont des données incomplètes.

L'analyse du régime des débits de l'Ivaí a été faite en utilisant principalement les données issues des stations hydrométriques qui sont placées sur le tronçon hydrographique principal (l'Ivaí et son « formateur », la rivière dos Patos), car ces stations peuvent donner des informations plus intéressantes sur la dynamique hydrologique amont-aval du bassin

versant. On a aussi pris en considération la recherche sur le régime de débits de l'Ivaí faite par Destefani (2005).

Certaines analyses ont demandé l'utilisation des données pluviométriques. Ainsi, on a récupéré par téléchargement de la base de données HIDROWEB les données pluviométriques de 6 stations de mesure (Tableau 5). Ces stations se trouvent exactement au même endroit que les stations de jaugeage précédemment présentées. Au-delà des séries pluviométriques, on a pris aussi en considération les informations disponibles dans quelques travaux de recherche précédemment réalisés sur la dynamique pluviométrique dans le bassin versant de l'Ivaí (ANDRADE, 2003 ; ANDRADE et NERY, 2003 ; BALDO, 2006).

Tableau 5 - Stations Pluviométriques et séries de précipitations utilisées

Code	Nome	Début de la série	Fin de la série
2550000	Rio dos Patos	19/05/1937	31/12/2002
2451017	Porto Espanhol	11/08/1965	31/01/2005
2451002	Ubá do Sul	17/04/1967	01/07/2005
2352010	Porto Bananeiras	21/02/1974	30/06/2005
2352000	Porto Paraíso do Norte	15/03/1953	30/06/2005
2353044	Novo Porto Taquara	01/07/1974	30/06/2005

Les séries de données pluviométriques de ces stations sont très hétérogènes. Comme pour les séries de débits, elles présentent un temps d'enregistrement très variable (Figure 51). Fréquemment, les séries sont courtes et discontinues, avec des trous importants dans la série de mesures. A titre de complément, d'autres travaux de recherche réalisés dans le bassin versant de l'Ivaí ont été aussi consultés (ANTONELI, 2004 ; DOUHI, 2004).

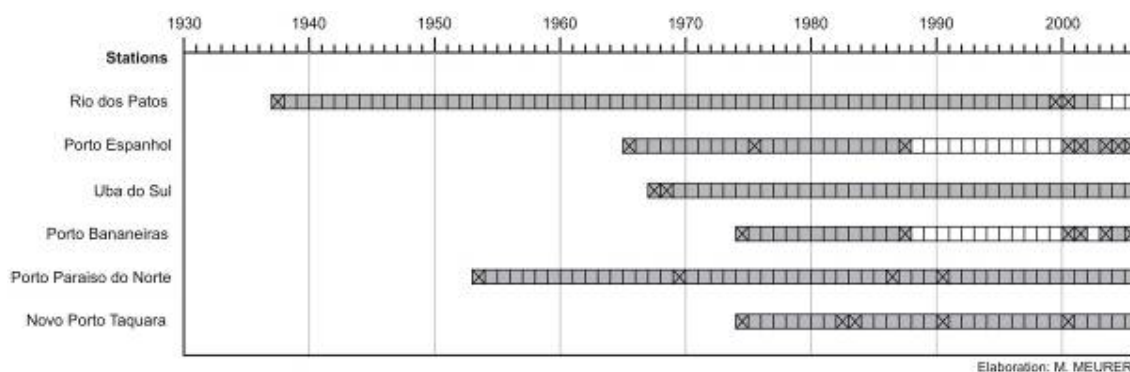


Figure 51. Période couverte par chaque série pluviométrique. Les années signalées avec un « X » ont des données incomplètes.

3.1.2. La distribution spatio-temporelle des débits moyens

Le régime des débits moyens de l'Ivaí a été récemment étudié par Destefani (2005), qui a réalisé une discussion centrée principalement sur la variabilité de la magnitude et de la fréquence des débits, à partir des hydrogrammes des 8 stations de mesure prises en compte pour l'analyse. Les conclusions présentées dans ce travail montrent une partie de la complexité de l'hydrologie du bassin versant de l'Ivaí. Dans un essai de caractérisation du régime saisonnier de l'Ivaí, l'auteur a conclu que « la délimitation des saisons de crue et d'étiage n'est pas pratique car on observe que les mois qui caractérisent l'occurrence des

crues et des étiages ne sont pas regroupés sur un semestre ou un trimestre » (DESTEFANI, 2005). En outre, l'auteur affirme que « l'intense oscillation entre les (débits) maximaux et les (débits) minimaux se maintient au long des séries historiques et elle ne possède pas une période définie d'occurrence. Ceci signifie que les périodes d'étiage et de vagues de crues peuvent avoir lieu quel que soit le mois de l'année, et elles changent alors d'une année à l'autre, ou bien la rivière ne montre pas une période saisonnière définie de crue et d'étiage (...) » (DESTEFANI, 2005). Le travail élaboré par l'auteur présente un ensemble de données et d'interprétations important pour la compréhension de l'hydrologie du bassin de l'Ivaí, qui ont été prises en compte pour l'élaboration des discussions à suivre.

Comme cela a été déjà présenté précédemment, le débit moyen (module de toute la série) de l'Ivaí mesuré à la station située la plus en aval (Station de Novo Porto Taquara), à environ 77 km de la confluence avec le Paraná, est de 686,82 m³/s. Néanmoins, la variation amont-aval de la moyenne, de la médiane et de l'écart-type des débits journaliers n'est pas homogène (Figure 52, Tableau 6).

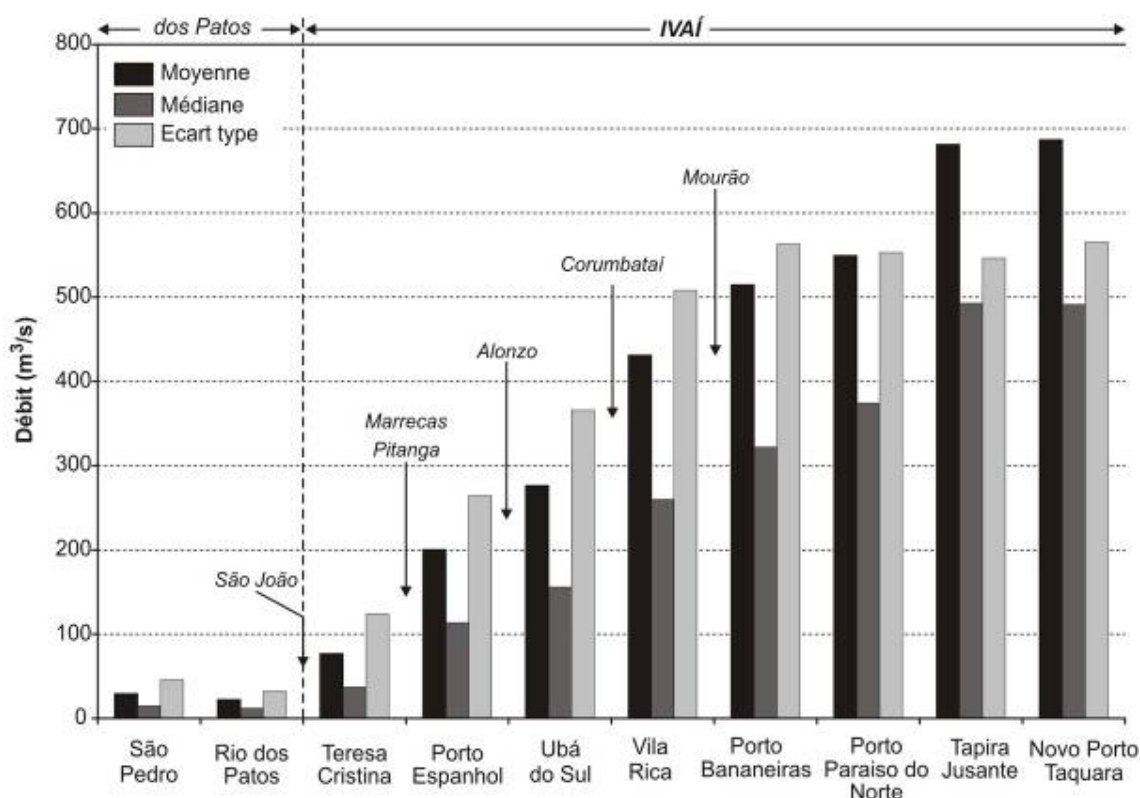


Figure 52. Moyenne, médiane et écart-type des débits journaliers aux stations de mesure de la rivière dos Patos et de l'Ivaí.

Tableau 6 –Moyenne, médiane et écart-type des débits journaliers aux stations de mesure de la rivière Dos Patos et de l'Ivaí

Station	Débit moyen (m^3 /s)	Débit médian (m^3 /s)	Ecart-type (m^3 /s)
São Pedro	29,13	14,63	45,87
Rio dos Patos	22,14	12,24	31,91
Tereza Cristina	76,62	36,83	123,61
Porto Espanhol	200,41	113,68	264,51
Ubá do Sul	276,27	156,00	365,96
Vila Rica	430,91	259,80	507,99
Porto Bananeiras	514,53	321,90	562,99
Porto Paraíso do Norte	549,29	374,43	553,21
Tapira Jusante	681,15	493,08	546,41
Novo Porto Taquara	686,82	491,38	565,54

A partir de la moyenne des débits journaliers, on observe une forte différence entre les stations de Tereza Cristina et de Porto Espanhol (augmentation de $124 m^3/s$ à Porto Espanhol), entre Ubá do Sul et Vila Rica (augmentation de $155 m^3/s$ à Vila Rica) et entre Porto Paraíso do Norte et Tapira Jusante (augmentation de $132 m^3/s$ à Tapira Jusante). Dans le cas des stations de Tereza Cristina et Porto Espanhol, la différence peut être expliquée par les apports de la Marrecas et de la Pitanga, qui drainent le plateau de Pitanga, lequel selon Baldo (2006), est une des régions les plus pluvieuses du bassin de l'Ivaí. Dans le cas des stations de Vila Rica et Ubá do Sul, la différence peut être expliquée par l'entrée des eaux venues de la Corumbataí, qui draine un sous-bassin situé entre les plateaux de Pitanga et de Campo Mourão, lui aussi une des régions les plus arrosées du bassin de l'Ivaí. En ce qui concerne les stations de Porto Paraíso do Norte et Tapira Jusante, l'arrivée des eaux de plusieurs rivières qui drainent les collines gréseuses peut expliquer partiellement la différence de débit moyen observée. Il faut considérer aussi que la série d'observations hydrométriques faites à Tapira Jusante n'est pas encore assez longue (14 ans avec beaucoup d'interruptions dans les premières années), ce qui peut donner des résultats un peu distordus.

La médiane des débits journaliers présente des valeurs de débit qui se trouve exactement à la moitié de l'ensemble des observations, ce qui signifie que 50 % des débits observés sont supérieurs à la médiane et que 50 % des débits lui sont inférieurs. Ceci aide l'observateur à avoir une idée de l'ensemble des débits à une station donnée. En ce qui concerne la médiane des débits journaliers des stations de l'Ivaí, les différences les plus importantes sont observées entre les stations de Porto Paraíso do Norte et Tapira Jusante (différence de $119 m^3/s$), entre celles d'Ubá do Sul et Vila Rica (différence de $104 m^3/s$) et entre les stations de Rio dos Patos et Tereza Cristina (différence de $77 m^3/s$).

L'écart-type d'une série hydrométrique donne une idée de la dispersion de l'ensemble des débits. Plus l'écart-type est élevé, plus fortes sont les variations de débit observées dans une station donnée. Pour les stations hydrométriques de l'Ivaí, la variation des débits augmente fortement de la station de Tereza Cristina à celle de Porto Bananeiras, dans la partie moyenne du bassin versant. A partir de Porto Bananeiras, la variabilité des débits se maintient d'une station à l'autre.

En ce qui concerne les débits moyens mensuels, leur comportement est très variable entre les stations de mesure (Figures 53, 54, 55, 56 et 57), en fonction des différences

enregistrées dans la distribution des précipitations sur le bassin versant. Selon Baldo (2006), la partie amont du bassin versant est soumise à une distribution de précipitations plus homogène au long de l'année, sans l'occurrence d'une saison sèche ; en revanche, la partie aval présente une distribution des précipitations plus inégale, avec une saison humide pendant les mois d'été et une saison sèche pendant les mois d'hiver. La transition entre les deux domaines climatiques se trouve dans la région de la station d'Ubá do Sul, proche de la ville de Grandes Rios.

Sur le graphique des débits moyens mensuels de la station de São Pedro (Figure 53) on observe l'existence de trois périodes de débits élevés : une à la transition de l'hiver et du printemps, une pendant l'été et une au milieu de l'automne. La période de hauts débits qui a lieu à la transition hiver-printemps n'est pas très longue, mais le débit moyen mensuel le plus élevé de l'année a lieu justement pendant cette période, au mois d'octobre. La période de hauts débits qui a lieu pendant l'été est plus étendue que celle des autres périodes. Les stations de Rio dos Patos et Tereza Cristina présentent un comportement semblable à celui qui est observé à la station de São Pedro (Figure 53), mais la période de hauts débits de la fin de l'automne se décale vers le début de l'hiver. Il est important d'observer que la série de mesures faites à São Pedro n'est pas très étendue ; il faudra un plus long suivi hydrométrique pour pouvoir faire des comparaisons entre la station São Pedro et les stations en aval.

Douhi (2004) a fait une analyse de la distribution des précipitations sur la ville de Prudentópolis (l'endroit où se trouvent les stations hydrométriques de São Pedro et Rio dos Patos) pour la période 1998-2002. Il a observé que le trimestre d'été concentre 33 % des épisodes pluviométriques ; 27 % des événements ont lieu pendant le trimestre de printemps, 21 % pendant le trimestre d'automne et 19 % pendant le trimestre d'hiver. Pendant les mois de septembre et octobre, environ 40 % des pluies sont comprises dans l'intervalle de 20 à 60 mm par jour, ce qui explique les hauts débits observés dans la transition hiver-printemps. Douhi (2004) a observé aussi qu'au mois de mai, plus de 19 % des événements pluviométriques dépassent les 60 mm par jour, ce qui explique les forts débits de la période d'automne.

Antoneli (2004) a fait une analyse des précipitations de la période 1988 - 2003 dans le bassin versant du ruisseau Boa Vista, un affluent de la rivière dos Patos qui traverse la ville de Guamiranga, localisée dans le haut bassin de l'Ivaí. La dynamique des précipitations est semblable à celle présentée par Douhi (2004). Selon Antoneli (2004), les mois de janvier et mai présentent des forts totaux pluviométriques, tandis que le mois d'août est en général le plus sec. L'auteur montre aussi que les précipitations de janvier et mai sont souvent très intenses, de sorte que ces deux mois sont très favorables au processus d'écoulement superficiel.

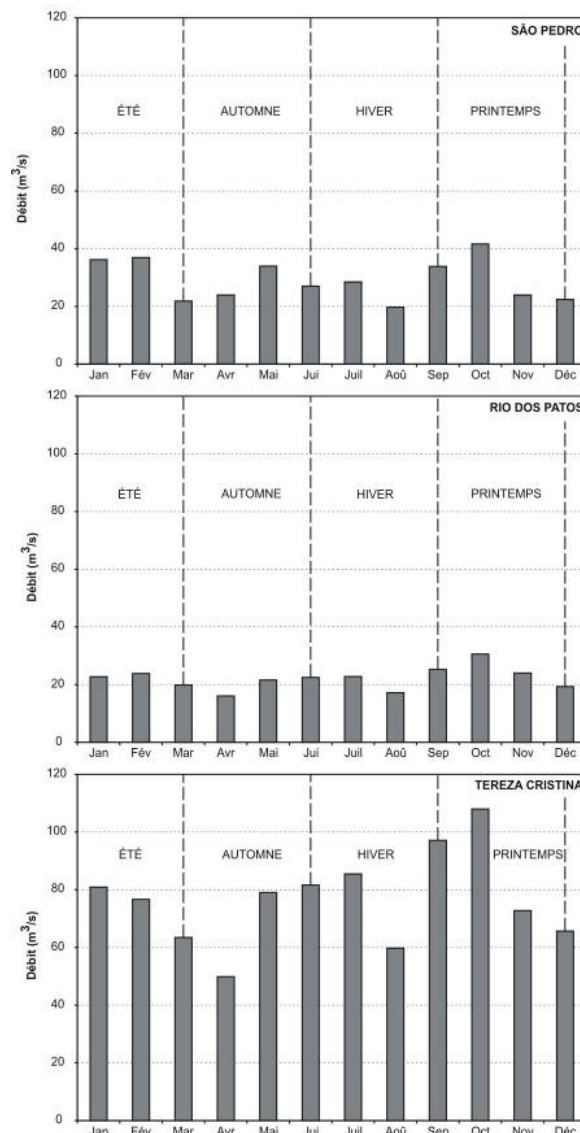


Figure 53. Moyenne des débits moyens mensuels aux stations de São Pedro, Rio dos Patos et Tereza Cristina.

Aux stations de Porto Espanhol et Ubá do Sul (Figure 54), les périodes de forts débits suivent une logique semblable à celle des stations plus amont. A la station de Porto Espanhol, le mois d'octobre possède de manière remarquable une moyenne plus élevée que celle des autres mois. La période de hauts débits de la fin de l'automne s'étend maintenant jusqu'au milieu de l'hiver.

La station de Porto Espanhol est la première station à recevoir les eaux de la Marrecas et de la Pitanga, qui drainent le plateau de Pitanga. Selon Baldo (2006), la région du plateau de Pitanga est la région la plus arrosée du bassin versant pendant presque toute l'année, sauf pour les mois de printemps, période où les précipitations se concentrent un peu plus au nord-ouest, sur le plateau de Campo Mourão. Sur le plateau de Pitanga, les totaux pluviométriques dépassent les 1800 mm annuels et la période la plus humide correspond aux mois d'été. Pendant le trimestre d'hiver, les précipitations totales dépassent les 450 mm tandis que dans la partie aval du bassin de l'Ivaí elles totalisent autour de 350 mm (BALDO, 2006). Ceci aide à comprendre les hauts débits observés pendant l'été et l'hiver à la station

de Porto Espanhol. La forte moyenne observée au mois de novembre est le résultat de la combinaison des forts débits venus de la région du plateau de Prudentópolis, bien arrosée au printemps par les pluies du plateau de Pitanga. Ce plateau n'est pas la région la plus arrosée au printemps mais, en fonction de l'effet orographique, les totaux pluviométriques observés pendant cette saison ne sont pas très éloignés des valeurs enregistrées sur le plateau de Campo Mourão.

A la station d'Ubá do Sul, le mois dont la moyenne est la plus élevée est novembre. Cependant, dans cette station placée à la transition entre les climats à hiver humide et à hiver sec, on observe que la période de hautes eaux de l'été présente des débits plus proches de ceux mesurés au printemps, avec la moyenne la plus élevée au mois de février. La période de hauts débits de l'automne observée dans les stations plus à l'amont est presque entièrement décalée vers l'hiver à cette station. Les faibles débits du mois d'août sont aussi décalés vers le mois de septembre (BALDO, 2006). La station d'Ubá do Sul est la première station à recevoir les eaux de l'Alonzo, qui draine le plateau d'Ortigueira. Ce plateau est une région bien arrosée, principalement pendant l'été et le printemps. En automne et en hiver, le plateau d'Ortigueira reçoit nettement plus de pluie que la vallée ou la partie aval du bassin versant, en raison de l'effet orographique. L'Alonzo arrive à l'Ivaí avec un débit moyen de $41,2 \text{ m}^3/\text{s}$, mais pendant les crues cette valeur peut monter jusqu'à $766,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ⁷.

En synthèse, le graphique des débits moyens mensuels de la station d'Ubá do Sul montre la combinaison des caractéristiques du climat plus humide des stations plus à l'amont et des caractéristiques tropicales de la moyenne vallée de l'Ivaí.

⁷ Informations extraites de la résumée des données hydrologiques de la station Porto Monteiro.

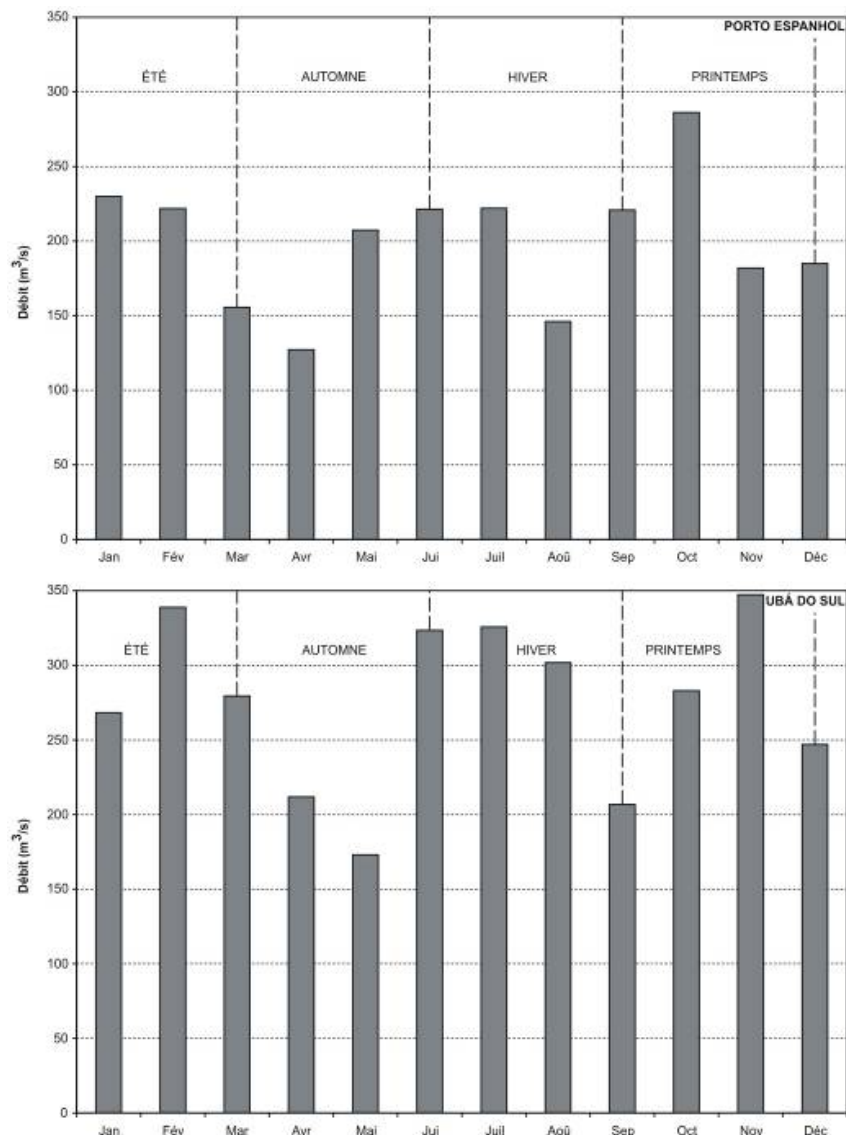


Figure 54. Moyenne des débits moyens mensuels pour les stations Porto Espanhol et Ubá do Sul.

A la station de Vila Rica (Figure 55), l'influence du climat tropical est plus nette qu'aux stations précédentes. La période de forts débits de l'été est la plus importante, avec février comme le mois de moyenne la plus élevée ($622,3 \text{ m}^3/\text{s}$). On observe aussi l'occurrence de forts débits à la fin de l'automne, surtout au mois de mai, et au printemps, où les forts débits ont lieu au mois d'octobre. L'écart entre les débits d'été et d'hiver est grand, mais les eaux venues du haut bassin de l'vaí contribuent à l'augmentation des débits pendant l'hiver, de façon qu'on n'observe pas l'occurrence d'une période de sécheresse continue.

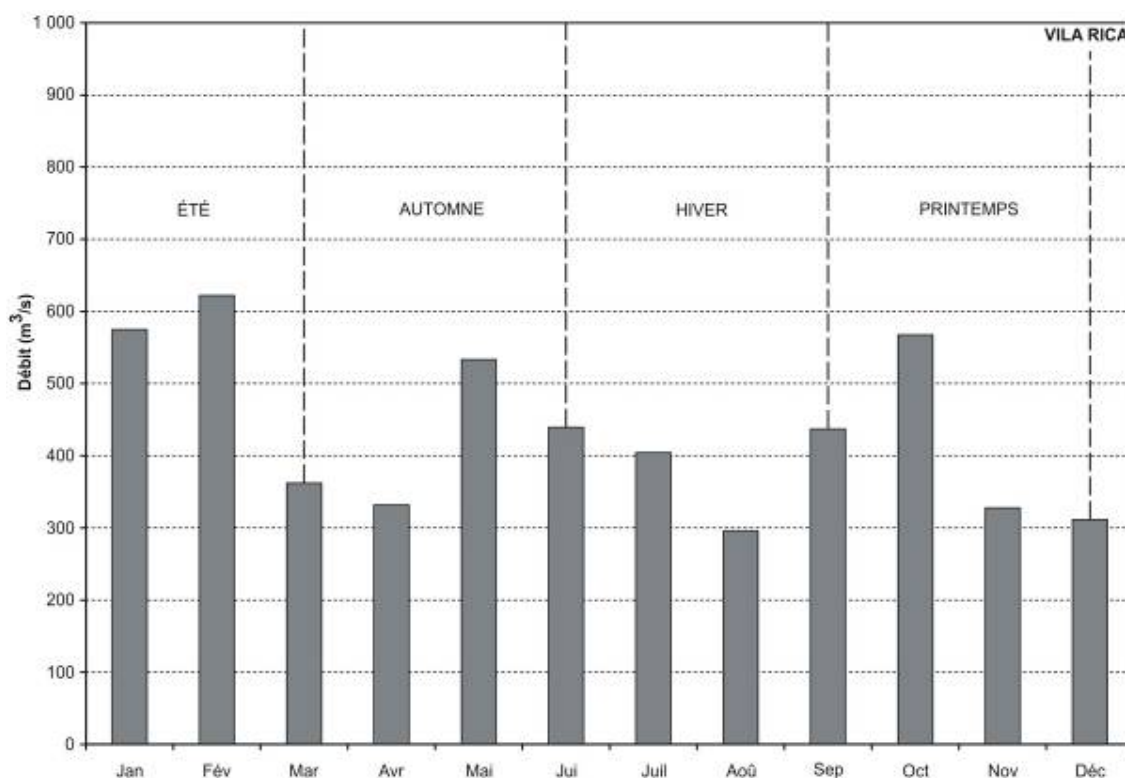


Figure 55. Moyenne des débits moyens mensuels pour la station Vila Rica.

Aux stations de Porto Bananeiras et Porto Paraíso do Norte (Figure 56) les trois périodes de haut débit sont encore identifiables. Le mois d'octobre est toujours le mois de plus fort débit moyen, mais la différence entre sa moyenne et la moyenne des autres périodes de crue n'est plus aussi grande.

A la station de Porto Bananeiras, trois périodes de crue ont lieu pendant l'été, à la fin de l'automne et au début du printemps. Ces trois périodes présentent des moyennes de débit mensuel semblables, autour de 600 m³/s. Cette station est la première station à recevoir les eaux de la Corumbataí, qui draine une partie du plateau de Pitanga et une partie du plateau de Campo Mourão. La Corumbataí arrive à l'Ivaí avec un débit moyen de 51,7 m³/s, mais en période de crue cette valeur peut monter à 464,2 m³/s⁸.

La station de Porto Paraíso do Norte présente un comportement presque identique à celui qui est observé à la station de Porto Bananeiras. La principale différence se trouve dans la période de forts débits de l'automne : tandis que les forts débits de la station de Porto Bananeiras ont lieu au mois de mai, à Porto Paraíso do Norte les forts débits ont lieu au mois de juin, dans la transition vers l'hiver.

⁸ Informations extraites du résumé des données hydrologiques de la station de Barra Ribeirão Raposo Tavares.

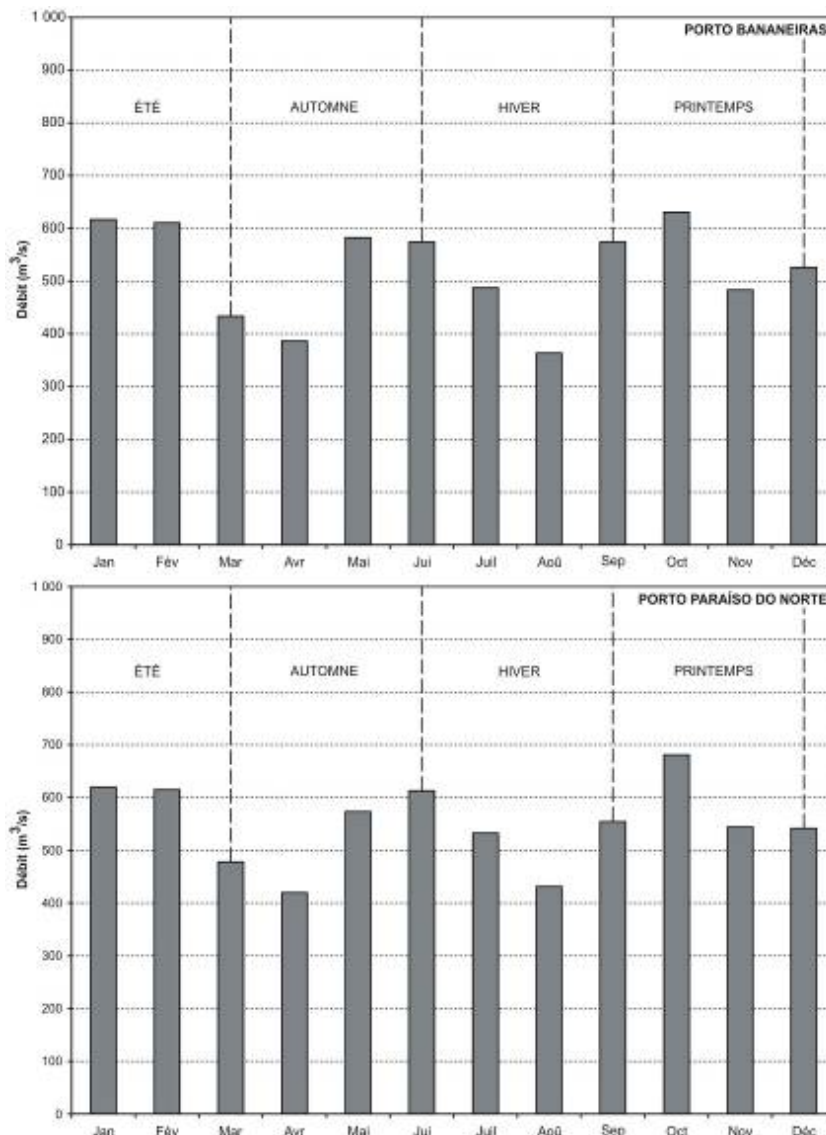


Figure 56. Moyenne des débits moyens mensuels aux stations de Porto Bananeiras et Porto Paraíso do Norte.

Dans la basse vallée de l'Ivaí, les stations de Tapira Jusante et Novo Porto Taquara enregistrent des variations de débits (Figure 57). Au premier regard on peut dire que les deux stations possèdent un comportement caractéristique des climats tropicaux, avec une importante saison de crues aux mois d'été et une période de faibles débits les mois d'hiver. Mais pour comprendre le comportement des débits dans ces deux stations, il faut aussi considérer les différentes contributions venues des sous-bassins placés plus en amont. Malgré les faibles précipitations des mois d'hiver auxquelles la basse vallée de l'Ivaí est soumise, les débits moyens mensuels se maintiennent autour de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ en fonction de la contribution des eaux venues de la partie haute du bassin versant et en fonction des apports issus des nappes phréatiques.

La station de Tapira Jusante présente une période de crues d'été bien marquée. A cause des crues d'été, la moyenne du mois de février atteint les $958,33 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que la

moyenne au mois d'août est de seulement 425 m³/s (la moyenne mensuelle la plus élevée fait 2,25 fois la moyenne mensuelle la plus faible). On observe aussi des forts débits au mois d'octobre, un résultat probable de la combinaison des forts débits venus d'amont et de l'augmentation des précipitations dans la basse vallée, surtout sur les collines situées entre les villes de Cianorte et Umuarama.

La station de Novo Porto Taquara possède une série de données plus étendue que celle de la station de Tapira. Il en résulte quelques différences entre les graphiques des deux stations. D'abord, la station de Novo Porto Taquara présente les caractéristiques d'un régime tropical : saison de crues pendant l'été et saison de faibles débits pendant l'hiver. Néanmoins, on observe plus nettement à la station de Novo Porto Taquara l'influence des apports liquides venus de la partie haute du bassin versant. Le mois de mai présente un débit moyen élevé. Le mois d'octobre présente aussi un débit moyen élevé, mais ceci est le résultat de la combinaison entre des débits issus de l'amont et des précipitations de printemps qui tombent surtout sur les collines proches de la ville d'Umuarama. Une autre conséquence des apports liquides amont est la montée des débits pendant la saison sèche. En observant le graphique, on voit que la période la plus sèche est soumise à l'interférence des forts débits du mois de mai, issus de la partie amont du bassin versant.

Le mois de février possède la moyenne mensuelle la plus élevée, avec 849,27 m³/s, tandis que le mois d'août est le mois dont la moyenne mensuelle est la plus faible : 492,52 m³/s (la moyenne mensuelle la plus élevée fait 1,72 fois la moyenne mensuelle la plus faible).

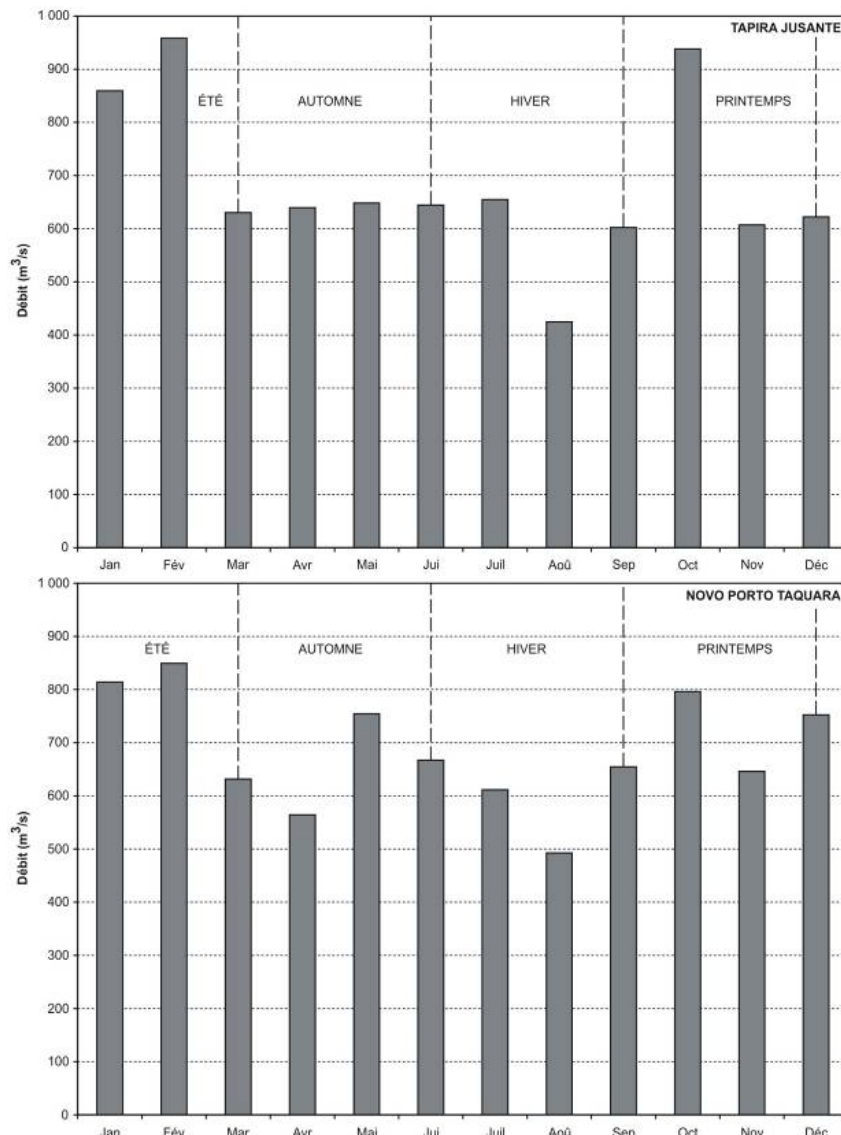


Figure 57. Moyenne des débits moyens mensuels aux stations de Tapira Jusante et Novo Porto Taquara.

L'étude des débits bruts est importante pour la définition du régime d'un cours d'eau, mais elle ne permet pas la comparaison entre des bassins versants de taille différente (GIRET, 2007). Afin de permettre une telle comparaison, on utilise des coefficients créés à partir des rapports entre plusieurs variables hydrologiques. Selon Pardé (1933), « ces coefficients nous permettent de comparer facilement, pour tous les cours d'eau, les écarts, les moyennes mensuelles avec la moyenne annuelle et, de même, les différences de débits entre les saisons de maigres et celles d'abondance ». Afin de mieux comprendre la distribution et la variabilité des débits au long de l'année, le coefficient mensuel de débits et le rapport des moyennes mensuelles extrêmes ont été calculés pour les 10 stations hydrométriques de la Dos Patos et de l'Ivaí. Le coefficient mensuel de débit est le ratio de chaque moyenne mensuelle et du module de la série de données ; il montre l'écart qui existe entre les moyennes mensuelles et le module. Le rapport des moyennes mensuelles extrême est le ratio de la moyenne mensuelle la plus haute et de la moyenne mensuelle

la plus faible ; il montre le degré de variabilité des moyennes mensuelles à une station de mesure (PARDE, 1933).

A partir des coefficients mensuels de débits de l'Ivaí (Tableau 7, Figure 58), on peut observer que la plupart des stations présentent trois périodes de hautes eaux : une en janvier et février, une entre mai et juillet et une entre septembre et octobre. On note aussi que la plupart des stations possèdent trois périodes de basses eaux : une en mars et avril, une au mois d'août et une en novembre et décembre. Si au premier regard, il semble y avoir une homogénéité dans le comportement des débits amont-aval, une analyse plus fine permet d'observer quelques petites différences entre les stations placées en amont de la station d'Ubá do Sul, soumises à un climat subtropical, et les stations placées en aval d'Ubá do Sul, soumises à un climat tropical (Figure 58).

Tableau 7 – Valeurs des coefficients mensuels de débits à chaque station de la Dos Patos et de l'Ivaí

	São Pedro	Rio dos Patos	Tereza Cristina	Porto Espanhol	Ubá do Sul
Janvier	1,24	1,03	1,06	1,15	0,97
Février	1,27	1,08	1,00	1,11	1,23
Mars	0,75	0,90	0,83	0,78	1,01
Avril	0,82	0,73	0,65	0,63	0,77
Mai	1,17	0,97	1,03	1,03	0,63
Juin	0,93	1,02	1,07	1,10	1,17
Juillet	0,98	1,03	1,12	1,11	1,18
Août	0,68	0,78	0,78	0,73	1,09
Septembre	1,16	1,14	1,27	1,10	0,75
Octobre	1,43	1,38	1,41	1,43	1,02
Novembre	0,82	1,09	0,95	0,91	1,26
Décembre	0,77	0,87	0,86	0,92	0,89
	Vila Rica	Porto Bananeiras	Porto Paraíso do Norte	Tapira Jusante	Novo Porto Taquara
Janvier	1,33	1,20	1,13	0,98	1,19
Février	1,44	1,19	1,12	1,09	1,24
Mars	0,84	0,84	0,87	0,72	0,92
Avril	0,77	0,75	0,76	0,73	0,82
Mai	1,24	1,13	1,04	0,74	1,10
Juin	1,02	1,12	1,12	0,73	0,97
Juillet	0,94	0,95	0,97	0,74	0,89
Août	0,69	0,71	0,79	0,48	0,72
Septembre	1,01	1,12	1,01	0,68	0,95
Octobre	1,32	1,23	1,24	1,06	1,16
Novembre	0,76	0,94	0,99	0,69	0,94
Décembre	0,72	1,02	0,99	0,71	1,10

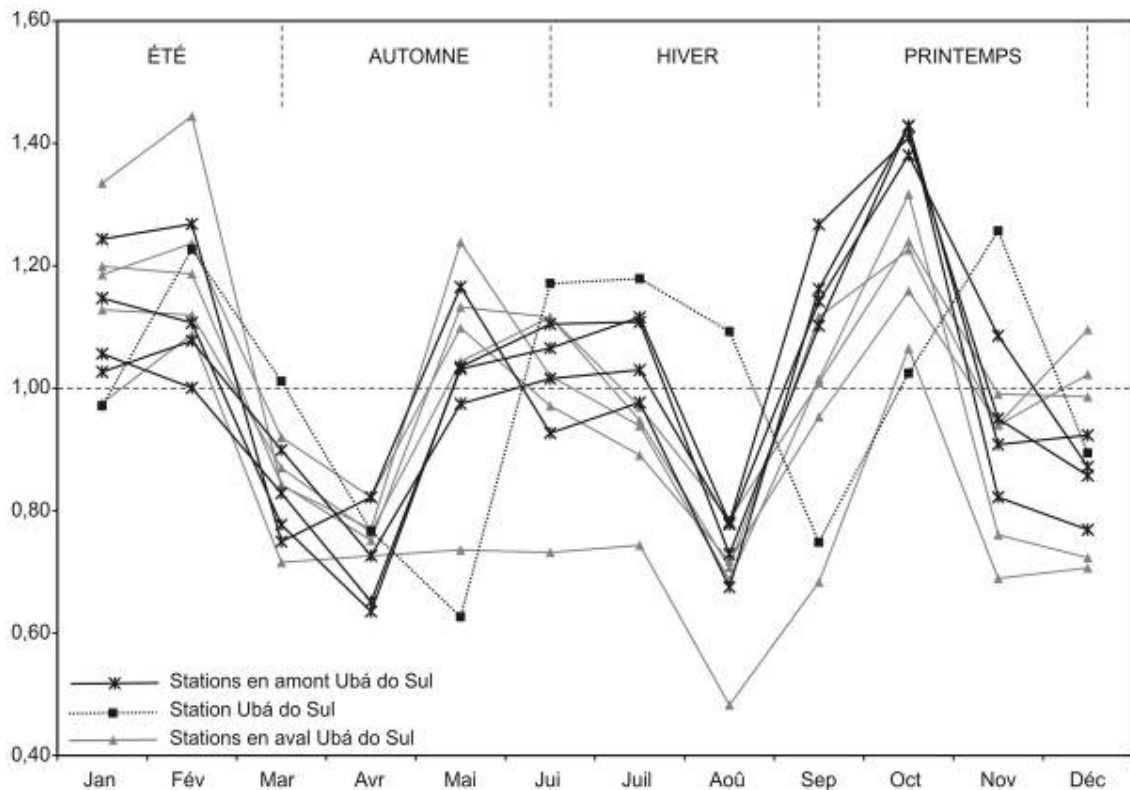


Figure 58. Coefficients mensuels de débits aux stations de la Dos Patos et de l'Ivaí.

Pendant la période de hautes eaux de janvier et février et pendant la période de basses eaux de mars et avril, les stations en amont et en aval d'Ubá do Sul possèdent des comportements relativement semblables. Au mois de mai, quand commence la deuxième période de hautes eaux, les stations en amont d'Ubá do Sul présentent des débits moyens mensuels proches du module de la série de débits, tandis que la plupart des stations en aval d'Ubá do Sul présentent des débits au-dessus du module. Aux mois de juin et juillet, les stations en amont d'Ubá do Sul voient augmenter leurs débits moyens mensuels, avec la moyenne la plus haute au mois de juillet, tandis que les stations en aval d'Ubá do Sul présentent une réduction de leurs débits moyens mensuels, qui va se poursuivre jusqu'au mois d'août.

Pendant la période de hautes eaux du mois d'octobre, on observe que les stations placées en amont d'Ubá do Sul présentent des débits moyens mensuels bien plus élevés que les stations qui se trouvent en aval de cette station. Ceci s'explique par les importantes précipitations qui ont lieu au printemps et qui tombent principalement sur la partie amont du bassin versant.

La station d'Ubá do Sul représente un cas particulier car elle se trouve dans la zone de transition entre les deux domaines climatiques, et elle est placée juste en aval de l'Alonso (ou Do Peixe). Cette rivière reçoit les eaux issues du plateau de Faxinal, une région qui reçoit d'importantes précipitations. Ainsi, le comportement des débits à cette station dépend de la combinaison des différentes influences climatiques.

Quant à la station de Tapira Jusante (la ligne avec la moyenne la plus faible au mois d'août sur la Figure 58), à première vue elle semble avoir un comportement qui ne correspond pas aux stations voisines, avec des débits moyens très faibles. Cette distorsion est due à la courte période de suivi hydrométrique à cette station. La station de São

Pedro possède aussi une courte série de données, mais les résultats ne semblent pas très différents de ceux obtenus aux stations de Rio dos Patos et Tereza Cristina.

Le calcul du rapport des moyennes mensuelles extrêmes a donné une idée de la variabilité des débits aux stations de mesure (Tableau 8). On peut observer que de la station de São Pedro à la station de Vila Rica, la valeur du rapport des moyennes mensuelles extrêmes est toujours supérieure à 2,0, sauf pour la station de Rio dos Patos, où le rapport est de 1,9. A partir de la station de Porto Bananeiras, la valeur du rapport des moyennes mensuelles extrêmes tombe en dessous de 1,73, sauf pour la station de Tapira Jusante (la valeur serait-elle plus élevée en raison de la série de données courte ?). Ainsi, d'après ces résultats, on peut conclure que la variabilité des débits au long de l'année est plus importante dans la partie amont du bassin versant, avec une forte variabilité aux stations de Porto Espanhol et Tereza Cristina. En admettant que la valeur trouvée à la station de Tapira Jusante ne soit pas correcte, on peut affirmer que dans les stations en aval de Vila Rica la variabilité des débits moyens au long de l'année est plus faible. Cette variabilité moindre est possiblement liée à plusieurs facteurs : 1) la combinaison des différents régimes des affluents donnant un régime moins variable dans la partie aval de l'Ivaí ; 2) l'amortissement des débits de crue en direction de l'aval ; 3) dans la partie aval du bassin versant, la contribution des nappes phréatiques issues des collines gréseuses soutien le débit de l'Ivaí pendant les périodes d'étiage.

Tableau 8 – Rapport des moyennes mensuelles extrêmes

Station	Rapport des moyennes mensuelles extrêmes
São Pedro	2,12
Rio dos Patos	1,90
Tereza Cristina	2,16
Porto Espanhol	2,25
Ubá do Sul	2,01
Vila Rica	2,10
Porto Bananeiras	1,73
Porto Paraíso do Norte	1,62
Tapira Jusante	2,25
Novo Porto Taquara	1,72

3.1.3. Les débits de crue

Les crues sont des événements très importants dans un système fluvial. Pendant les crues, les cours d'eau évacuent des volumes importants d'eau et de sédiments, modifient la morphologie de la vallée fluviale, construisent ou détruisent des dépôts sédimentaires (bancs, plaines et terrasses). Les crues attirent aussi l'attention car elles sont des événements de forte intensité qui se passent à une échelle temporelle courte, de sorte qu'il n'est pas difficile à un observateur d'accompagner l'intégralité du cycle de montée et de descente des eaux dans un système fluvial. L'intérêt des habitants pour les crues se renforce quand les crues touchent des zones occupées, causant des dégâts au patrimoine et mettant parfois fin à des vies humaines.

La caractérisation des débits de crue est importante car elle donne une idée de la puissance des événements extrêmes dans un système fluvial. Selon Pardé (2004) la puissance des crues reflète « les influences combinées de tous les facteurs géophysiques : relief (y compris celui des lits apparents et majeures), nature du sol, plus ou moins

imperméable ou susceptible de saturation rapide ou lente, climat et végétation ». En synthèse, les crues aident à mieux comprendre le rôle joué par les facteurs de contrôle d'un bassin versant.

Afin de donner une idée précise du fonctionnement de l'hydrosystème, la caractérisation des débits de crue doit fournir des informations sur les **causes**, les **mécanismes de contrôle et les interférences**, la **puissance** et la **fréquence** de ces événements. D'autres informations complémentaires peuvent être aussi intéressantes, comme le rapport entre la précipitation tombée et les débits mesurés dans une section du chenal (PARDE, 1933).

Les débits de crue de l'Ivaí ont été aussi étudiés par Destefani (2005). Les débits de crue de l'Ivaí ont été aussi étudiés par Destefani (2005). L'auteur a présenté une analyse des débits maximaux annuels, en identifiant les années de forts débits totaux. La moyenne des débits de crue, la période de récurrence des débits moyens et des débits de crue ont été calculés. Au-delà de la présentation de ces paramètres, Destefani (2005) a aussi identifié, d'après les hydrogrammes issus des séries de mesure, trois types de comportement pour les crues (Figure 59) : un type « A », qui concerne les crues extraordinaires, un grand volume d'eau étant drainé pendant plusieurs jours, avec plusieurs pics de fort débit ; un type « B », qui concerne les crues avec trois pics successifs de fort débit, mais avec une durée inférieure aux crues du type « A » ; et les crues du type « C », qui concerne les crues isolées dans l'hydrogramme, à un seul pic, qui montent de façon rapide (DESTEFANI, 2005).

En ce qui concerne les causes des crues, Destefani (2005) a montré que les averses sont à l'origine des forts débits de l'Ivaí. Les crues deviennent plus importantes et plus étendues pendant les années d'occurrence du phénomène climatique *El Niño*. Selon l'auteur, pour la période qui va de 1965 à 1998, sur les 12 crues extraordinaires répertoriées dans le bassin de l'Ivaí, environ 55% ont eu lieu les années sous l'influence d'*El Niño*. A quelques stations de mesure, cette valeur peut atteindre les 80 %. L'auteur a observé aussi que les crues de 1983 et de 1998, considérées comme les plus importantes de l'Ivaí, ont aussi eu lieu pendant des années d'*El Niño*.

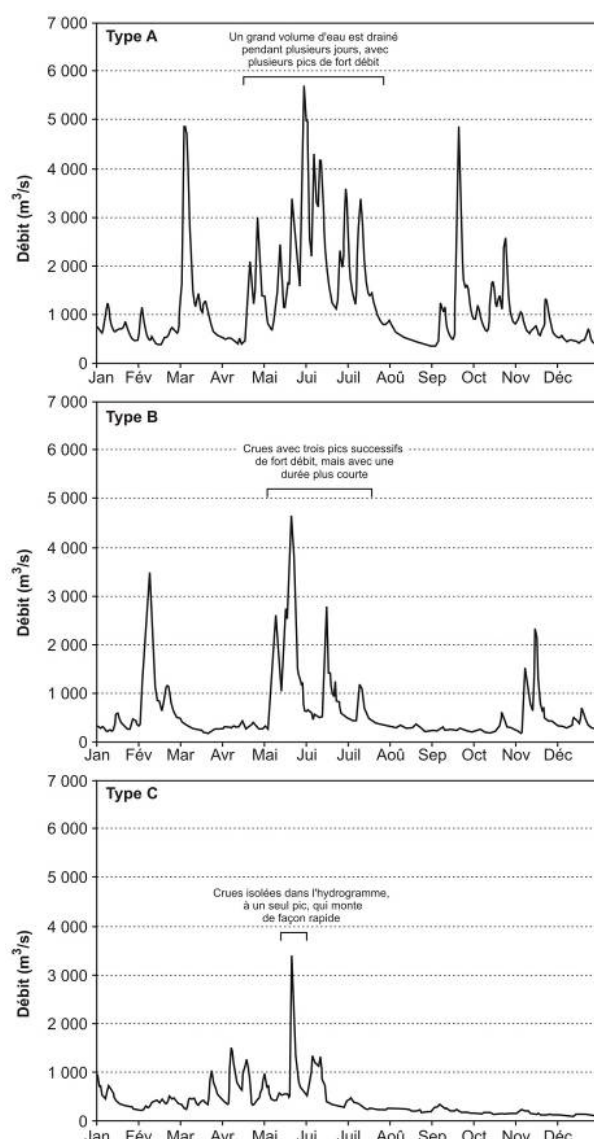


Figure 59. Les trois types de crues du bassin versant de l'Ivaí définis par Destefani (2005).

Afin de mieux connaître la puissance et la fréquence des débits de crue, des courbes de débits classés ont été élaborées pour les sections de mesure de la Dos Patos et pour l'Ivaí. Les courbes de débits classés présentent sur l'axe des abscisses la fréquence cumulée (en pourcentage) des débits mesurés dans une station hydrométrique, et sur l'axe des ordonnées les débits ou classes de débits. Ces courbes expriment le pourcentage de temps pendant lequel un débit donné est égalé ou dépassé à une station de mesure. La courbe de débits classés peut aussi donner quelques indices sur la variabilité des débits dans la section d'étude. Pour l'élaboration des courbes de débits classés des stations de mesure de l'Ivaí, la définition des intervalles a été faite en utilisant l'équation de Sturges (SPAD, 1999) :

$$k = 1 + 3,3 \cdot \text{Log}(n)$$

Où :

k = le nombre d'intervalles à découper dans la série hydrométrique ;

n = le nombre total d'observations dans la série hydrométrique.

L'amplitude des classes a été définie par l'équation :

$$(Q_{\max} - Q_{\min}) / k$$

Où :

Q_{\max} = Débit maximum enregistré dans la section ;

Q_{\min} = Débit minimum enregistré dans la section ;

k = nombre d'intervalles à découper dans la série hydrométrique.

A partir des courbes de débits classés élaborées (annexe 1), les débits caractéristiques de crue ont été calculés (Tableau 9, Figures 60 et 61). Les débits caractéristiques sont des valeurs de quantiles extraits de la courbe de débits classés, et ils fournissent quelques paramètres descriptifs sur la série de débits d'une station de mesure. Pour l'étude des crues, on utilise souvent deux débits caractéristiques : le DC10, ou le débit qui est dépassé dix jours par an, et le DC30, ou le débit qui est dépassé trente jours par an (REMENIERAS, 1980 ; GIRET, 2007). A partir de ces deux indices, on peut séparer les débits de crue en deux catégories : les crues rares, celles qui dépassent le DC10, et les crues plus fréquentes, celles qui dépassent le DC30 mais ne dépassent pas le DC10 (GIRET, 2007).

Tableau 9 – Débits caractéristiques de crue des stations de la Dos Patos et de l'Ivaí

Station	DC 10 (m 3 /s)	DC 10 (l/s/ km²)	DC 30 (m 3 /s)	DC 30 (l/s/ km²)
São Pedro	217	209	142	137
Rio dos Patos	152	140	101	93
Tereza Cristina	541	151	346	97
Porto Espanhol	1 181	137	1 093	127
Ubá do Sul	1 592	125	1 018	80
Vila Rica	2 238	116	1 561	81
Porto Bananeiras	2 540	105	1 713	71
Porto Paraíso do Norte	2 510	88	1 679	59
Tapira Jusante	2 512	79	1 832	57
Novo Porto Taquara	2 662	77	1 826	53

Les valeurs du DC₁₀ et du DC₃₀ donnent une idée de la magnitude des crues pour chaque station de mesure de l'Ivaí, tandis que les valeurs spécifiques du DC₁₀ et du DC₃₀ permettent facilement la comparaison avec d'autres cours d'eau. Normalement, les débits absolus tendent à augmenter en raison directe de la surface réceptrice, tandis que les débits spécifiques tendent à se réduire alors que la surface réceptrice augmente (PARDÉ, 1933).

On voit que les valeurs absolues du DC₁₀ (Figure 60) sont semblables aux stations de São Pedro et Rio dos Patos, mais ces valeurs augmentent fortement de Tereza Cristina à Porto Bananeiras. A partir de Porto Bananeiras, l'augmentation des valeurs de DC₁₀ est moins forte. Par rapport aux valeurs spécifiques du DC₁₀, on voit que la station de São Pedro présente une forte contribution par unité de surface drainée. A partir de la station de Tereza Cristina, on voit que la réduction du DC₁₀ est relativement forte et linéaire jusqu'à

la station de Tapira Jusante. A la station de Novo Porto Taquara, la station la plus à l'aval de l'Ivaí, le DC₁₀ correspond à une contribution de 77 l/s/km².

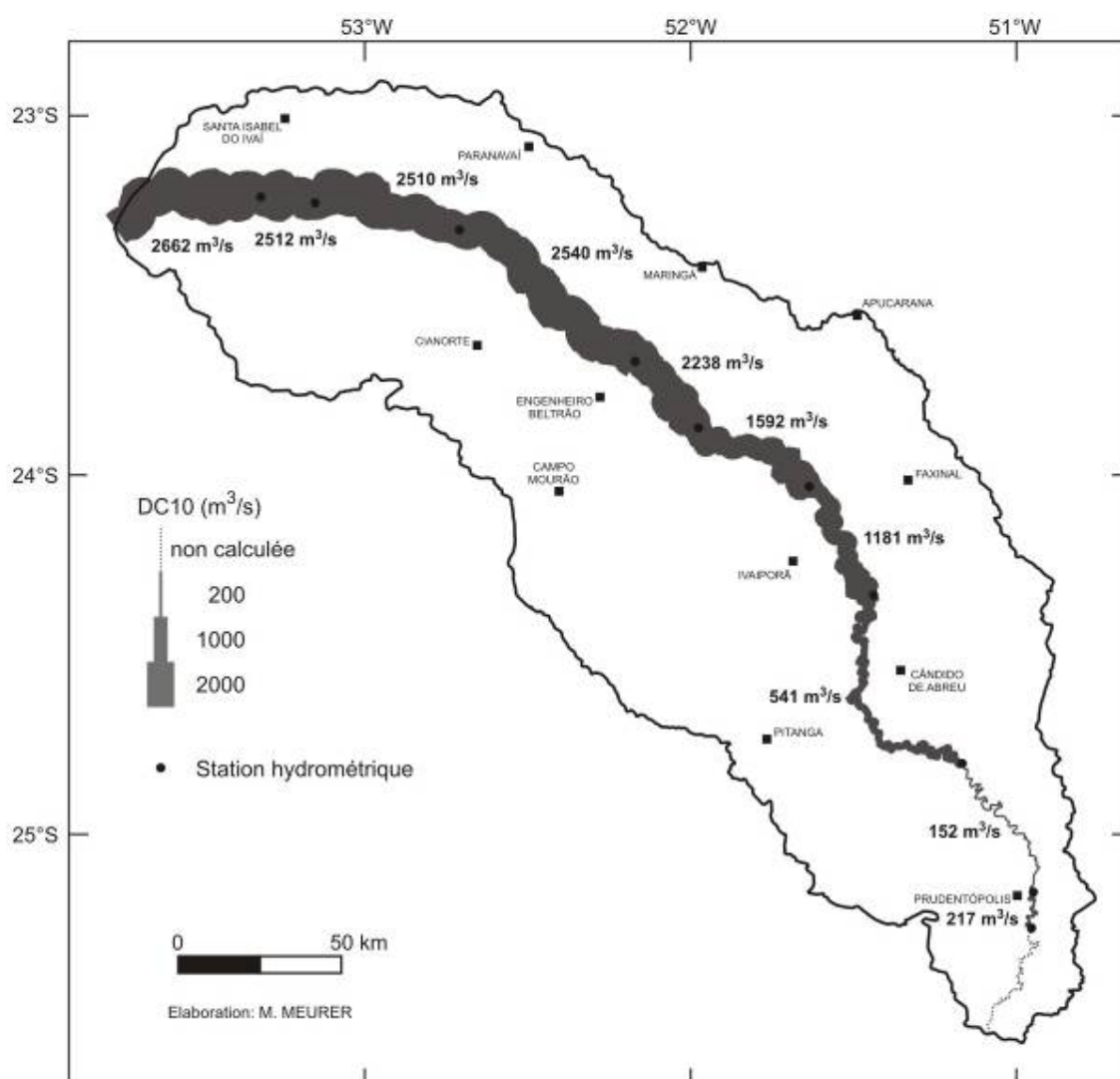


Figure 60. Distribution amont-aval des DC₁₀.

L'observation des valeurs absolues du DC₃₀ (Figure 61) montre que l'augmentation des débits ne se passe pas de façon linéaire. En raison des différentes contributions apportées par les affluents, les débits augmentent avec une intensité plus ou moins forte. Ainsi, entre les stations de Tereza Cristina et Porto Espanhol, il est probable que les affluents contribuent fortement à l'augmentation des débits à Porto Espanhol. La même chose peut être observée entre les stations d'Ubá do Sul et Vila Rica. Par rapport aux valeurs spécifiques, on voit qu'à la station de São Pedro il y a une forte contribution par unité de surface, qui est ultérieurement amortie au fur et à mesure que la surface drainée augmente. Néanmoins, la station de Porto Espanhol présente aussi une forte contribution spécifique, probablement en raison des apports venus du plateau de Pitanga, une des régions les plus arrosées du bassin de l'Ivaí. En aval de la station de Porto Espanhol, les DC₃₀ se réduisent de façon presque

constante, avec une réduction moins forte aux trois dernières sections (Porto Paraíso do Norte, Tapira Jusante et Novo Porto Taquara).

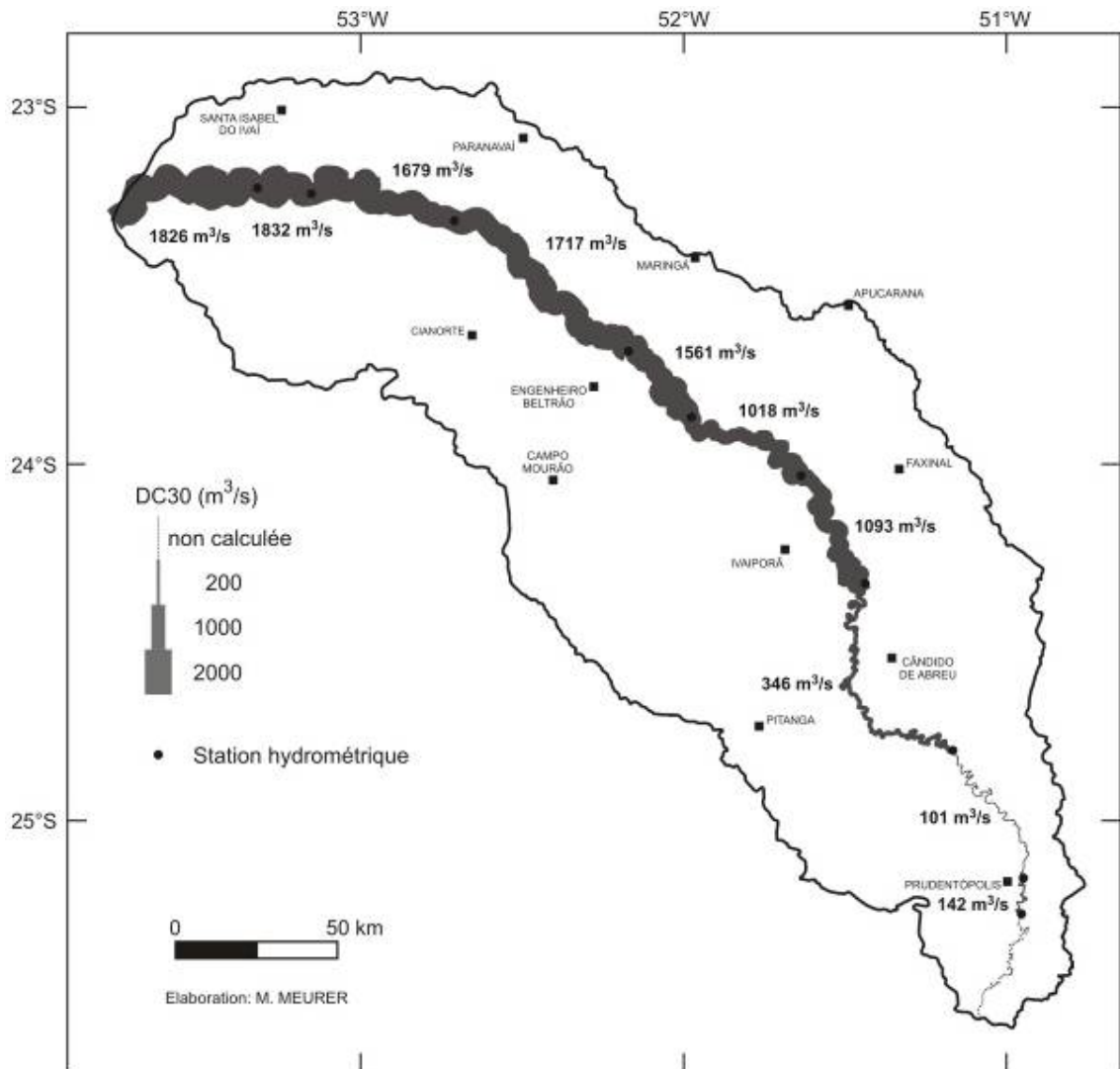


Figure 61. Distribution amont-aval des DC30.

La distribution saisonnière des débits de crue est un critère aussi important pour la caractérisation du régime d'un cours d'eau que la magnitude. Ainsi, des graphiques de la distribution mensuelle des débits caractéristiques DC10 et DC30 ont été faits pour chaque station de mesure de la rivière Dos Patos et de l'Ivaí (Figures 62 à 66). La station de Vila Rica n'a pas été comprise dans cette analyse car la série de données hydrométriques disponible ne présente pas encore une quantité suffisante de débits supérieurs au DC30.

D'après les graphiques élaborés, on voit que la distribution saisonnière des débits de crue n'est pas la même pour toutes les stations de mesure, mais que certaines d'entre elles présentent des caractéristiques communes. Dans la partie amont du bassin versant, les stations de São Pedro (Figure 62), Rio dos Patos et Tereza Cristina (Figure 63) présentent des forts débits surtout pendant les mois de septembre et octobre, au début du printemps. Cependant, les mois de mai, juin et juillet sont aussi marqués par les forts débits.

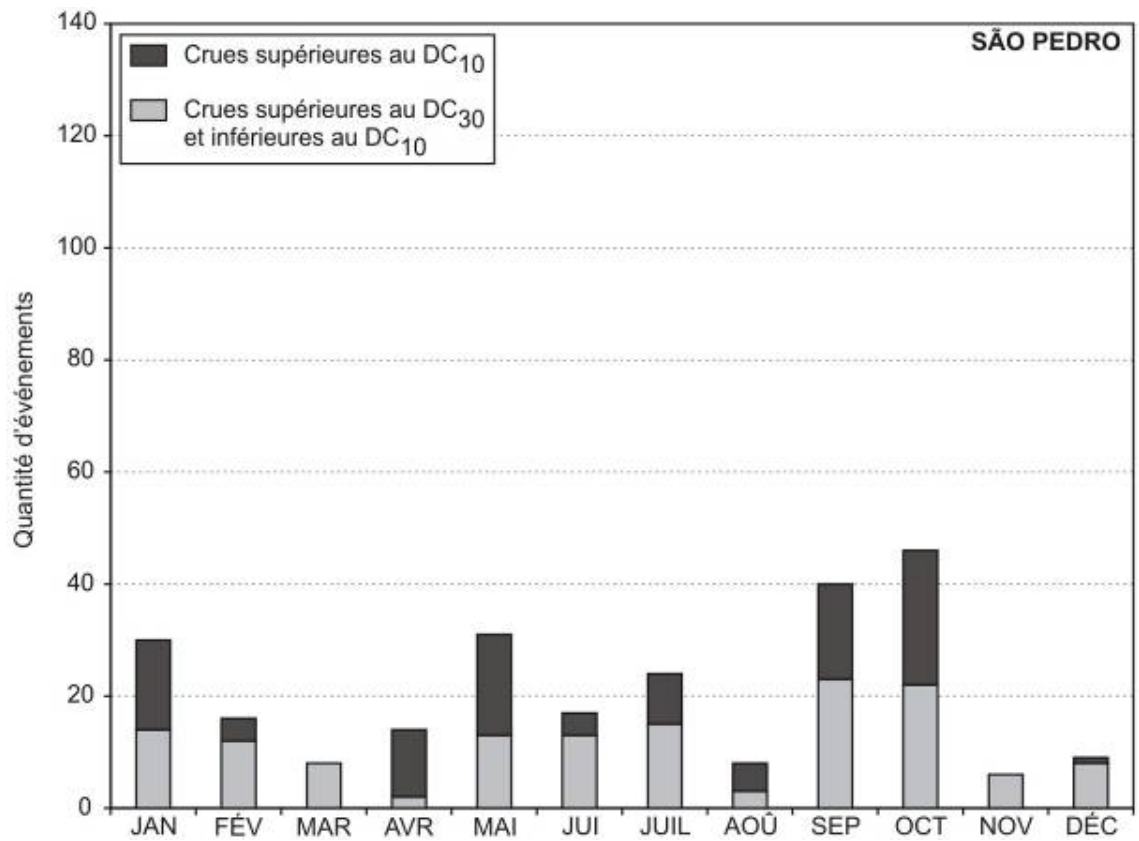


Figure 62. Distribution mensuelle des débits caractéristiques de crue de la station de São Pedro.

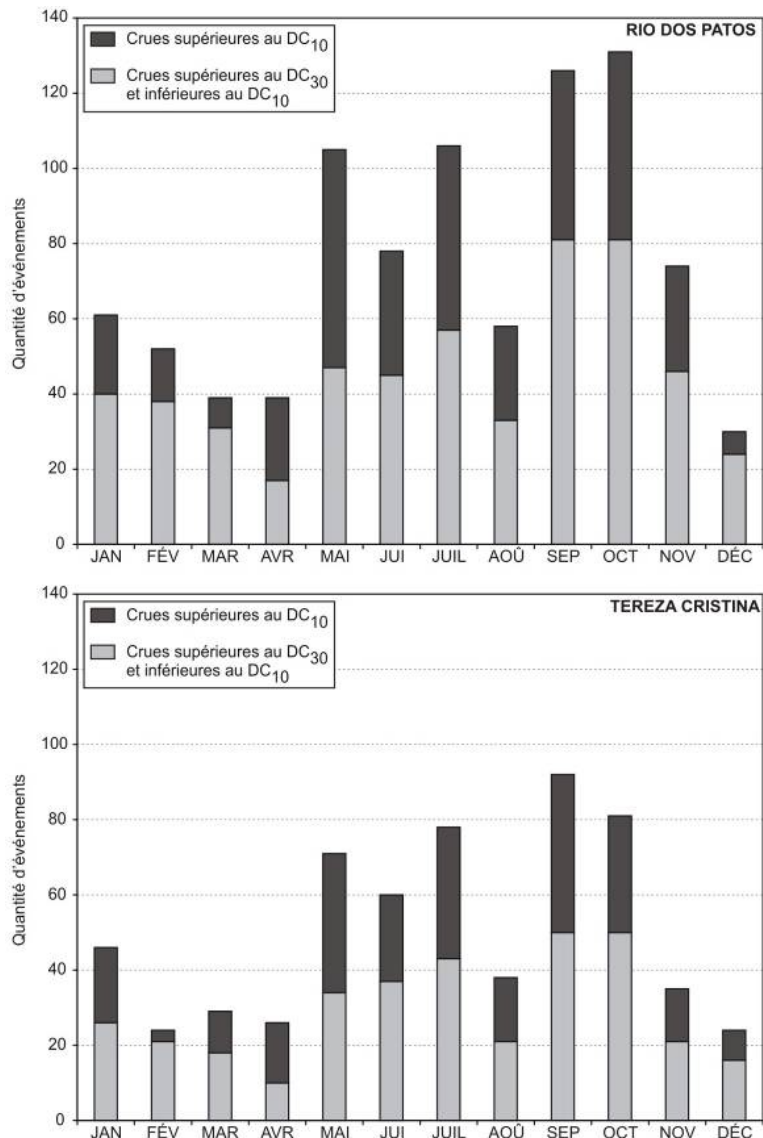


Figure 63. Distribution mensuelle des débits caractéristiques de crue des stations de Rio dos Patos et Tereza Cristina

Plus à l'aval, la station de Porto Espanhol (Figure 64) se trouve à la limite entre le haut et le moyen bassin versant de l'Ivaí. On observe qu'à partir de cette station, la majeure partie des forts débits a eu lieu au mois de mai. On observe aussi que cette station est soumise à une période de forts débits à la fin de l'automne et au début de l'hiver (aux mois de juin et juillet). Une deuxième période de forts débits commence en septembre, au début du printemps, mais c'est au mois d'octobre qu'on observe la majeure partie des événements à forts débits.

Dans la partie intermédiaire du bassin versant, aux stations d'Ubá do Sul (Figure 64) et de Porto Bananeiras (Figure 65), le mois de mai marque le début d'une période à forts débits, qui se prolonge jusqu'au mois de juillet. Dans cette période, la majeure partie des événements à forts débits a lieu au mois de mai. Une deuxième période à forts débits commence en septembre, au début du printemps, mais, comme pour les stations précédentes, la majeure partie des événements est enregistrée au mois d'octobre. Malgré ces similarités avec les stations précédentes, les stations d'Ubá do Sul et Porto Bananeiras

présentent une forte influence du climat tropical humide. Pour cette raison, le mois de janvier commence à apparaître comme une période importante par rapport aux débits de crue.

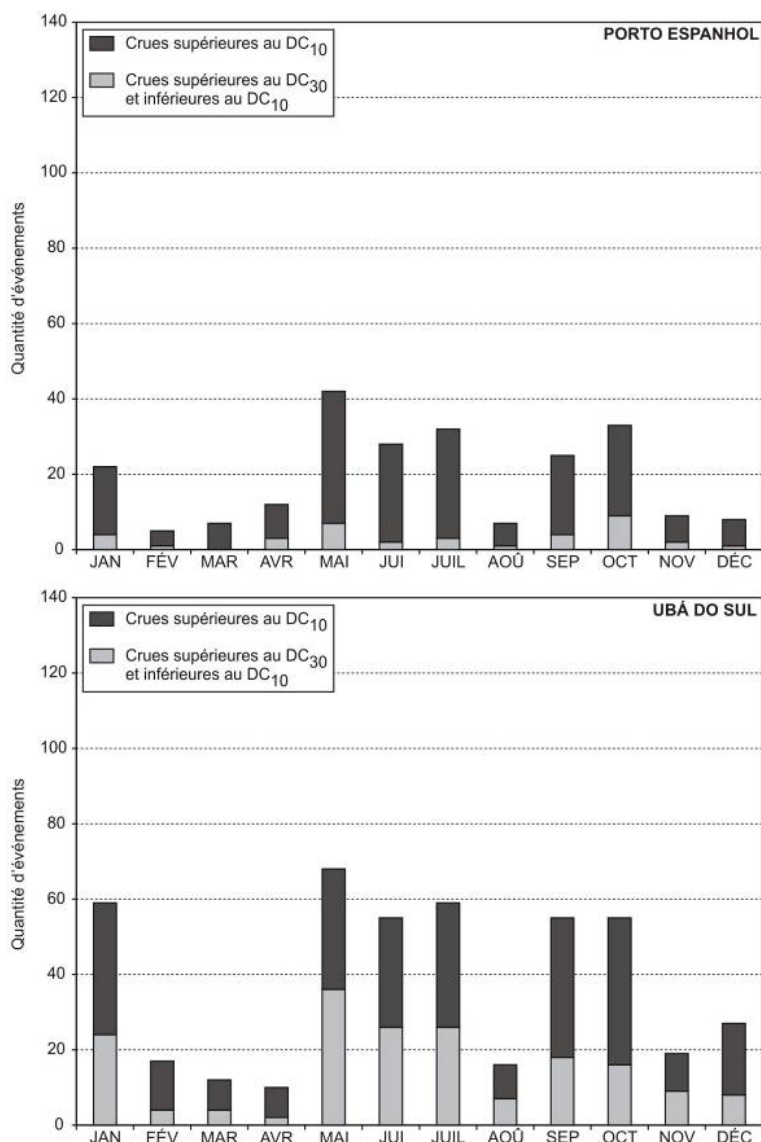


Figure 64. Distribution mensuelle des débits caractéristiques de crue des stations de Porto Espanhol et Ubá do Sul.

Dans la partie inférieure du bassin versant, la station de Porto Paraíso do Norte (Figure 65) montre aussi un comportement de transition entre deux groupes de stations. On observe que cette station présente une période à forts débits qui commence en septembre et qui atteint son maximum dans le mois d'octobre. Néanmoins, comme pour les stations de la partie intermédiaire du bassin versant, le mois de mai est aussi une période à forts débits, qui se prolonge jusqu'au mois de juillet.

Dans la partie la plus aval du bassin de l'Ivaí, aux stations de Tapira Jusante et Novo Porto Taquara (Figure 66), on voit que les mois de janvier et mai et la période entre septembre et octobre sont des périodes de forts débits. Sous l'influence d'un climat tropical comprenant éventuellement une saison sèche pendant l'hiver (de juin à septembre), ces sections présentent des forts débits en janvier à cause des fortes précipitations d'été. Il est

probable que les forts débits observés pour les mois de mai et de septembre-octobre soient une conséquence des contributions venues de la partie haute du bassin versant.

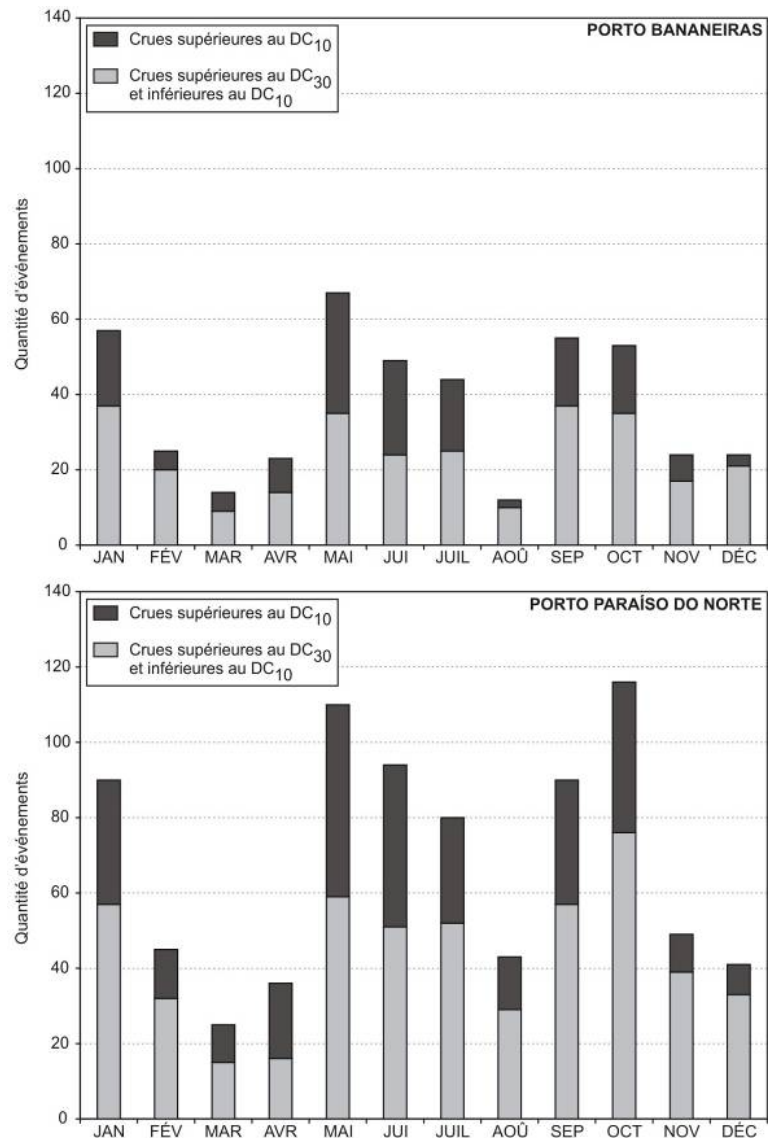


Figure 65. Distribution mensuelle des débits caractéristiques de crue des stations de Porto Bananeiras et Porto Paraíso do Norte.

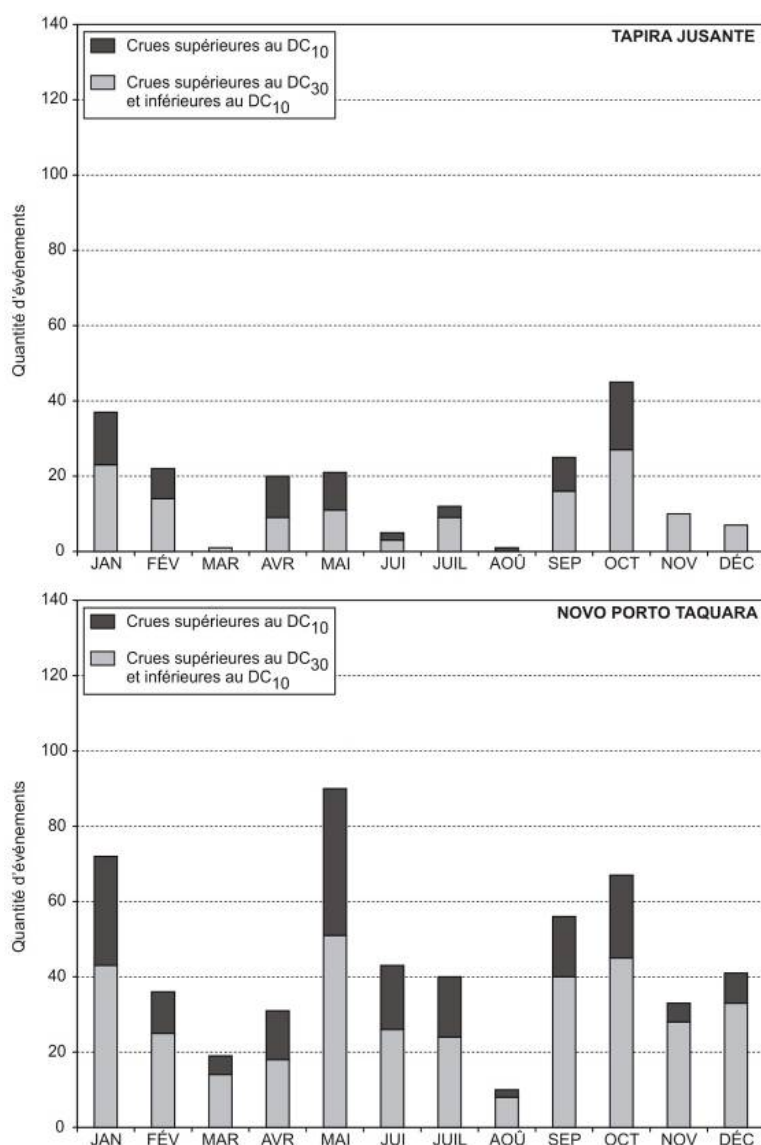


Figure 66. Distribution mensuelle des débits caractéristiques de crue des stations de Tapira Jusante et Novo Porto Taquara.

Dans son étude sur la dynamique hydrologique de l'Ivaí, Destefani (2005) affirme que «les crues, pour la plupart des stations, ont lieu préférentiellement aux mois de janvier, mai et juin (...) car c'est dans ces mois que le plus fréquemment ont lieu les crues maximales annuelles. Cependant, ceci ne définit pas une période saisonnière de crue pour l'Ivaí, mais montre seulement le mois de l'année où a lieu le pic maximum de crue. (...). Malgré cela, même le pic maximum de crue possède une occurrence très forte pendant d'autres mois de l'année ». Les résultats obtenus sur nos graphiques corroborent les affirmations de Destefani (2005) sur la complexité du régime de débits de crue de l'Ivaí. La rivière ne présente pas une période de crues bien définie, et les forts débits peuvent avoir lieu en différentes saisons chaque année.

Destefani (2005) a identifié les mois de janvier, mai et juin comme des périodes préférentielles d'occurrence des forts débits. D'après les graphiques, on voit que les mois de mai et juin sont réellement des mois à forts débits dans la plupart des stations de mesure, et le mois de janvier est un mois à forts débits principalement pour les stations qui se trouvent

à l'aval de la station de Porto Espanhol. Par contre, les graphiques montrent que les mois de septembre et octobre concentrent aussi une bonne partie des jours à forts débits, ce qui n'a pas été observé par Destefani (2005). Ces mois sont très importants, principalement pour les stations de São Pedro, Rio dos Patos et Tereza Cristina, dans la partie amont du bassin versant.

La compartimentation du bassin de l'Ivaí en trois secteurs (un en amont de Porto Espanhol, un entre Porto Espanhol et Porto Paraíso do Norte et un dernier en aval de Porto Paraíso do Norte), réalisée à partir du régime saisonnier des débits de crue, n'est pas une compartimentation rigide ; les limites peuvent se modifier en raison de la dynamique climatique. Cependant, ces résultats semblent s'accorder avec la compartimentation précédemment présentée, faite à partir du régime saisonnier des débits moyens.

3.1.4. Les débits de pleins bords

Un des débits caractéristiques les plus importants pour la compréhension de la dynamique hydro-géomorphologique d'un cours d'eau est le débit de pleins bords (Q_{pb}). En termes hydrologiques, le débit de pleins bords marque le niveau pour lequel le chenal est totalement rempli d'eau, jusqu'au sommet des berges, avant de déborder sur la plaine (GORDON *et al.*, 2004). En termes géomorphologiques, le débit de pleins bords possède une signification plus importante. Selon Leopold (1997), le concept de débit de pleins bords est important car, même s'il a lieu seulement quelques jours par an car c'est lui qui est responsable de la formation et de l'entretien de la forme du chenal. Selon l'auteur, « des données ont montré que, sur une période de quelques années, la plus grande quantité de sédiments est transportée par des débits proches du débit de pleins bords » (LEOPOLD, 1997). Selon Haan *et al.* (1994), « les flux inférieurs au débit de pleins bords transportent moins de sédiments et ils causent moins de d'érosion. Les flux supérieurs au débit de pleins bords sont absorbés par les surfaces d'inondation, sans une grande augmentation de la profondeur de flux et par conséquent sans une augmentation de l'érosion ».

Leopold (1997) affirme aussi que le débit de pleins bords est géomorphologiquement important car « la condition de pleins bords est l'unique paramètre morphologique et de forme du chenal qui coïncide à peu près avec un intervalle constant de récurrence du flux » (LEOPOLD, 1997). En fonction de cette récurrence relative, les travaux de recherche ont souvent utilisé le débit de pleins bords comme critère pour établir des rapports avec la morphologie du chenal, avec la dynamique processuelle et avec les caractéristiques du bassin versant (LEOPOLD et WOLLMAN, 1957 ; ROSGEN, 1994 ; SCHMITT, 2001 ; PETIT *et al.*, 2005).

La définition des débits de pleins bords des stations de la Dos Patos et de l'Ivaí a été faite à partir des séries de débits. En admettant que pour les rivières tempérées, le débit de pleins bords présente une récurrence de 1,5 ans (BRAVARD et PETIT, 2002), on a extrapolé cette règle à l'Ivaí, qui se trouve à la transition entre la zone tropicale et la zone subtropicale. Le travail statistique a été fait sur des séries de crues annuelles, c'est-à-dire les plus forts débits journaliers de chaque année dans une station. On travaille sur des séries de crues annuelles car cette variable est aléatoire et les valeurs sont indépendantes entre elles. On a procédé à l'ajustement de chaque série de crues par la loi de probabilités de Gumbel (BRAVARD et PETIT, 2002), et à partir de cet ajustement on a calculé les débits de récurrence de 1,5 ans, soit les débits de pleins bords (Tableau 10).

Tableau 10 - Débits de pleins bords calculés aux stations de la Dos Patos et de l'Ivaí

Station	Qpb (m ³ /s)
São Pedro	225
Rio dos Patos	149
Tereza Cristina	739
Porto Espanhol	1519
Ubá do Sul	2071
Vila Rica	3373
Porto Bananeiras	3428
Porto Paraíso do Norte	3019
Tapira Jusante	Non calculé
Novo Porto Taquara	2978

A partir des valeurs calculées, on observe que la station de São Pedro, dans le haut bassin versant, présente un débit de pleins bords légèrement plus fort que celui de la station de Rio dos Patos, qui se trouve environ 33 km en aval. Ceci peut s'expliquer en raison de différences lithologiques et morphologiques entre les deux sections. Selon Bravard et Petit (2002), le débit de pleins bords dépend de plusieurs facteurs, comme la taille et la lithologie du bassin versant, le régime hydrologique, la morphologie du chenal et des berges, entre autres. Pour cette raison, le temps de retour du débit de pleins bords peut aussi varier entre les différentes sections d'un cours d'eau. Afin de mieux analyser les résultats achevés, un graphique met en relation les débits de pleins bords et la surface drainée (Figure 67).

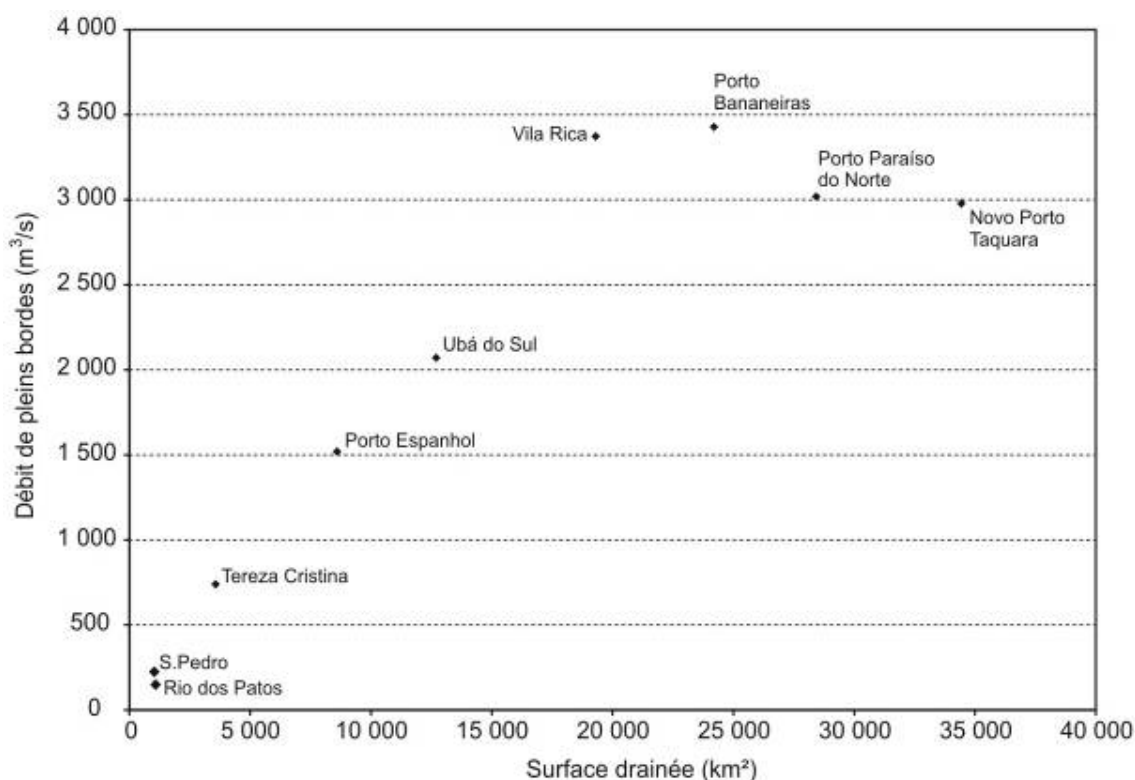


Figure 67. Variation du débit de pleins bords en fonction de la surface drainée.

A partir de la station Rio dos Patos, on observe une augmentation relativement linéaire des débits de pleins bords jusqu'à la station de Vila Rica. A partir de Vila Rica, le débit de pleins bords n'augmente pas beaucoup à la station de Porto Bananeiras, et après cette

station, on observe une réduction des débits de pleins bords pour les stations de Porto Paraíso do Norte et Novo Porto Taquara.

Comme il a été déjà vu, ces augmentations et réductions des débits de pleins bords peuvent être causées par plusieurs facteurs. Dans le cas du bassin de l'Ivaí, il est probable que ces variations des débits de pleins bords sont causées par les différences lithologiques, climatologiques et de morphologie des stations de mesure. La réduction de 3500 à 3000 m³/s de ce débit enregistré dans le cours aval, qui possède une plaine alluviale bien développée, pourrait s'expliquer par la mise en eau de la plaine pour des débits décroissants en direction de la confluence du Paraná.

Dans cette recherche, on a adopté la récurrence de 1,5 comme celle du débit de pleins bords pour toutes les sections du bassin versant. Il est probable que, dans l'avenir, des nouvelles recherches déterminent différentes périodes de récurrence pour les débits de pleins bords des différentes stations de mesure.

3.1.5. Les débits d'étiage et le tarissement des nappes

Comme les débits de crue, les débits d'étiage font partie des conditions extrêmes qui touchent périodiquement un système fluvial. Ils représentent les conditions minimales d'écoulement qui peuvent concerner un cours d'eau. Une étude de la dynamique hydrologique d'un cours d'eau ne peut pas être faite sans qu'on prenne en considération les débits d'étiage.

Les étiages sont toujours liés à un déficit d'eau. Ce déficit peut se produire en raison d'un faible entrée d'eau dans le système, causée par de faibles totaux pluviométriques, ou en raison d'un stockage ou sortie d'eau du système, comme le stockage par la neige, par les barrages, la forte évaporation ou le pompage d'eau. Dans les zones tropicales, la pénurie de précipitations pendant la période estivale est la principale cause des étiages (PARDE, 1933).

La magnitude des étiages dépend du bilan des entrées et sorties d'eau dans le système fluvial, mais dépend aussi de la capacité des nappes phréatiques à retenir et maintenir l'écoulement de surface. Dans les bassins à terrains imperméables, les nappes phréatiques n'emmagasinent pas beaucoup d'eau et pendant les périodes de pénurie pluviométrique elles n'arrivent pas à soutenir l'écoulement de surface longtemps ; par contre, dans les bassins à terrains perméables, les nappes phréatiques peuvent soutenir le flux de surface durablement.

L'analyse des débits d'étiage de la Dos Patos et de l'Ivaí sera faite à partir des données et graphiques auparavant présentés dans la discussion du régime de débits moyens, complétée par d'autres informations jugées pertinentes.

D'après les graphiques des moyennes des débits moyens mensuels précédemment présentés (Figures 53 à 57), on peut décrire la distribution saisonnière des périodes d'étiage pour chaque section de mesure. Sur ces graphiques, on observe que les stations de São Pedro, Rio dos Patos et Tereza Cristina présentent trois périodes de basses eaux : une au mois d'avril, une au mois d'août et la dernière au mois de décembre. A partir des coefficients mensuels de débits calculés pour les stations de mesure (Tableau 7 et Figure 58), on voit qu'à la station de São Pedro, la moyenne mensuelle la plus basse, correspondant au mois d'août, est 32 % inférieure au module de la série (débit moyen de toute la série de données). Pour la station de Rio dos Patos, la moyenne mensuelle la plus basse, qui correspond au

mois d'avril, est 27 % inférieure au module de la série. A Tereza Cristina, le débit moyen mensuel le plus faible est celui du mois d'avril, environ 35 % inférieur au module de la série.

A la station de Porto Espanhol, on observe deux périodes d'étiage pendant l'année : la première aux mois de mars et avril, et la deuxième au mois d'août. Avril est le mois dont le débit moyen est le plus faible, autour de 37 % au-dessous du module de la série. A Ubá do Sul, deux périodes d'étiage ont été identifiées, une au mois de mai, l'autre au mois de septembre. Le mois de mai présente le débit moyen le plus faible, environ 37 % inférieur au module de la série. Aux deux stations suivantes, Vila Rica et Porto Bananeiras, on observe deux périodes de crue, la première en mars et avril, la deuxième au mois d'août. A la différence des stations précédentes, à Vila Rica le mois d'août et celui qui a le débit moyen le plus faible, environ 31 % inférieur au module de la série. A Porto Bananeiras, le mois d'août est aussi celui qui a la moyenne la plus faible, environ 29 % inférieure au module.

A la section de Porto Paraíso do Norte, deux périodes d'étiage peuvent être identifiées, une au mois d'avril et l'autre au mois d'août. La moyenne la plus faible est en avril, de 24 % inférieure au module de la série. A la station de Tapira Jusante, seul le mois d'août est une importante période d'étiage, de 42 % au-dessous du module de la série. A la station de Novo Porto Taquara, la dernière section de mesure de l'Ivaí, deux périodes d'étiage peuvent être observées, une en avril et l'autre en août. Le débit du mois d'août, mois dont le débit moyen est le plus faible, est de 28 % inférieur au module de la série.

D'après ces résultats, on peut regrouper les stations de mesure en deux ensembles : un premier regroupe les stations de São Pedro à Ubá do Sul, où les débits moyens mensuels les plus faibles sont les plus écartés des modules, et un deuxième regroupe les stations de Vila Rica à Novo Porto Taquara, dont les débits moyens mensuels les plus faibles sont plus proches du module. Une remarque doit être faite quant aux résultats des stations de Rio dos Patos et Tapira Jusante qui, en raison de la courte période de suivi hydrométrique, ont des valeurs un peu en dehors de ce qu'on attendrait pour ces stations.

Hormis la distribution saisonnière des étiages, il est important de connaître aussi leur magnitude. On a choisi d'utiliser un paramètre simple : le débit caractéristique DC₃₅₅. Le DC₃₅₅ est le débit qui est dépassé 355 jours par an (REMENIERAS, 1980 ; GIRET, 2007). Il a été calculé pour les stations de mesure de la Dos Patos et l'Ivaí (Tableau 11).

Tableau 11 – Débits d'étiage et débits spécifiques d'étiage aux stations de la Dos Patos et de l'Ivaí

Station	DC 355 (m³ /s)	DC 355 (l/s/km²)
<i>São Pedro</i>	78	75,2
<i>Rio dos Patos</i>	17	15,7
<i>Tereza Cristina</i>	125	35,0
<i>Porto Espanhol</i>	274	31,9
<i>Ubá do Sul</i>	350	27,6
<i>Vila Rica</i>	471	24,4
<i>Porto Bananeiras</i>	481	19,9
<i>Porto Paraíso do Norte</i>	409	14,4
<i>Tapira Jusante</i>	424	13,3
<i>Novo Porto Taquara</i>	434	12,6

Les valeurs absolues des débits d'étiage de chaque section donnent une référence quantitative, mais elles ne permettent pas une comparaison directe avec d'autres cours d'eau. C'est la raison pour laquelle on présente aussi les débits spécifiques d'étiage. Ces valeurs sont calculées par rapport à la surface drainée, et elles peuvent être comparables entre elles et avec celles d'autres bassins versants.

On voit que la station de São Pedro présente un fort débit spécifique, autour de 75 l/s/km², mais cette valeur est un peu surestimée en raison du temps réduit de suivi hydrométrique dans cette section. A la station de Rio dos Patos, la valeur trouvée pour le débit spécifique d'étiage est bien plus faible, autour de 15 l/s/km².

De la station Rio dos Patos à Tereza Cristina, on observe une forte augmentation du débit spécifique d'étiage. La station de Tereza Cristina reçoit la contribution de quelques affluents qui drainent l'escarpement situé entre le 2^{ème} et le 3^{ème} plateau du Paraná ; ceci explique cette augmentation du débit spécifique d'étiage observé.

A partir de Tereza Cristina, on observe une réduction relativement linéaire et forte du débit spécifique d'étiage, jusqu'à la station de Porto Paraíso do Norte. Après Porto Paraíso do Norte, cette réduction reste linéaire, mais devient un peu plus faible qu'auparavant. Une hypothèse pour expliquer ce changement de comportement peut être trouvée dans la géologie du bassin versant. Il est probable que, pendant les étiages, la partie aval de l'Ivaí est approvisionnée par l'eau emmagasinée dans les grès de la formation Caiuá. Afin de mieux connaître le rôle joué par les eaux souterraines dans le comportement des débits d'étiage dans le bassin de l'Ivaí, une étude sur le tarissement des nappes a été faite.

Le tarissement est un événement hydrologique qui a lieu au moment de la décrue, en l'absence de précipitations, après l'écoulement superficiel et hypodermique (écoulement des couches supérieures des sols). Pendant le tarissement, les débits se réduisent et les nappes souterraines se vident, en approvisionnant le cours d'eau. La décroissance des débits se fait de façon exponentielle, ce qui veut dire que les débits se réduisent de plus en plus lentement (GONOT, 1996 ; GIRET, 2007). La dynamique de tarissement des nappes pendant des longues périodes d'étiage a été expliquée par la loi de Maillet (1905) :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Où :

Q_t = débit à l'instant t donné ;

Q_0 = débit initial de la phase de tarissement ;

α = coefficient de tarissement de la nappe (appelé aussi coefficient k).

D'après la loi de Maillet (1905), on retient le coefficient de tarissement α , un coefficient adimensionnel qui exprime la vitesse avec laquelle les nappes souterraines se vident. On a choisi ce coefficient car la valeur d'alpha dépend de la géologie et de la géomorphologie des terrains drainés. Ce coefficient présente aussi l'avantage d'être comparable d'un bassin versant à l'autre (GONOT, 1996).

Selon la loi de Maillet (1905), le calcul du coefficient de tarissement α est donné par l'équation :

$$\alpha = -\log_n(Q_t/Q_0)/t$$

Dans le bassin versant de l'Ivaí, le coefficient α a été calculé pour les six stations qui disposaient de données pluviométriques (Figure 68). Pour chaque station, plusieurs phases de tarissement ont été sélectionnées, et plusieurs valeurs d'alpha ont été calculées.

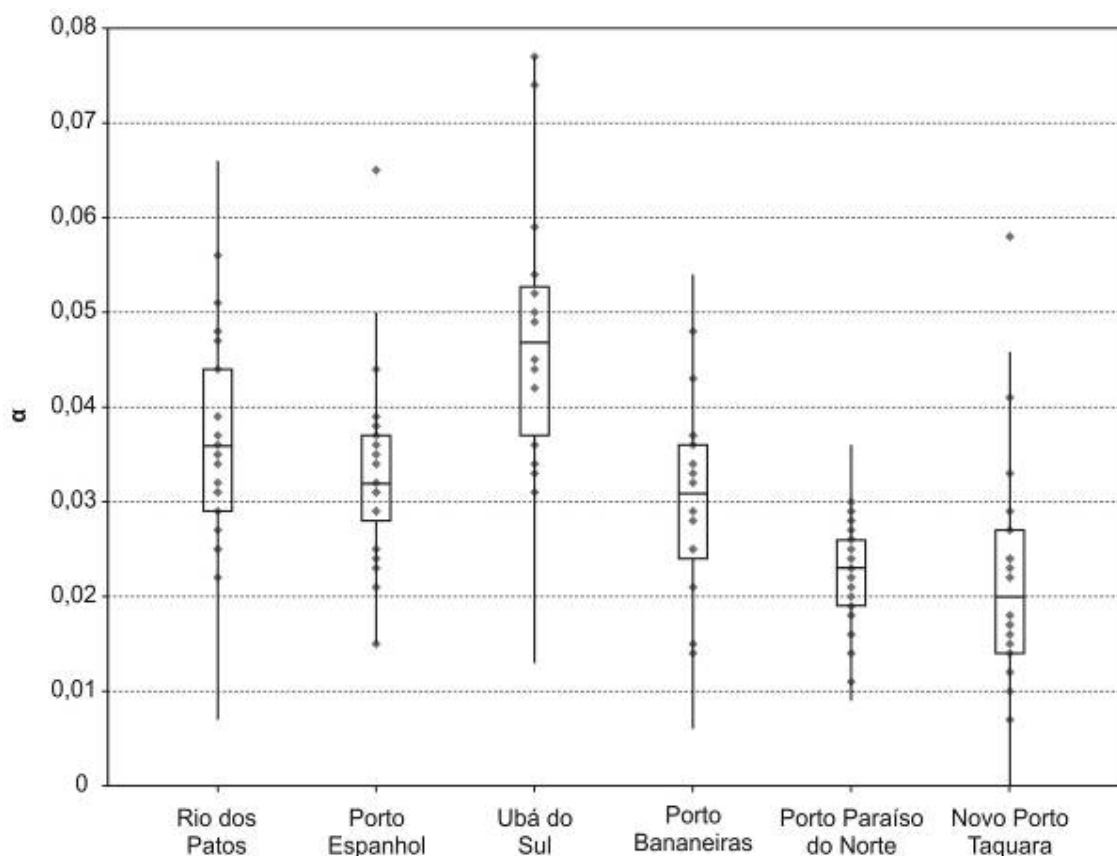


Figure 68. Valeurs du coefficient de tarissement α trouvées pour les stations de la Dos Patos et l'Ivaí.

Les valeurs d'alpha trouvées pour les différentes sections de l'Ivaí montrent que le tarissement des nappes ne se produit pas de façon homogène pour tout le bassin versant, mais qu'il varie entre les stations et au sein d'une même station.

A la section de Rio dos Patos, les valeurs d'alpha sont relativement élevées, ce qui indique que la vidange des nappes est rapide. On voit que le coefficient médian de tarissement se trouve autour de 0,035, mais la dispersion de l'ensemble de valeurs est assez importante. Cette station draine les terrains sédimentaires du deuxième plateau du Paraná, et en fonction des valeurs d'alpha trouvées, on peut estimer que ces sédiments ne sont pas très perméables, pour cette raison, ils ne sont pas capables de maintenir le débit de base pendant de longs étiages.

La section de Porto Espanhol est aussi entourée par les terrains sédimentaires qui forment la transition entre le 2^{ème} et le 3^{ème} plateau. On voit que la médiane des valeurs d'alpha calculées pour cette section est de 0,032, pas très différente de celle trouvée pour la station de Rio dos Patos, néanmoins l'ensemble de valeurs de Porto Espanhol est un peu moins dispersé que l'ensemble de valeurs trouvées pour la station précédente.

A la section d'Ubá do Sul, les valeurs d'alpha sont très élevées. La médiane est de 0,047 et l'ensemble présente une forte dispersion. Cette section se trouve sur les roches volcaniques de la Formation Serra Geral. Ces roches sont généralement très imperméables ; les fractures sont les seuls milieux de subsurface où les eaux peuvent s'accumuler. Au moment des étiages, la vidange de ces stocks est très rapide, ce qui explique les fortes valeurs d'alpha observées.

La section suivante, celle de Porto Bananeiras, draine aussi des terrains volcaniques de la Formation Serra Geral. On voit que les coefficients de tarissement trouvés pour cette section sont bien plus faibles que ceux de la section d'Ubá do Sul. La médiane des valeurs d'alpha est de 0,031, similaire à celle des sections de Rio dos Patos et Porto Espanhol, qui drainent les formations sédimentaires du haut bassin versant. La dispersion de l'ensemble de valeurs d'alpha est aussi inférieure à celle de la section d'Ubá do Sul. Il est probable que cette réduction de la vitesse de tarissement et cette réduction de la dispersion de l'ensemble de valeurs sont liées à la présence de couches de basalte vacuolaire. Ces roches, parfois touchées par les processus d'altération, présentent une perméabilité secondaire liée aux fractures et aux vacuoles. Pendant les étiages plus prolongés, ces couches maintiennent le débit de base, avec un transfert d'eau plus rapide dans les fractures et plus lent entre les vacuoles.

A la section de Porto Paraíso do Norte, l'Ivaí court sur le basalte, mais il reçoit des eaux des affluents qui drainent les grès de la Formation Caiuá. Les valeurs du coefficient de tarissement dans cette section sont bien plus faibles que celles des sections précédentes. La valeur médiane d'alpha pour cette section est de 0,023, ce qui indique que la vidange des nappes se passe de façon très lente. On voit aussi que l'ensemble de valeurs n'est pas très dispersé ; il s'agit de la plus faible dispersion de toutes les sections analysées. Il est probable que la présence du grès Caiuá, très perméable, est responsable du tarissement très lent et peu variable observé dans cette section.

A Novo Porto Taquara, l'Ivaí court entièrement sur le grès. On observe que la médiane des coefficients de tarissement pour cette section est de 0,020, la plus faible du bassin versant. La majorité des valeurs se trouve autour de la médiane, mais la dispersion des valeurs est plus forte que celle observée à Porto Paraíso do Norte. Le tarissement lent peut aussi être expliqué par la présence du grès Caiuá. La dispersion plus forte peut être liée à la présence de la plaine alluviale, composée de différents niveaux sédimentaires, avec des vitesses différentes de tarissement. A la dernière section de mesure, le tarissement des débits de Novo Porto Taquara est soumis à l'influence du tarissement des sections précédentes, ce qui peut aussi expliquer la variabilité des valeurs trouvées.

D'après l'ensemble de résultats (Figure 69), on voit que la vitesse de tarissement exprime de façon approximative les caractéristiques géologiques du bassin versant de l'Ivaí. Dans les séquences sédimentaires paléozoïques du haut bassin versant, la vitesse de vidange des nappes peut être considérée comme moyenne. Ceci peut varier beaucoup, mais les résultats montrent que, dans la majorité des cas, le tarissement est inférieur à 0,040. Dans les roches volcaniques, la vidange des nappes est en général plus rapide. Les variations sont très fortes, les nappes de ce secteur pouvant souvent avoir un

comportement semblable à celui trouvé dans les séquences sédimentaires paléozoïques, et exceptionnellement les nappes peuvent avoir un comportement semblable à ce qu'on observe dans le grès. Malgré ces variations de comportement, dans la majorité des cas les valeurs de tarissement sont au-dessus de 0,029. Dans le grès Caiuá le tarissement est nettement plus lent. Les valeurs sont très concentrées autour de la médiane de 0,023, et la grande majorité des valeurs est au-dessous de 0,030. Dans des situations extrêmes, le tarissement des nappes dans le grès peut être très lent, et s'abaisser jusqu'à 0,007.

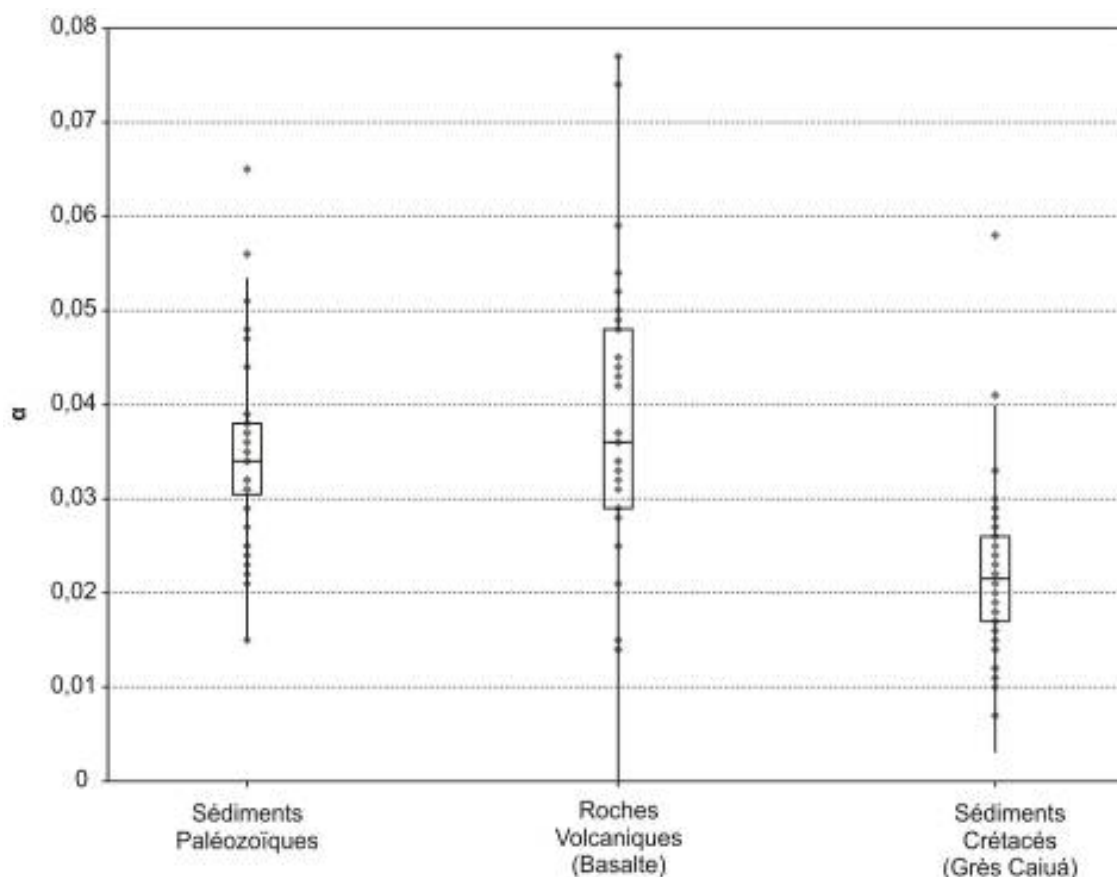


Figure 69. Synthèse des coefficients de tarissement des sections du bassin de l'Ivaí, regroupées selon la géologie prédominante.

Le calcul du coefficient de tarissement des nappes pour les sections de mesure de l'Ivaí a donc permis une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant, principalement pendant les périodes d'été. Cependant, on doit considérer que les résultats ici présentés sont encore un peu limités. Plusieurs facteurs peuvent interférer, comme la difficulté de bien séparer la phase de tarissement des autres phases hydrologiques sur les hydrogrammes (GIRET, 2007), l'épaisseur et la nature des formations superficielles et des sols, ou encore le court temps de suivi hydrométrique aux stations et pluviométriques. Il est probable qu'avec un temps d'observation supérieur, les valeurs de tarissement présenteraient des tendances plus nettes.

3.1.6. Les rapports entre le débit et la surface drainée

La compréhension des rapports existant entre le débit et la surface drainée est importante car, elle permet de comprendre le rôle joué par les différentes régions d'un bassin versant

en termes de contribution et de stockage de l'eau. Ceci peut nous offrir des informations indirectes sur la géologie des terrains drainés, et peut aussi être utile pour l'estimation des débits dans une section où il n'y a pas de station de jaugeage, mais dont on connaît la surface drainée.

Afin de vérifier les rapports existant dans le bassin de l'Ivaí entre les débits moyens, de crue (DC₁₀) et d'étiage (DC₃₅₅) avec la surface drainée, on a élaboré des graphiques à nuages de point qui mettent en rapport ces variables (Figures 70, 71 et 72).

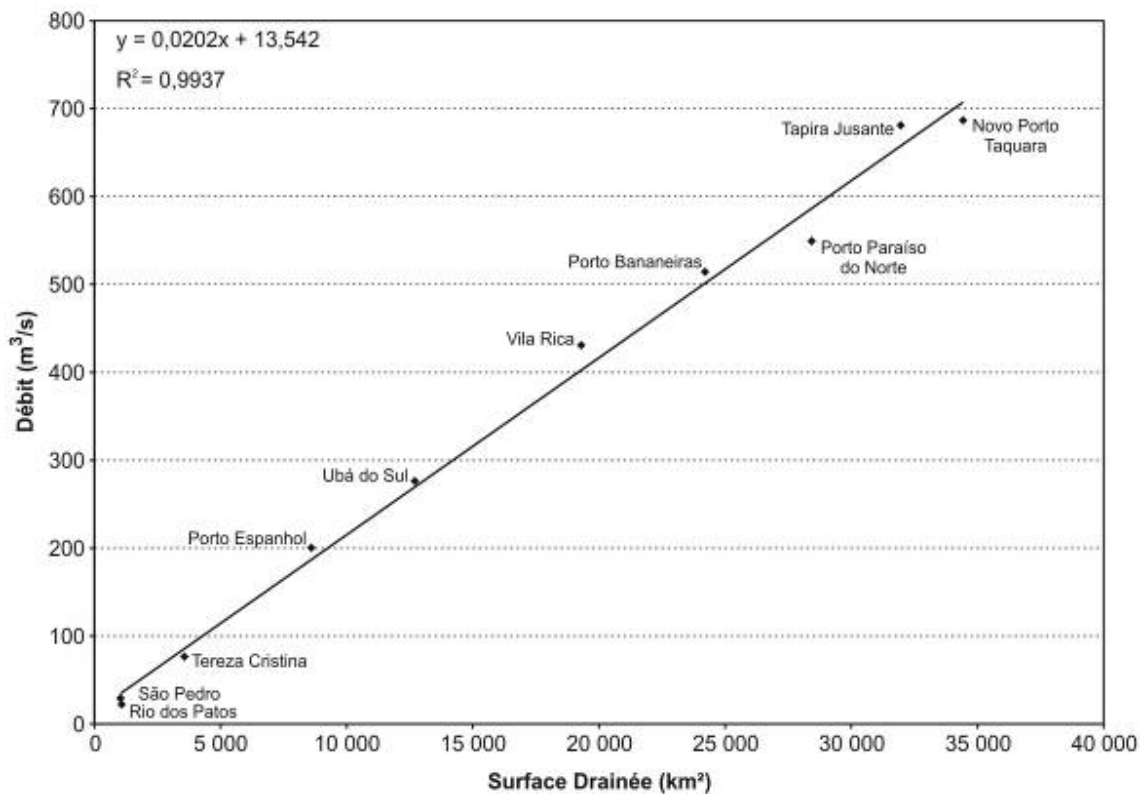


Figure 70. Rapport entre le débit moyen et la surface drainée pour les stations de la Dos Patos et de l'Ivaí.

D'après le graphique débit moyen – surface (Figure 70), on voit que les débits moyens des stations de jaugeage de l'Ivaí présentent une bonne relation avec la surface drainée, les points étant distribués de façon presque linéaire autour d'une droite d'ajustement. De cette droite, a été extraite une équation qui exprime de façon mathématique le rapport débit moyen/surface :

$$Q_m = 0,0202 A + 13,542$$

Où :

Q_m = Débit moyen dans une section de l'Ivaí et A = Surface drainée

A partir de cette équation, on peut voir que cette droite d'ajustement lie de façon approximative les points qui présentent un débit spécifique de 20,6 l/s/km². Ainsi, les stations de l'Ivaí qui se trouvent au-dessus de la droite possèdent un débit spécifique plus fort que 20,6 l/s/km², tandis que les stations qui sont au-dessous de la droite présentent des débits spécifiques plus faibles que cette valeur.

L'analyse du graphique permet d'observer que les stations de São Pedro, Rio dos Patos et Tereza Cristina, localisées dans la partie supérieure du bassin versant, sont placées au-dessous de la droite d'ajustement, ce qui indique que les contributions par surface dans cette région ne sont légèrement moindres. Il est probable que la position de la station de São Pedro n'est pas très correcte, car la série hydrologique de cette station est un peu courte, ce qui peut distordre un peu les résultats. A partir de la station de Porto Espanhol, le débit spécifique augmente, les points étant placés au-dessus de la droite d'ajustement. Ceci peut être lié à la relative imperméabilité des terrains basaltiques qui transfèrent rapidement aux cours d'eau l'eau issue des précipitations. Aux trois dernières stations, on voit que Porto Paraíso do Norte et Novo Porto Taquara sont bien au-dessous de la droite, tandis que Tapira Jusante est placé au-dessus. Comme la série de données hydrologiques de Tapira Jusante est très courte, on va admettre que Tapira Jusante ne devrait pas présenter un débit spécifique très différent des stations de Porto Paraíso do Norte et Novo Porto Taquara, ou qu'elle devrait être placée aussi au-dessous de la droite. Cette réduction des débits spécifiques dans la partie plus aval du bassin versant peut être liée à la présence du grès, qui en raison de son importante perméabilité, stocke l'eau des précipitations et la transmet plus lentement aux cours d'eau.

Le rapport entre les débits de crue et la surface drainée (Figure 71) n'est pas très direct comme il a été observé pour les débits moyens. On voit qu'entre les stations de Rio dos Patos et Porto Bananeiras, le débit de crue augmente de façon presque linéaire. Si on fait l'ajustement de ces points, la droite d'ajustement lie les points qui ont un débit spécifique compris entre 110 l/s/km² et 160 l/s/km².

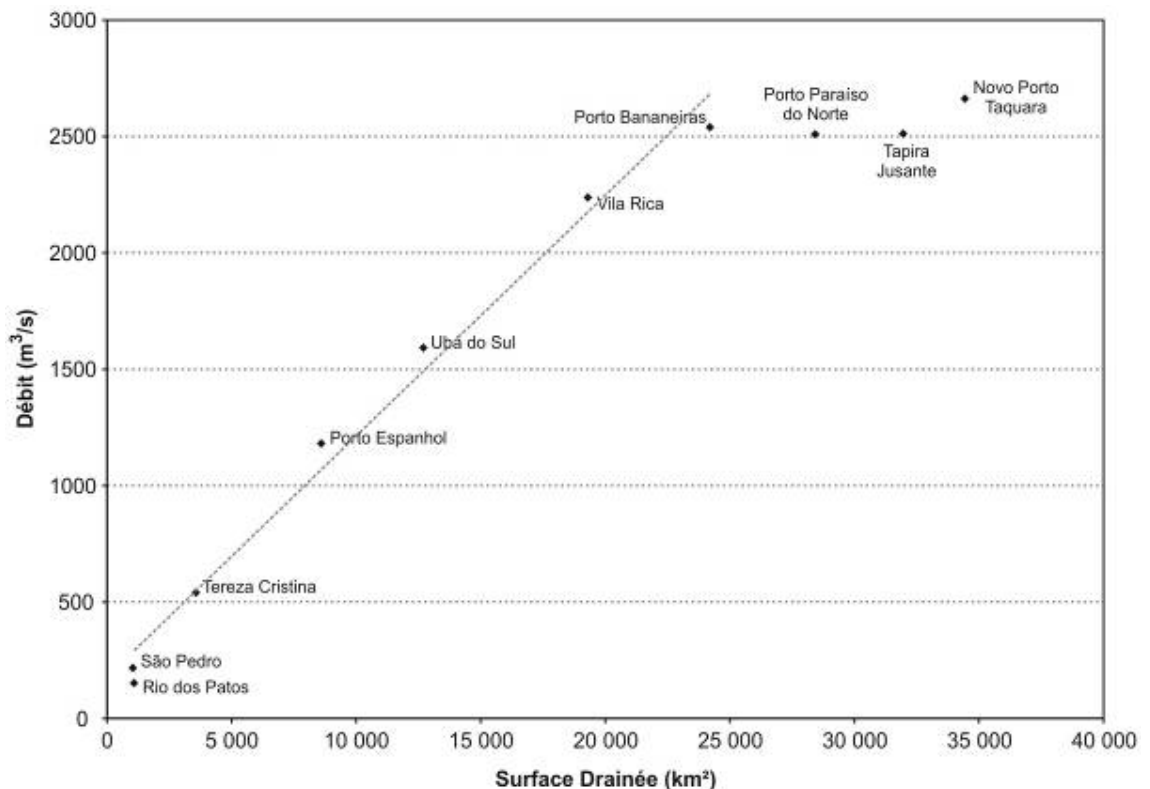


Figure 71. Rapport entre les débits de crue (DC_{10}) et la surface drainée pour les stations de la Dos Patos et de l'Ivaí. La droite d'ajustement s'applique seulement aux stations situées entre Rio dos Patos et Porto Bananeiras.

A partir de la station de Porto Bananeiras, on note que les débits spécifiques de crue n'augmentent pas de façon proportionnelle à la surface drainée. Ce changement de comportement est probablement moins lié au stockage d'eau dans le grès (cf supra à propos des étiages), qu'à une probable perte d'eau de crue au profit de la plaine alluviale en arrière des levées. Cette hypothèse a déjà été avancée plus haut à propos des débits de pleins bords.

Comme pour les pour débits de crue, le rapport entre les débits d'étiage et la surface drainée n'est pas très constant (Figure 72). On voit que, entre les stations Rio dos Patos et Vila Rica, l'augmentation des débits se produit de façon relativement linéaire. Si on fait l'ajustement de ces points, la droite d'ajustement lie les points de débit spécifique compris entre 25 l/s/km² et 33 l/s/km².

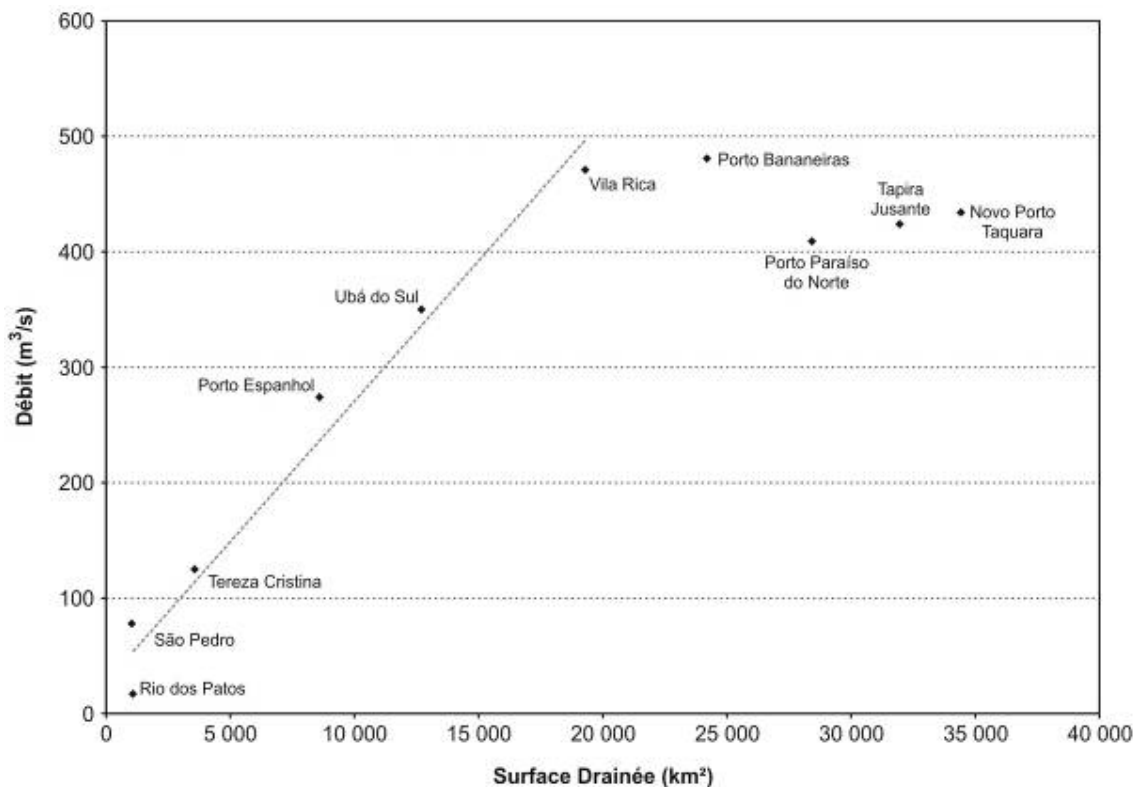


Figure 72. Rapport entre les débits d'étiage et la surface drainée aux stations de mesure de la Dos Patos et de l'Ivaí. La droite d'ajustement s'applique seulement aux stations situées entre Rio dos Patos et Vila Rica.

A partir de la station de Vila Rica, les débits d'étiage varient beaucoup et d'une façon non linéaire. On voit que le débit spécifique d'étiage de Porto Bananeiras est à peine plus fort que ce qu'on trouve à Vila Rica. Dans la station de Porto Paraíso do Norte, on observe une réduction du débit d'étiage, malgré l'augmentation de la surface. Aux stations de Tapira Jusante et Novo Porto Taquara, on observe une petite augmentation par rapport à Porto Paraíso do Norte, mais les débits spécifiques sont aussi très faibles quand on les compare avec ceux du haut bassin versant, malgré la contribution des grès au soutien des étiages. Il est possible que les échanges avec la nappe alluviale, bien développée, et les consommations d'eau par évapotranspiration en soient responsables.

En synthèse, on voit que les débits moyens présentent un bon rapport avec la surface drainée, tandis que pour les débits de crue et d'étiage ce rapport est bien exprimé jusqu'aux

stations de Vila Rica et Porto Bananeiras. A partir de ces sections, le comportement des débits change, peut-être en raison d'interactions avec le comportement de l'eau dans la plaine alluviale.

Compte tenu du fait que les débits sont un des plus importants facteurs qui contrôlent la taille et la morphologie des chenaux fluviaux, l'étude de la dynamique hydrologique de l'Ivaí sera un pas très important dans la construction d'une méthode de sectorisation fluviale. Il est probable que les changements de comportement hydrologique observés au long de l'Ivaí correspondent à des changements de sa morphologie et de la dynamique de l'Ivaí, et pour cette raison ces informations seront reprises plus tard pour l'élaboration de la sectorisation finale.

3.2. Formes fluviales, flux de sédiments et processus géomorphologiques

La morphologie du chenal fluvial est directement contrôlée par les flux liquides et par la charge sédimentaire (LEOPOLD *et al.*, 1995). Le fait de comprendre le fonctionnement sédimentaire d'un cours d'eau peut être très utile pour élucider certains aspects de la morphologie et de la dynamique des systèmes fluviaux. Dans le cas du bassin versant de l'Ivaí, l'indisponibilité de données de charge sédimentaire nous a poussé à trouver des alternatives. Ainsi, on a opté en faveur de l'étude de la dynamique sédimentaire via les sédiments déposés sur les berges, de façon à comprendre comment les processus évoluent de l'amont vers l'aval.

Comme il a été vu dans la première partie de ce travail, le transport de la charge sédimentaire dans un milieu fluvial se réalise selon trois mécanismes distincts : par roulement ou traction, par suspension graduée et par suspension uniforme. La partie la plus grossière de la charge sédimentaire est transportée uniquement sur le fond du lit, soit par roulement (si les grains sont arrondis), soit par traction (si les grains sont plus aplatis), et elle ne remonte pas en suspension, sauf en situation de très forte turbulence. Le frottement du courant sur le fond crée une turbulence, ce qui permet la mise en suspension d'une partie de la charge sédimentaire. Les grains les plus grossiers restent en suspension à proximité du fond, tandis que les grains les plus fins sont soulevés plus haut dans la colonne d'eau. Ainsi, un gradient granulométrique se forme dans la partie inférieure de la masse d'eau ; pour cette raison, ce mode de transport s'appelle la suspension graduée. Au-dessus de la couche de suspension graduée, la partie la plus fine de la charge sédimentaire est transportée par le mécanisme de la suspension uniforme, où la concentration des sédiments et la taille maximale de grain sont indépendantes de la hauteur dans la colonne d'eau. Cette couche est aussi moins soumise à la turbulence du fond, de sorte que le flux tend à être plus laminaire (PASSEGA, 1963).

En observant l'étroite liaison qui existe entre la texture des sédiments et les mécanismes de transport et dépôt, Passega (1957, 1963, 1964, 1969) a proposé le diagramme CM, un outil d'analyse de la texture des sédiments qui a pour but d'établir les rapports entre les caractéristiques granulométriques des sédiments et les processus de dépôt (PASSEGA, 1957).

Le diagramme CM est un graphique de type nuage de points, à axes gradués de façon logarithmique et il met en rapport les valeurs C et M extraites de la courbe cumulée

de distribution des tailles de particules. La valeur M correspond au diamètre médian des particules de l'échantillon (aussi appelé d_{50}), ou encore le diamètre pour lequel 50 % de l'échantillon sont plus fins et 50% et plus grossiers. La valeur C correspond au premier percentile de l'échantillon ou le diamètre des particules qui n'est dépassé que par 1% de l'échantillon (PASSEGA, 1957, 1963). Pour chaque échantillon, le croisement des paramètres C et M donne un point sur le diagramme logarithmique. Du côté droit du diagramme, une droite lie les points où $C=M$. Cette droite est la droite du tri parfait.

D'après l'étude de plusieurs dépôts de chenaux fluviaux, Passega (1963) a proposé un diagramme-clé, dont on peut déduire les mécanismes de transport de la position des échantillons sur le diagramme CM (Figure 73).

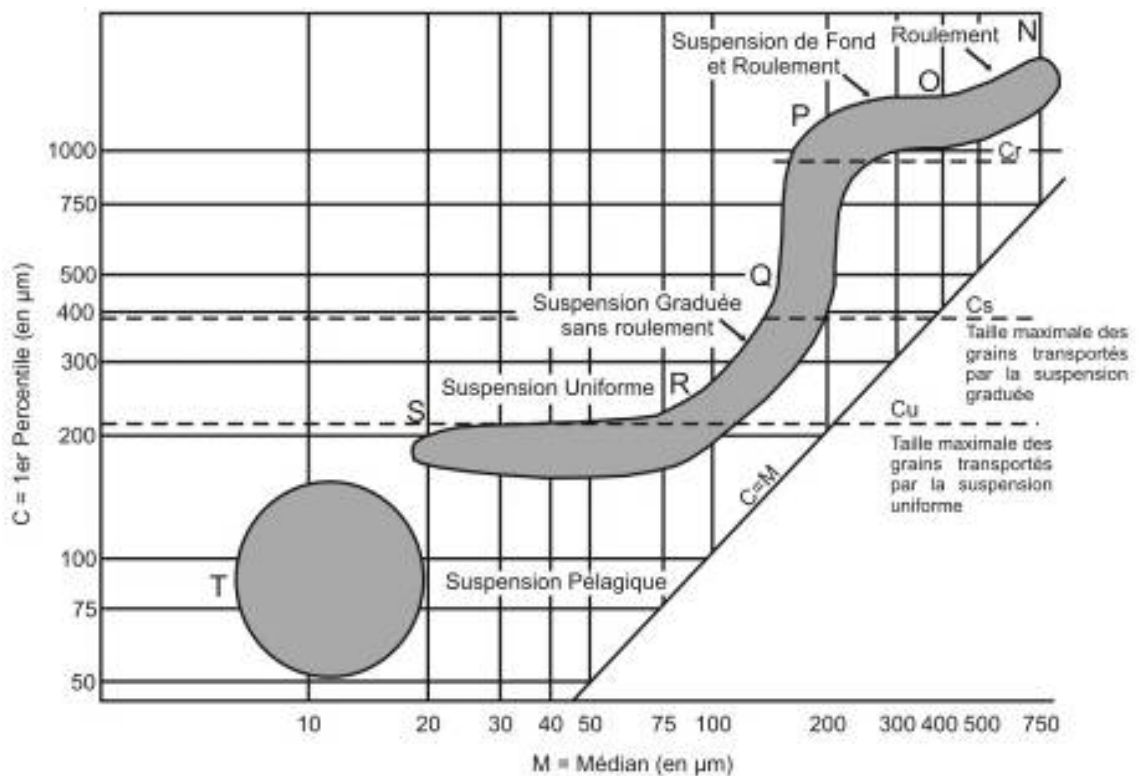


Figure 73. Diagramme-clé de l'Image CM, à partir duquel on peut déduire les mécanismes de transport actifs.

Au long de l'Ivaí, 14 sections ont été visitées (Figure 74). Sur 9 de ces sections, des profils topographiques ont été levés et des échantillons de sédiments ont été prélevés. A partir des résultats des analyses granulométriques, l'image CM de ces dépôts a été élaborée (Figure 75, annexe 2).

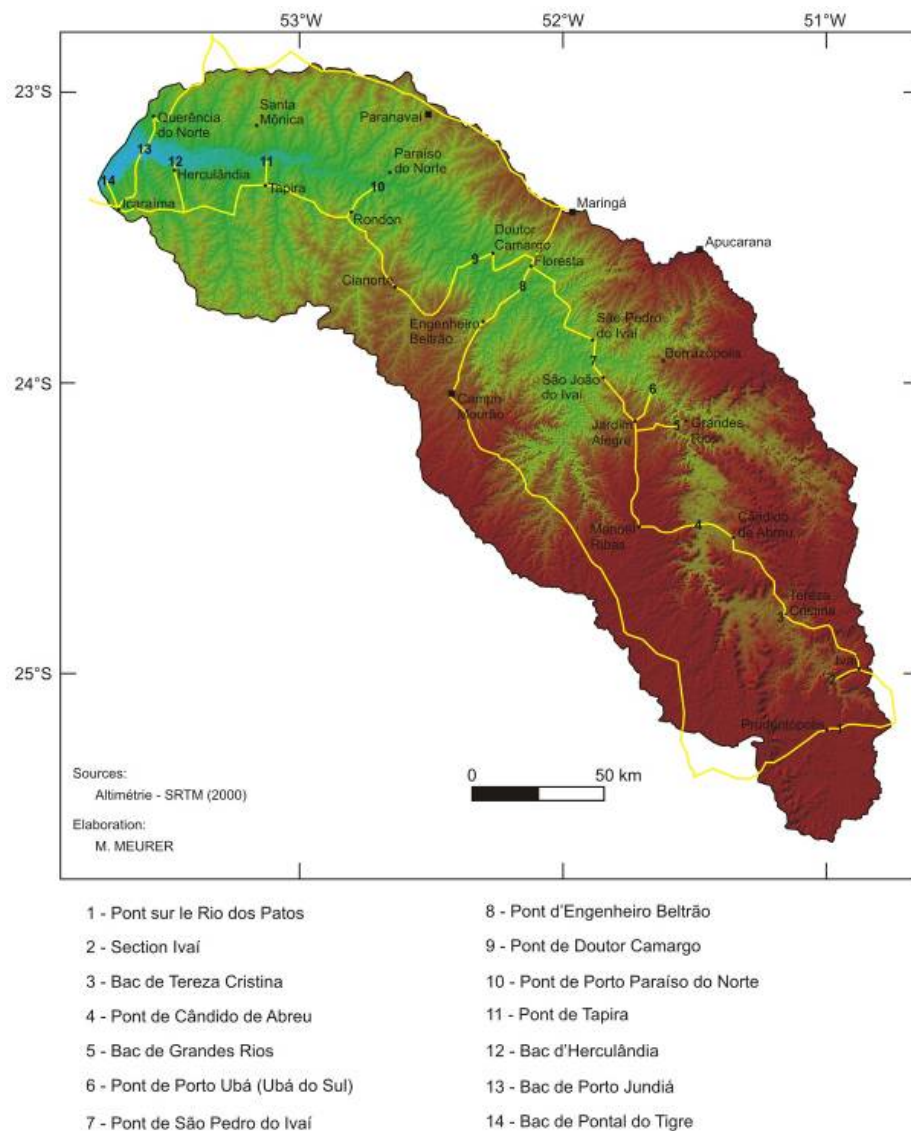


Figure 74. Trajet parcouru dans le bassin versant de l'Ivaí et sections visitées.

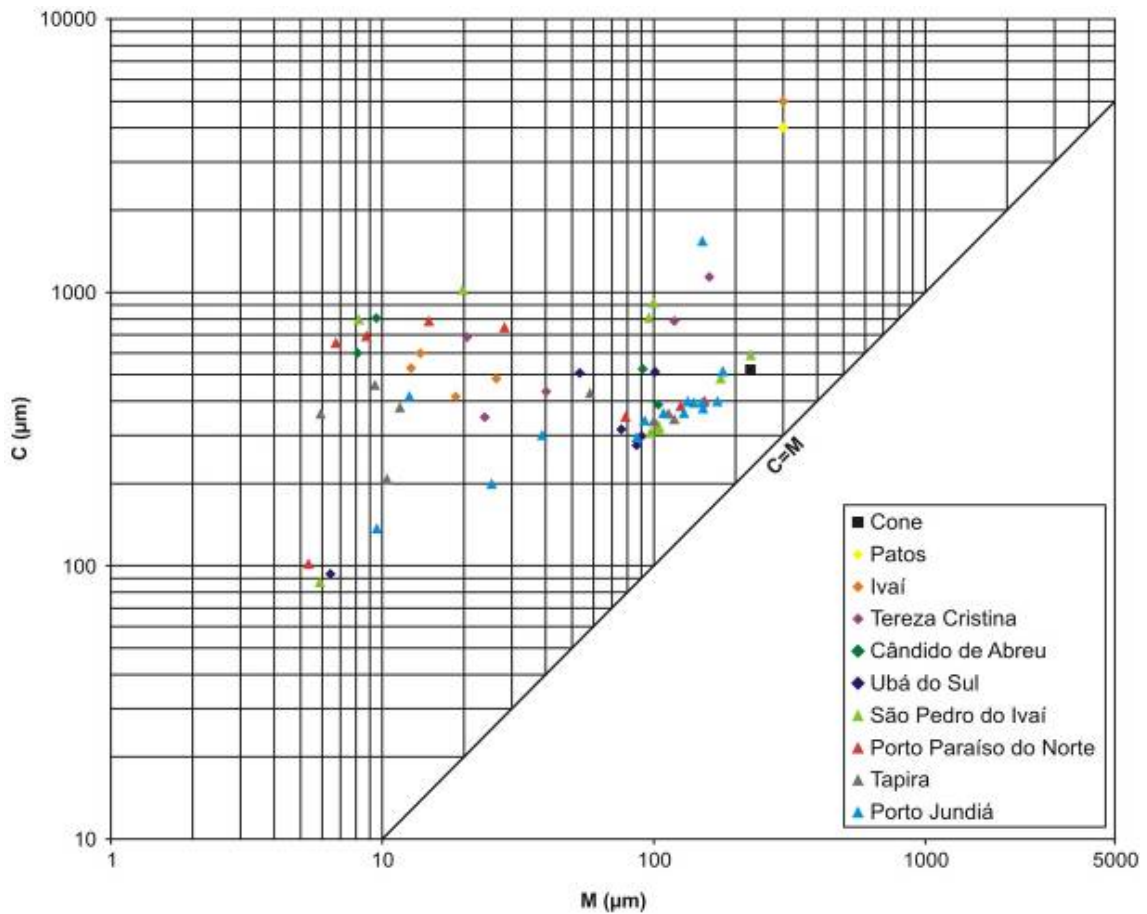


Figure 75. Image CM complète des échantillons prélevés dans le bassin versant de l'Ivaí.

La section du pont de Rio dos Patos est le premier endroit de prélèvement de sédiments. Dans cette section, la Dos Patos présente un fond à gros blocs rocheux et les sédiments prélevés correspondent aux matériaux qui circulent au fond du lit, sur ces blocs.

Sur l'image CM des sédiments prélevés, on voit que la médiane est de 299 μm (sable moyen), mais la valeur de C est de 4 000 μm (cailloux). Ceci montre que dans cette section, la rivière Dos Patos présente une très forte turbulence et est capable de transporter par roulement des cailloux au fond du lit.

Sur la commune d'Ivaí, un profil a fait l'objet de prélèvements sur la rive droite de l'Ivaí (Figure 76). Un niveau topographique localisé environ 3 mètres plus haut que le niveau des eaux moyennes s'étend sur une distance d'une vingtaine de mètres. Une coupe verticale a permis d'identifier partiellement l'existence d'une nappe caillouteuse horizontale à la base de cette surface. Dans la partie plus la plus éloignée du chenal, le profil se termine dans

forme creux, probablement un paléo-chenal. Au long de ce profil, 6 échantillons ont été prélevés.

A partir de l'image de synthèse, on voit que l'échantillon I1 est placé dans les dépôts de type suspension graduée, tandis que l'échantillon I2 présente les caractéristiques de sédiments de fond transportés par roulement. Les échantillons I3, I4, I5, et I6 se trouvent au milieu d'un nuage de points du côté gauche du diagramme, ce qui indique que ces échantillons possèdent une proportion importante de matériaux fins. Par contre, les quatre échantillons présentent une valeur de C au-dessus de 400 μm (sable moyen), ce qui correspond à la limite supérieure de la suspension graduée sans roulement. Ces échantillons correspondent ainsi à des dépôts issus de la suspension graduée, avec quelques grains roulés et un fort enrichissement en particules fines qui est dû à la décantation pendant la décrue et à la réduction de la vitesse du courant provoqué par la végétation des berges.

L'image CM de la section Ivaí (Figure 76) montre que l'échantillon I6, pris dans un probable paléo-chenal, présente une valeur de C proche de 415 μm (sable moyen) et une valeur de la médiane de 19 μm (limon moyen). D'après ces résultats, on peut dire que ces sédiments représentent la combinaison d'une suspension graduée sans roulement avec des sédiments issus de la décantation. Il est probable que pendant les grandes crues ce paléo-chenal est réactivé et que le flux d'eau apporte les sédiments les plus grossiers. Au moment de la décrue, le flux d'eau cesse dans ce chenal et l'eau qui y stagne dépose sa charge par décantation, ce qui peut expliquer la médiane très basse de l'échantillon I6.

Sur le niveau topographique où ont été pris les échantillons I3, I4 et I5, on observe que l'échantillon I4 présente une médiane de 26 μm (limon moyen), un peu plus élevée que celle des échantillons I3 et I5. Ceci montre que l'échantillon I4 possède moins de matériaux fins, probablement en raison de sa position à mi-chemin entre le chenal de l'Ivaí et le paléo-chenal. Les échantillons I3 et I5, le premier proche du chenal et le deuxième proche du paléo-chenal, sont très semblables entre eux. Il est probable que tous les deux représentent des dépôts de suspension graduée mal triés ou enrichis par les sédiments fins pendant la décrue.

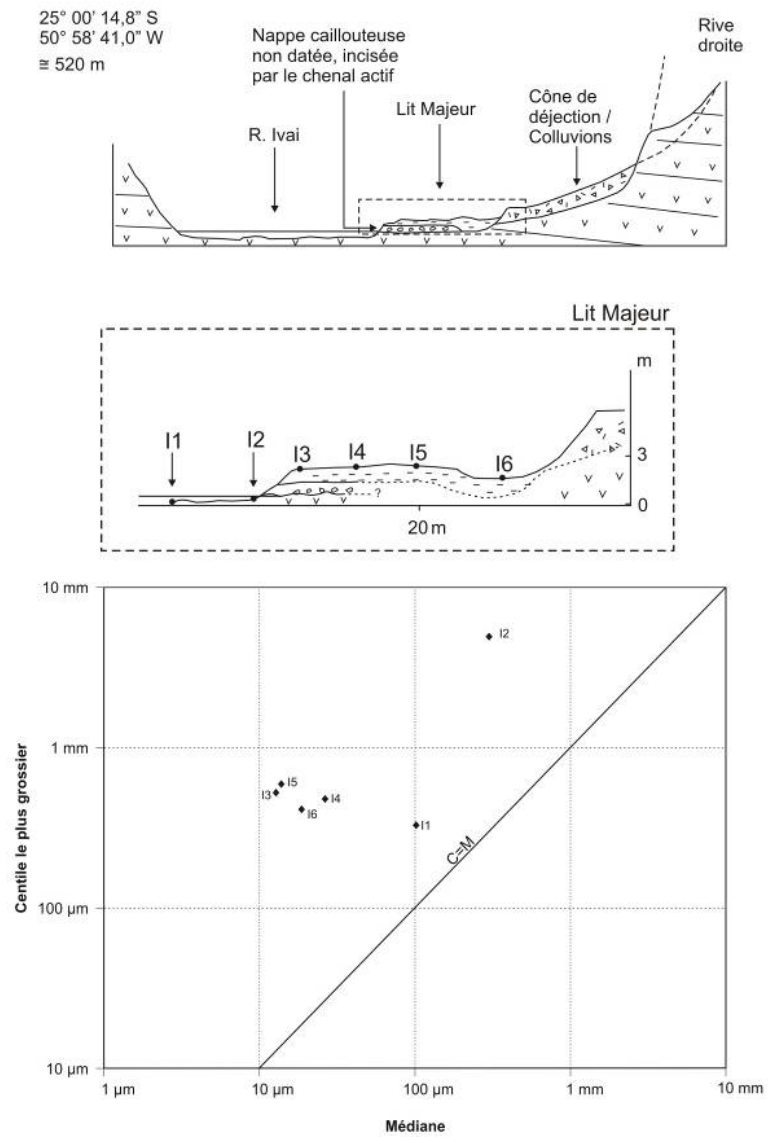


Figure 76. Profils de terrain et image CM de la section en travers du village d'Ivai.

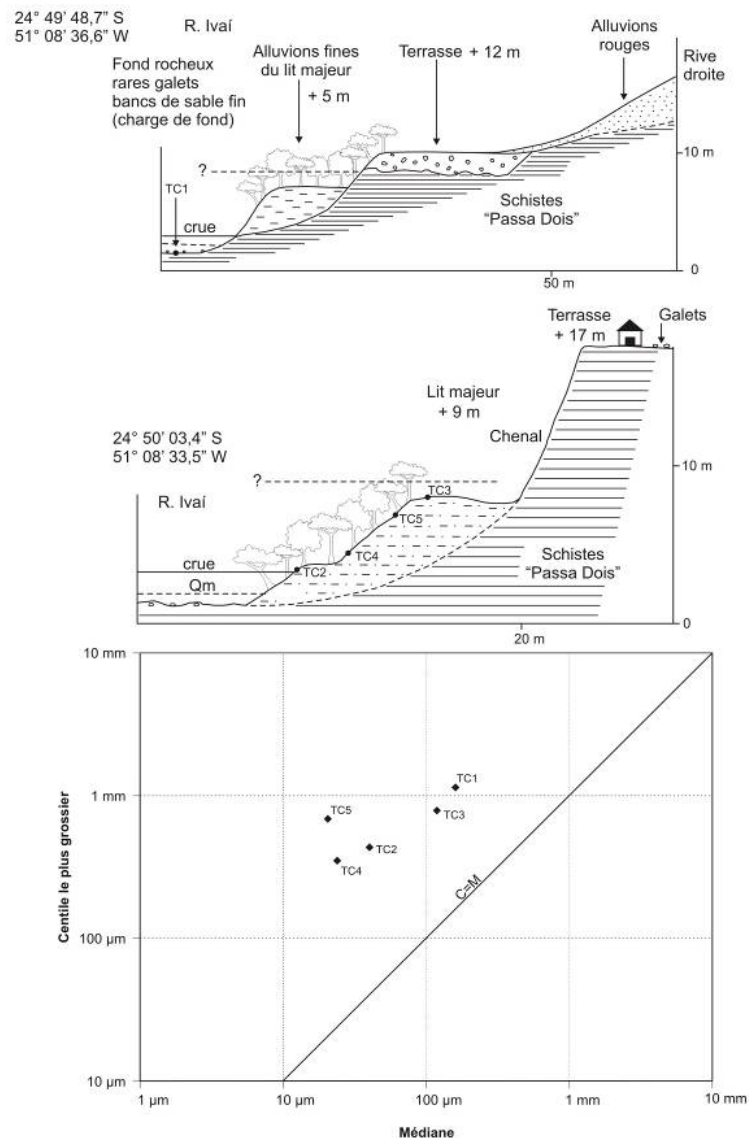


Figure 77. Profils de terrain et image CM de la section en travers de Tereza Cristina.

A Tereza Cristina, le profil qui a fait l'objet de prélèvements sur la rive droite de l'Ivaí, dans une section qui est celle de la station de mesures hydrométriques, montre l'existence de deux niveaux topographiques distincts (Figure 77). Le premier niveau se trouve à 5 mètres au-dessus des eaux moyennes et il est directement posé sur les schistes de la Formation Passa Dois. Le deuxième niveau, formé par une couche de cailloux posée aussi directement sur les schistes, se trouve à environ 12 mètres au-dessus du niveau des eaux moyennes. Le contact entre cette surface et les versants est recouvert par une couche d'alluvions rougeâtres. En raison de l'interférence anthropique sur la section de la station hydrométrique, seule la collecte d'échantillons de fond a été faite à cet endroit, tandis que les autres échantillons ont été collectés dans une autre section placée environ 200 mètres en amont.

Sur la deuxième section échantillonnée, on observe l'existence de trois niveaux topographiques. Les deux premiers niveaux se trouvent respectivement environ à 4 mètres et à 9 mètres au-dessus du niveau des eaux moyennes. Le troisième niveau, environ 17 mètres au-dessus du niveau des eaux moyennes, porte quelques maisons qui appartiennent

aussi au village de Tereza Cristina. Sur cette surface, on retrouve quelques galets roulés. Dans cette section, 4 échantillons ont été prélevés au long d'un profil.

A partir des images CM de tous les échantillons de la section, on voit que l'échantillon TC1 se trouve à la transition entre les sédiments transportés par suspension graduée et roulement et les sédiments transportés au fond seulement par roulement. L'échantillon TC3, prissur le deuxième niveau topographique, est proche du segment des sédiments transportés par suspension graduée avec des grains roulés. Un enrichissement en matériaux fins fait que cet échantillon est placé un peu plus à gauche dans le graphe. Les autres échantillons semblent être issus aussi de la suspension graduée, mais en raison de leur position du côté gauche du diagramme, on peut conclure qu'ils présentent un mauvais tri et que l'enrichissement en matériaux fins pendant la décrue est plus important. L'échantillon TC4 est placé très près du segment qui correspond à la suspension uniforme.

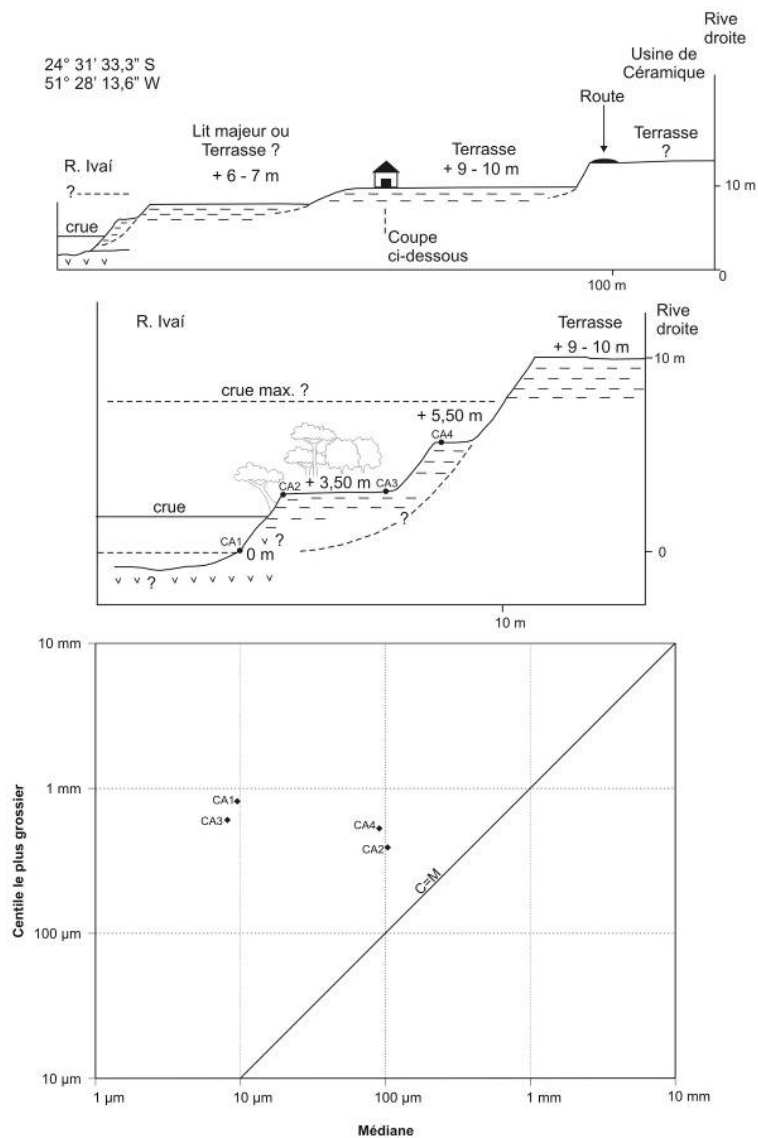


Figure 78. Profils de terrain et image CM de la section en travers de Cândido de Abreu.

Dans le secteur du pont qui relie les villes de Cândido de Abreu et Manoel Ribas, deux profils ont fait l'objet de prélèvements (Figure 78). Le premier profil est localisé sur la rive droite de l'Ivaí, en partant de la route en direction de l'Ivaí, en traversant par une ferme. Le deuxième profil est perpendiculaire au premier, en partant de l'Ivaí en direction de la maison de la ferme. Sur ce profil, 4 échantillons ont été collectés.

Sur les images CM, on observe que les échantillons CA2 et CA4 se trouvent dans le segment des sédiments issus de la suspension graduée, l'échantillon CA4 est caractérisé par une petite contribution des grains de sable transportés par roulement au fond du lit.

L'échantillon CA1, collecté dans le chenal de l'Ivaí, présente une médiane autour de 9 μm (limon fin), tandis que la valeur de C est autour de 806 μm (sable grossier). On peut en déduire que l'échantillon possède un pourcentage important de matériel fin, ce qui réduit la médiane. Par contre, la valeur de C montre que la rivière possède une compétence suffisante pour le transport de sable grossier. Il est probable que cet échantillon représente le mélange d'une fraction grossière issue du roulement des particules en crue et d'une importante fraction fine déposée à la décrue dans le lit mineur. L'échantillon CA3 présente une valeur de C importante, autour de 600 μm (sable grossier), mais la médiane est très basse, autour de 8 μm (limon très fin). Ceci montre que pendant la crue la turbulence est très forte, et elle fait monter les grains issus du roulement jusqu'à ce niveau topographique. Pendant la décrue, la réduction de la vitesse de flux mène à la décantation, ce qu'enrichit beaucoup le dépôt en matériel fin. On voit aussi que, malgré les fortes crues, la turbulence n'est pas assez puissante pour faire remonter une même quantité de la charge de fond jusqu'au niveau le plus élevé, où a été collecté l'échantillon CA4.

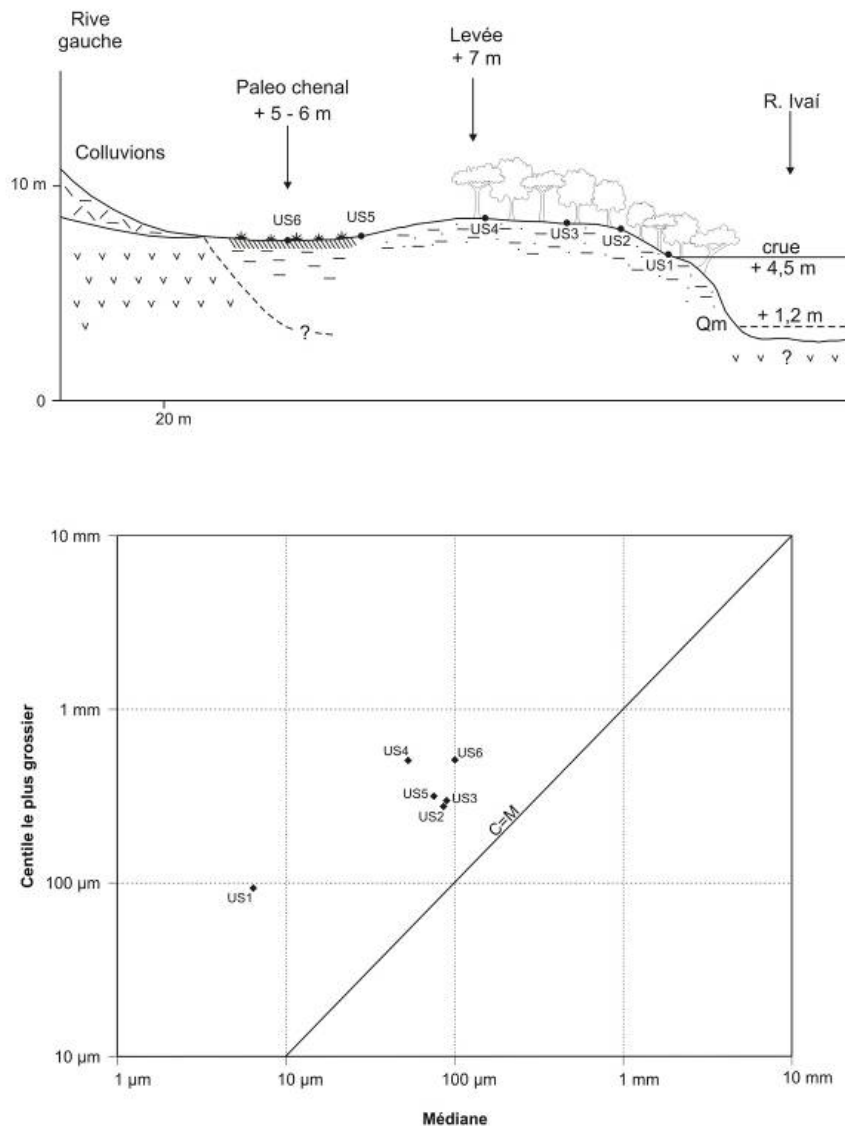


Figure 79. Profils de terrain et image CM de la section en travers d'Ubá do Sul.

Dans le secteur d'Ubá do Sul, un profil a fait l'objet de prélèvements sur la rive gauche de l'Ivaí (Figure 79). Ce profil commence au bord de la rivière, remonte la levée naturelle et se termine dans une partie plus basse, probablement un paléo-chenal. Au long de ce profil, six échantillons ont été collectés.

A partir des images CM on peut voir que, sauf pour l'échantillon US1, tous les échantillons se trouvent dans la partie du diagramme qui correspond à la suspension graduée. L'échantillon US6 a été pris dans une dépression qui correspond à un probable paléo-chenal. La position de l'échantillon sur l'image CM correspond aux sédiments issus de la suspension graduée, mais avec une petite contribution des grains issus du transport par roulement. D'après ces résultats, on peut estimer que ce paléo-chenal est réactivé pendant les grandes crues. La forte turbulence fait s'y déposer le sable grossier, suivi par les matériaux issus de la suspension graduée. A la décrue, la réduction de la vitesse du flux fait que la charge issue de la suspension uniforme s'y dépose, ce qui apporte des matériaux fins au dépôt.

L'échantillon US4, collecté sur la levée naturelle, présente une valeur de C de 507 μm (sable grossier), valeur semblable à celle observée pour l'échantillon US6, mais la médiane de l'échantillon US4 est de seulement 53 μm (limon grossier). On voit que la turbulence des crues arrive à faire remonter par roulement le matériel grossier de fond jusqu'au sommet de la levée naturelle. Comme dans le paléo-chenal, la décrue apporte aussi des matériaux fins, mais sur les secteurs de berges les plus proches de l'Ivaí l'enrichissement des dépôts en matériaux fins est plus important que dans le chenal réactivé.

Les échantillons US2, US3 et US5 représentent des dépôts typiquement issus de la suspension graduée pris sur les berges proches de l'Ivaí et dans le paléo-chenal, avec du sable moyen et fin mélangé à des matériaux fins.

L'échantillon US1 est particulièrement intéressant car il correspond à une laisse de crue prise au bord de la rivière peu après la descente des eaux. Les résultats de l'analyse granulométrique montrent que cet échantillon présente une médiane d'environ 6,5 μm (limon très fin), et la valeur de C est de 93 μm (sable très fin). Sur la base de ces résultats, on peut conclure que le matériel laissé par l'Ivaí pendant la descente des crues est très fin, issu de la suspension uniforme. Il est remarquable qu'il se dépose dans le chenal même.

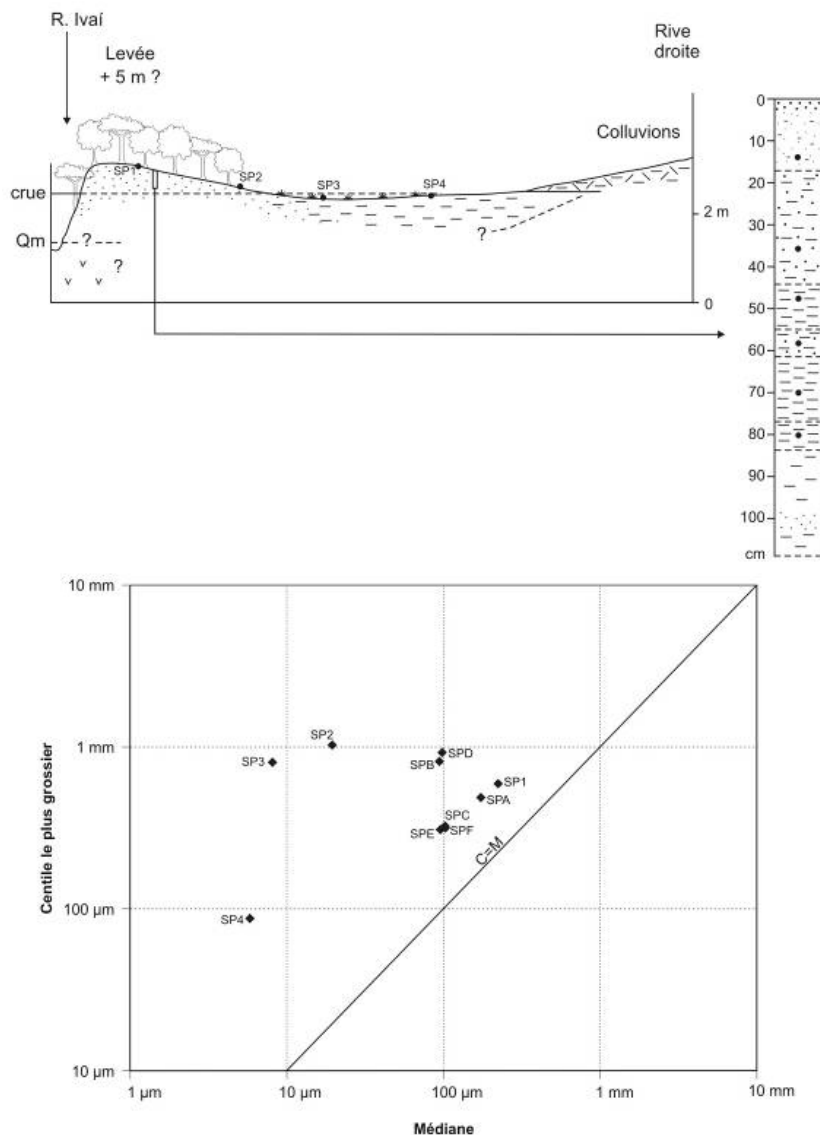


Figure 80. Profils de terrain et image CM de la section en travers de São Pedro.

Dans le secteur du pont reliant les villes de São João do Ivaí et São Pedro do Ivaí, un profil a été prélevé sur la rive droite (Figure 80). Le profil commence sur le bord du chenal, traverse la levée naturelle et arrive sur une partie plus basse juste derrière la levée. Sur ce profil, 6 échantillons ont été pris verticalement, et 4 échantillons ont été pris horizontalement.

Sur l'image CM, on peut voir que les échantillons SP1, SPA, SPC, SPE et SPF sont disposés dans le segment des sédiments issus de la suspension graduée provoquée par la turbulence des crues. La proximité avec la droite $C=M$ montre que ces échantillons sont bien triés. Les échantillons SPC, SPE et SPF, dans la partie inférieure de cet ensemble de points, sont à la transition entre la suspension graduée et la suspension uniforme.

Les échantillons SPD et SPB, ainsi que les échantillons SP2 et SP3 sont le résultat de la combinaison de deux processus : pour le premier, il s'agit d'une suspension graduée grossière avec quelques grains roulés, et pour le deuxième d'une décantation à la décrue, quand il n'y a plus de turbulence. La synthèse des résultats des échantillons pris sur la levée montre que la combinaison de la suspension graduée avec la décantation postérieure

a lieu sur toute l'étendue de la levée, avec une augmentation progressive des quantités de matériaux fins au fur et à mesure qu'on s'éloigne du chenal. L'échantillon SP3 a été pris dans la partie la plus basse, à la base de la levée naturelle, et la médiane très basse montre que la participation des matériaux fins devient plus importante, du fait d'une forte décantation en décrue.

L'échantillon SP4 possède une médiane de 6 μm (limon très fin) et une valeur de C de 87 μm (sable très fin). D'après ces résultats, on peut dire que cet échantillon représente un dépôt pur de décantation des sédiments issus de la suspension uniforme.

D'après l'ensemble des résultats, on observe une intercalation de couches plus sableuses avec des couches de matériaux plus fins. Ces couches plus sableuses ont été déposées probablement pendant le maximum des épisodes de crues, quand la forte turbulence arrive à faire remonter les matériaux les plus grossiers, tandis que les couches plus fines ont été déposées pendant la descente des eaux, lorsque la turbulence se réduit (ou cesse) et l'Ivaí subit une réduction de sa compétence, en déposant seulement les sédiments issus de la suspension uniforme.

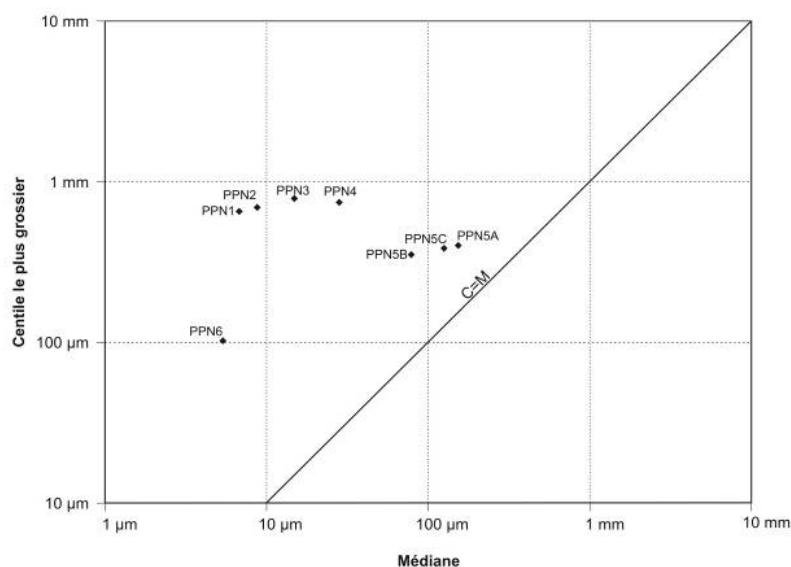
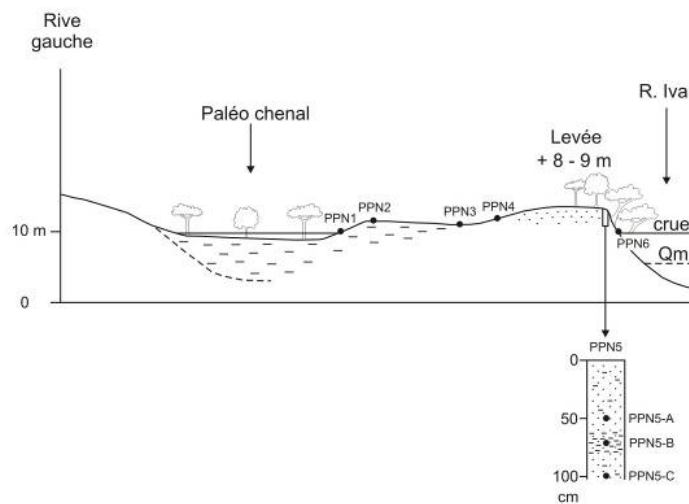


Figure 81. Profils de terrain et image CM de la section en travers de Porto Paraíso do Norte.

Dans la section de Porto Paraíso do Norte un profil a été prélevé sur la rive gauche (Figure 81) et, sur ce profil, 5 échantillons ont été collectés. Sur la levée naturelle, une coupe verticale a été faite, et 3 échantillons ont été pris à différentes profondeurs.

D'après l'image CM, on peut observer que les sédiments collectés sur cette section sont distribués en trois groupes, en fonction de leurs caractéristiques et des processus de dépôt. Les échantillons PPN5A, PPN5B et PPN5C se trouvent dans le segment des sédiments transportés en suspension graduée. La médiane basse montre que l'échantillon PPN5B se trouve à la transition entre la suspension graduée et la suspension uniforme. Il est probable que cette couche représente la fin d'un événement de crue, quand les eaux commencent à reculer, en laissant sur la levée les matériaux fins originellement en suspension.

Les échantillons PPN1, PPN2, PPN3 et PPN4 forment un ensemble de points dont la valeur de C est toujours au-dessus de 650 μm (sable grossier), mais avec une médiane qui se réduit progressivement au fur et à mesure qu'on s'éloigne du chenal de l'Ivaí. On peut conclure que ces sédiments représentent des sédiments transportés par suspension graduée avec des grains grossiers roulés, enrichis en matériaux fins au moment de la décrue. Le gradient granulométrique qui existe entre les échantillons PPN4 et PPN1 est le résultat du blocage des sédiments les plus grossiers, dû au frottement des eaux dans l'herbe qui recouvre la levée.

L'échantillon PPN6, qui apparaît dans la partie inférieure gauche de l'image CM, correspond à une laisse de crue prise au bord de l'Ivaí peu après la descente des eaux. La médiane est d'environ 5 μm (limon très fin) et la valeur de C est d'environ 102 μm (sable très fin). Comme dans les autres sections, l'Ivaí dépose une partie de la charge en suspension sur les berges pendant la phase de décrue, ce qui explique les caractéristiques observées dans cet échantillon.

De l'ensemble des résultats, on peut conclure que la levée naturelle est formée majoritairement par des couches sableuses issues de suspension graduée, intercalées avec de couches de matériel plus fin décanté à la fin des crues. Dans la partie de la levée naturelle qui fait face au chenal, la forte turbulence amène par roulement des matériaux sableux plus grossiers mélangés avec les sédiments issus de la suspension graduée. Ces matériaux plus grossiers sont plus abondants juste après le sommet de la levée, et ils deviennent plus rares en direction de la base de la levée. Comme il a été observé dans les sections précédentes, à la fin des crues la décantation donne un enrichissement des dépôts de crue en matériaux fins.

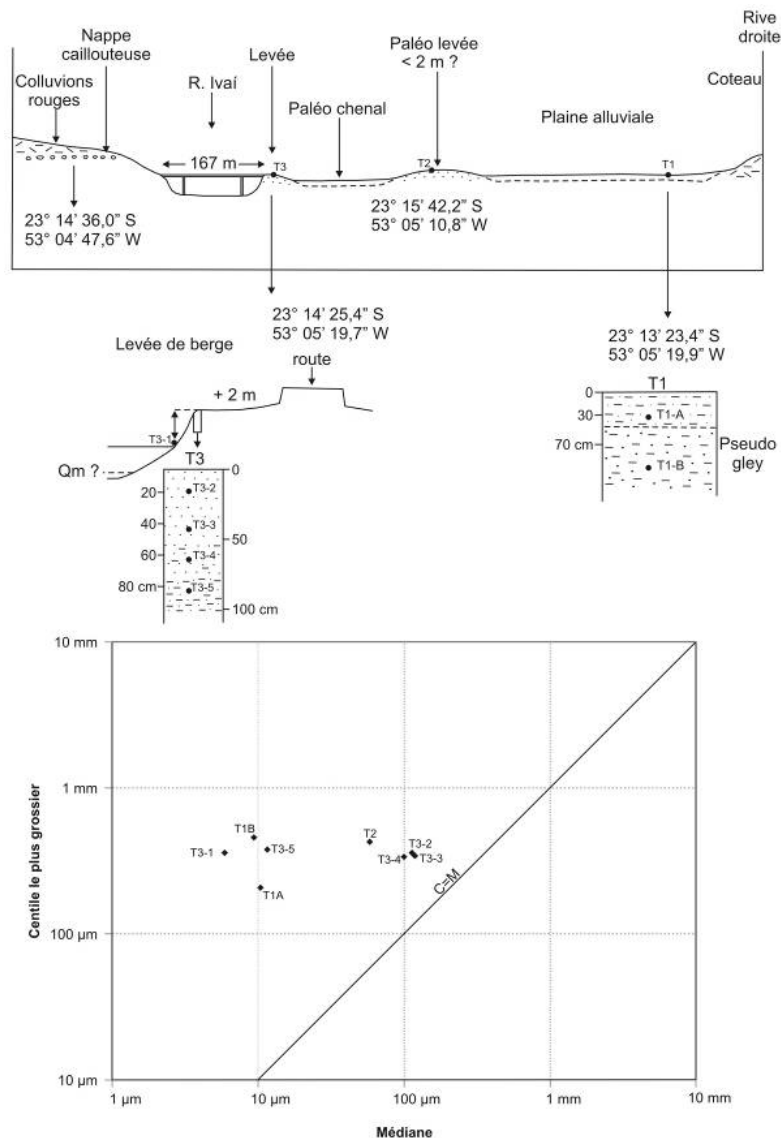


Figure 82. Profils de terrain et image CM de la section en travers de Tapira Jusante.

Dans la section de Tapira, on observe le développement d'une plaine alluviale sur la rive droite de l'Ivaí. Sur cette plaine, un long profil a fait l'objet de 8 prélèvements (Figure 82).

Sur l'image CM, on voit que les échantillons T3-2, T3-3 et T3-4 se trouvent dans le segment des sédiments issus de la suspension graduée, tandis que l'échantillon T1A se trouve dans le segment des sédiments issus de la suspension uniforme. Les autres échantillons, T1B, T3-1 et T3-5 se trouvent à la limite de la suspension uniforme, probablement avec une contribution des sédiments plus fins issus de la suspension graduée.

L'ensemble des échantillons T3-1, T3-2, T3-3, T3-4 et T3-5 montre que la levée naturelle est formée par des couches de sédiments sableux issus de la suspension graduée, avec un diamètre maximal des grains voisin de 400 μm (sable moyen) ; les sables sont mélangés avec des sédiments plus fins issus de la suspension uniforme, comme la laisse de crue T3-1 prise au bord de l'eau.

Sur la plaine alluviale, où ont été pris les échantillons T1A et T1B, les sédiments sont majoritairement très fins, avec un gradient des sables entre l'échantillon T1B et l'échantillon T1A. Il est probable que ces deux couches sont issues d'une suspension graduée, avec une réduction récente de la turbulence, ce qui a limité la présence des matériaux sableux dans la couche superficielle. On croit que, pendant l'Holocène, le chenal de l'Ivaí était placé plus près de cet endroit où les échantillons T1A et T1B ont été pris. Les flux turbulents des crues touchaient cette partie de la plaine, en laissant des matériaux fins mélangés avec du sable. Après la migration du chenal de l'Ivaí au profit de sa position actuelle, les flux turbulents des grandes crues n'ont plus touché cette partie de la plaine, et l'eau qu'y arrive possède la compétence pour transporter seulement les matériaux les plus fins, comme le limon et l'argile.

L'échantillon T2 a été prélevé sur une surface un peu plus élevée dans la plaine. Cet échantillon présente du matériel fin mélangé avec du sable. La forte valeur de C montre que le dépôt a été formé sous des conditions d'énergie plus hautes qu'actuellement. En raison de la morphologie du dépôt, de sa position dans la plaine et de ses caractéristiques granulométriques, semblables à celles retrouvées au bord du chenal, on peut estimer qu'il s'agit d'une ancienne levée naturelle de l'Ivaí.

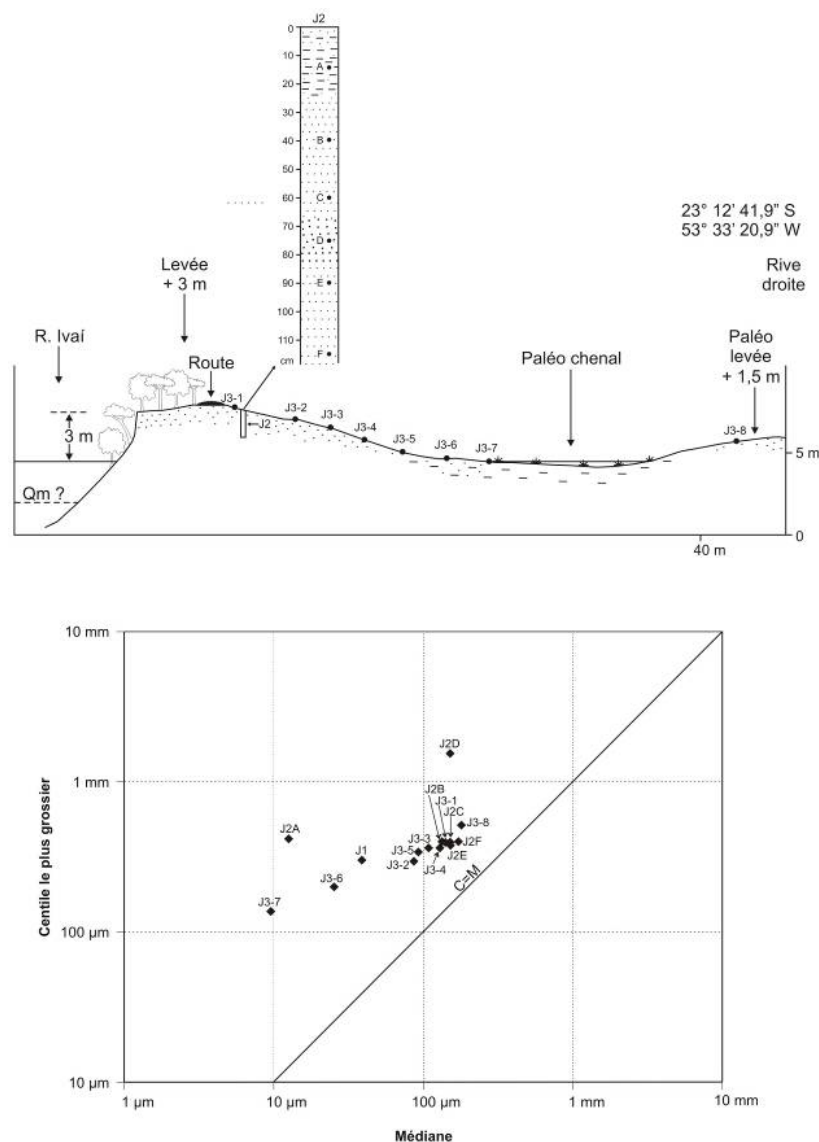


Figure 83. Profils de terrain et image CM de la section en travers de Porto Jundiá.

Dans la section du bac de Porto Jundiá, située environ 20 km en amont de la confluence de l'Ivaí et du Paraná, 15 échantillons ont été prélevés (Figure 83).

Sur l'image CM, on voit que la plupart des échantillons sont composés de sédiments issus de la suspension graduée, avec une contribution des grains grossiers ou fins.

Comme dans les cas précédents, la levée naturelle est formée principalement par des sédiments sableux issus de la suspension graduée, avec un diamètre de grain maximal autour de 400 μm (sable moyen). Une exception doit être faite pour la couche où a été prélevé l'échantillon J2-D, qui présente une valeur C de 1545 μm (sable très grossier) ; ce sont des sédiments issus du transport de fond par roulement. La partie superficielle de la levée est formée par des sédiments issus de suspension graduée et enrichis en matériaux fins par la décantation de fin de crue.

En surface, on observe que sur la partie de la levée opposée au chenal, prédominent les sédiments issus de la suspension graduée. On observe aussi l'existence d'un gradient granulométrique entre l'échantillon J3-1, au sommet de la levée, et l'échantillon J3-7, à la

base de la levée et au bord d'un paléo-chenal. Ce gradient est le résultat de la diminution de la compétence de l'Ivaí en raison de l'augmentation de la distance au chenal. La rivière arrive à transporter les matériaux fins très loin, mais n'arrive pas à faire de même avec les matériaux grossiers, qui sont piégés par la végétation.

L'échantillon J3-2 montre un enrichissement en matériaux fins semblable à ce qui a déjà été observé dans la couche superficielle de la levée. Les échantillons J3-6 et J3-7 sont fortement enrichis en matériaux fins issus de la suspension uniforme en raison de la décantation de l'eau des crues qui reste bloquée derrière la levée.

L'échantillon J3-8 a été prélevé dans un secteur plus élevé du terrain, qu'on a considéré comme en étant probablement une levée naturelle ancienne de l'Ivaí. Les résultats des analyses granulométriques montrent que cet échantillon présente une médiane de 180 μm (sable fin), avec une valeur de C à 515 μm (sable grossier). Le dépôt est riche en matériaux sableux transportés par suspension graduée, et la valeur de C montre qu'il y a des matériaux bien plus grossiers que dans les échantillons précédents, probablement issus du transport de fond par roulement. On peut dire que cette surface plus élevée est une ancienne levée naturelle de l'Ivaí.

Conclusion

La collecte et le traitement d'échantillons de sédiments ont permis une bonne compréhension du fonctionnement sédimentaire amont-aval de l'Ivaí (Figure 84). A partir des images CM, on observe que la suspension graduée est bien marquée sur le diagramme et qu'elle est présente tout au long de l'Ivaí. La disposition de l'ensemble de points de la suspension graduée sur le diagramme n'est pas aussi parallèle à la droite $C=M$ que dans le diagramme original de Passega (1963), mais elle est un peu décalée vers la gauche. D'après les analyses faites, on peut conclure que la cause en est un mauvais tri des dépôts, qui sont enrichis en matériaux fins pendant la phase de décrue.

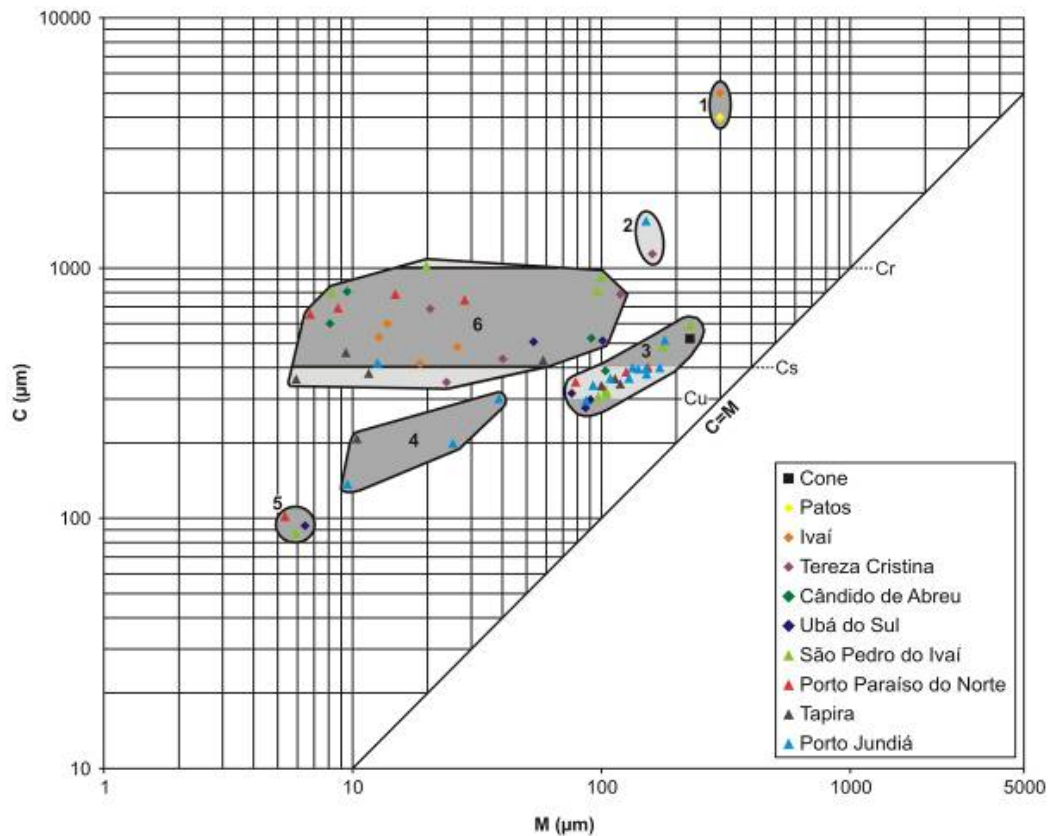
Selon Passega (1963), deux valeurs de C sont importantes : la valeur C_s , qui est le diamètre maximal des grains transportés en suspension graduée, et la valeur C_u , qui est le diamètre maximal des grains transportés en suspension uniforme. La valeur C_s donne un indice de la turbulence sur le fond du lit (et donne aussi un indice du degré d'énergie d'un dépôt), tandis que la valeur C_u donne un indice de la turbulence maximale de l'eau au-dessus de la zone d'influence directe du fond. Une autre valeur, nommée C_r , marque la limite inférieure du transport par roulement. En ce qui concerne l'Ivaí, les images CM et les interprétations faites pour chaque section montrent que la limite supérieure de la suspension graduée sans roulement (C_s) se trouve autour de 400 μm (sable moyen), et la limite supérieure de la suspension graduée avec des grains roulés (C_r) se trouve autour de 1 000 μm (sable très grossier).

D'après les analyses granulométriques, les sédiments d'un diamètre supérieur à 1 000 μm (sable très grossier) sont transportés par roulement au fond de la Dos Patos et de l'Ivaí. Dans le haut bassin de l'Ivaí, à l'occasion des grandes crues, le diamètre maximal transporté par roulement peut atteindre 5 cm (cailloux). La turbulence dans cette partie du bassin versant est très forte en raison des fortes pentes et des forts débits lors des saisons de pluies abondantes. Dans la partie aval du bassin, les crues augmentent la compétence de l'Ivaí, qui transporte des grains dont le diamètre maximal est d'à peu près 1 500 μm (sable très grossier).

Dans l'image CM des échantillons de l'Ivaí, on observe qu'une partie des échantillons dont la valeur de C est entre 300 μm et 1 000 μm sont placés à gauche, en formant un nuage de points. Cette position est le résultat de la réduction de la médiane en fonction du piégeage des matériaux les plus grossiers par la végétation ou d'un enrichissement postérieur en matériaux fins. L'analyse des sections visitées a montré que la végétation retient les fractions les plus grossières, et la quantité de matériaux fins augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du chenal. En d'autres cas, l'enrichissement en matériaux fins se passe pendant la phase de décrue.

En ce qui concerne la suspension uniforme, l'analyse des sédiments a montré que le diamètre de 300 μm (sable moyen) marque la limite maximale pour ce type de transport (Cu). Les échantillons T1A, J3-6 et J3-7 montrent que probablement la valeur de Cu peut être plus basse, autour de 200 μm (sable fin), dans la partie aval de l'Ivaí, à partir de la section de Tapira. Cette réduction est due à une diminution de la turbulence de l'eau en raison de la réduction de la pente dans ce tronçon. Dans la section de Porto Jundiá, l'Ivaí est soumise aussi à l'influence des crues du Paraná, qui bloquent la sortie des eaux de l'Ivaí.

Sur la partie inférieure de l'image CM, trois échantillons, regroupés, correspondent à des laisses de crue prises au bord de l'eau au moment de la descente des eaux. On voit que ces laisses de crue présentent une valeur de C voisine de 100 μm (sable très fin) et une médiane voisine de 6 μm (limon très fin). Ce matériel très fin issu de la suspension uniforme se dépose sur les berges en enrichissant les dépôts en matériaux fins. Au long du cours de l'Ivaí, les laisses de crues ont été trouvées à partir de la section d'Ubá do Sul. Ce type de dépôt ne peut pas être trouvé en amont d'Ubá do Sul en raison des fortes pentes, qui produisent plus de turbulence dans l'Ivaí, et qui l'empêche de décanter sa charge en suspension. Par contre, l'occurrence de ce processus au bord du chenal est une caractéristique très singulière de la partie basse de l'Ivaí, car ce type de dépôt est le plus souvent rencontré dans les méandres abandonnés.



- 1 - Sédiments issus du transport de fond par roulement classique
- 2 - Sédiments issus du transport de fond par roulement, enrichis en matériaux fins à la décrue
- 3 - Sédiments issus du transport par suspension graduée. La partie inférieure correspond à la suspension graduée fine; la partie supérieure représente la suspension graduée grossière avec des grains roulés.
- 4 - Sédiments issus du transport par suspension uniforme
- 5 - Sédiments issus du transport par suspension uniforme laissés sur les berges pendant la décrue
- 6 - Sédiments issus du transport par suspension graduée, parfois avec des grains roulés, enrichis en matériaux fins à la décrue

Figure 84. Image CM de synthèse pour les sédiments prélevés dans la Dos Patos et l'Ivaí.

L'élaboration des images CM a permis de mieux comprendre le fonctionnement sédimentaire du bassin de l'Ivaí. En synthèse :

- Le haut bassin versant, jusqu'à la section de Tereza Cristina, est caractérisé par une forte turbulence, qui donne à la rivière dos Patos et à l'Ivaí la compétence nécessaire pour le transport des fractions supérieures à 1 000 µm. Pendant les fortes crues, la turbulence est assez forte pour remobiliser des grains jusqu'à 5 000 µm. A la fin des crues, ces dépôts sont enrichis par les matériaux fins issus de la suspension uniforme, surtout dans les paléo-chenaux localisés derrière la levée naturelle, où la turbulence est réduite.
- A partir de Tereza Cristina, les cailloux ne sont plus présents dans les dépôts des berges, mais on retrouve encore des sédiments jusqu'à 1 000 µm, qui sont remontés par la turbulence des crues.

- A partir de la section d'Ubá do Sul, la turbulence en surface pendant la décrue n'est pas aussi forte, de sorte que l'Ivaí dépose sur les berges des laisses de crue très fines, boueuses, qui enrichissent les dépôts de crue en matériaux fins.
- A partir de la section de Tapira, l'Ivaí traverse une région à faible pente. Il est probable qu'à partir de cette section la compétence de la rivière se réduit de façon que le diamètre maximal transporté par la suspension uniforme tombe à environ 200 μm . Par contre, les fortes crues arrivent à faire remonter sur les berges des sédiments d'un diamètre de 1 500 μm .

3.3. Conclusion de la Troisième Partie

L'élaboration d'une étude sur le régime hydrologique et sur les dépôts sédimentaires du bassin versant de l'Ivaí a été une étape très importante pour la compréhension du fonctionnement global du système hydrographique. Pratiquement tous les résultats présentés au long de ce chapitre nous ont aidé à renforcer l'idée initiale selon laquelle le bassin versant de l'Ivaí n'est pas un bassin versant homogène.

Presque toutes les variables analysées permettent une forme de subdivision du bassin versant. Les limites entre ces changements de comportement varient en fonction du critère retenu, mais fréquemment des limites se superposent au même endroit. C'est le cas de la section d'Ubá do Sul, dans la moyenne vallée de l'Ivaí. La section d'Ubá do Sul a déjà été identifiée par Baldo (2006) comme une zone de transition climatique. D'après la caractérisation hydrologique ici présentée, on voit que fréquemment cette section représente aussi une zone de transition entre différentes dynamiques hydrologiques. Outre Ubá do Sul, la section de Porto Paraíso do Norte marque aussi une limite pour des changements de comportement hydrologique, probablement en raison du contact entre le basalte et le grès, qui se fait dans cette région.

L'étude de la distribution du régime des débits moyens a confirmé l'observation faite par Destefani (2005) selon laquelle l'Ivaí présente un régime complexe, car il n'a pas été possible d'identifier une période de crue et une période d'étiage bien marqué. Selon la typologie des régimes établie par Pardé (1933), présenté au début de ce chapitre, le régime de l'Ivaí peut être considéré comme complexe de deuxième ordre. La distribution saisonnière des débits n'est pas la même pour tout le bassin versant car, bien que le bassin versant ait une seule source d'alimentation en eau (les précipitations), il appartient à deux zones climatiques distinctes. D'autres facteurs comme la topographie et la géologie contribuent aussi à cette variabilité du comportement hydrologique.

L'utilisation des Coefficients Mensuels de Débits et des Rapport des Moyennes Mensuelles Extrêmes se sont montrés très utiles car les résultats obtenus sont comparables entre les sections de mesure et avec les résultats obtenus pour d'autres bassins versants. Les analyses sur le tarissement des nappes phréatiques, basées sur le paramètre alpha, ont donné aussi des résultats intéressants, qui permettent de mieux cerner la dynamique hydrologique de subsurface. Il faut remarquer que ces résultats permettent aussi des comparaisons entre eux et avec d'autres bassins versants.

L'utilisation de l'Image CM est également outil puissant pour la compréhension de la dynamique sédimentaire de l'Ivaí. Avec cette technique, on a réussi à décrire en détail la dynamique des processus de transport sédimentaires dans chacune des sections visitées.

La synthèse de toutes les images CM donne une idée du rôle joué par chacun des différents mécanismes de transport des sédiments dans une logique amont-aval. Les résultats de l'image peuvent aussi être utiles pour un futur découpage du bassin versant.

L'étude des flux liquides et sédimentaires de l'Ivaí a permis de présenter d'une façon relativement simple le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant. Au long de cette étude, un certain nombre de données ont été produites. D'une autre part, ces données seront utiles car elles expriment d'une façon quantitative certaines caractéristiques du bassin versant, et elles peuvent servir de point de départ pour d'autres études futures ; d'autre part, ce ne sont pas les valeurs quantitatives que nous intéressent le plus, mais les secteurs où on peut identifier un changement de comportement des variables analysées, car la synthèse de ces points est à la base de la sectorisation du bassin versant.

Quatrième partie - Du bassin versant au tronçon : une nouvelle méthodologie

4.1. La compartimentation du bassin versant de l'Ivaí

4.1.1. La compartimentation en Ecorégions

D'après les discussions sur les différents types de classifications appliquées aux milieux fluviaux, présentées dans la première partie de ce travail, on peut voir que la compartimentation en écorégions a fait ses preuves en tant qu'excellent outil pour faire la synthèse de la complexité du monde réel (MARSTON, 2006). Le travail avec les écorégions présente aussi l'avantage d'être une alternative peu coûteuse pour la classification des cours d'eau, susceptible d'application aux différentes échelles spatiales (NAIMAN et al. 1992).

Pour la construction de la carte des écorégions du bassin versant de l'Ivaí, on a travaillé en utilisant quelques uns des méthodes auparavant présentées. Le point de départ choisi a été la délimitation de compartiments à partir de la superposition des éléments physiques qui déterminent le fonctionnement des paysages, soit la superposition de ce que Harding et Winterbourne (1997) appellent « les facteurs de contrôle ». Le choix de cette méthode a été motivé par le fait de travailler d'une façon plus holistique, à partir d'une base de données relativement légère. A partir de cette superposition, l'idée était de trouver les changements de paysage les plus marqués, ce que Bryce et Clarke (1996) appellent les « *obvious breaks* ».

La superposition des facteurs de contrôle a suivi le schéma méthodologique proposé par Harding et Winterbourne (1997). Ainsi, six facteurs de contrôle ont été superposés deux par deux : la carte géologique (la géologie du *bedrock*) avec la carte des sols (les formations superficielles), la carte des régions climatiques du Paraná avec la carte de précipitations moyennes du bassin versant, et la carte de la végétation originelle du Paraná avec la carte topographique du bassin versant. De ces superpositions, trois cartes de synthèse sont sorties (Figures 85, 86, 87).

La première carte de synthèse montre le résultat de la superposition de la géologie et de la carte de sols (Figure 85). La synthèse a été faite en regroupant les types de sols en fonction de la géologie des roches sous-jacentes. Ainsi, les types de sols ont été regroupés en trois catégories : les sols sur les formations sédimentaires paléozoïques, les sols sur le basalte et les sols sur le grès Caiuá. Ce regroupement est important car il donne une idée de la structure verticale du bassin versant, de la surface jusqu'au *bedrock*. La combinaison de la géologie avec les sols donne aussi une idée de l'intensité des processus de dégradation des roches et pédogenèse, de la disponibilité sédimentaire dans les différentes parties du bassin versant, de la perméabilité des terrains et de la probable fragilité face aux processus érosifs.

Dans la partie amont du bassin de l'Ivaí, où on trouve des sols sur les formations paléozoïques et sur le basalte, les régolites sont peu profonds, ce qui explique l'occurrence

fréquente de sols du type Néosols Lithiques. Cette région du bassin versant est une source de sédiments fins issus de la décomposition du basalte et de certaines formations sédimentaires, mais on ne peut pas exclure un apport secondaire de sable issu de la décomposition de certaines formations gréseuses.

Dans le moyen bassin, on observe que les régolites tendent à être moins épais dans les parties les plus élevées, tandis qu'ils se montrent bien plus développés dans la vallée de l'Ivaí. En raison de la prédominance du basalte comme *bedrock*, cette partie du bassin versant est majoritairement source de sédiments fins.

Dans la partie aval du bassin on observe que les sommets des collines présentent des régolites relativement épais, avec une occurrence abondante de matériaux sableux issus de la décomposition du grès Caiuá. Secondairement, ces régolites présentent aussi des matériaux fins, qui originellement forment le ciment qui lie les grains de sable du grès. La partie inférieure des versants présente des régolites aussi épais et aussi riches en sable, mais un peu plus riches en matériaux fins. Parfois, le contact avec le basalte sous-jacent, surtout dans les parties moyenne et basse des versants, enrichit les sédiments en matériaux fins. Dans le fond de vallée, la plaine alluviale de l'Ivaí se distingue des versants. Cette plaine, formée par une succession de couches sableuses et limon-argileuses, est soumise aux fluctuations du niveau d'eau de la rivière et de la nappe phréatique. Certaines parties de la plaine sont régulièrement saturées en eau.

La deuxième carte de synthèse présente le résultat de la superposition du climat et de la carte des précipitations moyennes (Figure 86). La synthèse a été faite en regroupant les types de climat en fonction de la précipitation moyenne. Les trois types de climats du bassin de l'Ivaí ont été subdivisés en deux catégories : les climats avec des précipitations supérieures à 1 600 mm annuels, et les climats avec des précipitations inférieures à 1 600 mm annuels. Le choix de la valeur 1 600 mm comme critère de subdivision s'est imposé car, comme ceci a été montré dans la deuxième partie de ce travail, elle marque bien la limite entre les plateaux, où les totaux pluviométriques sont plus élevés, et les terres basses (les collines et la vallée), où les totaux pluviométriques sont un peu plus faibles. A partir de la carte de synthèse, on voit que les climats les plus humides se concentrent majoritairement dans les parties topographiquement les plus hautes et dans la haute vallée, tandis que les climats les moins humides sont présents dans les terrains topographiquement les moins élevés du 2^{ème} Plateau et principalement dans la basse vallée de l'Ivaí. La carte de synthèse montre bien le rôle joué par l'escarpement du 3^{ème} Plateau sur la distribution des précipitations dans le bassin versant.

La troisième carte de synthèse présente le résultat de la superposition de la carte de la végétation originelle et de la topographie (l'altimétrie) du bassin versant (Figure 87). Les types de végétation ont été regroupés en deux catégories en fonction de leur altitude. Le critère retenu a été celui qu'utilise l'IBGE (2004b) pour l'élaboration de la Carte de Végétation du Brésil : la végétation en-dessus de 500 m est considérée comme étant du type Montagnard, et la végétation en-dessous de 500 m est considérée étant comme du type « Sub-Montagnard ».

A partir de la carte de synthèse élaborée, on voit que les terrains au-dessus de 500 m présentent une mosaïque de types de végétation plus importante que les terrains au-dessous de 500 m. Le haut bassin versant est pratiquement dominée par la forêt ombrophile mixte (la forêt d'*Araucárias*), sauf dans le fond des vallées de l'Ivaí et de l'Alonso, où l'humidité et les températures plus favorables permettent la remontée de la forêt saisonnière semi-décidue vers le haut bassin versant. Dans quelques secteurs, la forêt saisonnière

semi-décidue avance par les vallées et arrive même à monter sur les plateaux. Les terrains en-dessous de 500 m sont pratiquement dominés par la forêt saisonnière semi-décidue, sauf dans la partie finale de la plaine, où on peut retrouver la végétation steppique.

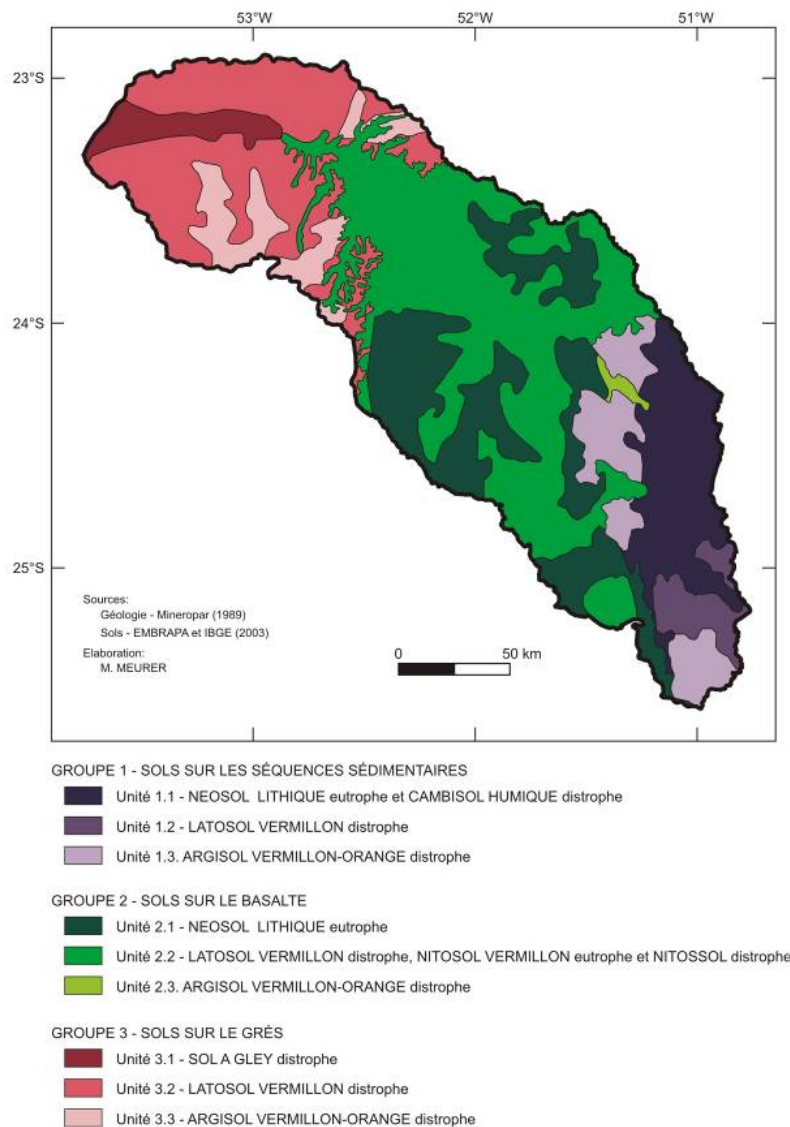
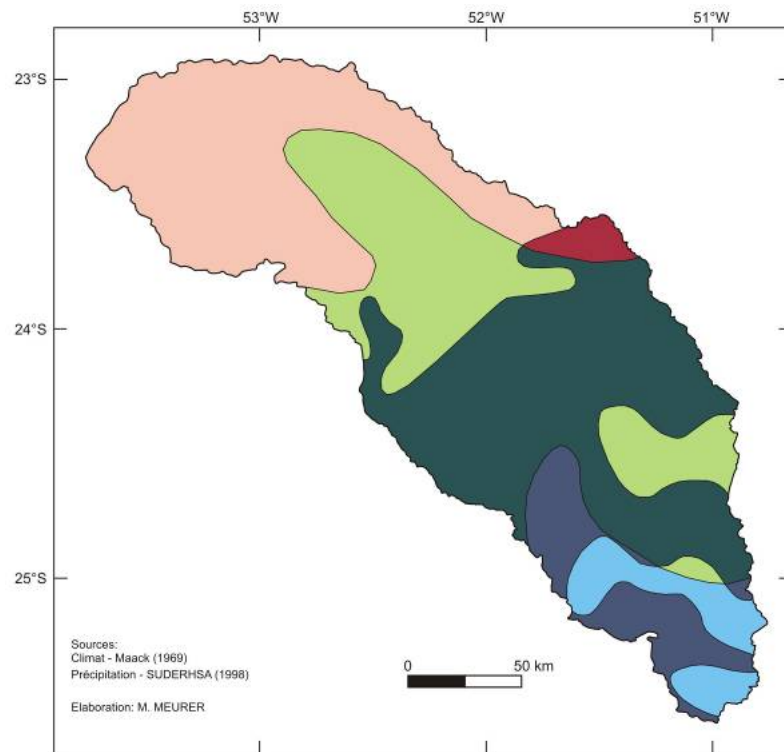






Figure 85. Carte de synthèse de la superposition de la géologie et des sols.



GRUPE 1 - CLIMAT TEMPÉRÉ HUMIDE, SANS SAISON SÈCHE*, AVEC ÉTÉ TEMPÉRÉ.

-  Unité 1.1. Climat Tempéré Humide avec précipitation totale supérieure à 1600 mm
 -  Unité 1.2. Climat Tempéré Humide avec précipitation totale inférieure à 1600 mm
- * Ce climat peut présenter périodiquement un hiver sec (climat tropical marginal)

GRUPE 2 - CLIMAT TEMPÉRÉ HUMIDE, SANS SAISON SÈCHE, AVEC ÉTÉ CHAUD.

-  Unité 2.1. Climat tempéré humide, avec été chaud, sans saison sèche et précipitation totale supérieure à 1600 mm
-  Unité 2.2. Climat tempéré humide, avec été chaud, sans saison sèche et précipitation totale inférieure à 1600 mm

GRUPE 3 - CLIMAT TEMPÉRÉ HUMIDE, SANS SAISON SÈCHE, AVEC ÉTÉ TEMPÉRÉ



-  Unité 3.1 - Climat tempéré humide, sans saison sèche, avec été tempéré et précipitation totale supérieure à 1600 mm
-  Unité 3.2 - Climat tempéré humide, sans saison sèche, avec été tempéré et précipitation totale supérieure à 1600 mm

Figure 86. Carte de synthèse de la superposition du climat et des précipitations moyennes.

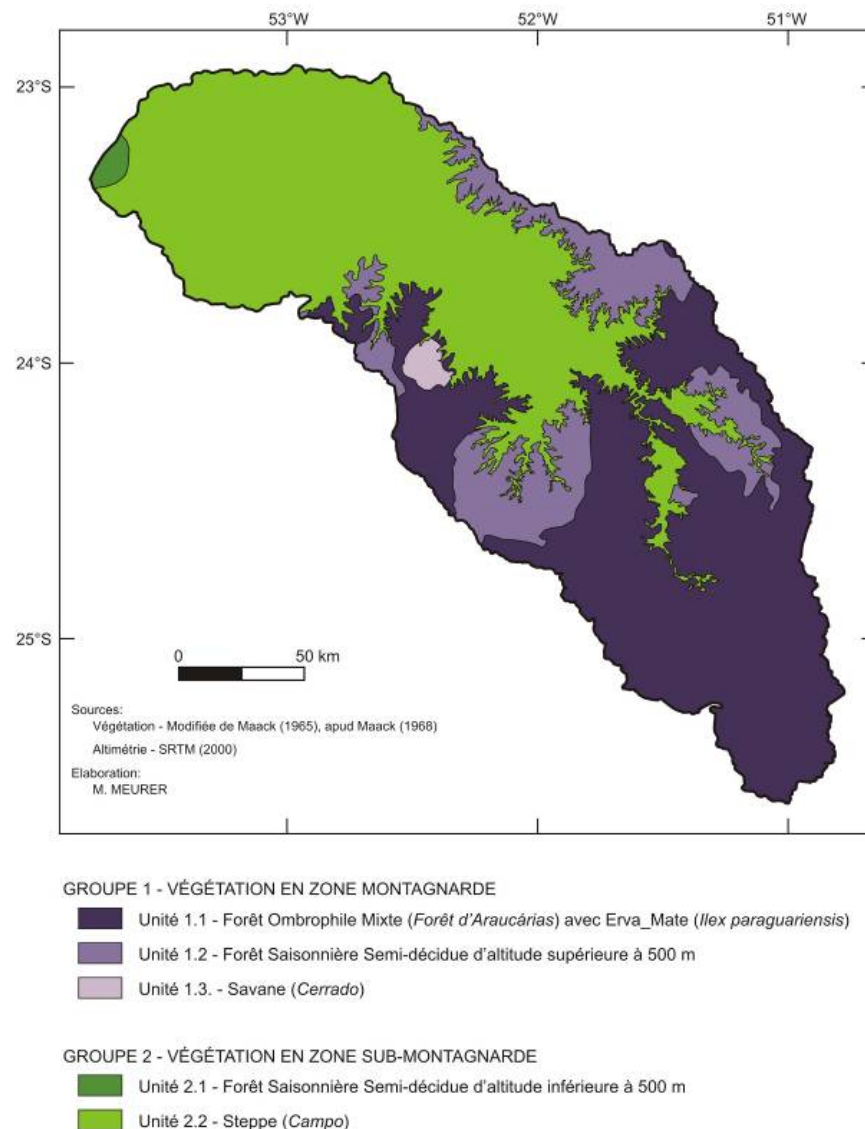


Figure 87. Carte de synthèse de la superposition de la végétation et de la topographie.

La superposition de ces trois cartes de synthèse a permis d'élaborer la carte des écorégions du bassin versant de l'Ivaí (Figure 88). La définition des limites des écorégions a commencé par l'identification des changements de paysage les plus importants, les « *obvious breaks* » de Bryce et Clarke (1996). Pour ceci, on a considéré comme « *obvious breaks* » les endroits dont plusieurs limites se superposaient. Cette étape a permis d'identifier cinq grandes unités. Dans un deuxième temps, on a identifié d'autres superpositions de limites pas aussi importantes que les premières, mais qui marquent aussi des changements de paysage. On a utilisé ces limites pour subdiviser les grandes unités identifiées précédemment. D'autres changements de paysage moins importants ont été ignorés.

L'importance des facteurs de contrôle dans la délimitation des écorégions n'est pas la même pour tous les variables. Certains facteurs de contrôle présentent un poids plus significatif que d'autres pour l'identification des limites des changements de paysage. Dans le cas du bassin versant de l'Ivaí, la géologie et la topographie semblent être les facteurs de contrôle les plus importants, car ils déterminent la distribution des autres éléments. Le

climat a été le facteur de contrôle le moins important, car il ne présente pas une variabilité très importante.

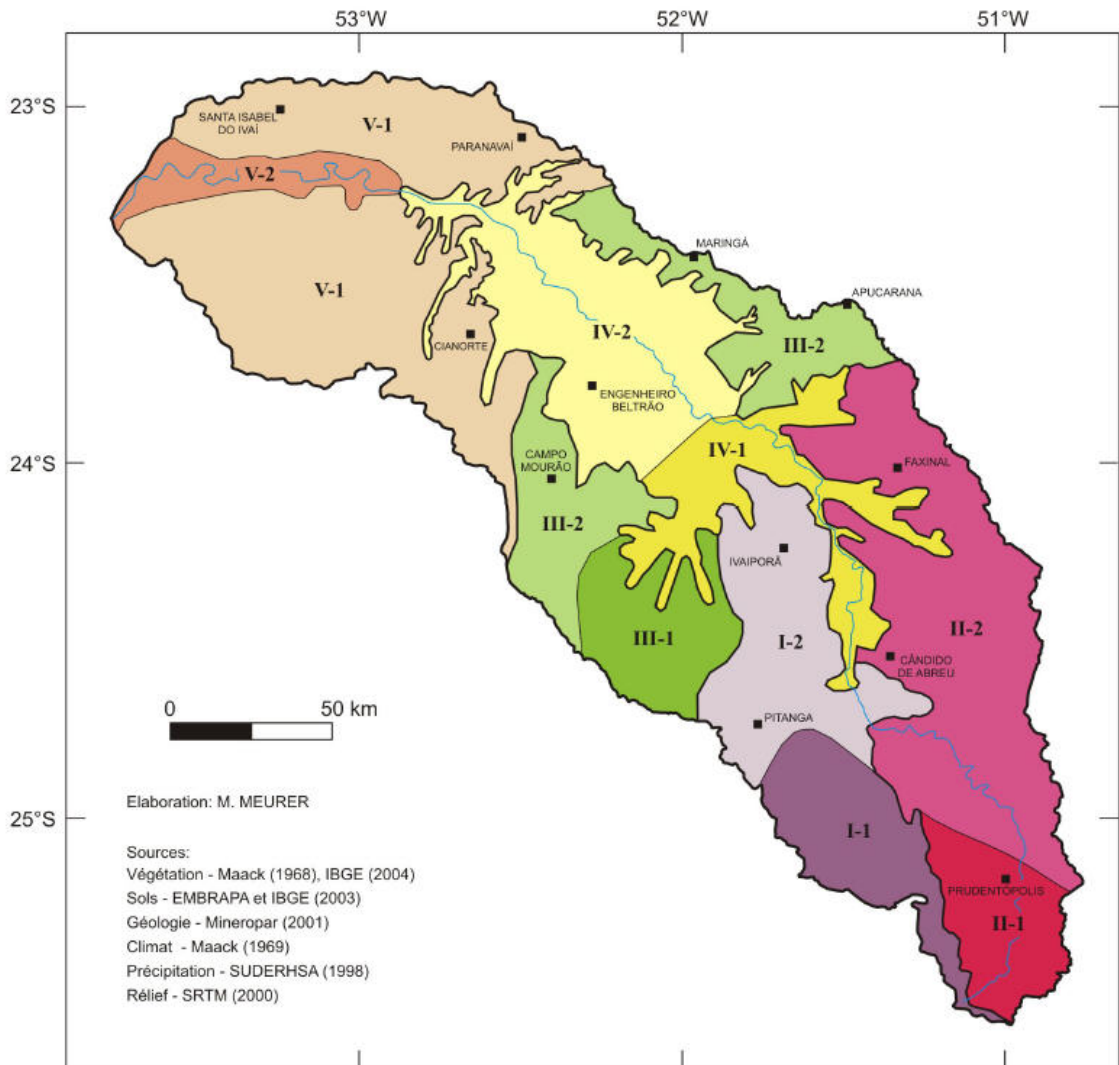


Figure 88. La carte des écorégions du bassin versant de l'Ivaí.

I - Ecorégion Haut Plateau Basaltique

I-1 Forêt Ombrophile Mixte (*Forêt d'Araucárias*) sur plateau basaltique avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols peu profonds (prédominance de Neosols Lithiques, avec Latosols de façon secondaire) et soumis à un climat tempéré humide avec été moins chaud et totales de précipitations inférieures à 1600 mm par an.

I-2 Forêt Ombrophile Mixte (*Forêt d'Araucárias*) sur plateau basaltique avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols peu profonds (prédominance de Neosols Lithiques, avec Latosols de façon secondaire) et soumis à un climat tempéré humide avec été tempéré et précipitations abondantes, supérieures à 1600 mm par an.

II - Ecorégion Haut Plateau Sédimentaire

II-1 Forêt Ombrophile Mixte (*Forêt d'Araucárias*) sur plateau sédimentaire avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols relativement profonds (Argisols et Latosols, avec Neosols Lithiques de façon secondaire) soumis à un climat tempéré humide avec été moins chaud et précipitations inférieures à 1600 mm par an.

II-2 Forêt Ombrophile Mixte (*Forêt d'Araucárias*) sur plateau sédimentaire avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols peu profonds (Neosols Lithiques, avec Argisols et Latosols de façon secondaire) soumis à un climat tempéré humide avec été moins chaud et précipitations inférieures à 1600 mm par an.

III - Ecorégion Moyen Plateau Basaltique

III-1 Forêt Saisonnière Semi-décidue sur plateau basaltique avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols peu profonds (Neosols Lithiques) soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et pluies abondantes, supérieures à 1600 mm par an, avec quelques régions en dessus de 1800 mm par an.

III-2 Forêt Saisonnière Semi-décidue et Forêt Ombrophile Mixte (*Forêt d'Araucárias*) sur plateau basaltique avec altitude supérieure à 500 mètres. Sols peu profonds (Neosols Lithiques) soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et précipitations autour de 1600 mm par an.

IV - Ecorégion Moyenne Vallée

IV-1 Forêt Saisonnière Semi-décidue dans la vallée de l'Ivaí, avec altitude inférieure à 500 mètres. Sols profonds (Nitosols) dérivés du basalte et soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et pluies abondantes, supérieures à 1600 mm par an.

IV-2 Forêt Saisonnière Semi-décidue dans la vallée de l'Ivaí, avec altitude inférieure à 500 mètres. Sols profonds (Nitosols) dérivés du basalte et soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et pluies moins abondantes, inférieures à 1600 mm par an.

V - Ecorégion Collines Gréseuses et Plaine Fluviale

V-1 Forêt Saisonnière Semi-décidue sur des collines gréseuses avec altitude inférieure à 500 mètres. Sols profonds (Argisols et Latosols) soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et hiver sec. Précipitations annuelles inférieures à 1600 mm.

V-2 Forêt Saisonnière Semi-décidue et Steppe (*Campo*) sur la plaine alluviale de l'Ivaí, avec sols profonds (Latosols et Sols Gley) soumis à un climat tempéré humide avec été chaud et hiver sec. Précipitations annuelles inférieures à 1600 mm.

La carte des écorégions du bassin versant de l'Ivaí présente cinq écorégions, chacune subdivisée en deux unités :

I - Ecorégion « Haut Plateau Basaltique » – Cette écorégion correspond à la partie sud de l'escarpement du 3^{ème} Plateau. Ces terrains possèdent le basalte comme *bedrock*, et ils se trouvent à des altitudes comprises entre 600 m et 1 300 m. Les sols sont en général peu profonds en raison des fortes pentes et de la vitesse réduite de la pédogenèse, limitée par le climat un peu plus frais. La végétation originelle était la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*. C'est la végétation qui est le principal facteur de distinction entre cette partie de l'escarpement et la partie qui se trouve au nord de l'Ivaí (qui fait partie de l'écorégion III). En raison des différences de climat et de précipitations, cette écorégion a été subdivisée en deux sous-unités.

La **sous-unité I-1** correspond à la partie haute de l'escarpement, qui est tournée vers le 2^{ème} Plateau. Les altitudes y sont comprises entre 700 m et 1 300 m. Le

climat est du type tempéré humide avec un été moins chaud, et les précipitations sont inférieures à 1600 mm par an.

La **sous-unité I-2** représente la partie haute de l'escarpement du 3^{ème} Plateau. Les altitudes sont comprises entre 600 m et 1 200 m, avec une pente relativement plus faible, sauf pour les versants qui longent la vallée de l'Ivaí. La géologie, les sols et la végétation sont les mêmes que ceux observés dans la sous-unité 1, par contre la sous-unité I-2 présente un climat du type tempéré humide, avec été tempéré, et des précipitations très abondantes qui dépassent facilement les 1600 mm.

II - Ecorégion « Haut Plateau Sédimentaire » – Cette écorégion rassemble les terrains d'altitude comprise entre 500 m et 1 200 m, qui se trouvent sur les formations sédimentaires paléozoïques du 2^{ème} Plateau. Les sols sont en général peu profonds, mais dans certains cas ils peuvent présenter des profils bien développés. La végétation originelle prédominante était la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, associée à l'*Erva-Mate*. En raison principalement des différences de sols, cette écorégion a été divisé en deux sous-unités.

La **sous-unité II-1** est sur la partie amont du plateau sédimentaire, où les altitudes varient entre 600 m et 1 000 m. Cette sous-unité se distingue principalement par la prédominance d'Argisols et Latosols, sols profonds et bien développés. Les précipitations dans cette sous-unité sont distribuées de façon inégale car elles sont influencées par la topographie. On voit que les parties les plus hautes sont en général les parties les plus arrosées.

La **sous-unité II-2** correspond à la partie aval du plateau sédimentaire, dont les altitudes varient entre 500 m et 1 200 m. En gros, elle présente les mêmes caractéristiques que la sous-unité précédente, sauf pour les types de sols. Dans la sous-unité II-2, prédominent les Néosols Lithiques, sols peu profonds et avec beaucoup de matériel lithique mélangé. En raison de l'abondance en matériaux fins, cette région concentre quelques *olarias*, usines pour la fabrication de matériaux de construction en terre cuite.

III - Ecorégion « Moyen Plateau Basaltique » – Cette écorégion correspond aux plateaux présents dans le moyen bassin versant des deux cotés de la vallée de l'Ivaí. Ces plateaux, essentiellement basaltiques, présentent des altitudes au-dessus de 500 m, et les sols sont principalement du type Néosols Lithiques, peu profonds et riches en matériaux lithiques. Le climat dans cette écorégion est du type tempéré humide avec un été chaud. En raison de différences de précipitation et de végétation, l'écorégion a été divisée en deux sub-unités.

La **sub-unité III-1** correspond à la partie la plus amont du moyen plateau qui se trouve au sud de l'Ivaí. Les précipitations dans ce secteur sont très abondantes, dépassant facilement les 1600 mm, avec même quelques secteurs au-dessus de 1800 mm. La végétation prédominante est la Forêt Saisonnière Semi-décidue, qui arrive à monter sur le plateau en avançant par l'ensemble des vallées du bassin de la Corumbataí.

La **sous-unité III-2** est la partie la plus aval du moyen plateau. Sur ces terrains, au-dessus de 500 m, on retrouve la Forêt Saisonnière Semi-décidue, avec la Forêt Ombrophile Mixte (Forêt d'*Araucárias*), de façon secondaire dans les parties les plus hautes. Les caractéristiques de sol et de climat sont semblables à celles de la sous-unité III-1, sauf pour les précipitations, qui sont moins abondantes, autour de 1600 mm par an.

IV - Ecorégion « Moyenne Vallée » – Cette écorégion délimite les terrains entre 250 m et 500 m d'altitude, ce qui correspond aux pentes et aux fonds de vallées de l'Ivaí et de quelques uns de ses tributaires. En général les sols, dérivés du basalte, sont profonds et bien développés (Nitosols). La végétation prédominante est du type Forêt Saisonnière Semi-décidue. Le climat est du type tempéré humide avec été chaud, mais les précipitations totales ne sont pas les mêmes pour toute l'écorégion. Ainsi, la distribution de précipitations a été utilisée comme critère pour la subdivision de cette unité.

- La **sub-unité IV-1** correspond à la partie amont de la vallée, comprise entre les altitudes 300 m et 500 m. Dans cette sous-unité, la vallée est entourée par les plateaux voisins, et les précipitations totales sont plus abondantes, dépassant le seuil des 1600 mm par an.
- La **sub-unité IV-2** correspond à la partie aval de la vallée, comprise entre les altitudes 250 m et 500 m. La vallée est plus ouverte, et les précipitations sont moins abondantes, inférieures à 1600 mm annuels.

V - Ecorégion « Collines Gréseuses et Plaine Alluviale » – Cette écorégion correspond au tiers inférieur du bassin versant, où on trouve le grès Caiuá comme bedrock. Dans cette écorégion, les terrains se trouvent entre les altitudes 230 m et 700 m ; le climat prédominant est du type tempéré humide avec été chaud et hiver sec. Les sols, du type Argisol et Latosol, sont en général très sableux. Les précipitations annuelles sont inférieures à 1600 mm, et arrivent même localement à dépasser les 1400 mm par an. Cette écorégion a été divisée en deux sub-unités en raison des différences morphologiques et des processus de façonnement des paysages.

- La **sub-unité V-1** englobe les collines gréseuses qui entourent la basse vallée de l'Ivaí. Ces collines présentent des altitudes comprises entre 250 m et 700 m, avec des sols très sableux et bien drainés, de type Argisols et Latosols.
- La **sub-unité V-2** correspond à la plaine alluviale, qui apparaît dans la basse vallée de l'Ivaí un peu après la section de Porto Paraíso do Norte. Les altitudes sont comprises entre 230 et 250 m, et les sols prédominants sont les Latosols et les Sols à Gley, soumis aux fluctuations de la nappe phréatique, et souvent saturés en eau. En général, la végétation de la plaine est très adaptée à cet excédent hydrique, avec des champs inondables et de la végétation riparienne au bord du chenal.

La carte des écorégions du bassin de l'Ivaí présente, à l'échelle du bassin versant, une bonne synthèse des différents paysages qu'on trouve dans l'aire d'étude. Néanmoins, il faut toujours avoir dans l'esprit que la carte des écorégions est issue d'une régionalisation, et qu'elle rassemble en aires discrètes un continuum de paysages. Pour cette raison, les limites entre les écorégions ne peuvent pas être vues comme des contacts abrupts entre deux paysages, mais comme d'amples zones de transition (BRYCE et CLARK, 1996). Malgré tout, la carte achevée exprime de façon relativement correcte la division en grandes zones géographiques dont les groupes d'écosystèmes présentent un fonctionnement similaire (BAILEY, 1983).

4.1.2. La compartimentation du profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau est un graphique qui met en rapport la variation de l'altitude du lit ou du fond de la vallée et la distance. La distance, représentée sur l'axe des abscisses, est toujours mesurée à partir d'un point de départ donné, souvent localisé à une extrémité du réseau hydrographique, comme par exemple à une confluence, à l'entrée dans un lac ou

dans l'océan (GORDON *et al.*, 2004). Sur un profil en long, on peut observer les variations de pente qui se succèdent au long d'un cours d'eau. Ces variations sont importantes car elles peuvent donner de façon indirecte des informations sur les climats antérieurs, sur l'augmentation amont-aval des débits, sur la charge sédimentaire transportée et sur les caractéristiques du bassin versant (LEOPOLD *et al.* 1995). Les variations de pente peuvent être aussi très utiles pour détecter des contrôles structuraux et pour déterminer les tronçons en érosion et les tronçons à dépôt (JULIEN, 2002).

Selon Gordon *et al* (2004), « sur la plupart des cours d'eau, les profils en long présentent une forme caractéristique concave, avec une réduction de la pente entre la partie « érosive » supérieure et la partie « dépositionnelle » inférieure. Cette forme est associée en même temps à une augmentation du débit et à une diminution de la taille des sédiments en direction de l'aval ». Les auteurs affirment encore que le climat joue aussi un rôle important dans la courbure du profil en long : sous les climats plus humides la concavité tend à être plus prononcée, tandis que sous les climats plus secs cette concavité tend à ne pas se produire (GORDON, 2004). En réalité, le profil en long d'un cours d'eau peut présenter des formes très variables, car il est le résultat de la combinaison de plusieurs variables avec différents degrés de dépendance ou d'indépendance entre eux. Pour Gordon *et al* (2004), la forme du profil en long peut être modifiée par la topographie locale, les caractéristiques du *bedrock*, des différences du matériel de fond, entre autres variables. Selon ces auteurs, le profil tend à être plus raide quand le cours d'eau traverse des lithologies plus résistantes à l'érosion, et plus plat quand le lit se trouve sur des roches moins résistantes. Selon Leopold *et al.* (1995), la forme du profil longitudinal d'un cours d'eau est donnée par les variables suivantes : le débit (Q), la charge délivrée dans le chenal (G), le diamètre des sédiments (D), la résistance au flux (n), la vitesse (v), la largeur (w), la profondeur (d) et la pente (s).

Pour Scheidegger (2004), la plupart des géomorphologues considèrent que les profils en long des cours d'eau présentent la forme d'une courbe exponentielle (concave), néanmoins ces courbes peuvent présenter des interruptions par des *knickpoints*, des points où on observe un changement abrupt de pente. Selon cet auteur, la présence de *knickpoints* sur un profil est souvent associée à une instabilité des variables de contrôle. Certains profils présentent plusieurs *knickpoints*, qui les divisent en plusieurs segments de longueur et de pente variables. Dans ce cas, il ne faut pas chercher une courbe exponentielle pour l'ensemble des segments, mais chacun de ces segments doit être considéré comme une courbe exponentielle indépendante (LEOPOLD *et al.*, 1995).

Le profil en long est, d'une certaine manière, une synthèse de la combinaison de plusieurs variables de contrôle. Au travers du profil en long, on peut aussi de faire des estimations de l'énergie du cours d'eau. La pris en compte du profil en long dans un travail de sectorisation est importante, car il permet de séparer des tronçons dont l'énergie et les caractéristiques hydro-sédimentaires tendent à être similaires. Afin de mieux comprendre le fonctionnement amont-aval de l'Ivaí, on va travailler sur le profil en long de l'Ivaí, de façon à faire ressortir les caractéristiques communes et les hétérogénéités de chaque tronçon.

Le profil en long de l'Ivaí a déjà été brièvement discuté par DESTEFANI (2005). Dans son travail, l'auteure a élaboré un profil de l'Ivaí à partir des données altimétriques des cartes topographiques. Ce profil a été divisé en sept segments, basés sur les changements de pente, et pour chaque un de ces segments, elle a présenté les valeurs de pente moyenne.

A fin de mieux caractériser les différents segments du profil en long de l'Ivaí, un nouveau profil en long a été élaboré (Figure 89), à partir des données altimétriques issues d'une mosaïque d'images SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*. Les images SRTM sont des fichiers matriciels de données altimétriques qui ont été recueillies au cours d'une mission

de la navette spatiale Endeavour en février 2000. Ces images sont mises à disposition gratuitement par la NASA - *National Aeronautics and Space Administration*. Au profil élaboré, on a superposé des informations sur la géologie, extraites de la carte géologique du Paraná (MINEROPAR, 1989) et la position des stations visitées pendant les travaux sur le terrain.

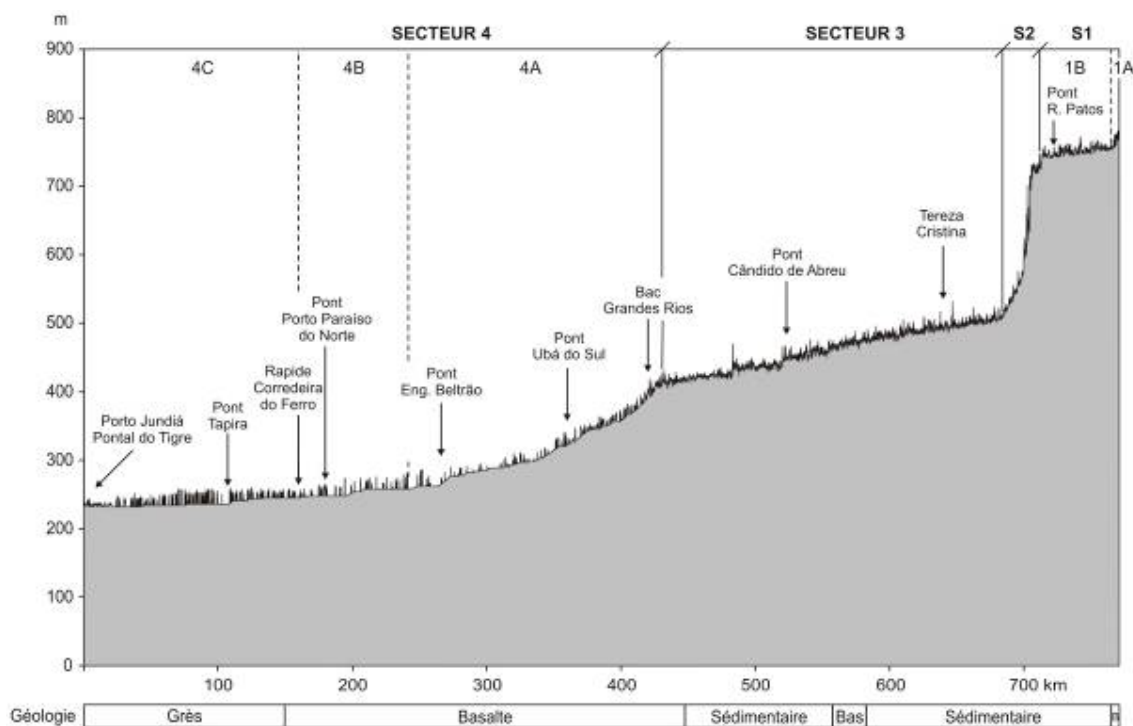


Figure 89. Profil en long de la Dos Patos et de l'Ivaí. Les flèches marquent les sections visitées pendant les travaux sur le terrain ; la barre du bas présente la géologie simplifiée du bedrock.

Sur le graphique, on observe que le profil en long de l'Ivaí présente au moins trois *knickpoints* bien marqués. Ces trois *knickpoints* ont servi de point de départ pour la division du profil en quatre grands secteurs (secteurs 1, 2, 3 et 4). Dans les secteurs 1 et 4, des changements de pente moins importants ont été pris en compte pour la subdivision intra-secteur. Pour la subdivision du secteur 4, on a aussi utilisé les informations issues du rapport d'une expertise géologique réalisée par le Secrétariat de Transports du Paraná pour une recherche sur la navigabilité de la basse Ivaí (SETR, 1982) (Figure 90).

Chacune des unités délimitées a été décrite en fonction de leurs caractéristiques (Tableau 12) :

Secteur 1 – Ce secteur correspond au tronçon qui commence aux sources de la Dos Patos et qui s'étend jusqu'à la partie haute de la chute d'eau Barão do Rio Branco, proche de la ville de Prudentópolis. Ce tronçon coule sur les terrains basaltiques et sédimentaires qui forment le contact entre le 2^{ème} et le 3^{ème} Plateaux. Sa longueur totale est d'environ 101 km, et les altitudes varient entre 1200 m et 700 m (la partie supérieure de ce segment n'est pas représentée sur le profil élaboré). Avec une pente moyenne de 0,4%, ce secteur présente approximativement la forme exponentielle décrite dans la littérature géomorphologique. En raison des différences de pente et de lithologie il a été divisé en deux sub-secteurs.

- Le **sous-secteur 1A** commence aux sources de la Dos Patos et se termine 16 km plus en aval, dans une section placée à environ 5 km en aval du village d'Itapará. Ce sous-secteur est une zone de relief à dominante basaltique, assez mouvementé, avec des altitudes qui varient entre 1200 m et 800 m. A cet endroit, la Dos Patos coule dans un lit relativement sinueux (une sinuosité sans liberté, contrôlée par la structure du basalte sous-jacent), avec une pente moyenne de 2,5 %.
- Le **sous-secteur 1B** commence à environ 5 km en aval du village d'Itapará et va jusqu'à la chute Barão do Rio Branco, proche de la ville de Prudentópolis, sur une longueur d'environ 85 km ; les altitudes dans cette unité varient entre 800 m et 700 m. Le relief est moins mouvementé car la Dos Patos coule sur le plateau sédimentaire, mais à certains endroits la rivière présente des petites marches. Près de la transition avec le compartiment suivant, la rivière présente une chute, la chute Manduri (ou Rickli). Malgré cette rupture, la pente moyenne dans ce sous-secteur est relativement faible, autour de 0,1 %.

Secteur 2 – Ce secteur correspond au tronçon qui se trouve entre la partie haute de la chute d'eau Barão do Rio Branco et la confluence de la São João, point à partir duquel commence officiellement l'Ivaí. Ce tronçon, qui a seulement 23 km de longueur, présente un profil relativement linéaire, avec une concavité dans la partie la plus aval. Les altitudes varient entre 700 m et 508 m. Au début de ce compartiment, la chute Barão do Rio Branco représente une dénivellation ponctuelle d'environ 64 m. Après, la rivière coule dans une vallée étroite, avec un lit peu sinueux, contrôlé par la structure, avec beaucoup de blocs rocheux, de petits rapides et de marches au long du chenal. La pente moyenne dans ce secteur est d'environ 0,8 %.

Secteur 3 – Ce secteur correspond au tronçon limité par la confluence de la São João et de la Dos Patos et par la station située à environ 5 km en amont du bac qui relie les villes de Grandes Rios et de Jardim Alegre. Dans ce secteur, long de 267 km, le profil est relativement linéaire, avec quelques dénivellements bien localisés, liés à la structure et aux changements de lithologie. Les altitudes sont comprises entre 508 m et 410 m, et la pente est d'environ 0,04 %. Dans la partie amont du secteur, la rivière coule dans une vallée assez étroite, longée par des hautes collines d'origine volcanique (des *dikes* plus résistants, avec une orientation préférentielle SE–NW), tandis que dans la partie plus aval la vallée est nettement plus ample.

Secteur 4 – Ce secteur commence à la station située à environ 5 km amont du bac qui relie les villes de Grandes Rios et de Jardim Alegre, et se termine à la confluence avec le Paraná. C'est le secteur le plus long, avec 420 km. Le profil dans ce secteur est relativement concave dans la partie amont et plus linéaire dans les parties moyenne et aval. Les altitudes varient entre 410 m et 235 m, et on observe quelques dénivellements localisés, liés à la structure et aux contacts entre les différentes couches basaltiques (SETR, 1982). La pente moyenne est d'environ 0,04 %, mais cette valeur varie au long du compartiment. Pour cette raison, ce secteur a été divisé en trois sous-secteurs.

- Le **sous-secteur 4A** correspond à la partie amont du secteur, qui se trouve entre le bac de Grandes Rios et la section amont du pont qui relie les villes de Doutor Camargo et Jusarra. Ce sous-secteur, d'une longueur de 180 km, se différencie des autres par sa pente un peu plus accentuée et la forme du profil en long, relativement plus concave que les sous-secteurs suivants. Les altitudes varient entre 410 m et 275 m et la pente moyenne est d'environ 0,07 %. A quelques endroits, on observe des rapides, probablement liés aux contrôles structuraux imposés par le basalte.

Les **sous-secteurs 4B et 4C** correspondent respectivement aux secteurs B et A du 1^{er} tronçon délimité par le Secrétariat de Transports du Paraná dans le rapport de l'expertise géologique réalisée sur la basse Ivaí (SETR, 1982) (Figure 90). Le **sous-secteur 4B** commence à la station située à l'amont du pont qui relie les villes de Doutor Camargo et Jusarra, et termine au rapide de la *Corredeira de Ferro*, proche de la ville de Mirador, ce qui représente un tronçon de 83 km de longueur. L'Ivaí coule ici sur des terrains basaltiques, entre les altitudes 275 m et 260 m. Le profil présente une forme faiblement concave, avec une pente moyenne d'environ 0,02 %. D'après les informations du rapport du SETR (1982), ce secteur est soumis à un important contrôle structural imposé par la lithologie, ce qui explique les étroitements du lit et les courbes fermées, ainsi que la présence de beaucoup de rapides (Figure 90). Dans la partie aval de ce sous-secteur, le rapide de la *Corredeira do Ferro* est une rupture importante dans le continuum du chenal de l'Ivaí. Ce rapide représente un dénivelé altimétrique, un changement de pente, mais aussi une transition entre deux lithologies. Peu après la fin de la *Corredeira do Ferro* se trouve la limite inférieure du basalte. Le **sous-secteur 4C** commence justement après le rapide *Corredeira do Ferro*, et se termine à la confluence avec le Paraná. Ce tronçon de 157 km de longueur se caractérise par une dénivellation très faible, les altitudes variant entre 260 m et 235 m. Le profil est relativement linéaire, avec une pente moyenne d'environ 0,016 %. Le chenal devient un peu plus large que dans le sub-secteur précédent, avec un style en amples méandres encaissés, contrôlés par les grands linéaments régionaux. Les berges gréseuses sont en général hautes, parfois asymétriques. Les rapides sont encore présents, mais ils deviennent moins fréquents que dans le secteur précédent en raison des changements de lithologie et de la pente très faible. Dans ce sous-secteur on observe aussi le développement de la plaine alluviale. Selon les informations du rapport du SETR (1982), les premiers éléments de cette plaine sont présents dès la fin du sous-secteur précédent, un peu avant la *Corredeira do Ferro*. En réalité, on va avoir une plaine plus continue et développée seulement à partir de la limite inférieure de la *Corredeira do Ferro*. Cette plaine est relativement étroite, avec largeurs qui varient entre 3 et 5 km, mais au fur et à mesure qu'on descend l'Ivaí cette valeur augmente, et la largeur peut varier entre 6 et 10 km. En ce qui concerne l'origine de cette plaine, le rapport de la SETR (1982) la divise en deux parties : une partie amont, qui a été construite par la dynamique de l'Ivaí, et une partie aval qui, a été formée par la dynamique du Paraná, et qui correspond à la plaine de rive gauche du Paraná. Selon ce même rapport, le contact entre ces deux parties de la plaine se trouve à peu près 30 km avant la confluence avec le Paraná. Les recherches sur l'origine de la plaine de l'Ivaí sont encore très neuves, et l'on n'a pas beaucoup de certitudes sur l'histoire de sa formation et sur son âge. Par contre, on sait que le chenal actuel de l'Ivaí est souvent limité par des berges rocheuses, de façon qu'il n'est pas possible que le lit migre dans la plaine. Ainsi, on peut estimer que cette plaine n'est pas le résultat de la dynamique actuelle de l'Ivaí, mais probablement est liée à une dynamique antérieure de ce cours d'eau.

Tableau 12 – Synthèse des caractéristiques de chaque secteur et sous-secteur du profil en long de la Dos Patos et de l'Ivaí

Compartiment	Longueur (km)	Z Max (m)	Z Min (m)	ΔZ (m)	S (m/m)	S (%)
Secteur 1	101	1200	700	500	0,004	0,4
Sous-secteur 1A	16	1 200	800	400	0,025	2,5
Sous-secteur 1B	85	800	700	100	0,001	0,1
Secteur 2	23	700	508	192	0,008	0,8
Secteur 3	267	508	410	98	0,0004	0,04
Secteur 4	420	410	235	175	0,0004	0,04
Sous-secteur 4A	180	410	275	135	0,0007	0,07
Sous-secteur 4B	83	275	260	15	0,0002	0,02
Sous-secteur 4C	157	260	235	25	0,00016	0,016

L'identification des différents secteurs du profil en long est importante car chaque compartiment limite un tronçon de même pente moyenne, ce qui aura un certain rapport avec l'énergie du tronçon. En plus, il est probable que dans chaque compartiment la combinaison des facteurs de contrôle du profil en long est plus ou moins homogène, et que par conséquent le comportement des cours d'eau en est aussi homogène. Bref, la compartimentation du profil en long est un critère très important pour la compréhension et la sectorisation amont-aval d'un cours d'eau.

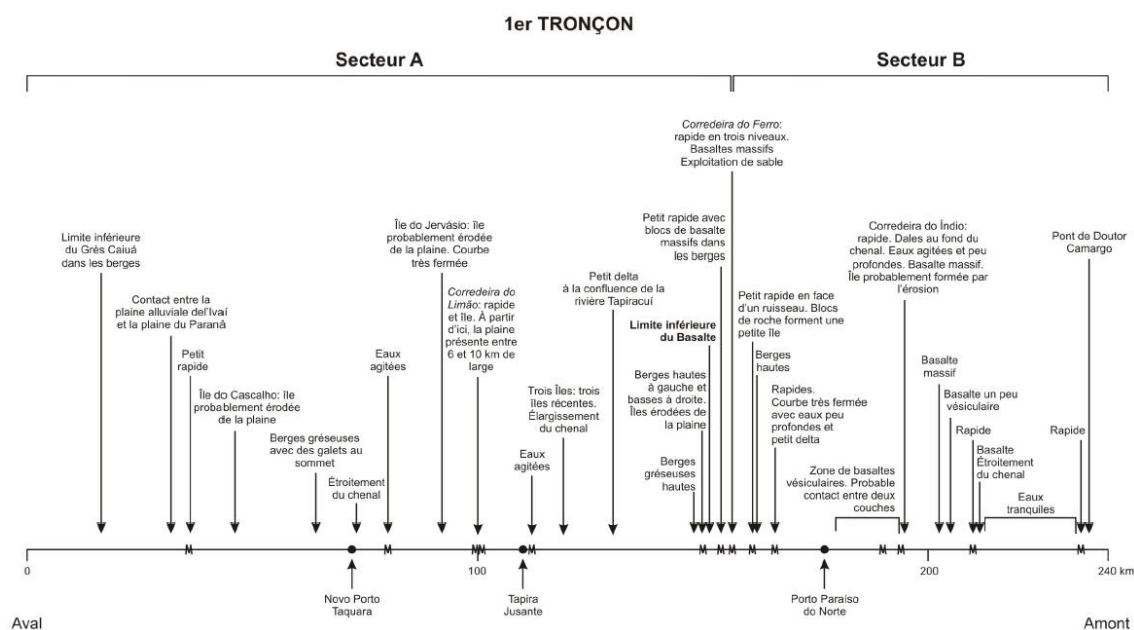


Figure 90. Synthèse des informations recueillies dans la basse Ivaí pendant une expertise géologique réalisée par le Secrétariat de Transports du Paraná pour une recherche sur la navigabilité de ce tronçon.

4.1.3. La compartimentation en fonction de la dynamique hydro-sédimentaire

Le débit et la charge sédimentaire sont deux variables déterminantes de la morphologie des chenaux fluviaux. Le débit conditionne directement l'énergie disponible dans le système et à la taille des chenaux, néanmoins il ne peut pas être utilisé tout seul comme une base valable pour la classification des chenaux (sauf pour des classifications qualitatives entre chenaux temporaires et pérennes). La charge sédimentaire est aussi une variable importante pour la morphologie des cours d'eau, car elle dépend directement des modes de transport prédominants et de la taille des sédiments transportés (SCHUMM, 1977).

La dynamique des débits et la dynamique sédimentaire vue à travers les processus de dépôt de l'Ivaí ont déjà été un sujet de discussion dans le chapitre précédent. On a présenté le comportement amont-aval de plusieurs variables qui sont importantes pour la compréhension du fonctionnement du bassin versant. Maintenant, on présente une tentative de synthèse des résultats présentés, afin d'élaborer une sectorisation de l'Ivaí en fonction de son fonctionnement hydro-sédimentaire. Pour parvenir à cette sectorisation hydro-sédimentaire, on a réalisé un tableau de synthèse des variables étudiées dans le chapitre précédent (Figure 91). Dans ce tableau, les variables hydrologiques ont été placées pour chaque station de mesure. Pour chacune des variables, un « X » a été marqué dans les sections où des changements de comportement des variables ont été observés. La quantité totale de changements a été utilisée pour la réalisation d'une pré-sectorisation, basée seulement sur les variables hydrologiques. En fonction des résultats, on a retenu comme limites pour la pré-sectorisation les sections d'Ubá do Sul et Porto Paraíso do Norte.

VARIABLES	SECTIONS									
	SP	RP	TC	PE	US	VR	PB	PPN	TJ	NPT
Moyenne des Q journaliers			X		X			X		
Médiane des Q journaliers		X			X			X		
Ecart-type des Q journaliers			X				X			
Q moyens/mois					X					
Coefficient mensuel de débits					X					
Rapport Moyennes Mensuelles Extrêmes						X				
Q crue (DC10)			X				X			
Q crue (DC30)				X		X				
Q crue/mois				X				X		
Q pleins bords						X				
Q étiage					X					
Q étiage (DC355)				X				X		
Tarissement des nappes					X		X			
Q moyen x surface				X				X		
Q crue x surface							X			
Q étiage x surface						X		X		
Quantité de Changements	0	1	3	4	6	4	4	6	0	0
Pré-sectorisation	Secteur 1				Secteur 2			Secteur 3		
Image CM			X		X				X	
Sectorisation	Secteur 1A		Secteur 1B		Secteur 2			Sec. 3A	Secteur 3B	

Figure 91. Tableau synthèse des changements de comportement des variables hydrologiques et sédimentaires au long de la Dos Patos et de l'Ivaí. Les « x » marquent les sections où des changements de comportement des variables ont été observés.

Dans un deuxième temps, après la pré-sectorisation hydrologique, on a ajouté au tableau les informations issues des images CM. On a choisi de considérer les résultats de l'image CM comme un critère à part car on considère que cette information a un poids très important dans la morphologie et dans le fonctionnement du chenal fluvial. Ainsi, les limites issues de l'Image CM ont été utilisées pour un raffinement de la pré-sectorisation auparavant élaborée.

D'après la synthèse des informations hydro-sédimentaires, on a divisé l'Ivaí en trois secteurs :

Secteur 1 – Ce secteur correspond au tronçon qui se trouve entre les sources et la station d'Ubá do Sul. Dans ce tronçon, les débits moyens présentent une forte augmentation amont-aval. Les débits les plus importants ont lieu au début de l'été, dans la transition automne-hiver et principalement au début du printemps. Les débits de crue présentent une forte augmentation amont-aval, et les débits d'étiage ne sont pas très réduits. Cependant, le rapport entre les débits extrêmes est relativement important, ce qui montre que le débit est très inconstant. La vitesse de tarissement des nappes phréatiques est variable, mais en générale elle est forte. En raison des résultats de l'image CM et de certains changements de comportement hydrologique, ce secteur a été divisé en deux sub-secteurs.

- Le **sous-secteur 1A** correspond au tronçon situé entre les sources et la station de Tereza Cristina. Ce sous-secteur se caractérise par une augmentation amont-aval des débits moyens et des crues moins fortes. Les débits d'étiage sont relativement élevés. La vitesse de tarissement des nappes phréatiques est forte et peu variable dans les séquences sédimentaires paléozoïques du 2^{ème} plateau, et forte et plus variable dans les terrains basaltiques. Dans ce sous-secteur, les résultats de l'image CM montrent qu'il y a une forte turbulence, principalement pendant les crues, qui arrivent à transporter en suspension les matériaux sédimentaires les plus grossiers normalement transportés au fond du chenal. Ces sédiments grossiers sont déposés sur les berges pendant les crues, et ils sont ultérieurement enrichis en matériaux fins à la phase de décrue.
- Le **sous-secteur 1B** correspond au tronçon situé entre la station de Tereza Cristina et la station d'Ubá do Sul. Dans ce sous-secteur, l'augmentation amont-aval des débits moyens et de crue est plus forte, peut-être en raison des contributions venues du plateau de Pitanga, une des régions les plus arrosées du bassin versant. Par contre, les étiages sont un peu plus importants que dans le sous-secteur précédent. La vitesse de tarissement des nappes est forte et très variable, typique des terrains sédimentaires et basaltiques du 2^{ème} et 3^{ème} plateau. D'après les résultats de l'image CM, on voit que la turbulence dans ce tronçon est un peu moins forte que dans le tronçon précédent, mais elle peut être aussi très variable en raison des changements de largeur du lit et de la présence de rapides observés au long de ce tronçon. Dans ce tronçon, on ne trouve plus des cailloux dans les dépôts des berges.

Secteur 2 – Ce secteur correspond au tronçon situé entre les stations d'Ubá do Sul et de Porto Paraíso do Norte. Dans la majeure partie de ce tronçon, les débits moyens augmentent fortement. Une réduction de cette augmentation commence à la section de Porto Bananeiras, proche de la fin du secteur. Les débits les plus importants ont lieu au printemps, au début de l'été et à la transition automne-hiver. Ce qui change par rapport au secteur précédent, c'est la réduction de l'importance des forts débits au début du printemps et à la transition automne-hiver, ainsi que l'augmentation de l'importance des forts débits aux mois d'été (une influence majeure du climat tropical). Les débits caractéristiques montrent

aussi qu'il y a une augmentation des crues les plus fortes au mois de janvier et une réduction des crues les plus fortes au début du printemps. Ainsi que pour les débits moyens, les débits de crue et de pleins bords augmentent fortement jusqu'à la section de Porto Bananeiras, et après cette section on observe une réduction de cette augmentation. Les débits d'étiage sont de plus en plus faibles, ce qui montre que les étiages deviennent plus importants au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'aval. La variabilité du régime dans ce secteur est encore importante, mais elle se réduit dans la partie la plus aval du secteur. La vitesse de tarissement des nappes est haute et variable dans la majeure partie du secteur, mais cette vitesse de tarissement tend à se réduire en direction de l'aval, où commencent les terrains gréseux. Les résultats de l'image CM montrent que la turbulence dans ce secteur est moyenne, mais elle peut varier en fonction des variations de largeur du chenal et de la présence de rapides. On ne trouve pas des cailloux sur les dépôts de berge, mais on trouve des matériaux sableux mélangés, fortement enrichis en matériaux fins par des laisses de crue boueuses, qui sont déposées sur les berges au moment de la décrue.

Secteur 3 – Ce secteur correspond au tronçon situé entre la section de Porto Paraíso do Norte et la confluence du Paraná. Dans la totalité du secteur, les débits moyens augmentent fortement entre la station d'entrée et la station de sortie. De manière plus détaillée, on voit que les débits moyens augmentent brusquement entre les stations de Porto Paraíso do Norte et de Tapira Jusante ; ils présentent une variation moins brusque entre les stations de Tapira Jusante et de Novo Porto Taquara. Il est probable que ce changement brusque doit aux contributions venues des collines gréseuses qui longent la basse Ivaí. Les débits les plus importants ont lieu pendant les mois d'été, principalement en janvier, au printemps, notamment au mois d'octobre, à la transition automne-hiver. Les débits de crue et de pleins bords sont plus importants dans la partie amont du secteur, car le débordement de l'eau vers la plaine alluviale réduit l'importance de ces débits dans la partie aval du secteur. Les crues les plus fortes ont été observées au mois de mai, mais les mois de janvier et octobre sont aussi importants en raison du nombre de crues. Les étiages ont lieu principalement dans les mois d'hiver, notamment au mois d'août, mais ils sont moins importants dans cette partie du bassin versant. D'après le rapport des moyennes extrêmes, on voit que le régime de débits est moins variable que dans les secteurs précédents. En raison de certains changements de comportement hydrologique et des résultats de l'image CM, ce secteur a été divisé en deux sous-secteurs.

Le **sous-secteur 3A** correspond au tronçon situé entre les stations de Porto Paraíso do Norte et de Tapira Jusante. Dans ce tronçon, les débits de crue et de pleins bords sont plus importants que dans le sous-secteur suivant. Les crues les plus fortes ont lieu au mois de mai, et le mois d'octobre est celui qui présente la plus grande quantité d'événements. En raison de sa position à la transition entre le basalte et le grès, la vitesse de tarissement est un peu plus haute dans ce sous-secteur. D'après les résultats de l'image CM, on voit que ce secteur présente une turbulence moyenne à faible car les échantillons prélevés sur les berges sont en général pauvres en matériaux grossiers. Les dépôts sont riches en sables moyen et fin, et ils sont enrichis en matériaux fins par des laisses de crue très boueuses.

Le **sous-secteur 3B** correspond au tronçon localisé entre la station de Tapira Jusante et la confluence du Paraná. Ce sous-secteur, à très faible pente, se caractérise par la réduction des débits de crue et de pleins bords en raison du débordement d'eau vers la plaine alluviale. Les crues les plus fortes et la plus grande quantité d'événements sont enregistrées au mois de mai. Le mois de janvier présente aussi un grand nombre d'événements, sous l'influence du domaine climatique tropical. En général, la turbulence est très faible et le transport de matériel ne présente pas une

grande compétence. Cependant, pendant les fortes crues, l'Ivaí arrive à remonter la fraction fine de sa charge de fond, et la dépose sur les berges les moins hautes. D'après les résultats de l'image CM, on voit que dans ce tronçon les dépôts sont riches en matériaux fins, mais parfois on peut trouver des couches de matériaux sableux mélangées, ce qui montre que pendant les grandes crues l'Ivaí augmente de façon considérable sa compétence. Il est important de considérer aussi que la dynamique des crues dans ce sous-secteur est très influencée par les variations de niveau hydrométrique du Paraná. Quand les eaux du Paraná sont hautes, elles peuvent freiner la sortie des eaux de l'Ivaí, augmentant ainsi l'extension des crues, mais en réduisant sa compétence.

L'élaboration d'une sectorisation de l'Ivaí basée sur les paramètres hydrologiques et sédimentaires a été importante car elle permet d'ajouter à la proposition finale de sectorisation quelques variables déterminantes pour la morphologie et pour la dynamique processuelle des cours d'eau. L'élaboration d'une sectorisation basée sur des paramètres hydrologiques et sédimentaires a permis aussi la réalisation d'une synthèse de toutes les variables présentées dans le chapitre précédent. A partir du tableau de synthèse auparavant présenté, on a réussi à identifier, malgré la variabilité de position des limites de certaines variables, les principaux points au long de la rivière où se superposent des changements de comportement de ces variables. L'incorporation des informations issues de l'image CM a été importante car ceci a donné une idée de la dynamique sédimentaire en chacun des secteurs identifiés. Dans certains tronçons, ces informations ont été fondamentales pour leur subdivision en deux sous-unités.

Selon Knighton (1998), « il n'est pas prouvé que le débit est un critère effectif pour les classifications, sauf dans les cas où la taille est une considération primordiale ». Cependant, le fait de ne pas prendre en compte les débits dans une étude sur la sectorisation longitudinale d'un cours d'eau mènerait à des résultats peu intéressants du point de vue hydrologique et géomorphologique, car on sait que le débit est une des variables clé pour comprendre la morphologie du chenal et les processus que s'y déroulent. Pour cette raison, on a choisi d'utiliser l'hydrologie et la dynamique sédimentaire comme critères de découpage.

4.1.4. La compartimentation en fonction de la puissance de l'écoulement dans le chenal

En physique, le concept de puissance exprime la quantité d'énergie dépensée par une source par unité de temps ; la puissance exprime l'intensité (ou la vitesse) dans laquelle un travail est réalisé. En hydrologie, l'application du concept de puissance est à l'origine du concept de puissance dans le chenal (*stream power*). Dans un cours d'eau, l'énergie potentielle de l'eau est progressivement transformée en énergie cinétique au fur et à mesure que l'eau coule vers l'aval. Pour que la continuité du flux soit possible, l'énergie cinétique de l'eau doit être plus forte que les forces contraires au mouvement : les forces de friction internes (les tensions de cisaillement visqueux et la turbulence), et les forces de friction aux marges du chenal (frottement sur le fond et les berges). Dans les processus de friction, une partie de l'énergie de l'eau se dissipe sous la forme de chaleur, tandis qu'une autre partie, au-delà d'un certain niveau critique, est utilisée par les mécanismes d'érosion et de transport de sédiments dans le chenal. La puissance de chenal peut être considérée comme l'énergie potentielle dépensée par un cours d'eau lorsque l'eau se déplace au long d'un gradient d'énergie (RHOADS, 1995 ; KNIGHTON, 1998 ; 1999). D'une façon plus simple,

la puissance dans le chenal montre à quel taux un volume unitaire d'eau « tombe » dans un chenal de pente donnée (MIDDLETON et WILCOCK, 1994).

La quantification de la puissance totale dans le chenal peut être faite de plusieurs façons, mais ce calcul est fait plus fréquemment en utilisant l'équation suivante :

$$\Omega = \rho g Q S$$

Où :

Ω = puissance de chenal (en W)

ρ = masse volumique de l'eau (en kg/m^3)

g = accélération de la pesanteur (en m/s^2)

Q = débit (en m^3/s)

S = pente (en m/m)

La puissance peut être calculée aussi en fonction de la quantité d'énergie dépensée par unité de surface du fond du lit. La puissance de chenal spécifique est donnée par l'équation suivante :

$$\omega = \rho g Q S / w$$

où :

ω = puissance de chenal spécifique (en W/m^2)

ρ = masse volumique du fluide (en kg/m^3)

g = l'accélération de la pesanteur (en m/s^2)

Q = débit (en m^3/s)

S = pente (en m/m)

w = largeur du lit (en m)

Une analyse rapide de l'équation de la puissance montre que le produit de $\rho.g$ est une valeur constante ($1\,000\text{ kg/m}^3$ ou $9\,810\text{ N/m}^3$). Ainsi, la puissance sera toujours définie en fonction directe des valeurs du débit (Q) et de la pente (S), et en raison inverse de la largeur du chenal (w). En admettant qu'en théorie la pente d'un cours d'eau tende à se réduire vers l'aval, tandis que le débit tend à augmenter, la puissance de chenal tend à présenter sa valeur maximale dans la partie moyenne du bassin versant.

L'équation de la puissance intègre un ensemble important de variables de la dynamique fluviale. On sait que la capacité de transport des sédiments d'un cours d'eau est contrôlée, outre les caractéristiques inhérentes aux sédiments, par le débit et par la pente. Le débit et la pente sont aussi les principales variables qui contrôlent la puissance de chenal, et pour cette raison la puissance est souvent utilisée dans les études sur la capacité d'érosion et de transport dans les cours d'eau. L'équation de la puissance prend en compte aussi certains aspects de la morphologie de la section et de la dynamique d'écoulement. Il faut bien observer que dans la valeur du débit utilisée dans l'équation, la largeur et la profondeur du chenal, ainsi que la vitesse moyenne y sont comprises. Pour cette raison, la puissance est elle aussi souvent utilisée dans les travaux de morphologie fluviale. Selon Gordon *et al.* (2004) la puissance de chenal « est un indice utile pour décrire la capacité érosive des

chenaux, et il peut être mis en relation avec la forme du profil en long, le style de chenal, le développement de formes de fond, et le transport des sédiments ».

Afin de mieux connaître la distribution amont-aval de l'énergie dans l'Ivaí, le calcul des puissances a été fait pour 14 tronçons de l'Ivaí. Pour l'élaboration de ces calculs, on a utilisé les valeurs de débit de pleins bords et les pentes moyennes précédemment présentées. Pour la largeur, on a utilisé des informations mises à disposition par la SUDERHSA, et pour certaines sections on a mesuré la largeur à partir d'images satellitales de moyenne et haute résolution spatiale et à partir de photos aériennes (Tableau 13).

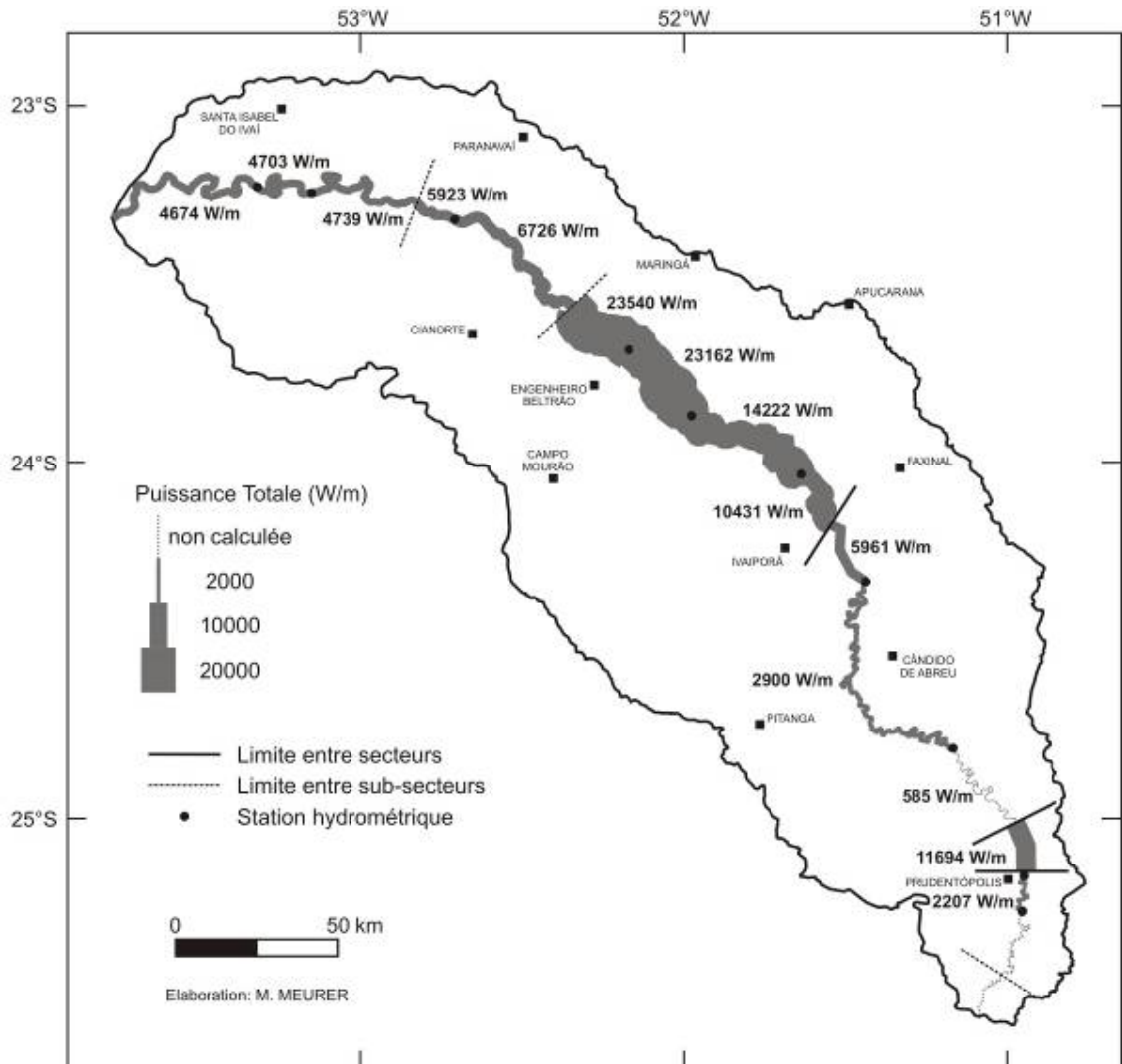


Figure 92. Distribution des puissances totales le long de l'Ivaí.

Sur la carte de puissances totales (Figure 92), on observe que la distribution des puissances totales au long de l'Ivaí est très variable. Comme prévu théoriquement, les parties amont et aval du bassin versant présentent des valeurs de puissance plus faibles par rapport à la partie intermédiaire. Dans la partie amont, les puissances sont en général faibles, mais dans le tronçon situé entre Rio dos Patos et la confluence de la São João, en raison de la forte pente, la puissance monte à près de 12 000 W/m. Plus en aval, la

réduction de la pente au début du secteur 3 a comme effet une forte chute dans les valeurs de la puissance. Dans la partie moyenne du bassin versant, le sous-secteur 4-A est celui qui concentre les puissances les plus importantes. La valeur la plus importante a été calculée dans le tronçon localisé entre la station de Porto Bananeiras et le début du sous-secteur 4-B, où la puissance totale a atteint plus de 23 000 W/m. Dans la partie aval, les puissances sont relativement homogènes, et les valeurs sont comprises entre environ 4 500 W/m et 6 800 W/m.

Afin de permettre la comparaison entre différents tronçons d'un même cours d'eau ou de plusieurs cours d'eau entre eux, on utilise plus fréquemment la puissance spécifique. Cette dernière exprime l'énergie dépensée par unité de surface du chenal. Variable-clé pour la compréhension de la dynamique sédimentaire, la puissance spécifique est souvent utilisée aussi pour comprendre les caractéristiques morphologiques du chenal et de la plaine (NANSON et CROKE, 1992). Plus récemment la puissance spécifique a été aussi utilisée pour l'identification de tronçons de même énergie dans certaines études de sectorisation fluviale (KNIGHTON, 1999 ; SCHMITT, 2001 ; ASTRADE, 2005 ; PETIT *et al.*, 2005 ; PETIT *et al.*, 2007). Pour prendre en compte l'importance de la puissance spécifique dans le contrôle de la dynamique fluviale, une carte de puissances spécifiques de l'Ivaí a été élaborée (Figure 93).

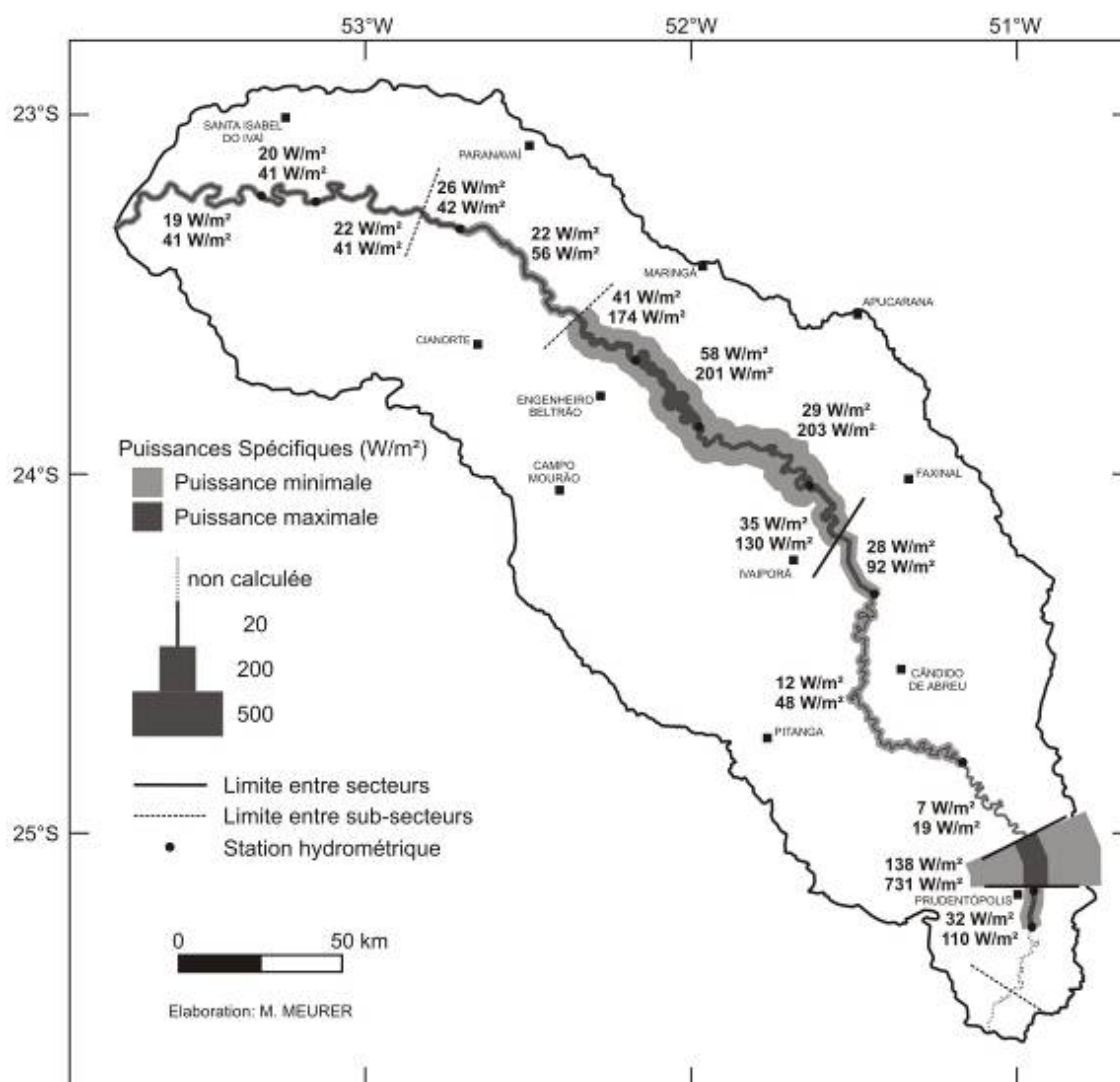


Figure 93. Distribution des puissances spécifiques minimales et maximales dans le bassin versant de l'Ivaí.

La carté élaborée présente les valeurs de puissance minimale et maximale calculées pour chacun des 14 tronçons distingués en fonction des changements de pente et de débit. Ces valeurs ont été calculées en utilisant la largeur de lit maximale et minimale identifiée sur les images satellitales et sur les photos aériennes (Tableau 13). Malgré les limites de cette méthode, les résultats trouvés sont relativement fiables et ils peuvent être le point de départ de nouvelles études sur la distribution amont-aval des puissances spécifiques de l'Ivaí.

Selon les résultats obtenus, on voit que la distribution des puissances spécifiques du chenal de l'Ivaí est variable. Au premier coup d'œil, on voit que les puissances sont relativement faibles dans les parties amont et aval du bassin versant, tandis que dans la partie intermédiaire du bassin versant, elles sont relativement importantes.

Tableau 13 – Valeurs utilisées pour le calcul des puissances de chenal de chaque tronçon

Tronçon	Qpb (m³/s)	S (m/m)	Ω (W/m)	w min (m)	w max (m)	ω min (W/m²)	ω max (W/m²)
<i>De São Pedro à Rio dos Patos</i>	225	0,001	2 207	20	70	32	110
<i>De Rio dos Patos à la confluence de la São João</i>	149	0,008	11 694	16	85	138	731
<i>De la confluence de la São João à Tereza Cristina</i>	149	0,0004	585	30	85	7	19
<i>De Tereza Cristina à Porto Espanhol</i>	739	0,0004	2 900	60	248	12	48
<i>De Porto Espanhol au début du secteur 4</i>	1 519	0,0004	5 961	65	210	28	92
<i>Du début du secteur 4 à Ubá do Sul</i>	1 519	0,0007	10 431	80	295	35	130
<i>De Ubá do Sul à Vila Rica</i>	2 071	0,0007	14 222	70	485	29	203
<i>De Vila Rica à Porto Bananeiras</i>	3 373	0,0007	23 162	115	400	58	201
<i>De Porto Bananeiras au début du sub-secteur 4-2</i>	3 428	0,0007	23 540	135	581	41	174
<i>Du début du sub-secteur 4-B à Porto Paraíso do Norte</i>	3 428	0,0002	6 726	120	312	22	56
<i>De Porto Paraíso do Norte au début du sub-secteur 4-C</i>	3 019	0,0002	5 923	142	231	26	42
<i>Du début du sub-secteur 4-C à Tapira Jusante</i>	3 019	0,00016	4 739	115	212	22	41
<i>De Tapira Jusante à Novo Porto Taquara</i>	2 996*	0,00016	4 703	115	235	20	41
<i>De Novo Porto Taquara à la confluence du Paraná</i>	2 978	0,00016	4 674	115	250	19	41

* Qpb estimé à partir des débits de Porto Paraíso do Norte et de Novo Porto Taquara

Dans la partie amont du bassin versant, les puissances sont relativement faibles. Ceci est normal car les débits dans le haut bassin sont généralement faibles et la pente, initialement raide, devient souple sur la surface du 2^{ème} Plateau. Des variations de largeur du lit résulte un écart important entre la puissance maximale et la puissance minimale calculés dans ce secteur.

Le secteur 2 est celui qui présente les puissances spécifiques les plus importantes. Ce secteur présente une puissance minimale d'environ 138 W/m^2 , et une puissance maximale d'environ 731 W/m^2 , les puissances minimale et maximale les plus élevées du bassin versant. La combinaison d'une forte pente et d'un lit encaissé, étroit, est responsable de ces valeurs de puissance élevées. Hormis le secteur 2, le sous-secteur 4-A présente aussi des valeurs de puissance importantes. Dans le tronçon situé entre les stations de Vila Rica et de Porto Bananeiras, on observe une puissance minimale de 58 W/m^2 , la deuxième plus élevée du bassin versant. Dans le tronçon situé entre les stations d'Ubá do Sul et de Vila Rica, on observe une puissance maximale d'environ 203 W/m^2 , la deuxième puissance la plus importante du bassin versant. L'association d'une pente moyenne, de débits de pleins bords importants et d'un chenal relativement étroit explique ces valeurs de puissance observées dans le sous-secteur 4-A. Cependant, il faut observer que l'écart entre les puissances minimales et maximales est très important, ce qui est lié à l'importante variabilité de la largeur du chenal dans ce sous-secteur. L'écart le plus important entre la puissance maximale et minimale peut être observé dans le tronçon situé entre les stations d'Ubá do Sul et de Vila Rica, où la puissance maximale est sept fois plus élevée que la puissance minimale.

La partie aval du bassin versant, (secteurs 4-B et 4-C) se caractérise par des valeurs de puissance spécifique relativement faibles et homogènes. Les puissances minimales se tiennent autour de 20 W/m^2 tandis que les puissances maximales sont d'environ 40 W/m^2 . La pente très douce, la faible variation des valeurs de débit de pleins bords et la largeur relativement constante du chenal expliquent cette variation réduite des puissances.

Selon Yang et Song (1979), les cours d'eau tendent toujours à s'ajuster de façon à réduire les dépenses d'énergie. Ainsi, plus forte est la puissance, plus il est probable que le tronçon aie tendance à s'ajuster. Petit *et al.* (2005) présente une brève révision des travaux portant sur le rapport entre la puissance spécifique et la capacité de changement du chenal. D'après eux, des chenaux à méandres actifs non confinés nécessitent des puissances supérieures à $30 - 35 \text{ W/m}^2$ pour s'auto-ajuster face aux changements apportés par des aménagements ou des contraintes extérieures ; dans les rivières où la puissance dépasse les 100 W/m^2 la dynamique de modification du tracé est très active. D'après l'ensemble des valeurs de puissances spécifiques, mis à part le secteur 2 où la forte pente élève la valeur des puissances, les valeurs des puissances minimales observées sont inférieures à 58 W/m^2 , et les valeurs maximales sont inférieures à 203 W/m^2 . Dans certains tronçons, ces valeurs de puissance seraient suffisantes pour une mobilité du chenal ou des processus actifs, mais il faut prendre en considération le fait que la majeure partie du chenal de l'Ivaí est encaissée entre des berges rocheuses, ce qui ne lui permet pas une grande mobilité.

La distribution des puissances dans l'Ivaí est contrôlée majoritairement par la géologie car les contrôles structuraux et la lithologie déterminent les changements abrupts de pente observés. D'après la carte de puissances spécifiques, on voit que le chenal de l'Ivaí peut être séparé en cinq secteurs en fonction de la puissance :

- **Secteur 1** – correspond au tronçon entre les sources et la station de Rio dos Patos. En raison des faibles débits et de sa pente douce, ce secteur présente des puissances faibles à moyennes. Les valeurs s'élèvent dans les endroits où le chenal est plus étroit et encaissé ;
- **Secteur 2** – correspond au tronçon entre la section de Rio dos Patos et la confluence de la São João. La forte pente et le lit encaissé expliquent des valeurs de puissances très élevées. Mais le fort contrôle imposé par la géologie et par le relief empêche le chenal de modifier son tracé ;

- **Secteur 3** – correspond au tronçon entre la confluence de la São João et le *knickpoint* qui marque la limite supérieure du secteur 4 du profil en long. La pente douce et le chenal un peu plus large sont responsables de valeurs de puissance pas très importantes. Des puissances un peu plus importantes sont observées dans la partie aval de ce secteur, après la station de Porto Espanhol ;
- **Secteur 4** – correspond au tronçon entre le *knickpoint* qui marque la limite supérieure du secteur 4 du profil en long et le pont qui relie les villes de Doutor Camargo et Jussara (limite supérieure du sub-secteur 4-B du profil en long). Les débits de pleins bords sont relativement forts, la pente est moins douce et le chenal présente des variations de largeur importantes. Il en résulte des valeurs de puissance très variables, parfois relativement élevées. Il est probable que dans le cas d'un changement dans les facteurs de contrôle en raison de l'aménagement de l'Ivaí, ce tronçon serait le premier à montrer des signes d'ajustement, car il présente des valeurs de puissances assez élevées et une liberté supérieure à celle du tronçon 2.
- **Secteur 5** – correspond au tronçon entre le pont qui relie les villes de Doutor Camargo et Jussara (limite supérieure du sous-secteur 4-B du profil en long) et la confluence avec le Paraná. La pente est très faible et les débits de pleins bords ne sont pas très élevés à cause des débordements dans la plaine. En conséquence, les puissances sont relativement faibles et constantes. On peut admettre que dans ce secteur l'Ivaí le lit présente une faible capacité d'auto-ajustement à des changements apportés par des aménagements.

L'étude des puissances dans l'Ivaí est très importante car elle permet de subdiviser la rivière en cinq secteurs de même degré d'énergie. En sachant que la puissance est directement liée aux mécanismes d'érosion, transport et dépôt des sédiments, il est probable que dans chaque secteur délimité ces mécanismes se déroulent de façon relativement homogène. Ainsi, l'utilisation de ce découpage dans une sectorisation de synthèse est très importante, car elle apporte non seulement des informations sur l'énergie dépensée dans le chenal, mais aussi des informations implicites sur la dynamique hydro-sédimentaire de chaque tronçon.

4.2 Sectorisation de synthèse des cours d'eau du bassin versant de l'Ivaí

La sectorisation synthétique des cours d'eau du bassin de l'Ivaí a été faite à partir de la superposition de toutes les sectorisations auparavant élaborées. Pour ceci, on a utilisé la base du réseau hydrographique à l'échelle du 1/1 000 000^{ème}. Le choix d'utiliser le réseau hydrographique à cette échelle est imposé par la qualité des données utilisées dans le travail d'élaboration de la sectorisation de l'Ivaí. La majeure partie des données utilisées à l'échelle du bassin a été originellement prélevée à l'échelle régionale, de sorte que l'utilisation d'une échelle plus fine pour la sectorisation finale conduirait à une extrapolation excessive des résultats obtenus à partir des informations régionales. De plus, cette échelle cartographique est la même que celle utilisée par le SEMA - Secrétariat de l'Environnement et des Ressources en Eau de l'Etat du Paraná et par la SUDERHSA pour les plans d'aménagement des ressources hydriques au niveau de l'Etat du Paraná.

Le travail de synthèse a commencé par la superposition du réseau hydrographique sur la carte des écorégions. Ensuite, chaque tronçon du réseau hydrographique a été

affecté à l'écorégion à laquelle il appartient. Pour la majeure partie des tronçons, le point de séparation entre deux types a été placé sur les limites des écorégions, mais dans les cas où une confluence se trouvait très proche de la limite de l'écorégion, on a utilisé la confluence comme point de séparation. Ceci fait, on a superposé à la carte basée sur les écorégions les limites des tronçons issus de la sectorisation du profil en long et de la sectorisation faite en fonction de la puissance de chenal. En fonction de ces limites, on a ainsi raffiné le découpage de la Dos Patos et de l'Ivaí.

Une fois cet effort de synthèse fait, les cours d'eau du bassin de l'Ivaí ont été classés en 17 types (Figure 94). Chaque type a été identifié par un code hiérarchisé composé de trois lettres et deux chiffres. Les trois lettres renvoient à la première échelle d'analyse et identifient l'écorégion à laquelle appartiennent les tronçons ; le premier chiffre renvoie à la deuxième échelle, celle de la subdivision de l'écorégion ; le dernier chiffre renvoie à la troisième échelle d'analyse et identifie les différents types de tronçons dans une même subdivision d'écorégion. Chacun des 17 types identifiés a donc été donc selon ces principales caractéristiques :

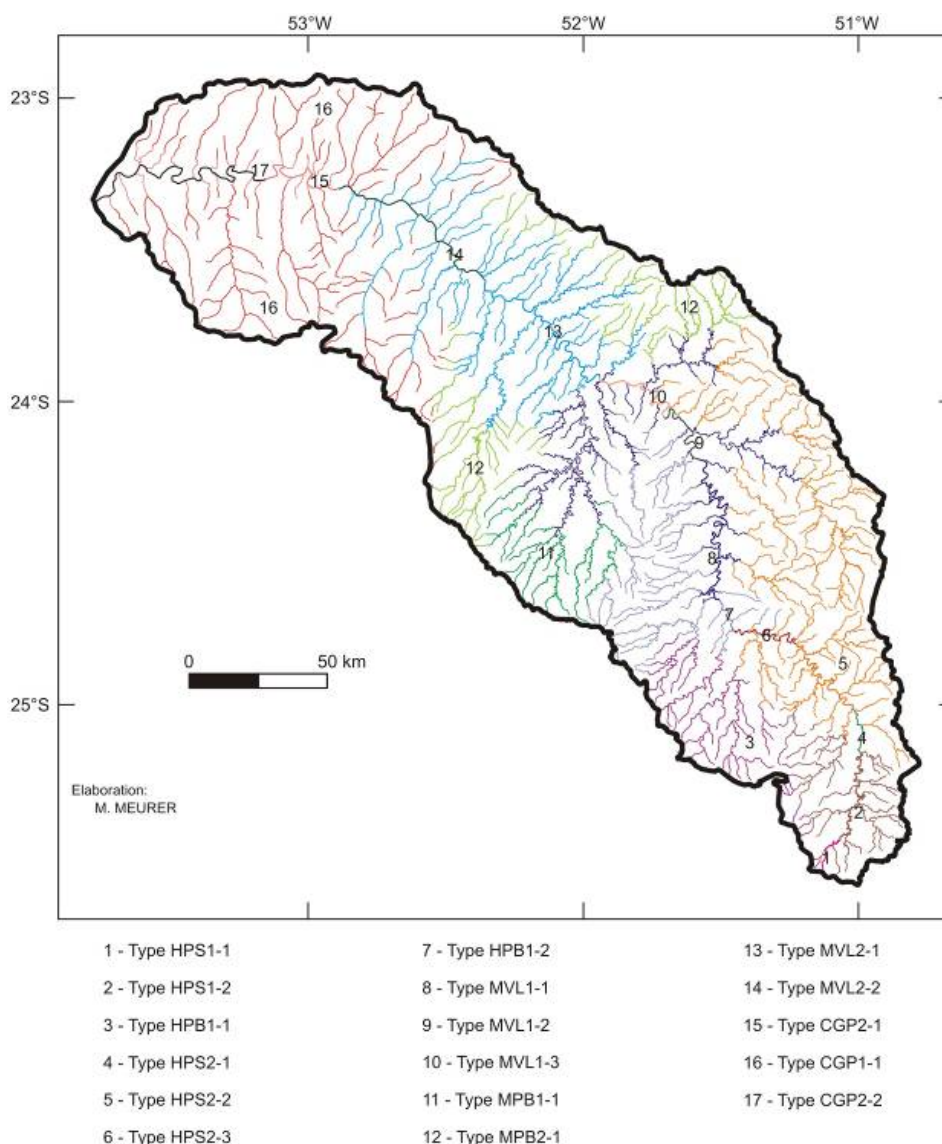


Figure 94. Sectorisation de synthèse des cours d'eau du bassin versant de l'Ivaí.

HPS1-1 – Le type HPS1-1 (Figure 95) correspond aux premiers kilomètres de la Dos Patos, dans le haut bassin de l'Ivaí. Ce tronçon se trouve sur la partie haute de l'escarpement du 3^{ème} Plateau, celle qui est tournée vers le 2^{ème} Plateau, et les altitudes sont comprises entre 700 m et 1 300 m. Le cours d'eau est soumis à un climat du type tempéré humide, avec été moins chaud et sans saison sèche. Le total pluviométrique se trouve autour de 1600 mm par an. Les terrains drainés par ce tronçon sont majoritairement basaltiques, coupés par des *dikes* de diabase qui prennent la direction préférentielle SE-NO. Sur le *bedrock*, on trouve des formations superficielles en général peu profondes et riches en particules minérales (des Neosols Lithiques, des Cambisols et des Latosols de façon secondaire). Originellement, ce tronçon était occupé par la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, mais actuellement l'occupation des sols est plus variée. Le chenal, qui coule dans une vallée assez fermée, est relativement étroit, fortement contrôlé par la structure et soumis à une très forte pente (pente moyenne d'environ 2,5 %). Le cours d'eau coule souvent sur le *bedrock*, et le lit peut parfois présenter des rapides, des marches et des petites chutes. La principale caractéristique hydrologique de ce tronçon est sa rapide capacité de réponse aux forts événements pluviométriques. Pendant les fortes précipitations, la montée et la descente de l'eau peut se faire de façon très rapide (les *flash floods* décrites dans la littérature). La charge sédimentaire est formée principalement d'un mélange de matériaux grossiers (des granules et des graviers mélangés au sable grossier et moyen), avec une participation moins importante des fractions les plus fines. Cette charge est déplacée principalement pendant le passage des forts débits de crue.

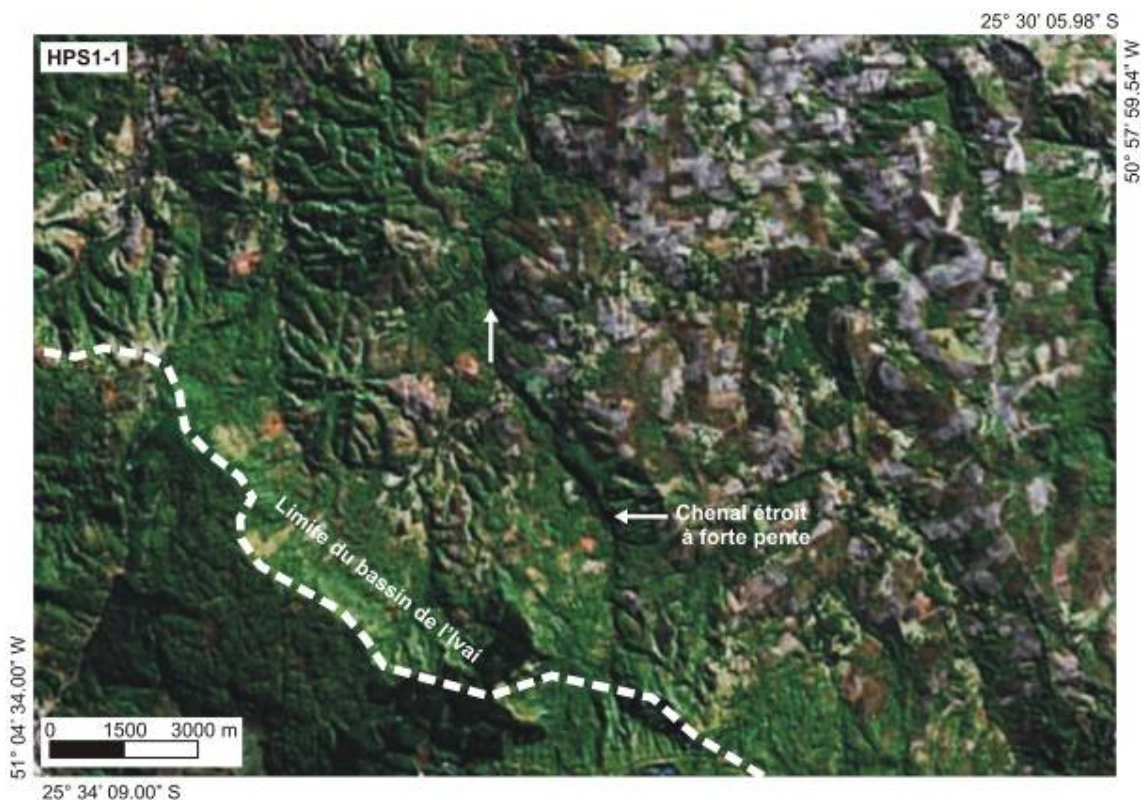


Figure 95. Image du tronçon de type HPS1-1.

HPS1-2 – Le type HPS1-2 correspond aux cours d'eau du 2^{ème} Plateau, aux altitudes comprises entre 600 m et 1 000 m (Figure 96). Ces cours d'eau sont soumis à un climat du type tempéré humide, avec été moins chaud et sans saison sèche, cependant les totaux

pluviométriques ne dépassent pas les 1600 mm annuels. Les précipitations sont distribuées de façon inégale car elles sont influencées par la topographie. Les surfaces drainées correspondent aux séquences sédimentaires paléozoïques, qui sont recouvertes par des formations superficielles relativement épaisses et bien développées (des Argisols et des Latosols). Les cours d'eau étaient originellement entourés par la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, avec une présence importante de l'*Erva-Mate*. Les chenaux sont en générale étroits et sinueux, cette sinuosité étant fortement contrôlée par la structure. Les contrôles structuraux sont aussi responsables de l'occurrence de quelques marches et chutes observées dans ces cours d'eau. Ces tronçons tendent cependant à présenter une pente moyenne relativement faible (autour de 0,1 %). En termes hydrologiques, ces cours d'eau présentent une forte augmentation amont-aval des débits, et pendant les épisodes pluviométriques les plus intenses ils répondent aussi de façon relativement rapide. La vitesse de vidange des nappes phréatiques est très variable, mais fréquemment forte. Pendant les crues, la puissance augmente de façon importante et ces chenaux sont soumis à une forte turbulence, qui arrive à mettre en suspension les matériaux sédimentaires les plus grossiers (jusqu'à des granules et petits graviers) normalement transportés au fond du chenal. C'est pour cette raison qu'on peut trouver des dépôts de ces matériaux grossiers sur les berges, enrichis par les matériaux fins de la phase de décrue.

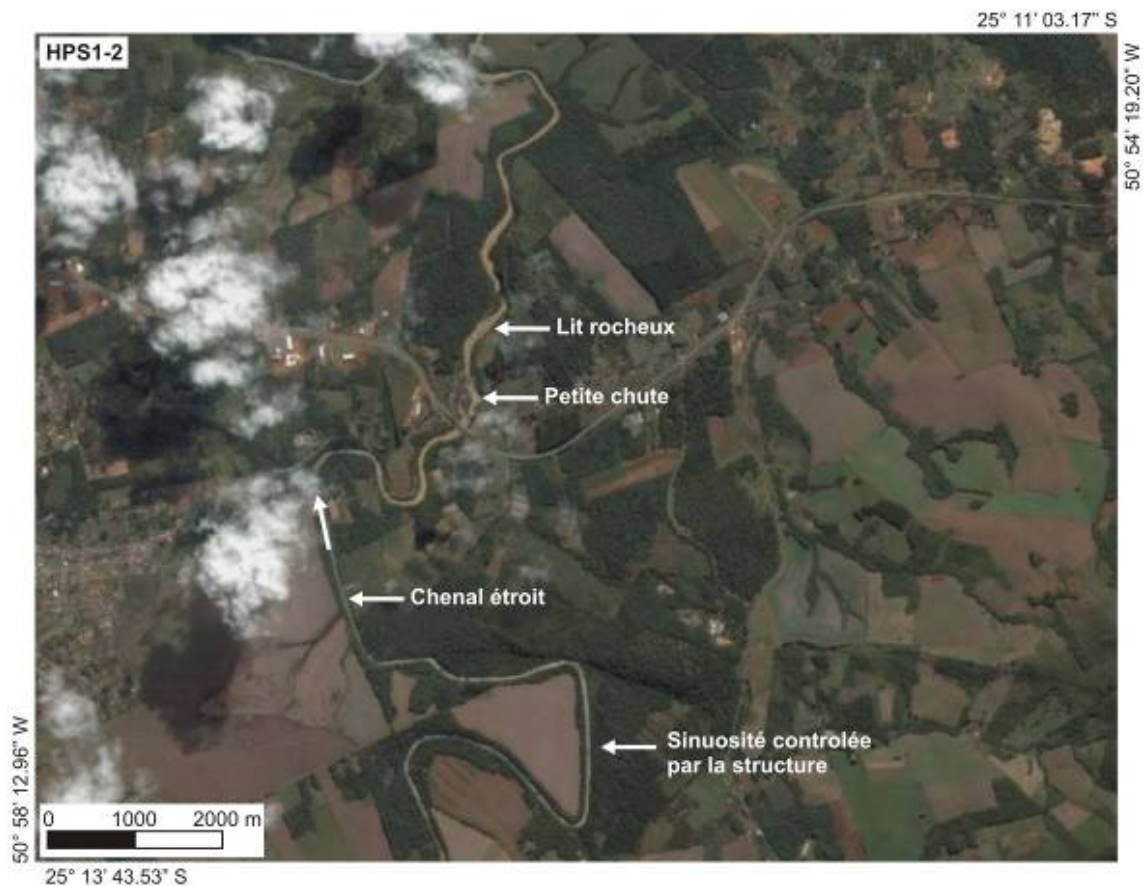


Figure 96. Image du chenal de type HPS1-2.

HPB1-1 – Le type HPB1-1 correspond aux tronçons qui se trouvent sur la partie haute de l'escarpement du 3^{ème} Plateau, celle qui est tournée vers le 2^{ème} Plateau (Figure 97). Ces cours d'eau se trouvent à des altitudes qui varient entre 700 m et 1 300 m et ils sont soumis à un climat tempéré humide avec un été moins chaud et sans saison sèche. Le total pluviométrique est inférieur à 1600 mm par an, mais parfois il peut atteindre cette valeur. Ces cours d'eau drainent des terrains où le basalte prédomine comme *bedrock*, coupé par des *dikes* de diabase qui prennent la direction préférentielle SE-NO. En surface, la couverture pédologique est formée par des sols peu profonds, peu développés et riches en matériaux minéraux (des Néosols Lithiques, des Cambisols et des Latosols de façon secondaire). La végétation originelle qui entourait ces cours d'eau était la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, néanmoins l'occupation agricole a beaucoup changé la couverture végétale. Les chenaux sont en général étroits, fortement contrôlés par la structure de la roche sous-jacente. Le *bedrock* peut affleurer au fond du chenal, et peut être à l'origine de rapides, de marches et de petites chutes. En termes hydrologiques, ces cours d'eau ont tendance à répondre rapidement aux épisodes pluvieux extrêmes ; les eaux peuvent monter et

descendre de façon très rapide (*flash floods*). La charge sédimentaire est majoritairement grossière (des granules et des graviers mélangés au sable grossier et moyen), avec des fractions plus fines en petite quantité. Cette charge est remobilisée principalement à l'occasion des forts débits de crues.



Figure 97. Image des tronçons du type HPB1-1.

HPS2-1 – Le type HPS2-1 correspond au tronçon de la Dos Patos qui se trouve sur le 2^{ème} Plateau, entre les altitudes de 508 m et 700 m (Figure 98). Ce tronçon draine les séquences sédimentaires qui forment le 2^{ème} Plateau, et qui sont recouvertes par des sols peu profonds et pas très bien développés, riches en matériaux minéraux (des Néosols Lithiques, avec occurrence secondaire de sols un peu mieux développés, comme les Argisols et les Latosols). Ce tronçon est soumis à un climat du type tempéré avec été moins chaud et sans saison sèche. Les précipitations sont inférieures à 1 600 mm par an et leur distribution spatiale est influencée par la topographie. Originellement, ce tronçon était entouré par la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, avec importante occurrence de l'*Erva-Mate*. Le chenal creuse son sillon au fond d'une vallée étroite, aux versants raides. Son parcours est sinueux, avec des méandres amples et irréguliers, non mobiles, complètement ancrés par la structure. Celle-ci confère à ce tronçon quelques points de dénivèlement abrupt (des marches et des chutes) et beaucoup de rapides. La caractéristique la plus remarquable de ce tronçon est sa forte pente moyenne (autour de 0,8 %). En raison de cette forte pente, la puissance de chenal est aussi très forte, ce qui indique que ce tronçon possède une importante capacité d'érosion et de transport de sédiments. En quelques endroits, on peut trouver des petites îles formées en raison de l'élargissement du chenal, qui érode une partie de ses berges, ou de la coupure d'une petite partie de la convexité de certains méandres. Les données hydrologiques ont montré que l'augmentation amont-aval des débits moyens et de crue dans cette partie de l'Ivaí est très importante, de

sorte qu'on peut estimer que ce tronçon est soumis à des fortes crues, avec une très forte turbulence, capable de suspendre des cailloux et des galets dans la colonne d'eau, et de les déposer sur les berges. Il est probable que ces processus ont lieu au début du printemps et pendant l'été, quand les débits les plus forts sont enregistrés plus fréquemment.



Figure 98. Image d'une partie du tronçon du type HPS2-1.

HPS2-2 – Le type HPS2-2 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 2^{ème} Plateau, à des altitudes comprises entre 500 m et 1 200 m, et au tronçon principal de l'Ivaí entre la confluence du São João et la station de Tereza Cristina (Figure 99). Ils se trouvent dans le domaine du climat tempéré humide, avec un été moins chaud et sans saison sèche. Les totaux pluviométriques sont inférieurs à 1600 mm annuels, mais la distribution des précipitations se réalise de façon inégale en fonction des variations de la topographie. Les terrains drainés sont formés par les séquences sédimentaires paléozoïques, et ces séquences sont recouvertes par des sols pas très profonds et riches en matériaux lithiques (notamment des Néosols Lithiques, avec occurrence secondaire de sols mieux développés, comme des Argisols et des Latosols). La végétation qui originellement entourait les cours d'eau était la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, avec une présence importante de l'*Erva-Mate*. Les chenaux sont en générale étroits et relativement sinueux, et ils incisent les terrains moins élevés qui se trouvent entre les *dikes* de diabase. Ces *dikes*, orientés préférentiellement SE-NO, imposent un certain contrôle sur le réseau hydrographique, car ils jouent le rôle de barrières topographiques face auxquelles les cours d'eau doivent adapter leur parcours. Les cours d'eau tendent aussi à suivre la direction préférentielle des *dikes*, et au long de leur parcours ils reçoivent la contribution d'affluents très courts qui descendent les versants dans l'espace réduit situé entre deux *dikes*. Certains cours d'eau majeurs arrivent à couper transversalement les *dikes*. La structure est responsable aussi de la fréquente occurrence de marches et de chutes observées dans ces cours d'eau, surtout

quand ils descendent les versants les plus raides. Néanmoins, dans le chenal de l'Ivaí la pente moyenne n'est pas très raide (environ 0,04%). En termes hydrologiques, ce tronçon présente une forte augmentation des débits moyens et de crue. Le début du printemps et l'été sont deux périodes importantes pour les forts débits. Les puissances spécifiques sont relativement faibles, mais il est probable que ces valeurs puissent être un peu plus élevées car, en raison de l'inexistence d'une station hydrologique dans ce tronçon, on ne connaît pas avec précision les débits moyens et de pleins bords. Les étiages ne sont pas très importants, et la vitesse de tarissement des nappes souterraines est très variable, mais en général elle est haute. La charge sédimentaire transportée dans ce tronçon est relativement grossière, avec du sable grossier et parfois des granules et des graviers, ce qui est une évidence de la forte turbulence qui a lieu pendant les crues. Comme cela a été observé sur d'autres tronçons de l'Ivaí, ces matériaux grossiers sont remontés et déposés sur les berges pendant le pic des crues, et ils sont enrichis en limon et argile pendant la phase de décrue.



Figure 99. Image d'une région à chenaux du type HPS2-2.

HPS2-3 – Le type HPS2-3 correspond aux tronçons de l'Ivaí localisés sur les séquences sédimentaires du 2^{ème} Plateau, entre la station de Tereza Cristina et la confluence avec la Pedrinho (Figure 100). Les altitudes au bord du chenal sont comprises entre 470 m et 500 m, mais les surfaces les plus élevées au voisinage du chenal sont à une altitude d'environ 600 m. Ce tronçon est soumis à un climat de type tempéré humide, avec un été moins chaud et sans saison sèche. Les totaux pluviométriques sont inférieurs à 1600 mm annuels, et les précipitations sont distribuées de façon inégale en raison des variations de la topographie. En ce qui concerne les formations superficielles qui recouvrent les séquences sédimentaires paléozoïques, elles sont en général peu profondes sur les versants les plus raides (des Néosols Lithiques), et un peu plus développées dans les terrains moins inclinés (des Argisols et des Latosols). Sur ces sols, la végétation qui originellement entourait l'Ivaí était la

Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, avec une importante présence d'*Erva-Mate*. Le chenal est incisé dans une vallée pas très ouverte longée par des versants relativement raides. A certains endroits, on commence à trouver des petits terrasses d'origine fluviale, coincés entre les versants raides et le chenal. Dans cette vallée, l'Ivaí coule avec une pente relativement douce (0,04%) et développe un style sinueux, avec d'amples méandres irréguliers et géométriques fortement contrôlés par la structure. Ce tronçon présente une forte augmentation des débits moyens et de crue car il reçoit les contributions des affluents qui drainent le plateau de Pitanga, une des régions les plus arrosées du bassin de l'Ivaí. Les débits les plus importants ont lieu au début du printemps et pendant l'été, et secondairement à la transition automne-hiver. Les étiages deviennent un peu plus importants que dans les tronçons précédents, et pour ces raisons la variation des débits est aussi importante. La vitesse de tarissement des nappes souterraines est relativement haute et variable. Les valeurs de la puissance spécifique maximale ne sont pas très importantes (environ 50 W/m²), ce qui montre que la capacité érosive et de transport est un peu limitée par la faiblesse de la pente. Une des caractéristiques plus remarquables de ce tronçon est la charge sédimentaire : en raison de la turbulence réduite, les matériaux les plus grossiers deviennent de plus en plus rares dans les dépôts des berges qui deviennent plus sableux et enrichis en matériaux fins à la décrue.



Figure 100. Image du tronçon de type HPS2-3.

HPB1-2 – Le HPB1-2 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau, à des altitudes comprises entre 600 m et 1 200 m (Figure 101). Ces cours d'eau drainent des terrains basaltiques recouverts par des formations superficielles peu profondes et riches en matériaux minéraux (Néosols Lithiques), avec occurrence de formations un peu mieux développés dans les terrains moins accidentés. Ces cours d'eau se trouvent dans le domaine du climat de type tempéré humide, avec un été tempéré et des précipitations très abondantes, qui dépassent facilement les 1600 mm. La végétation qui originellement entourait ces cours d'eau était la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias*, avec une importante occurrence de l'*Erva-Mate*. La pente est relativement faible, sauf pour les versants tournés vers la vallée de l'Ivaí. En fonction de la faible perméabilité, le réseau hydrographique est très dense, et on observe un fort parallélisme entre les cours d'eau en raison des contrôles structuraux. La sinuosité des chenaux est faible, sauf dans les tronçons d'ordre plus important, où on observe des méandres irréguliers, non mobiles, contrôlés par le *bedrock*. En termes hydrologiques, ces cours d'eau sont très bien approvisionnés en eau en raison des forts totaux pluviométriques annuels. Les débits les plus importants ont

lieu dans les mois d'été et au début du printemps. Ces cours d'eau présentent aussi une variabilité des débits importante, car les eaux peuvent monter très rapidement à l'occasion des événements pluviométriques les plus intenses. Dans le cas du chenal de l'Ivaí, on observe un tronçon à pente relativement douce (0,04%), un style sinueux à méandres amples, irréguliers et immobiles, un chenal avec quelques rapides, le tout étant fortement contrôlé par la structure du *bedrock*. Les débits moyens et de crue augmentent fortement en direction de l'aval, et la variabilité des débits est aussi importante. Les puissances sont variables en raison des variations de la largeur du lit, mais en général elles sont relativement faibles à cause de la pente faible. La charge transportée est riche, peu grossière, car la turbulence plus faible ne peut mettre en suspension les matériaux les plus grossiers dans la colonne d'eau.



Figure 101. Image des cours d'eau du type HPB1-2.

MVL1-1 – Le MVL1-1 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau et qui drainent la partie supérieure de la moyenne vallée de l'Ivaí (Figure 102). Ces cours d'eau traversent les terrains basaltiques et des formations superficielles plus récentes

(dépôts de talus et dépôts fluviaux quaternaires), ainsi que les formations superficielles issues de la pédogenèse. Les altitudes varient entre 300 m et 500 m. Les cours d'eau de ce type se trouvent dans le domaine du climat tempéré humide avec un été chaud et des pluies abondantes. Les totaux pluviométriques dépassent les 1600 mm annuels. La combinaison de la lithologie, des conditions climatiques favorables et du relief moins mouvementé donne des formations superficielles plus profondes et développées (des Nitosols), riches en matériaux fins. La végétation qui originellement entourait ces cours d'eau était la Forêt Saisonnière Semi-décidue. Le réseau hydrographique incise un ensemble de vallées un peu plus ouvertes, avec quelques points étroits, longées par des collines au premier plan, et par les plateaux au deuxième plan. Le réseau présente une densité variable, probablement conditionnée par les caractéristiques du *bedrock*, l'épaisseur et la perméabilité des formations superficielles. Les cours d'eau de premier rang présentent des chenaux étroits et peu sinueux ; au fur et à mesure que le rang augmente les chenaux deviennent plus sinueux, mais comme il a déjà été observé pour les types précédents, cette sinuosité est fortement contrôlée par la structure. Quant au chenal de l'Ivaí, il coule selon une pente moyennement douce (0,04 %), et son tracé est encore sinueux, mais moins qu'auparavant. Les méandres encaissés sont de plus grande taille, et parfois ils sont intercalés entre de longs tronçons rectilignes. Les contrôles structuraux sont toujours importants et ils conditionnent quelques changements de direction du chenal, la présence de rapides et marches. Un autre aspect remarquable du chenal est la variation de largeur du lit mineur, qui devient de plus en plus importante. La dynamique hydrologique est semblable au tronçon précédent, avec une forte augmentation amont-aval des débits moyens et de crue, mais une turbulence un peu faible en raison de la pente douce. Les débits les plus importants ont lieu principalement aux mois d'été, au printemps et à la transition automne-hiver. Les étiages sont plus importants qu'auparavant, ce qui a pour conséquence une forte variation des débits. La vitesse de tarissement des nappes est forte, mais elle peut être très variable selon les caractéristiques du basalte sous-jacent. Les valeurs de puissance sont moyennes à faibles, et pour cette raison le transport de sédiments se limite aux fractions sableuses, limoneuses et argileuses. Dans les dépôts des berges, on retrouve toujours des matériaux de taille moyenne enrichis par les matériaux fins de la décrue.



Figure 102. Image du tronçon du type MVL1-1.

MVL1-2 – Le type MVL1-2 correspond à un tronçon de l'Ivaí relativement court qui se trouve sur le 3^{ème} Plateau, toujours dans l'écorégion de la haute vallée de l'Ivaí (Figure 103). Ce tronçon draine les terrains basaltiques entre 370 m et 410 m, qui sont recouverts par des formations plus récentes (dépôts de talus et dépôts fluviaux quaternaires), ainsi que les formations superficielles issues de la pédogenèse. Le climat qui prédomine dans cette région est le climat tempéré humide avec un été chaud et des pluies abondantes, qui dépassent les 1600 mm annuels. Les formations superficielles sont bien développées, avec des profils profonds et riches en matériaux fins (des Nitosols). Originellement, ce tronçon était entouré par la Forêt Saisonnière Semi-décidue, mais l'usage du sol a modifié beaucoup le paysage. Le chenal est sinueux, avec des méandres amples, irréguliers et immobiles, intercalés avec quelques tronçons plus ou moins rectilignes, ce qui fait que cette sinuosité n'est pas très accentuée. La largeur du chenal est très variable, et le chenal est marqué par l'occurrence fréquente de rapides et d'îles. Par rapport au tronçon amont, la pente est plus forte (0,07 %), et le profil en long présente une certaine concavité. En ce qui concerne l'hydrologie, on observe encore une forte augmentation amont-aval des débits moyens et de crue. La région est relativement bien arrosée, mais on doit prendre en compte aussi que ce tronçon reçoit la contribution venue de l'Alonso, un important affluent de l'Ivaí qui draine le plateau de Faxinal, une région à forts totaux pluviométriques. Les débits les plus importants sont enregistrés au printemps, au début de l'été et à la transition automne-hiver. La variabilité des débits est aussi importante en raison de quelques périodes d'étiage. La vitesse de tarissement des nappes est forte mais très variable, car elle dépend de la qualité du basalte sous-jacent et de l'épaisseur des formations superficielles, ce qui peut varier fortement dans cette région. Par rapport aux puissances spécifiques, la combinaison de forts débits, d'une pente un peu plus raide et d'un chenal avec largeur très variable fait que les puissances soient plus importantes, mais très variables. La puissance spécifique maximale calculée

pour ce tronçon (130 W/m^2) fait presque quatre fois la puissance spécifique minimale. Dans ces conditions, la charge transportée n'est pas très grossière ; les dépôts sur les berges sont composés de matériaux sableux enrichis par les sédiments fins de la décrue.



Figure 103. Image du tronçon du type MVL1-2.

MVL1-3 – Le type MVL1-3 correspond à un tronçon de l'Ivaí qui se trouve sur le 3^{ème} Plateau, en aval d'Ubá do Sul, toujours dans les limites de l'écorégion de la haute vallée de l'Ivaí (Figure 104). Ce tronçon draine les terrains basaltiques situés entre 300 m et 370 m, qui sont recouverts par des formations plus récentes (dépôts de talus et dépôts fluviaux quaternaires), ainsi que les formations superficielles issues de la pédogenèse. Le climat auquel est soumis le tronçon est le climat tempéré humide avec un été chaud et des pluies abondantes, au-dessus de 1600 mm annuels. Les formations superficielles sont en général bien développées, avec des profils profonds et riches en matériaux fins (des Nitosols). La végétation originelle qui entourait ce tronçon était la Forêt Saisonnière Semi-décidue, néanmoins l'usage du sol a fortement modifié le paysage. Le chenal, qui incise une vallée plus ouverte, est moyennement sinueux, avec des méandres amples et irréguliers, non mobiles, ancrés par la structure. La pente moyenne est la même que celle observée dans le tronçon amont (0,07%). Les rapides, dalles rocheuses et îles sont fréquents au long de ce secteur. En termes hydrologiques, ce tronçon est le premier où l'influence tropicale devient un peu plus claire. Les débits les plus importants ont lieu au milieu du printemps, au début de l'été, et à la transition automne-hiver. Les forts débits des mois d'été deviennent plus importants par rapport aux tronçons amont, un trait caractéristique du climat tropical. Les étiages sont encore importants et la vitesse de tarissement des nappes souterraines est une des plus fortes et plus dispersées de tout le bassin versant. La puissance spécifique présente une forte variabilité entre la valeur minimale et la valeur maximale (la puissance maximale fait neuf fois la puissance minimale) en raison des variations de largeur du lit mineur. Cependant, les puissances sont relativement fortes, ce qui indique que ce tronçon

possède une importante capacité érosive et de transport. Les dépôts des berges confirment ces caractéristiques car on trouve des matériaux sableux un peu plus grossiers. Hormis les matériaux sableux, à partir de ce tronçon on commence à retrouver sur les berges des dépôts très boueux, laissés par l'Ivaï au moment de la décrue, quand la turbulence se réduit.

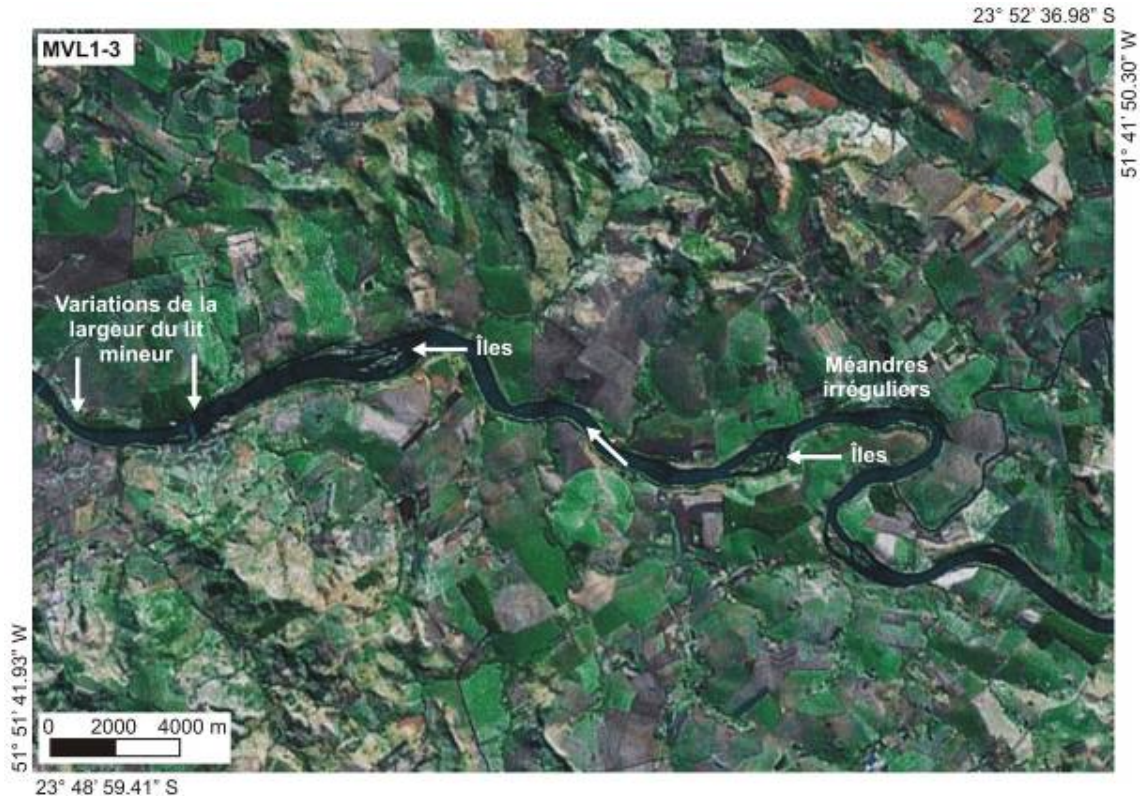


Figure 104. Image du tronçon du type MVL1-3.

MPB1-1 – Les cours d'eau du type MPB1-1 se trouvent sur le 3^{ème} Plateau ; ils drainent les terrains basaltiques qui se trouvent à des altitudes entre 500 et 900 m (Figure 105). Les formations superficielles qui recouvrent ce basalte sont en général peu profondes et mal développées, riches en matériaux minéraux (des Néosols Lithiques). Les cours d'eau sont soumis à un climat de type tempéré humide avec été chaud. Les précipitations sont très abondantes puisqu'elles dépassent facilement les 1600 mm, avec quelques secteurs même au-dessus de 1800 mm. Sur ce plateau d'altitude moyenne, la végétation originelle qui entourait ces cours d'eau était la Forêt Saisonnière Semi-décidue. En raison de la faible perméabilité des basaltes et des formations superficielles peu profondes, le réseau hydrographique est très dense. Les contrôles structuraux sont très présents dans l'organisation du réseau de drainage : à l'échelle du réseau les cours d'eau sont disposés de façon orthogonale, parallèle ou en treillis, tandis qu'à l'échelle du chenal les cours d'eau présentent un style sinueux très anguleux. Les informations sur l'hydrologie de ces cours d'eau ne sont pas disponibles, mais d'après la combinaison des facteurs de contrôle, on peut estimer que, si les débits sont relativement faibles, ils doivent présenter une forte variabilité liée à la dynamique des précipitations. Pendant les fortes pluies, les terrains basaltiques ne sont pas capables de retenir beaucoup d'eau, de sorte que prédomine l'écoulement de surface. Dans les cours d'eau, l'eau monte et descend très vite, de façon similaire à ce qu'on observe pour les tronçons de la tête du bassin versant. Par rapport à la charge sédimentaire, la charge de fond peut présenter des matériaux grossiers (du sable grossier et des cailloux),

mélangés avec des matériaux fins issus de la décomposition des basaltes. En fonction des caractéristiques lithologiques, pédologiques et des forts totaux pluviométriques, il est fortement probable que ces cours d'eau soient des grands fournisseurs de matériaux fins pour l'Ivaí.

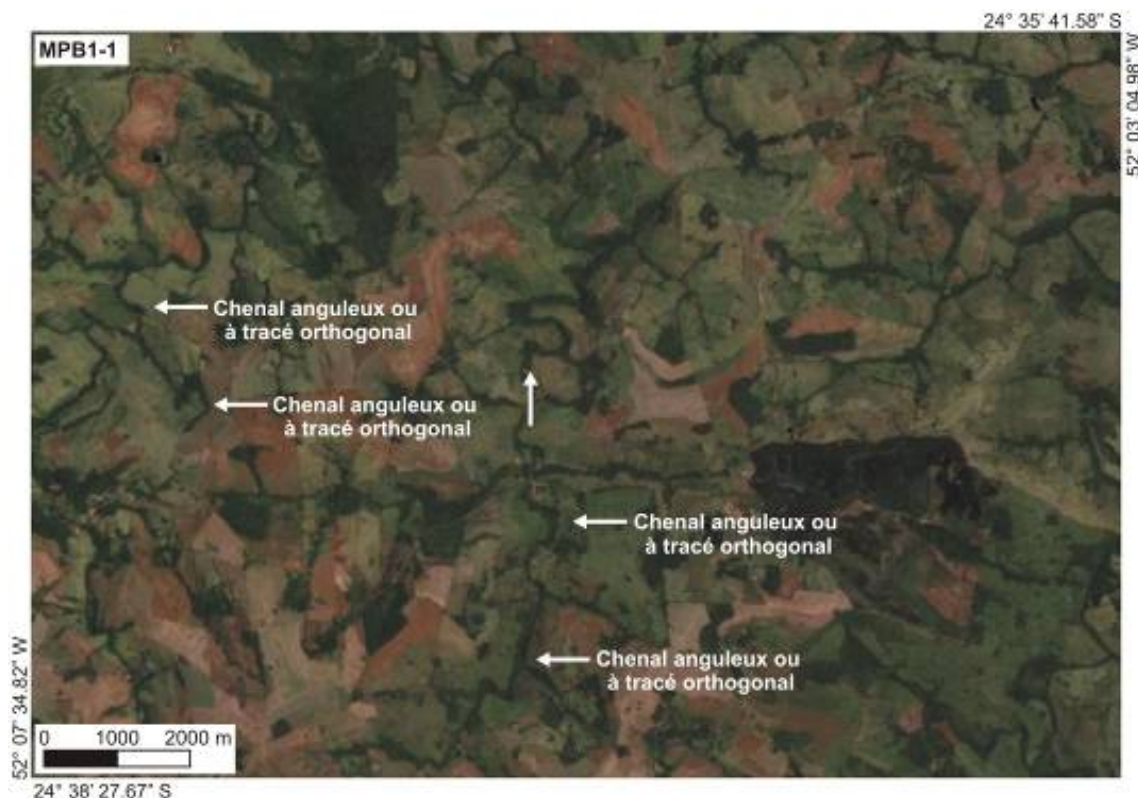


Figure 105. Image des cours d'eau du type MPB1-1.

MPB2-1 – Le type MPB2-1 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau et qui drainent les deux plateaux basaltiques d'altitude comprise entre 500 et 800 m au nord et au sud de l'Ivaí (Figure 106). Sur ces plateaux basaltiques, prédominent les sols peu profonds et pas très développés, riches en matériaux minéraux (des Néosols Lithiques). Les cours d'eau sont soumis à un climat du type tempéré humide à été chaud. Les totaux pluviométriques sont autour de 1600 mm annuels. Originellement, ces cours d'eau étaient entourés par la Forêt Saisonnière Semi-décidue, avec occurrence secondaire de la Forêt Ombrophile Mixte ou Forêt d'*Araucárias* dans les parties les plus hautes. Le réseau hydrographique est moins dense, et organisé selon un style parallèle moins marqué. A l'échelle des chenaux, ils sont moyennement sinueux, avec une sinuosité irrégulière ancrée dans la structure. Les contrôles structuraux sont à l'origine de quelques dénivellements dans les chenaux (des rapides, marches et même des chutes). En termes hydrologiques, ces cours d'eau doivent présenter une certaine variabilité des débits car les précipitations sont moins abondantes et les étiages plus importants (en fonction du climat avec une forte influence tropicale). La vitesse de tarissement des nappes est relativement forte et variable, de sorte que pendant les saisons à faibles précipitations les nappes souterraines n'arrivent pas à soutenir longtemps les débits. En ce qui concerne la charge sédimentaire, il est probable que la charge de fond a des matériaux grossiers, mais ce fait ne pourrait être confirmé que par des prélèvements sur le terrain. Ces cours d'eau doivent transmettre à

l'Ivaí des quantités importantes de matériaux fins issus de la décomposition des basaltes et de l'érosion des sols argileux.



Figure 106. Image des cours d'eau du type MPB2-1.

MVL2-1 – Le type MVL2-1 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau, dans la partie inférieure de la moyenne vallée de l'Ivaí, à des altitudes comprises entre 275 m et 500 m (Figure 107). Ces cours d'eau drainent des terrains basaltiques recouverts par des formations superficielles argileuses, profondes et bien développées (des Nitosols), et parfois recouvertes aussi par des dépôts sédimentaires d'origine gravitaire (talus) et fluviale (des levées naturelles et des petits terrasses). Le climat prédominant dans cette région est le climat tempéré humide à été chaud. Les précipitations annuelles sont moins abondantes, inférieures à 1600 mm. Dans ces conditions, la végétation qui originellement entourait les cours d'eau était la Forêt Saisonnière Semi-décidue, mais l'usage intense des sols à des fins agricoles a supprimé la majeure partie de cette formation végétale. Le réseau hydrographique n'est pas très dense, et il s'incise au fond d'une vallée très ouverte. Les chenaux sont sinueux, avec une sinuosité irrégulière conditionnée par la structure du basalte sous-jacent. Quant au chenal de l'Ivaí, il est aussi moyennement sinueux, avec des méandres amples et irréguliers, parfois intercalés avec des tronçons de faible sinuosité. Il coule avec une pente moyenne (0,07%), au long d'un profil en long relativement concave. En ce qui concerne l'hydrologie, ce tronçon est sous l'influence forte des tronçons amont, mais on arrive quand même à observer dans la dynamique des débits une influence tropicale croissante. Les débits les plus élevés ont lieu à la transition automne-hiver, au début de l'été et au début du printemps. Les étiages sont aussi importants, et la vitesse de tarissement de la nappe souterraine est forte à moyenne, avec une forte variabilité. La puissance spécifique est élevée mais l'écart entre les valeurs de la puissance

minimale et de la puissance maximale est moins important : la puissance maximale fait un peu plus que trois fois la puissance minimale. En raison des fortes puissances, on peut estimer que face à de possibles interférences anthropiques dans l'hydrosystème du bassin de l'Ivaí, ce tronçon possède une forte capacité de modification et d'ajustement. Les valeurs de la puissance spécifique montrent aussi que ce tronçon présente une forte capacité érosive et de transport de sédiments. Les sédiments prélevés présentent une fraction grossière, mais cela a été comme observé dans d'autres tronçons, le matériel fin est très abondant. A la fin des crues, un dépôt très boueux recouvre les matériaux sableux laissés sur les berges.



Figure 107. Image des tronçons du type MVL2-1.

MVL2-2 – Le type MVL2-2 correspond au chenal de l'Ivaí qui se trouve sur le 3^{ème} Plateau, dans la partie inférieure de la moyenne vallée de l'Ivaí, à des altitudes comprises entre 260 m et 275 m (Figure 108). Ce tronçon coule sur les terrains basaltiques recouverts par des formations superficielles argileuses, profondes et bien développées (des Nitosols), et parfois recouverts aussi par des dépôts sédimentaires d'origine fluviale (des levées naturelles et des petites terrasses). Le climat prédominant dans cette région est le climat tempéré humide à été chaud. Les précipitations annuelles sont inférieures à 1600 mm. La végétation qui originellement entourait les cours d'eau était la Forêt Saisonnière Semi-décidue, mais l'usage intense des sols à des fins agricoles a supprimé la majeure partie de cette formation végétale. En ce qui concerne la dynamique hydrologique, les débits moyens et de crue présentent une réduction par rapport à la surface drainée. La cause probable de ce changement de comportement peut être liée au déversement de l'Ivaí sur les dépôts alluviaux adjacents. Dans ce secteur, les berges présentent quelques points bas qui peuvent permettre le passage de l'eau pendant les crues. Les débits les plus importants ont lieu à la transition automne-hiver, au milieu du printemps et au début de l'été. Les étiages sont moins importants qu'auparavant, et ils ont lieu principalement aux mois d'avril et d'août. La vitesse

de tarissement des nappes est faible, de sorte que pendant les étiages ces nappes peuvent soutenir les débits de base de l'Ivaí pendant un certain temps. Le tronçon n'est pas très sinueux, et il coule selon une pente relativement faible (0,02 %) Le profil en long présente une forme faiblement concave. La largeur du chenal varie peu, sauf en certains points où on peut observer des élargissements ou des rétrécissements localisés. Les valeurs de puissance sont moyennes à faibles, en raison de la pente faible, et l'écart entre la puissance minimale et maximale est relativement réduit (la puissance spécifique maximale fait deux fois la puissance spécifique minimale). La charge transportée dans ce tronçon est riche en matériaux fins, mais on peut trouver sur les berges des dépôts riches en sable grossier. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne du chenal, les sédiments deviennent de plus en plus fins en raison de la réduction de la compétence. Sur les berges, pas très loin du chenal, il est possible de rencontrer aussi des endroits un peu moins élevés, probablement des paléo-chenaux, qui peuvent être réactivés pendant les grandes crues.



Figure 108. Image du tronçon de MVL2-2.

CGP2-1 – Le type CGP2-1 correspond aux tronçons qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau et sur la plaine alluviale qui longe les derniers kilomètres de l'Ivaí (Figure 109). Ces tronçons drainent les terrains sédimentaires formés par le grès Caiuá et recouverts par les différentes couches de sédiments d'origine fluviale qui forment la plaine. Le climat qui prédomine sur cette région est du type climat tempéré humide avec un été chaud et un hiver sec. Les précipitations sont inférieures à 1600 mm par an. La végétation qui entourait ces tronçons était la Forêt Saisonnière Semi-décidue et la Steppe (Campo). La Forêt Saisonnière Semi-décidue se concentrait plutôt aux bords des cours d'eau, sur la levée naturelle, tandis que la Steppe occupait les zones de plaine soumises à des inondations périodiques. L'usage agricole a fortement changé la couverture végétale sur cette région. Le réseau hydrographique n'est pas très dense, et les chenaux sont relativement sinueux, avec une certaine mobilité. Les contrôles structuraux sont présents, et l'on distingue quelques

changements de direction de drainage ou des alignements de cours d'eau liés à la structure de la roche sous-jacente. Quant au chenal de l'Ivaí, il coule avec une pente très faible (0,016 %), est faiblement sinueux, avec quelques méandres très amples et irréguliers, actuellement non mobiles. Les contrôles structuraux sont présents et ils déterminent la forme et la position de ces méandres. En termes hydrologiques, ce tronçon présente une dynamique de débits complexe en raison des contributions venues de l'amont. Les débits les plus importants ont lieu à la transition automne-hiver, au milieu du printemps et au début de l'été. On observe une réduction des débits moyens et de crue, et ceci peut être lié à la perte d'eau vers la plaine. Les étiages sont moins importants, et ils ont lieu principalement pendant les mois d'avril et d'août. La vitesse de tarissement des nappes est faible et peu variable, de sorte que ces nappes peuvent soutenir le débit de base de l'Ivaí pendant les périodes de pénurie. La puissance spécifique est faible en raison de la faible pente, si bien que ce tronçon ne présente pas une forte capacité de modification de son tracé, d'autant que la charge transportée est riche en sable et en limons. Sur la plaine, on retrouve une succession de couches sableuses et limoneuses-argileuses. Les couches sableuses représentent les dépôts de crue, tandis que les couches limoneuses-argileuses sont les dépôts fins issus de la suspension graduée, laissés par l'Ivaí à la décrue.



Figure 109. Image du tronçon du type CGP2-1.

CGP1-1 – Le type CGP1-1 correspond aux cours d'eau qui se trouvent sur le 3^{ème} Plateau, sur les collines gréseuses du bas bassin versant de l'Ivaí (Figure 110). Ces collines, avec des altitudes qui ne dépassent pas les 500 m, sont formées par le grès Caiuá et elles sont recouvertes par des sols profonds, généralement riches en matériaux sableux (Argisols et Latosols). Ces cours d'eau se trouvent dans le domaine du climat tempéré humide avec un été chaud et un hiver sec. Les précipitations sont moins abondantes et elles ne dépassent pas les 1600 mm annuels. Originellement, ces cours d'eau étaient entourés par la Forêt

Saisonnière Semi-décidue, mais l'intense usage agricole a fortement changé le paysage. Le réseau hydrographique n'est pas très dense, et il inscrit dans les vallées, entre les collines gréseuses, des lits relativement parallèles. La sinuosité des chenaux n'est pas très forte, mais le réseau est soumis à d'importants contrôles structuraux, avec des changements brusques de direction de drainage et des chenaux alignés sur les grands axes structuraux du relief. En termes hydrologiques, il est probable que ces tronçons présentent une variation moins intense des débits car les nappes phréatiques les soutiennent pendant les périodes de pénurie, et la perméabilité du grès et des formations superficielles réduit la magnitude des crues. La vitesse de tarissement de la nappe phréatique est basse et peu variable. En ce qui concerne la charge sédimentaire, il est probable que ces cours d'eau transportent beaucoup de sable, en raison de l'érosion du grès et des formations superficielles. Cette région est très touchée par les processus d'érosion, surtout dans les têtes de bassin, et pour cette raison il est probable que ces cours d'eau sont fortement approvisionnés en sédiments.

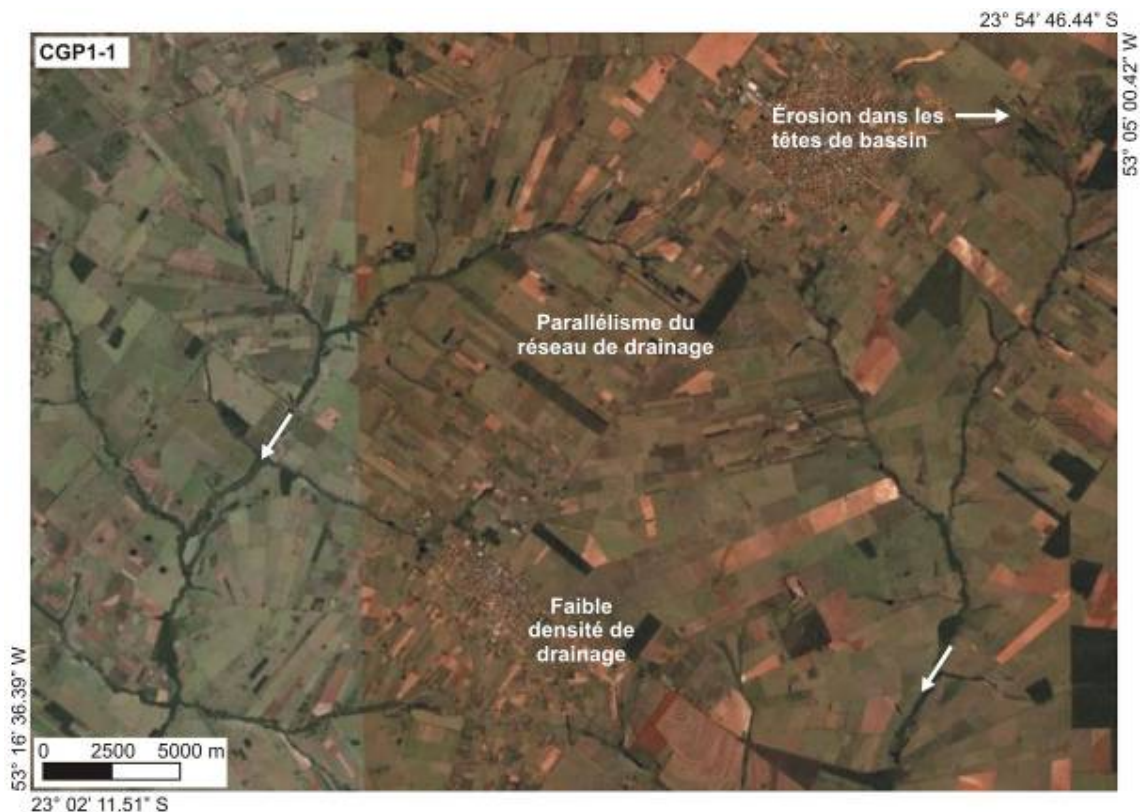


Figure 110. Image des cours d'eau du type CGP1-1.

CGP2-2 – Le type CGP2-2 correspond au tronçon de l'Ivaí qui se trouve à la traversée du 3^{ème} Plateau, en aval de la station de Tapira Jusante (Figure 111). Ce tronçon draine les terrains gréseux recouverts par les différentes couches de sédiments d'origine fluviale qui forment la plaine. Le climat qui prédomine sur cette région est de type climat tempéré humide avec un été chaud et un hiver sec. Les précipitations sont inférieures à 1600 mm par an. La végétation qui originellement entourait ce tronçon était la Forêt Saisonnière Semi-décidue et la Steppe (Campo). La Forêt Saisonnière Semi-décidue était placée plus au bord des cours d'eau, sur la levée naturelle, tandis que la Steppe occupait les zones de plaine soumises à des inondations périodiques. L'usage agricole a fortement changé la couverture végétale de cette région. Le chenal est sinueux, avec des méandres très grands et irréguliers, non mobiles, et contrôlés par les grandes lignes structurales régionales. Le chenal coule avec une pente très faible (0,016%), et la largeur du lit mineur ne présente pas de variations considérables. Le long de ce tronçon, on peut trouver des îles, mais elles ne sont pas très fréquentes. En ce qui concerne l'hydrologie, ce tronçon présente un régime complexe car il subit l'influence du régime de tous les tronçons en amont. Les débits les plus importants sont enregistrés au mois de mai, mais le mois de janvier est aussi marqué par des forts débits. Il est important d'ajouter que ce tronçon se caractérise par une réduction des débits de crue due à la perte d'eau par débordement dans la plaine. Les étiages ne sont pas très importants, et la vitesse de tarissement des nappes est lente, si bien qu'elles sont capables de soutenir le débit de base pendant les périodes de pénurie pluviométrique. En raison de la faible pente et des débits de crue moins forts les valeurs de la puissance spécifique sont relativement faibles, ce qui montre que ce tronçon ne présente pas une capacité importante de modification de son chenal. Un autre facteur qui rend complexe la dynamique hydrologique de ce tronçon est l'influence du Paraná : sous certaines conditions, les eaux du Paraná entrent dans le chenal de l'Ivaí, ce qui cause une inversion de la direction de flux dans les derniers kilomètres du tronçon. La charge sédimentaire est en général formée par des matériaux fins (sable fin, limon et argile), mais le passage de crues exceptionnelles peut augmenter la turbulence et entraîner en suspension des matériaux un peu plus grossiers (du sable très grossier).



Figure 111. Image du tronçon du type CGP2-2.

La sectorisation élaborée donne une bonne idée des différents paysages fluviaux existants dans le bassin de l'Ivaí. Dans cet effort de synthèse, on a réussi à identifier au moins 17 types de cours d'eau distincts, ce qui montre que le bassin de l'Ivaí n'est pas aussi homogène que les organismes de gestion le considèrent.

Les résultats trouvés présentent bien sûr quelques limites, car la disponibilité en données n'est pas la même pour l'ensemble du bassin versant. Le tronçon principal de l'Ivaí a été étudié de façon plus systématique, car on disposait de 26 variables pour faire le découpage. Les affluents ont été découverts à partir de 6 variables ; si à première vue le nombre de variables semble insuffisant, on doit faire attention au fait que les 6 variables utilisées pour ces affluents sont les facteurs de contrôle du bassin versant : géologie, sols, climat, pluviométrie, topographie et végétation originelle.

4.3. La transférabilité de la méthode

Pour l'élaboration de la sectorisation des cours d'eau du bassin versant de l'Ivaí on a mis au point une méthode adaptée aux spécificités du bassin versant étudié. Mais serait-il possible d'utiliser cette même méthode pour sectoriser d'autres bassins versants au Brésil ? Pour répondre à cette question, on doit prendre en compte que la méthode construite au long de ce travail s'appuie sur quatre groupes de données : la définition des écorégions, les données de la dynamique hydro-sédimentaire, le profil en long et la distribution des puissances de chenal. Ainsi, pour qu'on puisse considérer la méthode comme transposable, il est nécessaire qu'au moins ces ensembles de données soient disponibles.

La définition des écorégions demande un inventaire détaillé des caractéristiques physiques et d'occupation du bassin versant en question. L'élaboration de cet inventaire est une étape relativement longue, mais elle est faisable dans la majorité des grands et moyens bassins versants brésiliens. Au Brésil, la végétation, les sols et les unités de relief sont tous cartographiés à l'échelle du 1/5 000 000^{ème}, mais des documents à des échelles bien plus fines peuvent être disponibles pour certaines parties du territoire ; la géologie est cartographiée à l'échelle du 1/2 500 000^{ème}, et certains états possèdent aussi des cartes au 1/750 000^{ème}, 1/500 000^{ème} et 1/250 000^{ème}. En ce qui concerne le climat et les précipitations, le pays ne présente pas une cartographie climatologique très détaillée, mais il est doté d'un réseau de stations climatologiques et pluviométriques où les données peuvent être récupérées pour l'élaboration de cartes au niveau régional et parfois de détail. La majorité du territoire brésilien est aussi couverte par des cartes topographiques aux échelles 1/500 000^{ème}, 1/250 000^{ème}, 1/100 000^{ème} et 1/50 000^{ème}. Avec ces informations, il est possible de procéder à la délimitation d'écorégions à l'échelle du pays ou à l'échelle des douze grandes régions hydrographiques identifiées dans le Plan National de Ressources en Eau.

La caractérisation de la dynamique hydro-sédimentaire est une étape essentiellement statistique ; elle ne demande pas des connaissances statistiques lourdes, et elle peut être faite par des techniciens avec des connaissances statistiques de base. Par rapport aux données, le réseau hydrographique brésilien possède plus de neuf mille stations hydrométriques, et les données de la plupart de ces stations sont disponibles en ligne pour le téléchargement (même à l'étranger). Certaines stations présentent des problèmes dans la série de données, ce qui rend plus difficile le travail de détail, mais pour des travaux à l'échelle régionale le réseau, il est relativement aisé. La dynamique sédimentaire demande inévitablement la collecte d'échantillons sur le terrain et le traitement au laboratoire. Actuellement, plusieurs universités et centre de recherche ont des laboratoires capables de faire les analyses granulométriques nécessaires, de sorte que ceci n'empêche pas l'application de la méthode.

L'élaboration et l'analyse du profil en long sont relativement simples. Le profil en long peut être élaboré à partir des données altimétriques issues des cartes topographiques ou à partir des données altimétriques issues des images du projet SRTM. Ces images, qui recouvrent la majeure partie du globe terrestre, sont disponibles sur internet avec libre téléchargement et elles peuvent être utilisées pour des travaux à l'échelle régionale. Elles peuvent être utilisées aussi pour des travaux de détail, mais dans ce cas il est recommandable de comparer les données altimétriques des images avec quelques points de contrôle altimétriques sur le terrain, et si nécessaire de procéder à une calibration des images avant utilisation.

Le calcul des puissances demande des informations sur les débits de pleins bords, la pente et la largeur du lit mineur. Le débit de pleins bords peut être estimé à partir des séries hydrologiques, comme il a été fait dans ce travail ; la pente peut être déduite du profil en long élaboré précédemment ; la largeur du lit mineur peut être mesurée sur le terrain ou déduite des images satellitaires de haute résolution. Le Brésil possède déjà les satellites CBERS, qui recouvrent pratiquement la totalité du territoire brésilien, et les images de moyenne résolution spatiale sont mises à disposition gratuitement pour téléchargement. En l'absence de données plus détaillées, ces images peuvent être un outil important pour aider à mieux connaître les caractéristiques des grands systèmes hydrographiques.

La méthode est donc passible d'applications dans la majeure partie des régions hydrographiques brésiliennes, et même dans quelques grands et moyens bassins versants. Mais une autre question se pose : à quelles échelles peut-on utiliser cette méthode ?

Comme la méthode proposée a été construite à partir des facteurs de contrôle qui gouvernent un bassin versant, on pense qu'elle est applicable tant à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale, mais cette extrapolation dépend de la qualité et de l'échelle des données utilisées dans les premières étapes de la recherche. On peut appliquer cette méthode à la sectorisation des cours d'eau d'un petit sous-bassin versant dès lors que les données utilisées sont à une échelle fine; si on veut appliquer la méthode pour sectoriser les cours d'eau des grandes régions hydrographiques, on peut travailler sur des données un peu moins généralisées. La méthode proposée peut être aussi utilisée pour un travail à échelles emboîtées, en augmentant le niveau de détail au fur et à mesure qu'on travaille à des échelles plus fines.

Mais quelle serait la limite spatiale de la méthode ? Les travaux de sectorisation fluviale sont effectués à des échelles spatiales qui varient des grands bassins versants à l'échelle des éléments du chenal (l'échelle des seuils et mouilles, par exemple). La méthode proposée dans ce travail a été bâtie principalement sur les facteurs de contrôle du bassin versant. Ainsi, on propose que l'échelle du bassin versant soit une limite de prudence dans l'application de la méthode. Aller au-delà de cette limite et extrapoler la méthode à des échelles plus fines peut être extrêmement équivoque, car la dynamique fluviale à l'échelle des tronçons prend en compte d'autres facteurs de contrôle qui ne sont pas compris dans la méthode proposée.

Conclusion Générale

La construction d'une méthode pour la sectorisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ivaí a demandé beaucoup de réflexion et de travail. Les systèmes fluviaux sont manifestement des systèmes très complexes, de sorte que la création d'une méthode de sectorisation longitudinale qui soit capable de faire la synthèse de cette complexité n'est pas une tâche très simple. La tâche est devenue moins simple encore en raison des dimensions du bassin versant étudié et de l'absence d'informations et de données qui pour certains cours d'eau, en d'autres pays, sont considérés comme des données de base. Néanmoins, d'après les données disponibles on a réussi à construire pas à pas une méthode relativement simple, qui s'appuie sur les données disponibles dans la plupart des bassins versant brésiliens, qui respecte les spécificités de ces bassins versants, et qui donne de bons résultats. La recherche achevée, on se pose une question : quel est la contribution du travail fait à la connaissance du bassin versant de l'Ivaí et potentiellement à celle d'autres bassins versants brésiliens ?

L'effort de sectorisation a démarré par un inventaire relativement détaillé des caractéristiques naturelles et d'occupation du bassin versant. Cet inventaire a réussi à rassembler, organiser et présenter d'une façon logique une grande quantité d'informations sur le bassin de l'Ivaí qui étaient auparavant dispersées. Grâce au traitement de certaines de ces données, une quantité importante de nouvelles informations sur le bassin versant sont maintenant disponibles, et elles peuvent être le point de départ de futurs travaux de recherche. Pour sa part, la sectorisation élaborée a réussi à bien montrer l'hétérogénéité du bassin versant de l'Ivaí évoquée au début du travail. Le découpage du réseau hydrographique a identifié 17 types de tronçons distincts. A partir de maintenant, les futurs travaux de recherche auront une base sur laquelle ils pourront s'appuyer. A partir de maintenant, la voie est ouverte pour les recherches sur chacun des types identifiés, de façon à détailler ou même modifier la sectorisation ici présentée.

La sectorisation des cours d'eau apporte aussi une certaine contribution à l'aménagement du bassin versant de l'Ivaí. Au cours du développement de la méthode de sectorisation, on a observé que certains affluents de l'Ivaí très importants du point de vue hydrologique ne sont pas équipés d'une station de mesure. La sectorisation achevée pourra être utilisée pour orienter une probable réorganisation ou le développement du réseau de surveillance hydrologique, de façon à avoir une meilleure représentativité de l'ensemble du bassin versant. La sectorisation peut être utile aussi pour orienter les études géomorphologiques et d'impacts à l'occasion d'une possible intervention sur le réseau hydrographique (comme l'installation d'un barrage ou la réalisation d'un endiguement, par exemple).

La carte de sectorisation ici présentée est le résultat d'un premier effort de sectorisation des cours d'eau du bassin de l'Ivaí. En raison d'une plus grande disponibilité des données, cette sectorisation est plus détaillée pour l'axe principal de drainage, et moins détaillée pour les affluents. Ainsi, la réalisation de travaux de recherche sur les principaux affluents serait très intéressante dans l'avenir, car ceci permettrait de mieux préciser l'actuel découpage. La réalisation de travaux sur la plaine alluviale serait aussi intéressante, car ils apporteraient des informations de valeur sur l'évolution de l'Ivaí au cours des dernières années.

Hormis le bassin versant de l'Ivaí, ce travail apporte comme principale contribution la mise au point d'une nouvelle méthode applicable à d'autres bassins versants brésiliens. Au moment où le Brésil élabore son Plan National de Ressources en Eau et demande aux états des études pour mieux connaître la situation actuelle des ressources disponibles, l'apparition d'une nouvelle méthodologie de sectorisation longitudinale des cours d'eau semble arriver au bon moment. L'avancement des recherches sur les systèmes fluviaux au Brésil se heurte souvent au manque de données de base, mais on doit reconnaître que la récente politique brésilienne de mise en ligne des données avec téléchargement gratuit a rendu beaucoup plus facile les travaux de recherche. Le développement d'un Système d'Informations Géographiques libre (le logiciel SPRING) et la distribution gratuite des images satellitales du satellite CBERS ont aussi fortement contribué à une amélioration des conditions de travail. Toutes ces nouvelles conditions donnent les conditions minimales pour l'utilisation de la méthode de sectorisation proposée, et ces conditions rendent plus facile aussi sa transférabilité à d'autres bassins versants. Cette méthode pourrait être employée par exemple pour étudier chacune des 12 régions hydrographiques définies par le PNRH, et ainsi approvisionner ce plan en informations nouvelles qui pourraient orienter la gestion des eaux au Brésil.

La fin de cette thèse représente la conclusion d'une étape dans les études sur la sectorisation longitudinale du réseau hydrographique du bassin de l'Ivaí, néanmoins ceci ne représente pas une conclusion définitive et fermée. On peut dire qu'un grand pas dans l'évolution des connaissances sur le bassin de l'Ivaí a été fait, mais la thèse a aussi ouvert la voie pour que d'autres études sur le bassin versant soient faites. On espère aussi que cette thèse apportera sa contribution aux organismes de gestion et de recherche responsables de l'aménagement des ressources au niveau de l'Etat du Paraná et au niveau national.

Références

- AB'SABER, A. N. **Summit surfaces in Brazil**. *Revista Brasileira de Geociências*, 2000, v. 30, n° 3, p. 515 – 516.
- ALMEIDA, F. F. M de, CARNEIRO, C. D. R., MISUZAKI, A. M. P. **Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes**, *Revista Brasileira de Geociências*, 1996, v. 26, n° 3, p. 125 – 138.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS, **Hidroweb** [base de données en ligne]. Brasília : ANA. [s. d.] [référence de 2006]. Accès internet : <URL : <http://www.hidroweb.ana.gov.br>>
- ANDRADE, A. R. de. **Variabilidade da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Ivaí – Paraná**. Diss. master: Géographie, Analyse Environnementale et Régionale: Maringá: 2003, 99 p.
- ANDRADE, A. R. de. et NERY, J. T. **Análise da precipitação pluviométrica diária, mensal e interanual da bacia hidrográfica do rio Ivaí, Brasil**. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2003, n° 52, p. 7 – 30.
- ANTONELI, V. **Influência do uso do solo na avaliação hidro-sedimentológica da bacia do arroio Boa Vista – Guamiranga – PR**. Diss. master: Géographie, Analyse Environnementale et Régionale: Maringá: 2004, 151 p.
- ARNELL, N. **Hydrology and global environmental change**, Harlow: Prentice Hall – Pearson Education, 2002. 364 p.
- ASCONIT CONSULTANTS et HYDRATEC, **Complément et mise à jour des connaissances sur la dynamique fluviale de l'Allier entre Vieille Brioude et le Bec d'Allier : Diagnostic Janvier 2007**. Aubière: SAGE Allier Aval - Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin versant de l'Allier Aval, 2007. 70 p.
- ASSINE, M. L., SOARES, P.C., MILANI, E. J. **Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da bacia do Paraná, sul do Brasil**. *Revista Brasileira de Geociências*, 1994, v. 24, n° 2, p. 77 – 89.
- ASTRADE, L. **La Saône en crue: dynamique d'un hydrosystème anthropisé**, Lyon : Presses Universitaires de Lyon, 2005. 268 p.
- BALDO, M. C. **Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR**, Th. doct.: Géographie, Développement Régional et Planification Environnementale: Presidente Prudente: 2006, 153 p.
- BAILEY, R. G. **Delineation of ecosystem regions**. *Environmental Management*, 1983, v. 7, n° 4, p. 365 – 373.
- BAILEY, R. G. **Identifying ecoregion boundaries**. *Environmental Management*, 2005, v. 34, suppl. 1, p. S14 – S16.

- BARCELOS, A. H. F. **Os Jesuítas e a ocupação do espaço plantino nos séculos XVII e XVIII.** *Revista Complutense de História de América*, 2000, v 26, p. 93 – 116.
- BERNOT, V., CALLAND, V., BRAVARD, J. –P., FOUSSADIER, R. **La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Hérault) : une méthode appliquée à la gestion environnementale d'un espace fluvial méditerranéen.** *Géocarrefour Revue de Géographie de Lyon*, 1996, v. 71, n° 4, p. 323 – 339.
- BETHEMONT, J. **Les Grands fleuves.** 2^e éd. Paris : Armand Colin, 2002, 255 p.
- BIGG-WITHER, T. P. **Novo caminho no Brasil meridional: A provincia do Paraná. Três anos em suas florestas e campos 1872 – 1875.** Rio de Janeiro: José Olympio / Curitiba: UFPR – Universidade Federal do Paraná, 1974, 417 p.
- BOSTELMANN, R., BRAUKMANN, U., BRIEM, E., FLEISCHHACKER, T., HUMBORG, G.; NADOLNY, I., SCHEURLLEN, K., WEIBEL, U. **An approach to classification of natural streams and floodplains in South-West Germany.** In DE WAAL, L. C.; LARGE, A. R. G.; WADE, P. M. (Eds.) *Rehabilitation of Rivers: Principles and Implementation*, Chichester: John Wiley & Sons, 1998, p. 31 – 55.
- BRAVARD, J.-P. et PETIT, F. **Les cours d'eau : dynamique du système fluvial.** Paris : Armand Colin, 2002, 222 p.
- BROWN, A. G. **Alluvial geoarchaeology: floodplain archaeology and environmental change**, Cambridge: Cambridge University Press, 1997, 401 p.
- BRYCE, S. A. et CLARKE, S. E. **Landscape-level ecological regions: linking state level ecoregion frameworks with stream habitats classifications.** *Environmental Management*, 1996, v. 20, n° 3, p. 297 – 311.
- CAETANO-CHANG, M. R. et WU, F. T. **Diagênese de arenitos da formação Pirambóia no centro-leste paulista,** *Geociências*, 2003, v. 22, n° spécial, p. 33 – 39.
- CARPENTER, K. E. **Life in inland waters with special reference to animals,** London : Sidgwick and Jackson, 1928. 267 p.
- Cartas Climáticas do Estado do Paraná** [en ligne] / IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ, 1:50 000. Curitiba: IAPAR. 2000. [référence de 2007] Accès internet: <URL: http://200.201.27.14/Site/Sma/Cartas_Climaticas/Cartas_Climaticas.htm>.
- CHANDESRIS, A.; WASSON, J. G.; PELLA, H. **Hydro-écorégions de la Martinique: propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau,** Lyon: CEMAGREF, 2005a. 17 p.
- CHANDESRIS, A., WASSON, J. G., PELLA, H. **Hydro-écorégions de la Guyane: propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau,** Lyon: CEMAGREF, 2005b. 16 p.
- CIC – CENTRO DE INTELIGÊNCIA DO CAFÉ. **Banco de dados** [base de données en ligne]. Lavras : CIC – Centro de Inteligência do Café. [s.d.] [référence du 20 février 2007] Accès internet : <URL: <http://www.cicbr.org.br/>>.

- COSTA, F. L. et MENEZES, S. L. **Algumas considerações sobre a ocupação europeia da região do Guairá nos séculos XVI e XVII.** *Acta Scientiarum*, 2002, v 24, n° 1, p. 223 – 232.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Coluna White: Excursão virtual pela serra do Rio do Rastro. Seção padrão das unidades do Gondwana no sul do Brasil.** [en ligne]. Porto Alegre: CPRM – Superintendência Regional de Porto Alegre, 2002. 61 p. [référence de 2005]. Accès internet : <URL: <http://www.cprm.gov.br/coluna/colunawhite.pdf>>
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, **Excursão virtual aos Aparados da Serra - RS/SC: aspectos geológicos e turísticos. Cânions do Itaimbezinho e Fortaleza.** [en ligne]. Porto Alegre: CPRM – Superintendência Regional de Porto Alegre, 2004. 88 p. [référence de 2005]. Accès internet : <URL: <http://www.cprm.gov.br/Aparados/imagens/aparados.pdf>>
- CROWLEY, J. M. **Biogeography.** *Canadian Geographer*, 1967, 11, p. 312 – 326.
- CUPP, C. E. **Stream corridor classification for forested lands of Washington.** Olympia: Washington Forest Protection Association, 1989. 24 p.
- DAVIS, W. M. **The rivers and valleys of Pennsylvania.** *National Geographic*, 1889, n° 1, p. 183 – 253.
- DAVIS, W. M. **The Geographical Cycle.** *Geographical Journal*, 1899, n° 14, p. 481 – 504.
- DESTEFANI, E. V. **Regime hidrológico do rio Ivaí – PR,** Diss. master: Géographie, Analyse Environnementale et Régionale: Maringá. 2005, 90 p.
- DOUHI, N. **Análise das Condições Físico-Ocupacionais e suas Implicações no Comportamento Hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio Xaxim – Prudentópolis – PR.** Diss. master : Géographie, Analyse Environnementale et Régionale : Maringá. 2004, 120 p.
- DOYLE, M. W.; MILLER, D. E. ; HARBOR, J. M. **Should river restoration be based on classification schemes or process models ? Insight from the history of geomorphology .** In *ASCE International Conference on Water Resources Engineering* (1999; Seattle) Seattle: ASCE – American Society of Civil Engineers, 1999, p. 1 – 9.
- Ecoregions of the United States /** R. G. Bailey, 1:7 500 000, Ogden: USDA Forest Service, Intermountain Region, 1976.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos do Brasil,** 2^e éd. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999, 306 p.
- FERNANDES, L. A. et COIMBRA, A. M. **O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional.** *Revista Brasileira de Geociências*, 1994, v. 24, n° 3, p. 164 – 176.
- FONSECA, F. P. da et CZUY, D. C. **Formação Arenito Caiuá: uso, ocupação e problemas ambientais na região Noroeste do Paraná.** In *Simpósio Nacional de Geografia Agrária – Simpósio Internacional de Geografia Agrária – Jornada Ariovaldo*

- Umbelino de Oliveira* (3 - 2; 2005; Presidente Prudente), Presidente Prudente: UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2005, 7 p.
- GALVANI, E. et AZEVEDO, T. R. de. **A Frente Polar Atlântica e as características de tempo associadas: estudo de caso** . [en ligne] In : *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada* (10; 2003; Rio de Janeiro). *Geo UERJ Revista do Departamento de Geografia, X SBGFA numero special*, Rio de Janeiro: UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003, [référence de 2005]. Accès internet: <URL: <http://geografia.igeo.uerj.br/xsbgfa/cdrom/eixo3/3.2/093/093.htm>>
- GIANNINI, P. C. F., SAWAKUCHI, A. O., FERNANDES, L. A., DONATTI, L. **M.Paleoeventos e paleocorrentes subaquosas do sistema deposicional Pirambóia nos Estados de São Paulo e Paraná, Bacia do Paraná: estudo baseado em análise estatística de dados azimutais**, *Revista Brasileira de Geociências*, 2004, v. 34, n° 2, p. 282 – 292.
- GIRET, A. **Hydrologie fluviale**, Paris: Ellipses, 2007. 262 p.
- GIUSTI, C. **Géologues et Géographes Français face à la Théorie Davisienne (1896-1909): retour sur "l'intrusion" de la géomorphologie dans la géographie. On the adoption of the Davisian theory by French geographers and its rejection by geologists (1896–1909): birth of an ideological watershed in the Earth sciences** . *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2004, n° 3, p. 241 – 254.
- GONOT, B. **Gestion et crise du “Système Eau” de 1964 à 1991: Le bassin de la Midouze (Aquitaine Occidentale)**. Th. doct. : Géographie : Pau : 1996, 506 p.
- GOODWIN, C. N. **Fluvial classification: Neanderthal necessity or needless normalcy** . In OLSON, D. S. et POTYONDY, J. P. *Wildland Hydrology*, TPS 99-3, Herndon: American Water Resources Association, 1999, p. 229 – 236.
- GORDON, N. D., MCMAHON, T. A., FINLAYSON, B. L., GIPPEL, C. J., NATHAN, R. J. **Stream hydrology: an introduction to ecologists**, 2^e éd. Chichester: John Wiley and Sons, 2004. 444 p.
- GRAVELIUS, H. **Grundriss der gesamten Gewässerkunde. Band 1: Flusskunde**, Berlin: Goschön, 1914. 179 p.
- GRODZKI, L., CARAMORI, P. H., BOOTSMA, A., OLIVEIRA, D. de., GOMES, J. **Risco de ocorrência de geadas no Estado do Paraná** . *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 1996, v. 4, n° 1, p. 93-99.
- HAAN, C.T., BARFIELD, B.J., HAYES, J. C. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**, San Diego: Academic Press, 1994. 588 p.
- HAGHE, J.-P. **Les Eaux courantes et l'Etat en France (1789-1920). Du contrôle institutionnel à la fétichisation marchande** . Th. doct. : Sciences Sociales : Paris : 1998, 649 p.
- HALLOT, E. J., SCHMITT, L., MOLS, J., PETIT, F. **Elaboration d'une typologie hydro-géomorphologique de cours d'eaux dans l'Euregio Meuse-Rhin** . *Mosella*, Actes du Colloque Spatialisation et Cartographie en Hydrologie, 2004, Tome XXIX, n° 3 – 4 .

- HARDING, J. S. et WINTERBOURN, M. J. **An Ecoregion classification of the south island, New Zealand** . *Journal of Environmental Management*, 1997, 51, p. 275 – 287.
- HERTEL, R. J. G. **Aspectos interessantes da vegetação do Paraná** , In EL-KHATIB, F. (éd.). *História do Paraná*, v. 2, Curitiba: Grafipar, 1969, p 131-241.
- HORTON, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative geomorphology**, *Geological Society Bulletin*, 1945, 56, 3, p. 275 – 370.
- ILLIES J. et BOTOSANEANU L. **Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologiques des eaux courantes, considérés surtout du point de vue faunistique**. *Mitteilungen der Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 1963, 12, p. 1 - 57.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, **Normais Climatológicas** [base de données en ligne] Brasília : INMET. [s. d.] [référence de 2006]. Accès internet : <URL: <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>>
- IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Leituras regionais: mesorregião geogr á fica Sudeste Paranaense**, Curitiba: IPARDES / BRDE – Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul, 2004. 133 p.
- IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Referências ambientais e socioeconômicas para o uso do território do Estado do Paraná : uma contribuição ao zoneamento ecol ó gico econômico - ZEE**, Curitiba: IPARDES, 2006. 160 p.
- JULIEN, P. Y. **River mechanics**, Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 434 p.
- KELLERHALS, R., CHURCH, M., BRAY, D. I. **Classification and analysis of river processes**. *Journal of the Hydraulics Division*, 1976, v. 102, n°7, p. 813 – 829.
- KELLERHALS, R. et CHURCH, M. **The Morphology of large rivers: characterization and management**. In DODGE, D. P. (éd.) *Proceedings of the International Large River Symposium. Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, n° 106, p. 31 – 48.
- KIM, I., GRODZKI, L., CARAMORI, P. H., VISSOTO, S. **An á lise da Ocorrência de Geadas no Estado do Paraná**. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 2003, v. 11, n° 1, p. 99 – 106.
- KNIGHTON, A. D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. London: Arnold / New York (Etats-Unis): Oxford Press, 1998. 383 p.
- KNIGHTON, A. D. **Downstream variation in stream power**. *Geomorphology*, 1999, v. 29, n° 3 - 4, p. 293 – 306.
- LE FELLIC, A. **L'ordination des cours d'eau du bassin versant du Rhône**. Mémoire de maîtrise : Géographie : Lyon : 1990, 181 p.
- LE FELLIC, A. **Analyse quantitative des systèmes hydrographiques du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse et applications en termes de gestion**. Mémoire de DEA : Géographie : Lyon : 1991, 109 p.

- LEOPOLD, L. B. **Water, Rivers and Creeks**, Salsalito: University Science Books. 1997, 185 p.
- LEOPOLD, L. B. et WOLMAN, M. G. **River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight**. *U. S. Geological Survey Papers*, 282-B, Washington: U.S. Government Printing Office, 1957, 85 p.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G., MILLER, J. P. **Fluvial Processes in Geomorphology**, San Francisco: Freeman, 1995. 535 p.
- LIBERALI, L. **Estudo Fitossociológico da Vegetação do Cerrado de Campo Mourão**, Diss. master: Géographie, Analyse Environnementale et Régionale: Maringá: 2003.
- LOUCKS, O. **A forest classification for Maritime Provinces**. *Proceedings of Nova Scotian Institute of Science*, 1962, 259 (part 2), p. 85 – 167.
- MAACK, R. **Geografia física do Paraná**, Curitiba: UFPR - Universidade Federal do Paraná, 1969. 365 p.
- MAILLET, E. **Essais d'hydraulique souterraine et fluviale**, Paris : Herman, 1905.
- Mapa de Biomas do Brasil** / IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1:5 000 000, Rio de Janeiro: IBGE, 2004a.
- Mapa de Solos do Brasil** / EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária et IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1:5 000 000, Rio de Janeiro: EMBRAPA / IBGE, 2003.
- Mapa de Vegetação do Brasil** / IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1/5 000 000, Rio de Janeiro: IBGE, 2004b.
- Mapa Geológico do Estado do Paraná** / DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, MINEROPAR – Minerais do Paraná S. A., 1:650 000, Curitiba: MINEROPAR, 1989.
- MARSTON, R. **Ecoregions: A geographic advantage in studying environmental change**. *AAG Newsletter*, 2006, v. 41, n° 3, p. 5 – 6.
- MARTENS, K. et DUMONT, H. J. **Aquatic biodiversity: a celebratory volume in honour of Henri J. Dumont**, New York: Springer, 2003. 356 p.
- MELO, M. S.; MEDEIROS, C. V.; GIANNINI, P. C. F.; GARCIA, M. J.; PESSEDA, L. C. R. **Sedimentação Quaternária no espaço urbano de Ponta Grossa, PR**. *Geociências*, 2003, v. 22, n° 1, p.33 – 42.
- METEO FRANCE. **Glossaire Météo-France**. [en ligne] Paris : Météo France. [s. d.]. [référence de 2006]. Accès internet : <URL : <http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/index.jsp>>
- MIDDLETON, G. V. et WILCOCK, P. R. **Mechanics in the Earth and environmental sciences**. Cambridge : Cambridge University Press, 1994. 459 p.
- MILLER, J. R. et RITTER, J. B. **An examination of the Rosgen classification of natural rivers**. *Catena*, 1996, v. 27, p. 295 – 299.
- MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S. A. **Geologia do Paraná**. [en ligne]. Curitiba: Mineropar. [s. d.] [référence de 2006]. Accès internet: <URL: <http://www.pr.gov.br/mineropar/>>

- MMA – MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: MMA – Ministério do Meio Ambiente / SRH – Secretaria de Recursos Hídricos / ANA – Agência Nacional de Águas, 2003. 373 p.
- MMA – MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: síntese executiva**. Brasília: MMA – Ministério do Meio Ambiente / SRH – Secretaria de Recursos Hídricos / ANA – Agência Nacional de Águas, 2006. 135 p.
- MOSLEY, M. P. **The classification and characterization of rivers**. In RICHARDS, K. *River Channels, Environment and Processes*, Oxford: Blackwell, 1987, p. 225 – 320.
- MUZILLI, O. **Degradação e recuperação do solo sob uso agrícola: O caso do Estado do Paraná**. In Simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas Degradadas (5; 2002; Belo Horizonte). *Anais de Palestras*. Belo Horizonte: CEMAC – Centro de Excelência em Matas Ciliares / UFLA – Universidade Federal de Lavras, 2002, 13 p.
- NAIMAN, R. J., LONZARICH, D. G., BEECHIE, T. J., RALPH, S. C. **General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers**. In BOON, P. J.; CALOW, P.; PETTS, G. E. (éd.) *River Conservation and Management*, Chichester: John Wiley & Sons, 1992, p. 93 – 123.
- NANSON, G. C. et CROKE, J. C. **A genetic classification of floodplains**, *Geomorphology*, 1992, v. 4, n° 6, p. 459 - 486.
- NERY, J. T., MARTINS, M. L. O. F., ROSEGHINI, W. F. F., ROSEGHINI, F. **F. Variabilidade da precipitação pluvial e disponibilidade hídrica na região Noroeste do Estado do Paraná**. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 2004, v. 12, n° 2, p. 289 – 297.
- NERY, J. T., STIVARI, S. M. S., MARTINS, M. L. O. F., SILVA, E. S., SOUSA, P. **Estudo da Precipitação do Estado do Paraná e sua Associação à Temperatura da Superfície do Oceano Pacífico**. In.: *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 2005, v. 13, n° 1, p. 161 – 171.
- NEWSON, M. D., CLARCK, M. J., SEAR, D. A., BROOKES, A. **The geomorphological basis for classifying rivers**. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, n° 8, p. 415 – 430.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 1^e éd. Rio de Janeiro: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1979. 422 p.
- NOELLI, F. S. et MOTA, L. T. **Índios, Jesuítas, Bandeirantes e Espanhóis no Guairá nos séculos XVI e XVII**. *Revista GeoNotas*. [en ligne], Juillet-août-septembre 1999, v. 3, n° 3, [12.07.2006]. Accès internet : <URL : <http://www.dge.uem.br//geonotas/>>
- PARANÁ – GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Site internet du Gouvernement de l'État du Paraná**. [en ligne]. Curitiba : Governo do Estado do Paraná. [s. d.] [référence de 2007]. Accès internet : <URL : <http://www.pr.gov.br> Accédé en février 2007>
- PARDE, M. **Fleuves et Rivières**, Paris : Armand Colin, 1933. 224 p.
- PARDE, M. **Sur la puissance des crues en diverses parties du monde**, *Géocarrefour Revue de Géographie de Lyon*, 2004, 373 p.

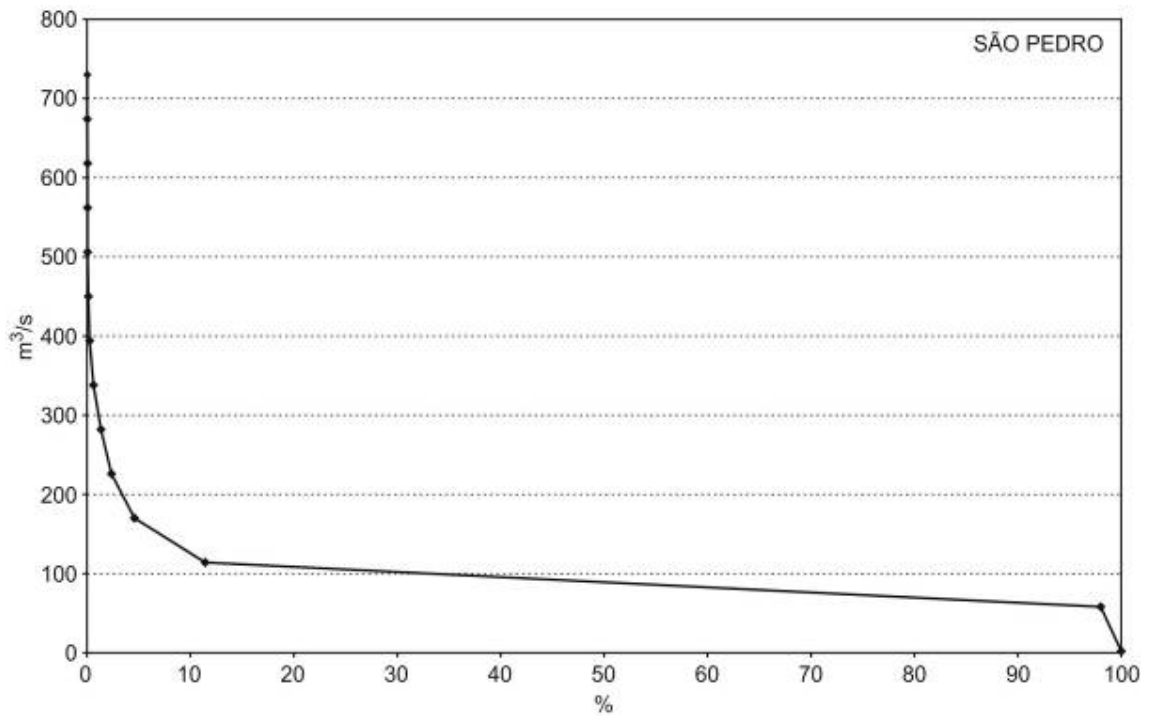
- PASSEGA, R. **Texture as Characteristic of Clastic Deposition**, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1957, v. 41, n° 9, p. 1952 – 1984.
- PASSEGA, R. **Analyses granulométriques, outil géologique pratique**, *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 1963, v. XVIII, n° 11, p. 1489 – 1499.
- PASSEGA, R. **Grain size representation by CM Patterns as a geological tool**, *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, v. 34, n° 4, p. 830 – 847.
- PASSEGA, R. et BYRAMJEE, R. **Grain-size image of clastic deposits**, *Sedimentology*, 1969, n° 13, p. 233 – 252.
- PETIT, F., HALLOT, E., HOUBRECHTS, G., LEVECQ, Y., MOLS, J., PEETERS, A., VAN CAMPENHOUT, J. **La typologie et les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau wallons**. In Colloque La gestion physique des cours d'eau : bilan d'une décennie d'ingénierie écologique (1; 2007; Liège) Liège: Ministère de la Région wallonne, 2007, p. 7 – 16.
- PETIT, F., HALLOT, E., HOUBRECHTS, G., MOLS, J. **Evaluation des puissances spécifiques de rivières de Moyenne et de Haute Belgique**, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 2005, 46, p. 37 – 50.
- PLATTS, W. S. **A plea for fishery habitat classification**. *Fisheries*, 1980, v. 5, n° 1, p. 2 - 6.
- QUINTAS, M. C. L., MANTOVANI, M. S. M., ZALAN, P. V. **Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná**. *Revista Brasileira de Geociências*, 1999, v. 29, n° 2, p. 217 – 226.
- REMENIERAS, G. **L'hydrologie de l'ingénieur**. 2^e éd. Paris: Editions Eyrolles, 1980. 456 p.
- RHOADS, B. L. **Stream Power: A unifying theme for urban fluvial geomorphology**. In : HERRICKS, E. E. *Stormwater Runoff and Receiving Systems: Impact, Monitoring, and Assessment*, Boca Raton: CRC Press, 1995, p. 65 – 76.
- RODERJAN, C. V., GALVÃO, F., KUNIYOSHI, Y. S., HATSCHBACK, G. **As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná**. *Ciência e Ambiente*, 2002, v. 24, p. 75-92.
- ROSGEN, D. L. **A Classification of natural rivers**. 1994, *Catena*, n° 22, p. 169 – 199.
- SAINT-HILAIRE, A. de. **Viagem pela Comarca de Curitiba**, Curitiba: Fundação Cultural, 1995. 182 p.
- SANTOS, I. dos., KRÜGER, C. M., LEVIS, M., GARCIA, K. S. **Avaliação de Perdas de Solo por Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí**. In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (13; 1999; Belo Horizonte) Belo Horizonte: ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999, 14 p.
- SCHEIDEGGER, A. E. **Morphotectonics**, Berlin: Springer-Verlag, 2004. 197 p.
- SCHMITT, L. **Approche Bibliographique pour une Typologie Hydro-Géomorphologique des Cours d'Eau**. Mémoire DEA : Géographie : Strasbourg : 1996, 108 p.
- SCHMITT, L. **Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau: Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace**. Th. doct. : Géographie : Strasbourg : 2001, 217 p.

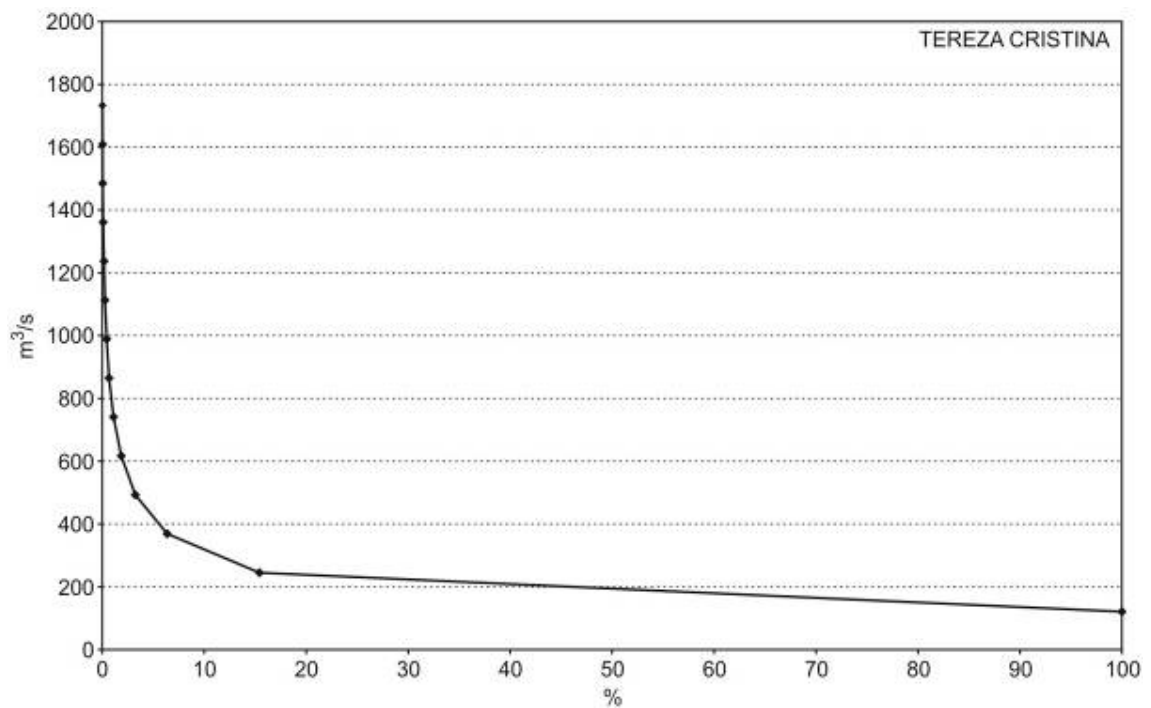
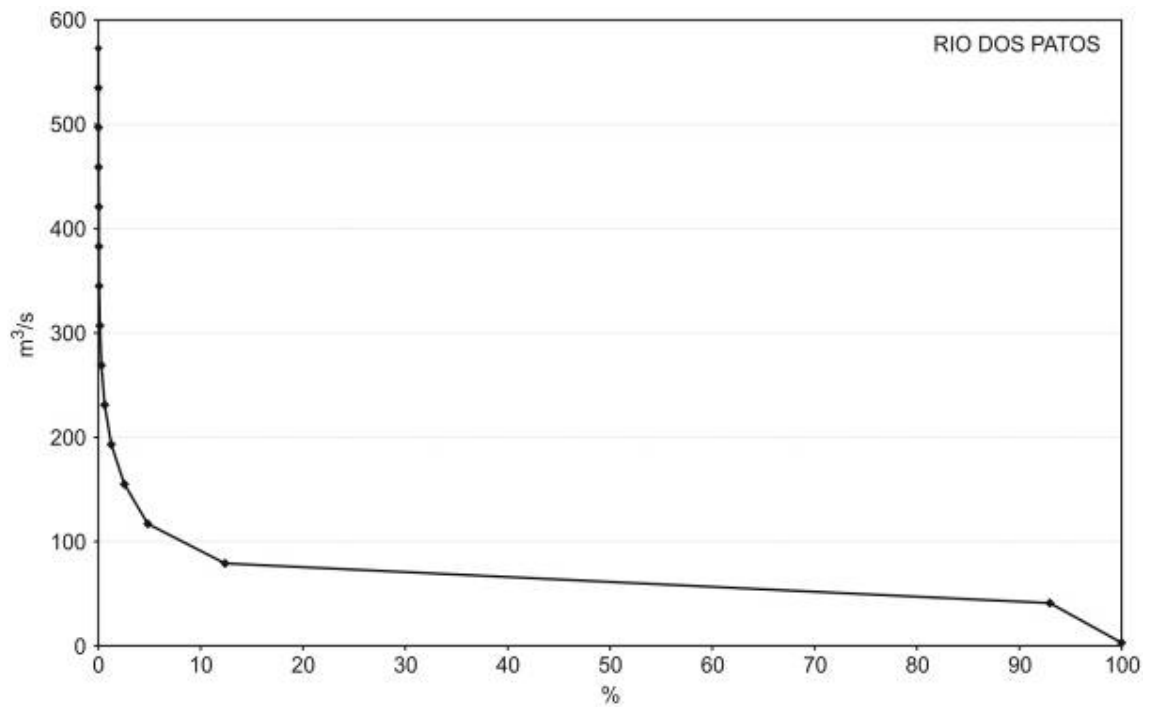
- SCHMITT, L., VALETTE, L., VALIN, K., PIEGAY, H., HALLOT, E. J. **Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (Bassin de l'Yzeron)**. *Mosella*, Actes du Colloque Spatialisation et Cartographie en Hydrologie, 2004, Tome XXIX, n° 3 – 4, p. 323 - 340.
- SCHNEIDER, R. L., MÜHLMANN, H., TOMMASI, E., MEDEIROS, R. A., DAEMON, R. F., NOGUEIRA, A. A. **Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, (28; 1974; Porto Alegre). Porto Alegre: SBG - Sociedade Brasileira de Geologia, 1974, p. 41-65.
- SCHUMM, S. A. **A tentative classification of alluvial river channels: An examination of similarities and differences among some Great Plain rivers**. *Geological Survey Circular*, 1963, n°. 477, p. 1 – 10.
- SCHUMM, S. A. **The Fluvial System**, New York: John Wiley & Sons, 1977. 338 p.
- SETR - Secretaria DE ESTADO dos Transportes. **Estudos geológicos relacionados a projetos de navegabilidade do rio Ivaí**. Curitiba: SETR Paraná, 1982.
- SERRA, E. **Os Primeiros Processos de Ocupação da Terra e a Organização Pioneira do Espaço Agrário no Paraná**. *Boletim de Geografia*, 1992, année 10, n° 1, p.61 – 89.
- SIARQ – ARQUIVO CENTRAL DO SISTEMA DE ARQUIVOS. **Catálogo do Fundo Sérgio Buarque de Holanda**. [en ligne]. Campinas: UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 2002 [référence de 2005] Accès internet : <URL : www.unicamp.br/siarq/pesquisa/guia/catalogo_sbh_publicacao.pdf>
- SILVA, F. de P. e., KIANG, C. H., CAETANO-CHANG, M. R. **Estratigrafia de Subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. *Revista Brasileira de Geociências*, 2005, v. 37, n° 1, p. 77 – 88.
- SPAD, **Aide-mémoire Statistique**. Paris: CISIA-CERESTA, 1999. 285 p.
- STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 1957, 38, p. 913 – 920.
- STRAUBE, F. C. **O cerrado no Paraná: ocorrência original e atual e subsídios para sua conservação**. *Cadernos de Biodiversidade*, 1998, v. 1, p.12 – 24.
- SUDERHSA – SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, **Atlas de recursos hídricos do Estado do Paraná**. [en ligne] Curitiba: SUDERHSA. 1998. [référence de 2006]. Accès internet : <URL : <http://www.suderhsa.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=73>>
- WASSON J. -G. **Éléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes. 1. Revue critique de quelques approches existantes**. *Bulletin d'Ecologie*, 1989, 20(2), p. 109-127.
- WASSON, J. -G.; CHANDESRIS, A.; PELLA, H.; BLANC, L. **Typology and reference conditions for surface water bodies in France – The hydro-ecoregion approach. Sommaire de la communication présentée au symposium *Typology and Ecological Classification of Lakes and Rivers***, Helsinki : SKYE–Suomen Ympäristökeskus (Centre Finlandais de l'Environnement), 2002, 5 p.

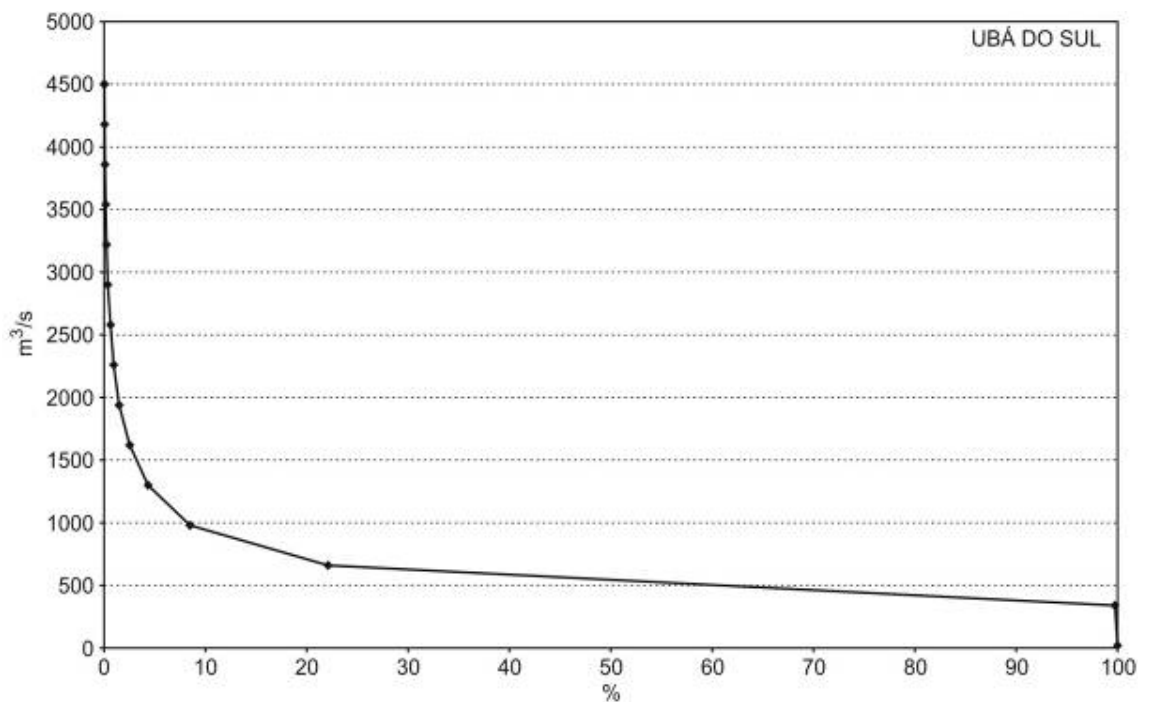
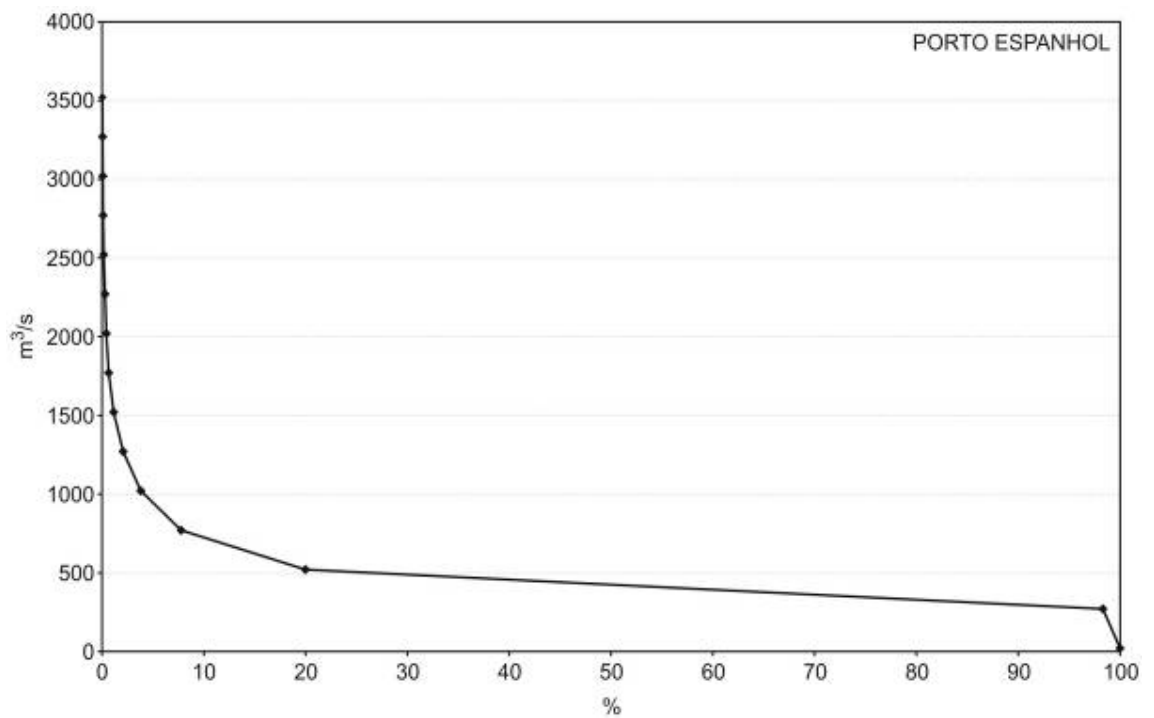
-
- WASSON, J.-G.; CHANDESRIS, A.; PELLA, H.; BLANC, L. **Les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive Cadre Européenne sur l'eau.** *Ingénieries*, 2004, n° 40, p. 3 – 10.
- YANG, C. T. et SONG, C. C. S. **Dynamic adjustments of alluvial channels**, In : RHODES, D. D. et WILLIAMS, G. P. (éd.) *Dynamic Adjustment of Alluvial Channels*, Part 1, Adjustments of the Fluvial System, Proceedings of 10th Annual Geomorphology Symposium, Dubuque : Hendall/Hunt Publishing Co., 1979, p. 55-68.
- ZALAN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C. de J., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T., ZANOTTO, O.A. **bacia do Paraná** . In.: PEDERNEIRAS, G., GABAGLIA, R., MILANI, E. J. *Origem e evolução de bacias sedimentares*, Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1990, p. 135 – 164.
- ZAMUNER, L. D., NÓBREGA, M. T. de., MARTONI, A. M. **A urbanização e o desencadeamento de processos erosivos em áreas de preservação ambiental na cidade de Maringá, Estado do Paraná.** *Acta Scientiarum*, 2002, v. 24, n° 6, p. 1793 – 1800

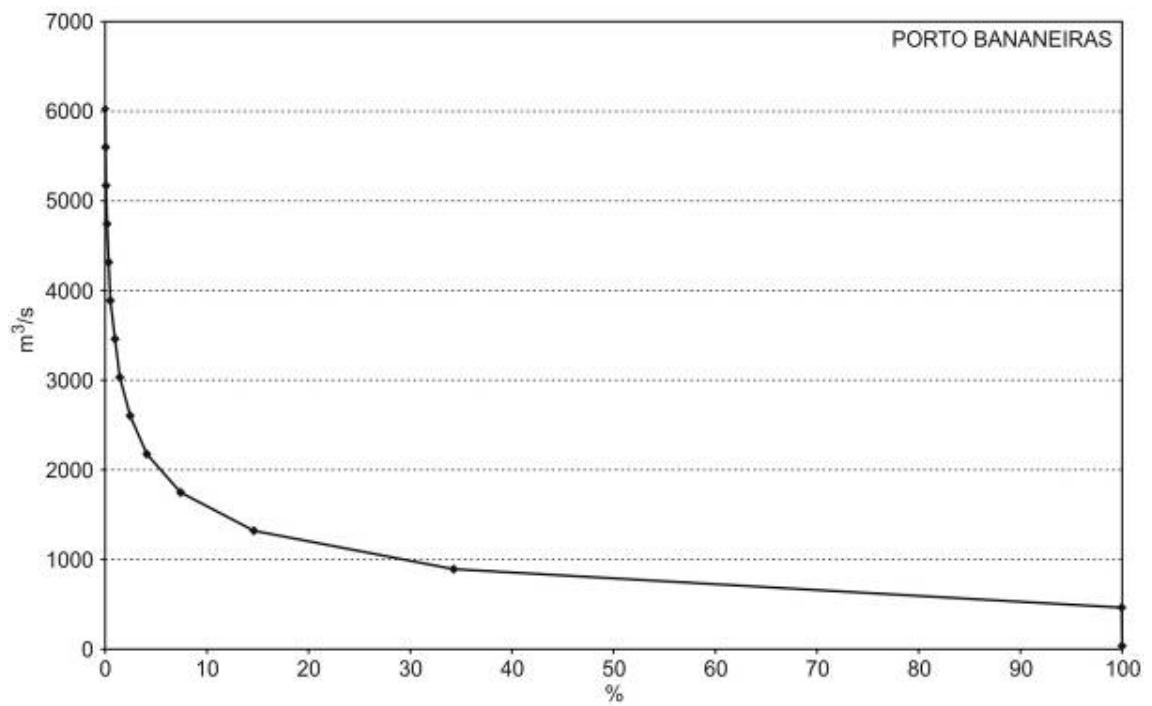
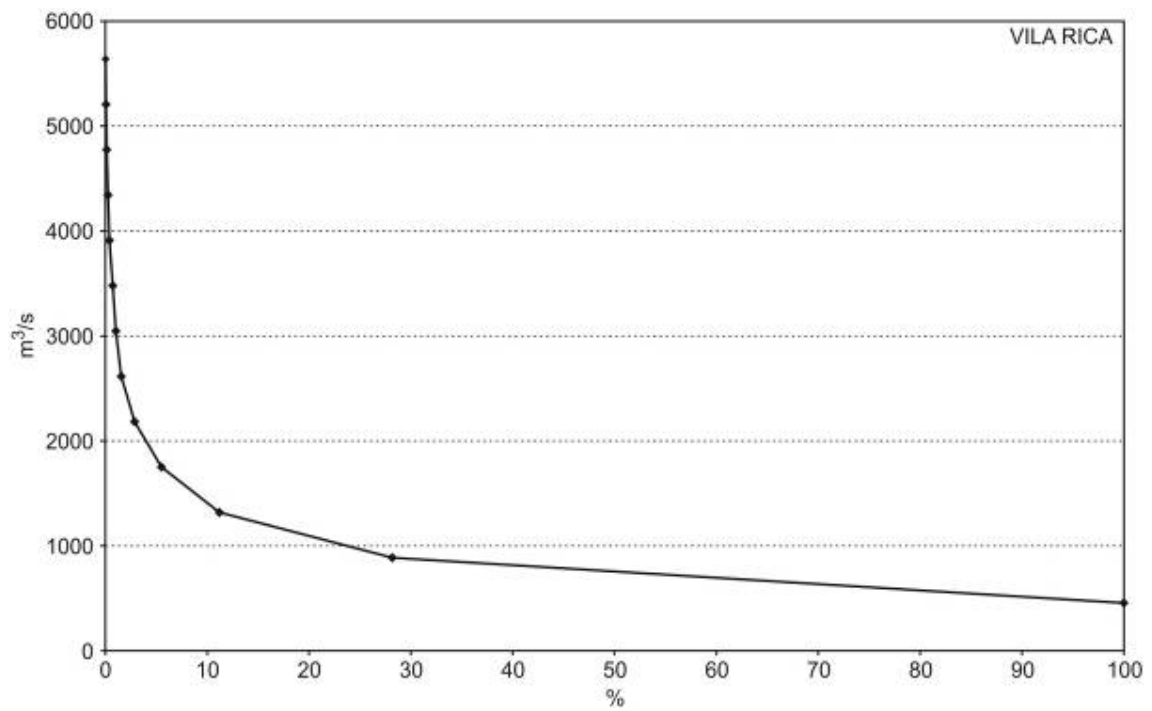
Annexes

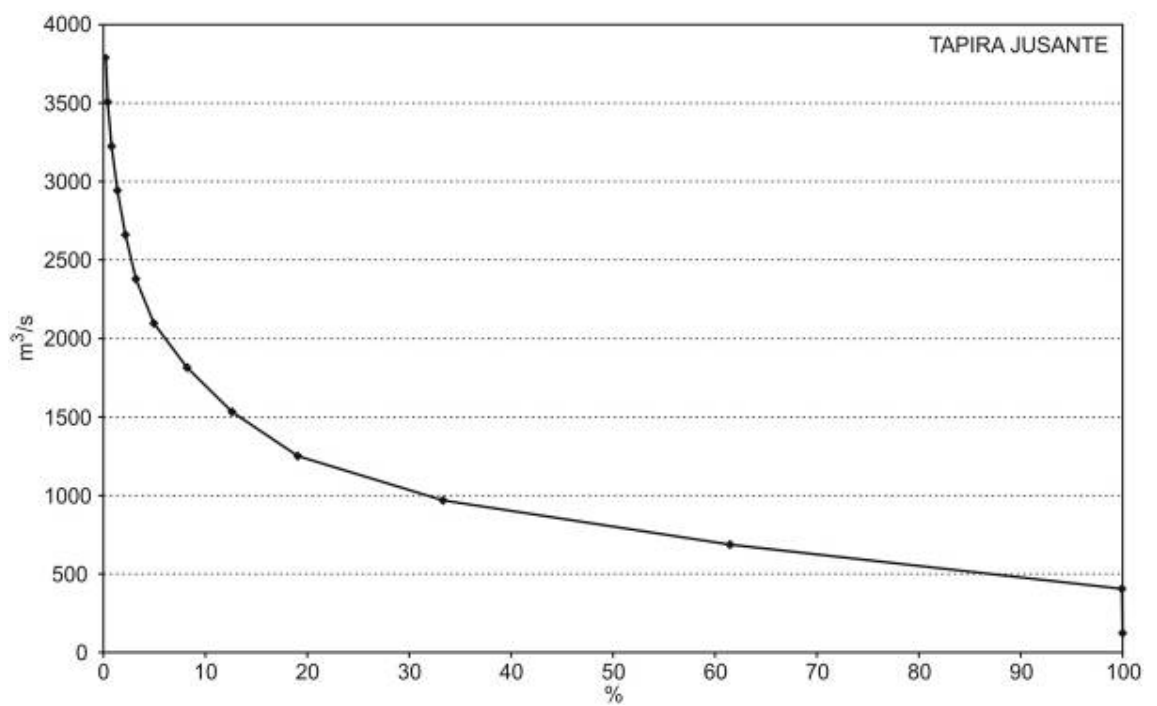
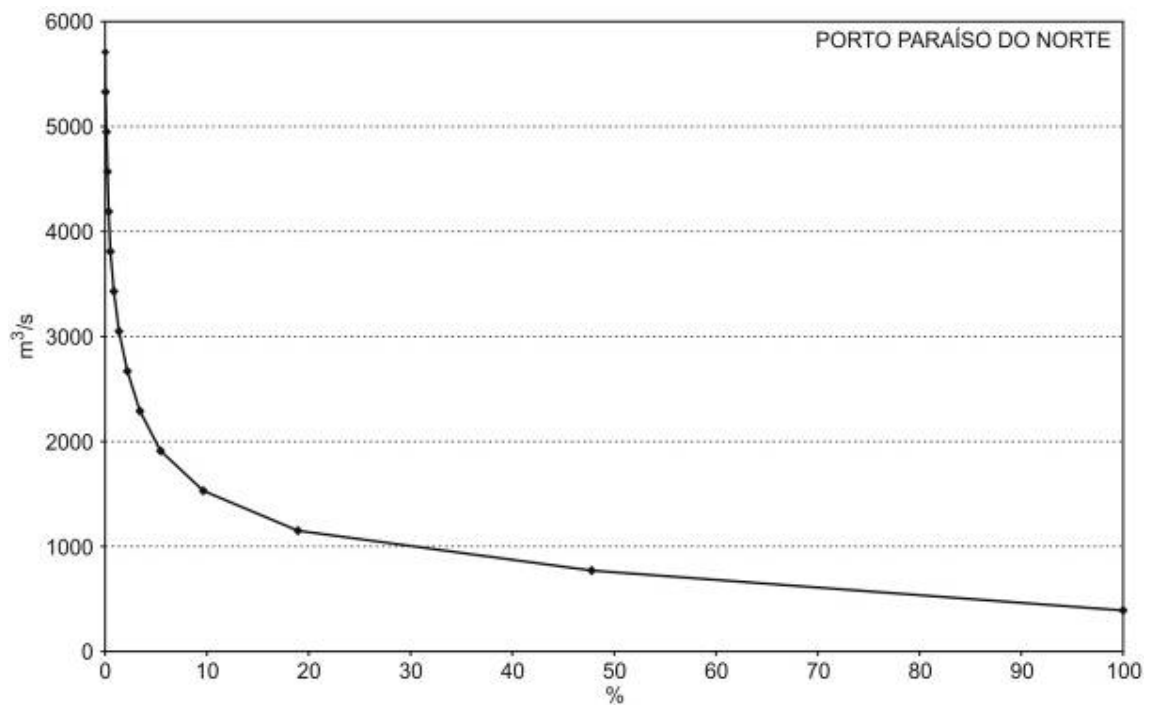
Annexe I - Les courbes de débits classés

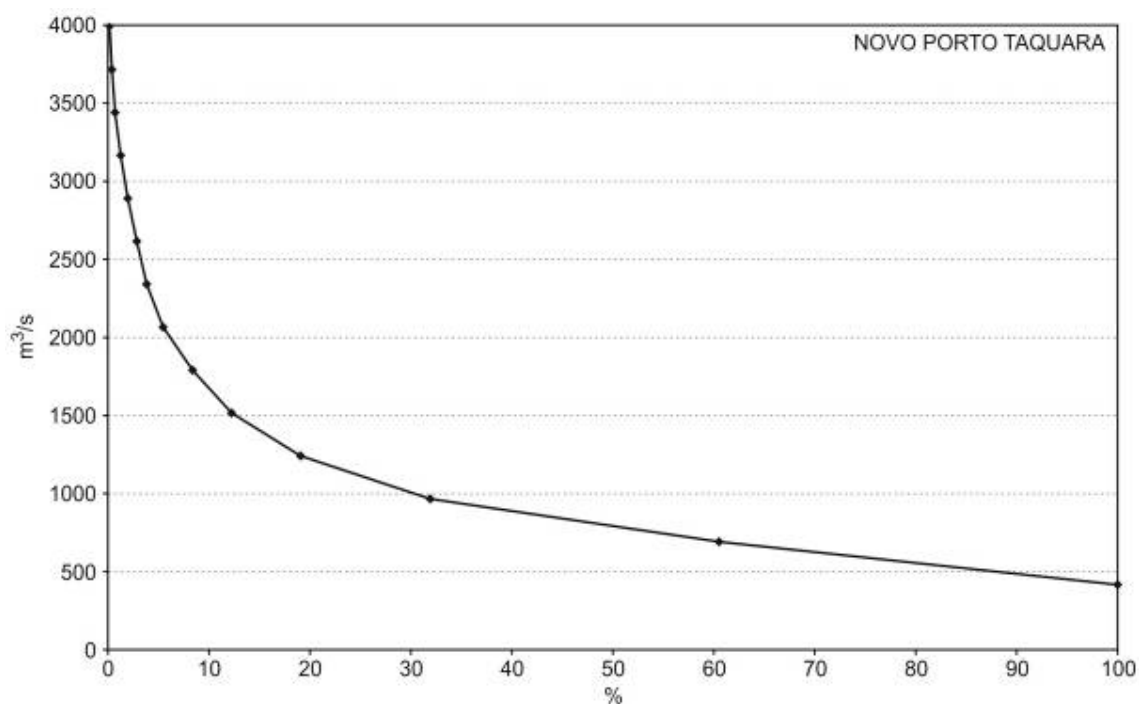












Annexe II - Tableaux des valeurs de C et M des échantillons prélevés dans le bassin de l'Ivaí

II.1 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section Rio dos Patos

<i>Echantillon</i>	<i>M (μ m)</i>	<i>C (μ m)</i>
RP1	299	4 000

II.2 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section du village d'Ivaí

<i>Echantillon</i>	<i>M (μ m)</i>	<i>C (μ m)</i>
I1	102	331
I2	299	5 000
I3	13	529
I4	26	484
I5	14	599
I6	19	415

II.3 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section de Tereza Cristina

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
TC1	160	1138
TC2	40	434
TC3	119	785
TC4	24	350
TC5	20	686

II.4 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section Cândido de Abreu

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
CA1	9	806
CA2	104	388
CA3	8	600
CA4	91	524

II.5 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section d'Ubá do Sul

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
US1	6	93
US2	86	276
US3	90	298
US4	53	507
US5	76	316
US6	101	512

II.6 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section de São Pedro

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
SP1	227	591
SP2	20	1022
SP3	8	798
SP4	6	87
SPA	176	484
SPB	96	810
SPC	104	324
SPD	100	918
SPE	97	307
SPF	105	315

II.7 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section de Porto Paraíso do Norte

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
PPN1	7	654
PPN2	9	693
PPN3	15	787
PPN4	28	745
PPN5A	154	401
PPN5B	79	351
PPN5C	126	385
PPN6	5	102

II.8 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section de Tapira Jusante

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
T1A	10	208
T1B	9	459
T2	58	429
T3-1	6	360
T3-2	113	361
T3-3	119	344
T3-4	100	339
T3-5	12	380

II.9 - Valeurs de M et de C pour chaque échantillon de la section de Porto Jundiá

Echantillon	M (μ m)	C (μ m)
J1	39	301
J2A	13	417
J2B	133	400
J2C	151	396
J2D	151	1545
J2E	152	377
J2F	172	400
J3-1	140	395
J3-2	86	295
J3-3	108	362
J3-4	129	363
J3-5	93	341
J3-6	25	199
J3-7	10	137
J3-8	180	515