



HAL
open science

Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord, France

Jean-Luc Peiry

► **To cite this version:**

Jean-Luc Peiry. Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord, France. Géographie. Université Joseph Fourier, 1997. tel-04088084

HAL Id: tel-04088084

<https://hal.science/tel-04088084>

Submitted on 3 May 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



HAL
open science

Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord, France

Jean-Luc Peiry

► **To cite this version:**

Jean-Luc Peiry. Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord, France. Géographie. Université Joseph Fourier, 1997. tel-04088084

HAL Id: tel-04088084

<https://hal.science/tel-04088084>

Submitted on 3 May 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

Institut de Géographie Alpine

Laboratoire de la Montagne Alpine (CNRS LAMA ESA 5038)

**RECHERCHES EN GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE
DANS LES HYDROSYSTEMES FLUVIAUX
DES ALPES DU NORD**

par

Jean-Luc PEIRY

DIPLOME D'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

le 30 Octobre 1997

Composition du jury :

Maryse GUIGO	Professeur à l'Université Joseph Fourier	Présidente
Philippe BOIS	Prof. à l'Ecole Nat. Sup. d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble	Examineur
Jean-Paul BRAVARD	Professeur à l'Université Paris-Sorbonne	Rapporteur
Michel CHARDON	Professeur à l'Université Joseph Fourier	Rapporteur
Roger LAMBERT	Professeur Emérite, Université de Toulouse-Le-Mirail	Examineur
François PETIT	Professeur à l'Université de Liège	Rapporteur

SOMMAIRE



REMERCIEMENTS	9
DOSSIER ADMINISTRATIF	11
Curriculum vitae et activité	13
Publications	17
Liste des directions de recherche d'étudiants	21
INTRODUCTION GÉNÉRALE	23
PARTIE I - APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES ET ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES	29
Introduction	31
Chapitre 1 - La reconstitution des paléoenvironnements fluviaux : les investigations sur le temps long	33
1.1) Positionnement vis-à-vis de la recherche sur les paléoenvironnements fluviaux	35
1.2) L'exploitation paléogéographique des sondages et des données géotechniques fournissant l'altitude du toit de l' <i>alluvium</i> : l'exemple de Grenoble	35
1.2.1) Problématique de l'étude	35
1.2.2) Méthodologie mise en œuvre	36
1.2.3) Interprétation paléogéographique des résultats	36
1.3) La reconstitution des phases de remplissage de bras mort par l'analyse géostatistique de la granulométrie des dépôts	38
1.3.1) Le problème de l'identification de la stratigraphie des remplissages de paléochenaux	38
1.3.2) Méthodologie de reconstitution stratigraphique des remplissages sédimentaires	39
1.3.3) Application de la méthode à l'identification du fossé gallo-romain de Grenoble	42
Chapitre 2 - La reconstitution morphodynamique au pas de temps séculaire	47
2.1) L'inégal intérêt des variables morphodynamiques de base vis-à-vis de l'étude des changements séculaires	49
2.1.1) Une inégale disponibilité des sources documentaires anciennes	49
2.1.2) L'hétérogénéité des sources documentaires anciennes, facteur de difficultés d'utilisation	49
2.2) L'exploitation géostatistique des documents en plan	51
2.2.1) Les indices morphométriques	51
A) La sinuosité	51
B) La multiplicité des chenaux	52
2.2.2) La métamorphose du style fluvial de l'Isère illustrée par le suivi diachronique des indices morphométriques	55
2.3) L'apport du SIG pour la quantification des ajustements en plan de la dynamique fluviale	58
Chapitre 3 - Le développement de techniques de diagnostic morphodynamique et d'aide à la gestion	61
3.1) Une nécessité : pouvoir mettre en œuvre sur le terrain des techniques de recueil des données adaptées au diagnostic morphodynamique	63
3.2) Le diagnostic morphodynamique sur un bassin-versant composé de plusieurs petits cours d'eau : l'exemple de l'Aire et de la Drize	64
3.2.1) Problématique de l'étude	64

3.2.2) Méthodologie de l'étude	64
3.3) Le diagnostic des causes d'érosion des berges sur le Tacon et le Flumen (Parc Naturel Régional du haut-Jura)	67
3.3.1) Contexte local et problématique de l'expertise	67
3.3.2) Méthodologie de l'étude	67
A) Choix des variables décrivant le fonctionnement	67
1) Les critères d'évaluation du fonctionnement des égrevines (processus de versant)	68
2) Les critères d'évaluation de la dynamique du chenal au contact des égrevines	69
B) Description des fiches de site et établissement de la base de données	69
3.3.4) L'exploitation cartographique de la base de données	71
3.4) Analyse de la fermeture des bras morts du Rhône dans l'île de Miribel-Jonage (amont de Lyon)	71
3.4.1) Problématique de l'étude	74
3.4.2) Méthodologie de l'étude	74
3.4.3) Analyse géostatistique des données et typologie fonctionnelle thématique	76
A) Cartographie des variables	76
B) Traitement statistique multivarié et typologie des bras morts	80
3.5) Synthèse méthodologique de l'approche experte	82
Conclusion	86
PARTIE II - LA PROBLÉMATIQUE DU DÉVELOPPEMENT VÉGÉTAL SUR L'ISÈRE DANS LA VALLÉE DU GRÉSIVAUDAN : STRATÉGIE DE RECHERCHE ET PREMIERS RÉSULTATS	89
Introduction	91
Chapitre 1 - Problématique et stratégie des recherches engagées sur l'Isère	93
1.1) La problématique du développement végétal dans le chenal de l'Isère en amont de Grenoble	95
1.1.1) Le cadre institutionnel de la recherche	95
1.1.2) Le constat initial d'un chenal en voie de végétalisation	96
1.1.3) Les étapes et les mécanismes de la végétalisation	98
1.1.4) Les causes et les enjeux du développement végétal	100
1.2) Les stratégies de recherche développées sur l'Isère	101
1.2.1) L'approche interdisciplinaire	101
1.2.2) Les stratégies de recherche propres à l'hydrologie et la géomorphologie fluviale	104
Chapitre 2 - L'analyse de la dynamique des flux de matière dissoute et de matière en suspension	107
2.1) Les techniques et protocoles de mesure	109
2.1.1) La mesure et ses difficultés	109
A) La mesure du débit	109
B) La mesure de la charge dissoute et de la matière en suspension	109
C) Les difficultés de la mesure	110
2.1.2) La correction et la validation des données de conductivité et de concentration en MES	111
A) La correction de la dérive de la conductivité	111
B) Confrontation des mesures de concentration en MES par prélèvement et par mesure optique	111
2.2) La dynamique de la matière dissoute totale (MDT)	112
2.2.1) Chronique de la charge dissoute entre le 24 mai 1995 et le 30 juin 1996	112
A) Les variations annuelles de la charge dissoute	112

B) Les variations quotidiennes et événementielles	113
2.2.2) Quantification des transports de matière dissoute	115
2.2.3) La relation concentration / débit	116
2.3) La dynamique de la matière en suspension (MES)	117
2.3.1) Chronique de la concentration en MES	117
A) Les données biquotidiennes issues des prélèvements automatiques	117
B) L'évolution en continu de la MES : résultats préliminaires	119
2.3.2) Quantification des transports de MES	122
2.3.3) Les difficultés de la modélisation des transports solides	124
A) La modélisation statistique : la relation concentration en MES-débit	124
B) La modélisation conceptuelle	127
2.3.4) La recherche des origines de la MES	127
A) Objectifs et méthode	127
B) Résultats de l'étude	127
2.4) Discussion des résultats et perspectives	133
Chapitre 3 - Modalités d'inondation et d'exhaussement des îles de l'Isère : l'exemple de l'île de Brignoud	135
3.1) Problématique et choix de la zone d'étude	137
3.2) Les données et les méthodes de recueil de l'information	137
3.2.1) Les données topographiques	138
3.2.2) Les données sédimentologiques	139
3.2.3) Les données hydrologiques	139
3.3) Modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement de l'île de Brignoud	139
3.3.1) Principes et méthodologie de la modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement	139
A) La restitution de la topographie sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT)	141
B) La relation hauteur-hauteur entre le site de Brignoud et la station du Campus	141
C) La détermination de la pente de la ligne d'eau en période d'inondation sur le site de Brignoud	142
D) L'inondation du 25-26 février 1995 : situation prédite et situation réelle	142
3.3.2) La réduction de l'inondabilité de l'île de Brignoud entre 1994 et 1995	143
3.3.3) Distribution spatiale de l'exhaussement de l'île de Brignoud	146
3.4) Discussion des résultats et perspectives	148
Conclusion	151
PARTIE III - IMPACTS ET GESTION DES HYDROSYSTÈMES FLUVIAUX : L'EXEMPLE DES RIVIÈRES DES ALPES DU NORD	153
Introduction	155
Chapitre 1 - Les rivières des Alpes du Nord à l'aube de l'ère industrielle : la dynamique de référence permettant l'évaluation ultérieure de l'impact anthropique	157
1.1) Un style fluvial en tresses omniprésent	159
1.2) Un accroissement progressif de l'instabilité des lits fluviaux sous l'effet de la crise climato-anthropique du Petit-Age-Glaciaire	161
1.3) Trois courts tronçons où le méandrage remplaçait le tressage	162

Chapitre 2 - La première étape du contrôle des rivières des Alpes du Nord : l'endiguement et ses impacts	165
2.1) Les rivières alpines, des laboratoires "grandeur nature" pour l'ingénierie fluviale	167
2.2) Des impacts difficilement maîtrisables	170
2.2.1) Les réponses du chenal	170
2.2.2) Les réponses de la plaine d'inondation	171
2.3) Une évidente nécessité : corriger l'impact	174
2.3.1) L'impossible maîtrise de l'exhaussement des lits fluviaux	174
2.3.2) L'amélioration de la salubrité des plaines par le colmatage et le drainage	174
Chapitre 3 - L'incision des rivières dans les Alpes du Nord depuis la seconde guerre mondiale	179
3.1) La distribution spatiale de l'incision	181
3.2) Une incision impressionnante par son intensité, son extension longitudinale et ses rythmes	181
3.3) Les facteurs anthropiques de l'incision des rivières des Alpes du Nord	184
3.3.1) Des endiguements longitudinaux qui empêchent la recharge latérale	185
3.3.2) La réussite de la politique "d'extinction" des torrents par le service de Restauration des Terrains de Montagne	185
3.3.3) Des ouvrages hydroélectriques qui perturbent le transit de la charge alluviale	187
A) Les étapes de l'équipement hydroélectrique alpin	187
B) Des barrages qui bloquent la charge de fond	189
C) Des changements hydrologiques qui modifient les conditions de mise en mouvement de la charge de fond	190
3.3.4) L'extraction dans le chenal d'énormes quantités de matériaux alluvionnaires	195
3.3.5) Des seuils sous-fluviaux qui bloquent les transits de charge de fond	196
Chapitre 4 - La tendance contemporaine au développement de la végétation dans les lits fluviaux	201
4.1) La végétalisation du chenal à l'aval d'un ouvrage hydroélectrique : l'exemple du Drac en aval de Notre-Dame-de-Commiers	203
4.1.1) Le Drac avant l'aménagement hydroélectrique : un tressage très actif ne permettant pas une installation durable de la végétation	204
4.1.2) Le Drac après l'aménagement hydroélectrique : l'envahissement progressif du chenal par la végétation et une très inquiétante réduction de la capacité d'écoulement	206
4.1.3) La crue du 8-9 octobre 1993 et ses conséquences géomorphologiques	208
4.2) Le développement végétal du Drac dans la plaine de Grenoble	209
4.2.1) Une métamorphose géomorphologique et biogéographique du chenal et de la plaine d'inondation en moins de trente ans	210
A) 1948-1956, une dynamique fluviale active interdisant une colonisation végétale durable	210
B) 1960-1994, le développement d'une forêt alluviale mature sur les espaces délaissés par le chenal	212
4.2.2) Une transformation des modalités de fonctionnement liée au changement de style fluvial	212
A) Le changement de la distribution spatiale des dépôts fins et ses conséquences écologiques	213
B) La multiplication du nombre d'unités fonctionnelles "espace-temps"	213
Chapitre 5 - L'effet de la déprise rurale : une tendance à la purge sédimentaire des cours d'eau de tête de bassin-versant	219
5.1) L'analyse des impacts indirects : un problème de méthode	221
5.2) La végétalisation du bassin de la Gresse et son incidence sur la morphologie du chenal	222
5.3) La stabilisation des rivières de tête de bassin, une tendance qui tend à se généraliser	229

Chapitre 6 - Synthèse et discussion : la métamorphose des rivières des Alpes du Nord et son apport pour la connaissance des mécanismes de l'impact	235
6.1) Une tendance continue à l'altération des flux hydriques et sédimentaires depuis 150 ans dans les Alpes du Nord	237
6.2) Des résultats qui font progresser la connaissance des mécanismes de l'impact et les concepts qui s'y réfèrent	240
Chapitre 7 - Impacts et gestion des hydrosystèmes fluviaux : la spécificité des cours d'eau alpins	247
7.1) Positionnement philosophique	249
7.2) L'évolution des relations homme-hydrosystème fluvial au cours des 200 dernières années	250
7.2.1) Surexploitation et dégradation des ressources	250
7.2.2) L'émergence d'une conscience environnementale : le concept de développement durable et ses implications pour la gestion	251
7.3) De nouvelles alternatives de gestion : l'ingénierie géomorphologique	253
7.3.1) Le développement de la restauration des cours d'eau au cours de la dernière décennie	253
7.3.2) Ingénierie géomorphologique et gestion des rivières dans les Alpes du Nord	254
A) La restauration du profil en long de l'Arve en aval de Bonneville	255
B) La re-création d'une zone inondable le long de l'Isère dans le Grésivaudan par l'ouverture de casiers d'inondation	258
C) L'essartage du chenal du Drac court-circuité en aval de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers	260
D) Les principes de gestion du chenal du Tacon et du Flumen (PNR du Haut-Jura)	261
7.4) Discussion et conclusion	263
Conclusion générale et perspectives	265
Bibliographie	271
Table des figures	289
Table des tableaux	299
Table des photos	305

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'aide des nombreuses personnes qui ont collaboré directement ou indirectement à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du Jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce Diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches.

Jean-Paul BRAVARD, professeur à l'Université Paris-Sorbonne, qui a accepté de superviser ce travail et m'a prodigué ses conseils tout au long de sa réalisation.

Maryse GUIGO, Professeur à l'Institut de Géographie Alpine, qui a bien voulu accepter de présider ce Jury d'habilitation.

Philippe BOIS, Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, qui m'a permis d'occuper un peu de place dans la station hydrométrique de Grenoble-Campus et d'y installer mes appareils d'enregistrement. Il me fournit également tous les mois, avec la plus grande régularité les données de hauteur d'eau et de débit de l'Isère.

Michel CHARDON, Professeur à l'Institut de Géographie Alpine, qui a notamment pris en charge l'aspect administratif de ce DHDR.

Roger LAMBERT, Professeur Emérite à l'Université de Toulouse-Le-Mirail.

François PETIT, Professeur à l'Université de Liège, avec qui je collabore à la rédaction d'un module d'enseignement européen SOCRATÈS intitulé "River channel design and environmental protection in Europe".

Mes remerciements vont également aux collègues qui m'ont fait l'amitié de relire minutieusement les différents chapitres de ce DHDR, afin que des regards extérieurs me permettent d'apporter les indispensables améliorations et éclaircissements à ce texte de synthèse. Jean-Paul BRAVARD, Michel CHARDON, Maryse GUIGO, Guy PAUTOU, professeur à l'Université Joseph Fourier ont bien voulu accepter cette tâche ingrate. Je me permets d'ajouter une mention spéciale à l'adresse de Jean-Jacques DELANNOY, Professeur à l'université de Savoie ; ce dernier a lu la totalité du texte de synthèse dans l'ordre inverse des parties et a réussi, malgré cette difficulté supplémentaire, à grandement m'aider par la qualité de ses remarques !

Ce travail doit également énormément aux collaborations de recherche que j'ai pu développer au cours des dernières années. Je tiens à remercier plus particulièrement mes collègues et amis phytoécologues grenoblois, Guy PAUTOU et Jacky GIREL (Ing. d'Etude CNRS)

pour leur collaboration patiente, la qualité des échanges et leur bonne humeur durant les rudes journées de terrain. Il a également été enrichi des collaborations scientifiques développées avec les collègues de l'Université de Cambridge, Keith RICHARDS (Prof), Francine HUGHES (Dr.). C'est également au cours d'un séjour au Département de Géographie de l'Université de Cambridge que j'ai collecté une grande partie de la documentation bibliographique utilisée dans ce travail ; à cette occasion, j'ai pu apprécier la qualité de l'accueil des collègues britanniques. Je tiens aussi à remercier Tim HARRIS (Dr.) et Adrian HAYE (technicien en électronique) d'avoir très largement contribué à ma formation aux techniques de mesure et d'enregistrement de terrain, en me confiant la maintenance des stations installées sur le terrain et en me fournissant un appui technique de qualité.

Mes remerciements s'adressent également aux collègues avec qui j'ai régulièrement publié et avec qui les échanges conceptuels et méthodologiques ont été constants aux cours des dernières années ; je pense plus particulièrement à Jean-Paul BRAVARD, à Huguette VIVIAN (D.R. CNRS), à Hervé PIÉGAY (C.R. CNRS) et à P.G. SALVADOR (M. de C. à l'Université de Lille).

Je ne peux passer sous silence les collaborations avec les collègues archéologues, qui m'invitent à partager leurs terrains de fouille depuis de nombreuses années, à Grenoble et dans les environs ; je pense plus particulièrement à Benoît HELI de la Direction Régionale de l'Archéologie Rhône-Alpes, Alain de MONTJOYE du Centre d'Archéologie de Grenoble, François BAUCHERON, Archéologue à l'AFAN.

La rédaction de ce DHDR a aussi demandé du temps et une certaine quiétude. J'ai pu bénéficier de ce temps et de cette quiétude grâce aux collègues de l'Institut de Géographie Alpine qui ont bien voulu me décharger d'un certain nombre de tâches tout au long de cette année universitaire, et plus particulièrement dans les dernières semaines de fièvre qui ont caractérisé la finalisation de ce travail. Que ceux qui se reconnaissent en soient vivement remerciés.

Mes remerciements vont enfin aux nombreuses personnes qui m'ont fourni un appui technique tout au long de ces années de recherche. André THOMAS, responsable du Laboratoire de Géomorphologie, a filtré patiem-

ment les échantillons d'eau de l'Isère depuis de longs mois et a été très fréquemment mis à contribution, dès qu'il s'agissait de mettre en place des appareillages de mesure, de les qualibrer ou d'assurer leur maintenance.

J'ai pu apprécier la disponibilité et la compétence de Rachid NEDJAI, qui est très fréquemment intervenu pour régler des situations de blocage informatique. Toute ma reconnaissance va également à Sandrine BONMARDION qui, toujours avec le sourire malgré la course de ces dernières semaines, a assuré la mise en page de ce texte de synthèse.

Que tous trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude !

DOSSIER ADMINISTRATIF



CURRICULUM VITAE ET ACTIVITÉS

Jean-Luc PEIRY

Né le 22 janvier 1962

Maître de Conférences à l'U.F.R. de Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, depuis le 1^{er} octobre 1989.

Diplômes

1988 - Doctorat d'Université en Géographie et Aménagement, obtenu le 22 janvier 1988 devant l'Université Jean Moulin, LYON 3. Directeurs : Prof. Ch. TOUPET et Prof. J.-P. BRAVARD. *Prix Henri MILON 1988, décerné par la Société Hydrotechnique de France.*

1985 - D.E.A. de Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin, LYON 3. Directeur : Prof. Ch. TOUPET.

1984 - Maîtrise d'Aménagement, Université Jean Moulin, LYON 3. Directeur : Prof. Ch. TOUPET.

1983 - Licence d'Aménagement, Université Jean Moulin, LYON 3.

1982 - D.U.T. de Génie-Civil, Université Claude Bernard, LYON 1.

1980 - Baccalauréat, Série E.

Activités de recherche

* Contrats européens

1996-1999 - EC contract ENV4-CT96-0317 - DG XII FZPA - « *Floodplain biodiversity and restoration : hydrological and geomorphological mechanisms influencing floodplain diversity and their application to the restoration of european floodplains* »

Responsables : K.S RICHARDS (Prof., Univ. Cambridge), H. DESCAMPS (D.R. CNRS, Toulouse), C. NIELSSON (Dr., Umea), J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

1993-1995 : EC contract EV5V-CT93-0261 - DG XII FZPA - « *Abiotic controls of the germination establishment and species distribution of woody riparian vegetation* ».

Responsables : K.S. RICHARDS (Prof., Univ. Cambridge) et G. PAUTOU (Prof., UJF).

* Contrats nationaux

1996-1999 - Contrat SRETIE-EGPN D7-D22 « Recréer la Nature : Réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes ». Projet : « *Stabilisation et déstabilisation des lits fluviaux par le végétal ; enjeux et contradictions apparentes* ». Responsables : G. PAUTOU (Prof., UJF) et H. PIÉGAY (C.R. CNRS, Lyon).

1992-1993 - Contrat SRETIE-EGPN « *L'impact de l'incision des lits fluviaux sur les biocénoses dans le bassin du Rhône* ».

Responsables : J.-P. BRAVARD (Prof., Univ. Lyon 3) et C. AMOROS (M. de C., Univ. Lyon 1).

1989-1988 :

A.T.P PIREN-CNRS : « Histoire de l'Environnement et des Phénomènes Naturels », intitulée « *Le changement du paysage dans le système fluvial rhodanien (XVI^e-XIX^e siècle)* ».

Responsable : J.-P. BRAVARD (Prof., Univ. LYON 3).

* Autres contrats

1997 - Contrat d'étude interdisciplinaire avec la Société SIEE pour le Syndicat pour l'Aménagement du Bassin de l'Arc

(13) : « *Etude hydraulique et morphologique pour l'aménagement et la gestion de la rivière et de sa vallée inondable dans le bassin-versant de l'Arc (Bouches du Rhône)* ».

Responsable : J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

1995 - Contrat d'étude interdisciplinaire pour l'Etat de Genève et le SIVOM de Saint-Julien-en-Genève : « *Etude morphologique et cartographie morphodynamique des lits de l'Aire et de la Drize* ».

Responsable : J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

1994 - Contrat d'étude avec le Parc Naturel Régional du Haut-Jura : « *Etude géomorphologique des causes d'érosion des berges du Tacon et du Flumen et descriptif des travaux à entreprendre* ».

Responsables: J.-P. BRAVARD (Prof., Paris IV) et J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

Contrat d'étude avec le Conseil Général de l'Isère, « Comité Drac-Vivant » : « *L'évolution d'une vallée alpine au contact d'une grande agglomération : la basse vallée du Drac à l'amont de Grenoble* ».

Responsables : G. PAUTOU (Prof., UJF) et J.-L. PEIRY (M. de C, UJF).

1993 - Contrat d'étude avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse : « *Méthodologie de sectorisation des plaines alluviales en vue de définir les contraintes de divagation et de remaniement des cours d'eau à fond mobile* ».

Responsable : J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

1992 - Contrat d'étude avec le Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'Entretien de l'Arve et de ses Berges dans l'Agglomération d'Annemasse : « *Schéma Directeur d'Aménagement de l'Arve et de ses Berges* ».

Responsable : J.-L. PEIRY (M. de C., UJF).

1990 : Contrat *interdisciplinaire* du PIREN Rhône avec l'Agence de l'Eau RMC : « *La basse vallée de l'Ain (Pont d'Ain - confluent avec le Rhône) : étude géomorphologique.* ».

Responsables : J.-P. BRAVARD (Prof., Univ. Lyon 3), C. AMOROS (M. de C., Univ. Lyon 1) et G. PAUTOU (Prof., UJF).

Responsabilités scientifiques

* Membre du Conseil Scientifique du Comité de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse depuis 1992.

* Membre du Comité Scientifique des Réserves Naturelles de Haute-Savoie depuis 1990.

Activités d'enseignement

Depuis 1989, mes activités de formation se sont orientées vers l'enseignement de la géographie physique et des outils de la géographie. Mes enseignements ont intéressé tous les cycles universitaires (DEUG, Licence, MST, IUP, DEA, DESS, Agrégation) et ont pris différentes formes (cours, séminaires, TD et TP de terrain).

Géographie physique :

- Climatologie générale
- Hydrologie de surface
- Relations homme/milieu et impacts
- Géomorphologie fluviale

Outils de la géographie :

- Analyse de données
- Sémiologie graphique
- Informatique
- Cartographie de terrain
- Techniques de mesure en géographie physique
- Techniques de diagnostic environnemental

Charges administratives

- * Président du Jury Académique de validation du Diplôme professionnel de Professeur des Ecoles (1993-1996).
- * Responsable de la gestion des heures complémentaires à l'Institut de Géographie Alpine.
- * Responsable du module « interactions nature-sociétés » du D.E.A Gestion des Espaces montagnards, sociétés et environnement de l'Institut de Géographie Alpine.
- * Responsable de l'option « gestion des eaux » du DESS « Méthodes et outils au service de la gestion du territoire » de l'Institut de Géographie Alpine.
- * Membre du Conseil d'U.F.R. de l'Institut de Géographie Alpine.

PUBLICATIONS

Articles

- PEIRY J.-L. (1986) : Dynamique fluviale historique et contemporaine du confluent Giffre-Arve (Haute-Savoie). *Rev. Géogr. Lyon* ; 1, 79-96.
- PEIRY J.-L. (1987) : Channel degradation in the middle Arve river (France). *Regulated Rivers ; Research and Management*, 1/2, 183-188.
- PEIRY J.-L. (1988) : Dynamique fluviale historique dans le bassin de Cluses, (Haute-Savoie). *Actes du 112^e Congrès National des Sociétés Savantes, Lyon 1987, Section de Géographie ; Ed. du CTHS, Paris, 95-108.*
- PEIRY J.-L. (1989a) : La mappe sarde. Utilisation pour une étude historique de l'Arve. *Rev. Géogr. Lyon*, 4, 197-203.
- PEIRY J.-L. (1989b) : Les sédiments dans les torrents de l'Arve : discontinuité fonctionnelle et impact de l'aménagement des bassins-versants. *La Houille Blanche*, 3-4, 205-211.
- PEIRY J.-L. & J.-P. BRAVARD (1989) : Evolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impacts des aménagements contemporains. *La Houille Blanche*, 3-4, 221-225.
- PEIRY J.-L. (1990a) : Paléodynamique fluviale et chronologie de l'incision holocène de la basse vallée de l'Arve (Haute-Savoie). *Rev. Géogr. de l'Est*, 1, 77-92.
- PEIRY J.-L. (1990b) : Les torrents de l'Arve : dynamique des sédiments et impacts de l'aménagement des bassins-versants sur l'activité torrentielle. *Rev. Géogr. Alpine*, 1-2-3, 25-58.
- BRAVARD J.-P., PEIRY J.-L. & P. GADIOLET (1991) : La formation de la plaine alluviale holocène du Rhône à l'amont de Lyon. *Physio-géo*, 22-23, 167-172.
- BRAVARD J.-P. & J.-L. PEIRY (1993) : La disparition du tressage dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (XIX^e-XX^e siècles). *Zeitschrift Geomorphologie, Suppl. Bd 88*, 67-79.
- PEIRY J.-L. (1993) : Application de la cartographie assistée par ordinateur à l'élaboration d'un Schéma Directeur d'Aménagement ; vers un projet de SIG : l'exemple des berges de l'Arve dans l'agglomération d'Annemasse (Haute-Savoie). *Dossiers de la Rev. Géogr. Alpine*, 9, 93-98.
- PEIRY J.-L. (1994a) : L'Ingénieur et la rivière dans la vallée de l'Arve (Haute-Savoie) et ses conséquences sur la dynamique fluviale contemporaine. *Actes du Colloque International "Le fleuve et ses métamorphoses", Lyon, 13, 14 et 15 mai 1992 ; Didier Erudition, Paris, 245-255.*
- PEIRY J.-L. (1994b) : Application de l'analyse statistique multivariée et de l'image CM des dépôts fluviaux à la reconstitution des paléoenvironnements fluviaux : l'exemple d'un bras mort du Rhône en amont de Lyon. *Quaternaire*, 5/2, 59-67.
- PEIRY J.-L. & N. PUIPIER (1994) : La notion de lit fluvial sur les rivières alpines et méditerranéennes. *Actes du colloque : "Aménagement et Gestion des grandes rivières méditerranéennes, Avignon, 8-9-10 sept. 1993 ; Numéro spécial Etudes Vauclusiennes*, 5, 51-57.
- PEIRY J.-L., SALVADOR P.-G. & F. NOUGUIER (1994) : L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Rev. Géogr. Lyon*, 69/1, 47-56.

PEIRY J.-L. & F. NOUGUIER (1994) : Le Drac dans l'agglomération de Grenoble : première évaluation des changements géomorphologiques contemporains. *Rev. Géogr. Alpine*, 82, 2, 1994, 77-96.

PEIRY J.-L. & H. VIVIAN (1994) : Dynamique des crues et réduction des capacités d'écoulement du chenal consécutives à la construction d'un barrage hydroélectrique : l'exemple du Drac inférieur en amont de Grenoble. *Congrès "Crues et inondations", 23^e Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France, Nîmes, 14-15 et 16 sept. 1994*, 321-329.

PEIRY, J.-L. (1996) : La charge en suspension et la charge dissoute dans l'Isère à Grenoble : protocole de mesure et de test des données. *Rev. Géogr. Alpine*, 84, 2, 103-110.

LATULIPPE, C. & J.-L. PEIRY (1996) : Méthodologie de hiérarchisation des zones de production sédimentaire sur le bassin-versant d'un grand cours d'eau : l'Isère en amont de Grenoble. *Rev. Géogr. Alpine*, 84, 2, 29-44.

PIÉGAY, H., O. BARGE, J.-P. BRAVARD, N. LANDON & J.-L. PEIRY (1996). *Comment délimiter l'espace de liberté des rivières ?* In : "L'eau, l'homme et la nature". Colloque, de la Société Hydrotechnique de France, 18-19-20 septembre 1996, Paris, 10 p.

PAUTOU G., GIREL J., PEIRY J.-L., HUGHES F.M.H., RICHARDS K.S., FOUSSADIER R., GARGUET-DUPORT B., HARRIS T. & N. BARSOUM (1996) : Les changements de la végétation dans les hydrosystèmes fluviaux : l'exemple du haut-Rhône et de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. *Revue d'Ecologie Alpine*, t. III, 41-66.

RICHARDS K.S., HUGHES F.M.H., EL-HAMES A.S., HARRIS T., PAUTOU G., PEIRY J.-L. & J. GIREL (1996) : Integrated field, laboratory and numerical investigations of hydrological influences on the establishment of riparian tree species. *Floodplain Processes ; M.G Anderson , D.E. Walling & P.D. Bates (Ed.) ; J. Wiley & Sons Ltd, Chichester, 611-635.*

BRAVARD J.-P. , AMOROS C., PAUTOU G., BORNETTE G., BOURNEAU M., DECHÂTELIER M., GIBERT J., PEIRY J.-L., PERRIN J.-F & H. TACHET (1997) : River incision in south-east France : morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers : Research & Management*, 13, 75-90.

PEIRY, J.-L. & C. FÉOUGIER (1997). A propos de la fondation de Grenoble : un réexamen de l'hypothèse d'une installation primitive sur un môle alluvial. *Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes, sous presse.*

PAUTOU G., PEIRY J.-L., GIREL J., BLANCHARD E., HUGHES F., RICHARDS K., HARRIS T., EL-HAMES A., BARSOUM N. & R. FOUSSADIER (1997) : Space-time units in floodplains : the example of the Drac river upstream of Grenoble (French Alps). *Global ecology and biogeography letters, sous presse.*

HUGHES F., HARRIS T., RICHARDS K., PAUTOU G., EL HAMES A., GIREL J., PEIRY J.-L. & N. BARSOUM (1997) : Woody riparian species response to different moisture conditions : Laboratory experiments on *Alnus incana*. *Global ecology and biogeography letters, sous presse.*

PIÉGAY H. & J.-L. PEIRY (1997) : Long profile evolution of an intra-mountain stream and gravel load management : example of the middle Giffre river (French Alps). *Environmental Management, sous presse .*

PEIRY, J.-L., GIREL J. & G. PAUTOU (1997) : Hydroelectrical developments and their impact on fluvial hydrosystems. In "Encyclopedia of Environmental Sciences"; D. Alexander Ed., USA, sous presse.

BRAVARD, J.-P., N. LANDON, J.-L. PEIRY, H. PIÉGAY & D. POINSART (1997). Managing erosion, bedload transport and ecology on geomorphological basis at the watershed and river scale, southeastern France. *Soumis pour publication, 20 p.*

Rapports d'études et mémoires non publiés

PEIRY J.-L. (1995) : Etude morphodynamique des bassins versant de l'Aire et de la Drize. Institut de Géographie Alpine, Univ. J. Fourier, Grenoble ; Etat de Genève ; SIVOM de St-Julien-en-Genevois, rapport d'étude, 75 pages.

BRAVARD J.-P. & J.-L. PEIRY (1994) : Etude géomorphologique des causes d'érosion des berges du Tacon et du Flumen et descriptif des travaux à entreprendre. U.F.R de Géographie, Univ. Paris-Sorbonne ; Institut de Géographie Alpine, Univ. J. Fourier, Grenoble ; PNR du haut-Jura, rapport d'étude, XXVIII et 66 pages.

PEIRY J.-L. & N. PUIPIER (1994) : Méthodologie de sectorisation morphodynamique des plaines alluviales. Univ. Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine ; Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, rapport d'étude, 100 pages + cartes couleur H.T.

PAUTOU G., PEIRY J.-L., GIREL J., BOREL J.-L., PAUTOU M.-P., LONG A., FOUSSADIER R. & G. GIRARD (1993) : L'évolution d'une vallée alpine au contact d'une grande agglomération : la basse vallée du Drac en amont de Grenoble. *Rapport préliminaire, Doc. n° 1, Comité Drac Vivant, Conseil Général de l'Isère.*

PEIRY J.-L. & C. JULIEN (1993) : Schéma Directeur d'Aménagement de l'Arve et de ses berges. *Rapport d'étude pour le Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'entretien de l'Arve et de ses berges dans l'agglomération d'Annemasse, 60 pages + 9 cartes couleurs HT.*

PEIRY J.-L. (1990a) : Fouilles archéologiques du tramway de Grenoble : étude géomorphologique des sites de la place Notre-Dame et de la place Sainte-Claire. *Rapport d'étude destiné à la Direction des Antiquités Historiques Rhône-Alpes, 22 pages.*

PEIRY J.-L. (1990b) : T.G.V. Sud : traversée de la plaine alluviale du Rhône en amont de Lyon ; rapport géomorphologique. *Rapport d'étude destiné à la Direction des Antiquités Historiques Rhône-Alpes, 16 pages.*

BRAVARD J.-P., FRANC O., LANDON N., LARGE J.-L. & J.-L. PEIRY (1989) : La basse vallée de l'Ain (Pont d'Ain - Confluence Ain-Rhône) : étude géomorphologique. *Rapport d'étude PIREN Rhône - Agence de l'Eau RMC, avril 1990.*

PEIRY J.-L. (1988) : Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intramontagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). *Thèse de Géographie et Aménagement, Université LYON 3, 378 pages.*

PEIRY J.-L. (1987) : Les torrents de l'Arve : dynamique des sédiments dans le système torrentiel. *Rapport d'étude dactylographié ; S.R.A.E. Rhône-Alpes-S.H.F., Sous-Groupe "Arve" ; 130 pages.*

PEIRY J.-L. (1985) : Cartographie appliquée à la gestion d'un espace péri-urbain : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve dans l'agglomération d'Annemasse. *Mémoire de D.E.A., Université LYON 3, 60 pages dactylographiées + cartes couleur H.T.*

PEIRY J.-L. (1984) : Etude d'Aménagement de l'Arve dans l'Agglomération d'Annemasse. *Mémoire de Maîtrise, Université LYON 3, 150 pages dactylographiées + cartes couleur H.T.*

LISTE DES DIRECTIONS DE RECHERCHE D'ÉTUDIANTS

* Mémoires de Maîtrise

Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.

HURAUD S. (en préparation) : Etude hydrologique et des transports de matière dissoute de la rivière de Coufin, grotte de Choranche, massif du Vercors (*titre provisoire*) (Co-direction avec J.-J. Delannoy).

MONTANVERT S. (en préparation) : Analyse hydrologique de l'Isère pendant la période végétative à Grenoble (1993-1996) (*titre provisoire*).

SAUSSUS G. (en préparation) : Etude géomorphologique des îles de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan (*titre provisoire*).

VIEUX-MELCHIOR M. (en préparation) : Etude biogéographique des îles de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan (*titre provisoire*).

BARRY J. (1996) : Les modifications hydrologiques de la rivière Ver (GB) : facteurs naturels ou facteurs anthropiques. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 100 pages.*

BLANC J.-M. (1996) : La Gresse et sa plaine alluviale : étude de la dynamique fluviale à l'Epoque Moderne et impacts de l'endiguement. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 177 pages.*

DIDIER C. (1996) : Les deltas fluviaux : synthèse fonctionnelle. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 123 pages + annexes* (Co-direction avec J.J. Delannoy).

MORIN S. (1996) : Mise en place d'une méthode de sectorisation morphodynamique des petits cours d'eau, en vue de leur gestion. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 133 pages + annexes.*

PLOYON E. (1996) : Evolution de la couverture végétale et dynamique de la recharge sédimentaire sur un cours d'eau peu anthropisé : l'exemple de la Gresse (Isère). *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 95 pages + annexes.*

LATULIPPE C. (1995) : Recherche sur l'origine et la dynamique de la charge en suspension de l'Isère en amont de Grenoble. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 100 pages.*

FÉOUGIER C. (1994) : A propos de la fondation de Grenoble : reconstitution du paléoenvironnement fluvial sur les sites d'archéologie urbaine. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 96 pages.*

ROUSSET A. (1993) : Exploitation des cartes anciennes pour une approche de l'évolution du profil en plan de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 135 pages.*

NOUGUIER F. (1992) : La métamorphose de l'Isère et du Drac à travers l'étude du profil en long (XIX^e-XX^e siècle). *Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 97 pages.*

* Mémoires de Maîtrise Sciences et Techniques « Aménagement et développement économique » Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.

BAKÉS J. (1995) : Impacts de la canalisation du Rhône et de l'aménagement du parc de loisirs sur le fonctionnement en crue de l'île de Miribel-Jonage. *Mémoire de MST, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 107 pages + volume d'annexes.*

JULIEN C. (1992) : Etude sur l'image et l'aménagement de l'Arve dans l'agglomération d'Annemasse. *Mémoire de MST, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 120 pages.*

Rapport professionnel d'Institut Universitaire Professionnalisé « Ingénierie du développement territorial »

Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.

LOULLIER M. (1997) : Etude préalable à la mise en place d'un Système d'Information Géographique d'aide à la gestion dans le bassin-versant du Doux (Ardèche). *Mémoire professionnel d'IUP, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 78 pages + volume d'Annexes.*

**Mémoires de D.E.A «Gestion des Espaces Montagnards »,
Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.**

PLOYON E. (en préparation) : Essai de clarification de la notion de « qualité physique » des cours d'eau à partir d'une analyse de la bibliographie internationale (*titre provisoire*).

BOGEAT V. (1995) : Essai méthodologique d'application du concept d'écotone aux relations homme/espace protégé : l'exemple de la Réserve Naturelle du Delta de la Dranse (Haute-Savoie). *Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 98 pages.*

MOUTARD R. (1995) : L'évolution de la vulnérabilité à l'érosion des pentes d'un bassin-versant torrentiel sous l'effet des événements climatiques et des interventions humaines (1730-1995) : l'exemple du Malnant dans les Bornes occidentales. *Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 49 pages.*

PUPIER N. (1992) : Méthode de cartographie des plaines alluviales par rapport à la dynamique fluviale : Haut-Drac, Roubion, et Gardon. *Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, 88 pages + cartes H.T.*

Thèse de Doctorat

(*autorisation de direction par dérogation du Conseil Scientifique de l'Université Joseph Fourier*)

VAUTIER F. (en préparation) : La végétalisation du chenal de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan : évolution, paramètres de contrôle et perspectives de gestion (*titre provisoire*).

TEXTE DE SYNTHÈSE

—

INTRODUCTION GÉNÉRALE



En 1988, je soutenais une thèse de géomorphologie fluviale portant sur la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un grand bassin-versant : l'Arve, premier affluent du Rhône en aval du lac Léman (Peiry, 1988). Se fondant sur une approche systémique, cette étude fut l'occasion de montrer la relation étroite liant l'abondance de la fourniture et du transit de la charge grossière à la dynamique fluviale, que ce soit le style géomorphologique et ses changements dans le temps et dans l'espace (Peiry, 1986 ; 1987 ; 1989) ou l'évolution altitudinale du plancher alluvial (Peiry, 1987 ; 1990 ; Peiry & Bravard, 1989).

Mon recrutement comme Maître de Conférences à l'Institut de Géographie Alpine, en octobre 1989, m'a offert la possibilité de poursuivre et de développer mes travaux. La diversification de mes recherches a porté : 1) sur les échelles spatiales, les études étant menées sur des unités géographiques de taille très différentes, du bassin-versant de plusieurs milliers de km² à la forme élémentaire de quelques dizaines de m² ; 2) sur les échelles temporelles, les études étant développées aux quatre pas de temps classiquement utilisés par le géomorphologue, du temps long à l'événement ; 3) sur une analyse plus fine des processus de la dynamique fluviale, en grande partie fondée sur la collecte, le traitement de données quantitatives et la modélisation. Au cours de ces travaux, j'ai pu étendre considérablement mon expérience en travaillant sur un grand nombre de cours d'eau des Alpes du Nord et du S.E de la France (fig. I.1) : bassins-versants torrentiels, petites rivières de montagne ou de l'avant-pays alpin sur lesquelles le cadre structural exerce de fortes contraintes ; grandes rivières des plaines alluviales intra-alpines au chenal auto-formé..

Les diverses études et travaux réalisés ont été l'occasion d'une ouverture sur les nouvelles méthodes et les outils de l'analyse géomorphologique : a) la collaboration avec les chercheurs de l'Université de Cambridge fut pour moi l'occasion d'un apprentissage de techniques de mesures de terrain sophistiquées, impliquant la mise en place, la maintenance et le dépannage d'instruments de mesures complexes, auxquels ma formation de géographe ne m'avait pas préparé ; b) l'utilisation de l'informatique pour le traitement statistique des données numériques et la représentation cartographique a été l'occasion d'une réflexion visant à développer des outils fonctionnels et diversifiés pour l'établissement de diagnostics géomorphologiques ; cette démarche inclut toutes les étapes de travail, du recueil des données sur le terrain à l'aide à l'interprétation.

Si ces neuf années de recherche depuis la soutenance de ma thèse de Doctorat ont été riches en expériences nouvelles, il n'en demeure pas moins que la ligne directrice que je m'étais fixée à cette époque a subsisté, voire a été renforcée :

1) La dynamique spatio-temporelle des sédiments est toujours au cœur des travaux développés. La mesure de la charge dissoute et de la charge en suspension de l'Isère (Peiry, 1996), mon intérêt pour la dynamique de la recharge sédimentaire fine sur l'Isère en amont de Grenoble (Latulippe & Peiry, 1996) et l'évolution altitudinale du plancher alluvial des rivières des Alpes du Nord (Peiry, Salvador *et al.*, 1994) l'attestent.

2) L'analyse des impacts de l'homme sur les rivières tenait une large place dans ma thèse de Doctorat. Celle-ci est encore aujourd'hui au cœur de ma recherche, à travers l'étude des cumuls d'impacts et des réponses complexes affectant tous les compartiments de l'hydrosystème. Ce niveau d'analyse est indispensable pour la compréhension des processus contemporains de la dynamique fluviale. Il est, par exemple, au centre des travaux de recherche engagés depuis 4 ans, en collaboration avec les phytoécologues grenoblois, sur les processus contemporains de végétalisation de certains lits fluviaux alpins. Le développement de la végétation apparaît ainsi être fortement liée à la diminution de la fourniture sédimentaire grossière et à la raréfaction des charriages induite par les activités humaines. La compréhension des mécanismes de la phytostabilisation des formes fluviales nécessite d'importants développements en recherche fondamentale sur les facteurs abiotiques qui contrôlent l'installation de la forêt alluviale pionnière dans le chenal.

3) La réflexion concernant les implications de la métamorphose des rivières alpines dans la gestion des hydrosystèmes fluviaux demeure un des éléments essentiels de mes études et recherches. Mon rôle apparaît à différents niveaux :

- dans ma participation aux réflexions du conseil scientifique placé auprès du Comité de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse ;

- dans les travaux de recherche appliquée mis en œuvre pour le compte de collectivités territoriales, fréquemment réalisés en collaboration avec des bureaux d'études spécialisés. Ils ont été pour moi l'occasion de prendre en compte les réalités socio-économiques, tout en élaborant des savoir-faire et en établissant des contacts essentiels pour orienter la formation des étudiants ;

- dans le développement récent d'approches de gestion plus respectueuses du fonctionnement des cours d'eau, notamment par le biais de techniques d'ingénierie géomorphologique.

Ce diplôme d'habilitation à diriger les recherches a été rédigé pour transmettre au lecteur quels ont été les éléments marquants de mon itinéraire de recherche, depuis la soutenance de ma thèse de Doctorat. J'ai souhaité présenter les savoir-faire acquis au fil des ans en montrant que toutes les échelles spatio-temporelles d'étude sont abordées, parce que cela correspond à un de mes soucis intellectuels permanents (fig. I.2) :

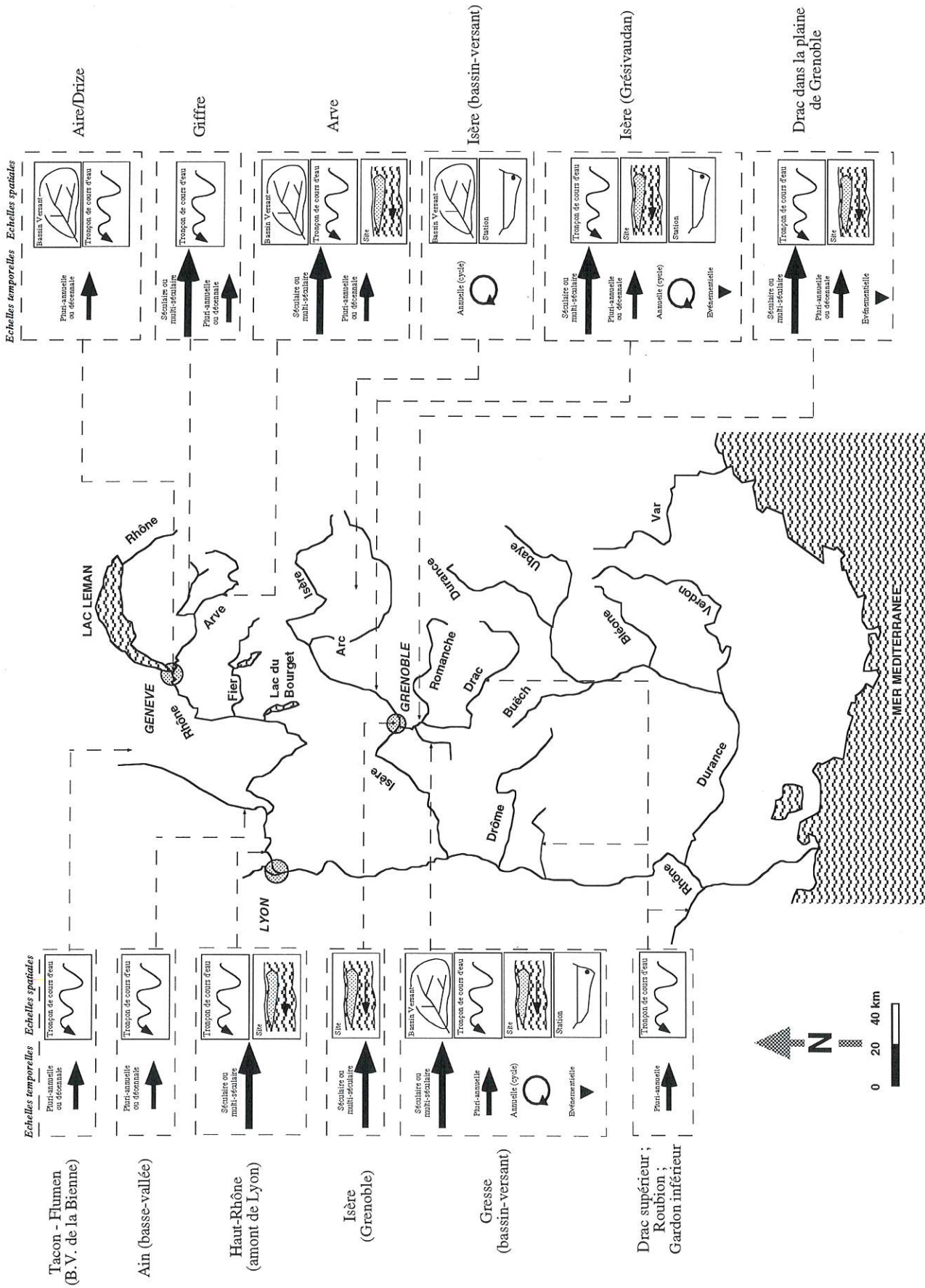


Figure I.1 - Localisation des cours d'eau étudiés, avec référence aux échelles spatiales et temporelles d'étude.

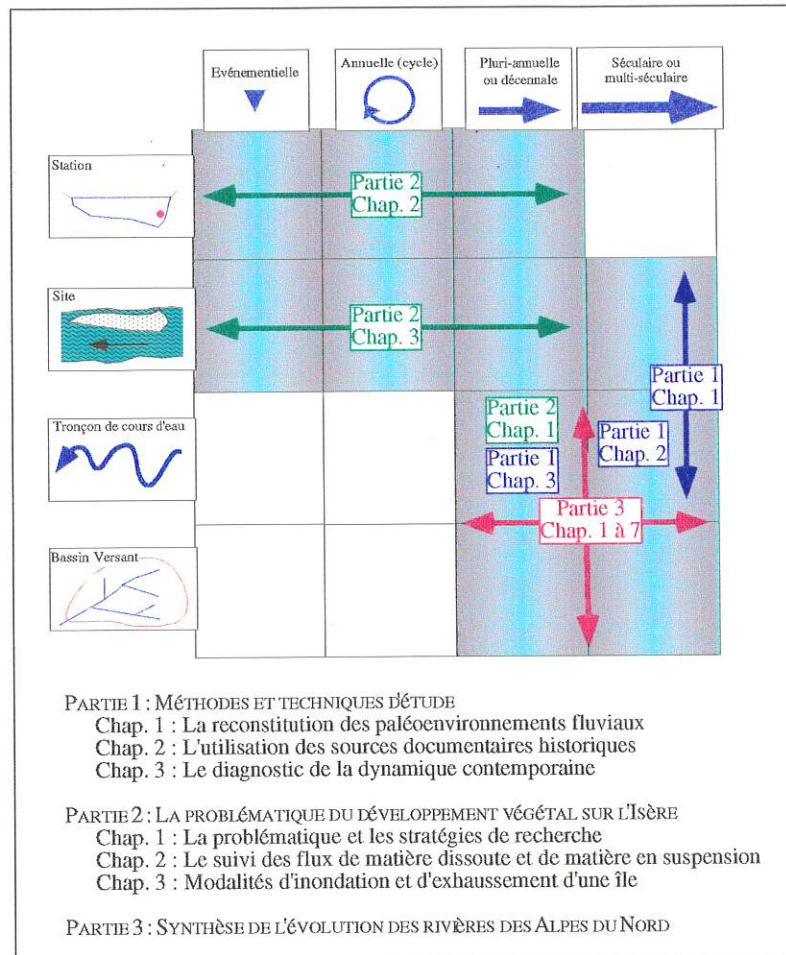


Figure I.2 - Organisation des différents chapitres de ce DHDR en fonction des échelles spatiales et temporelles abordées.

* La première partie de ce mémoire est consacrée à la présentation de méthodes et techniques développées pour obtenir de l'information géographique quantitative, le recours à la quantification étant l'un des éléments majeurs de la géomorphologie contemporaine. Trois échelles temporelles sont explorées : a) le *temps multiséculaire*, avec les techniques de reconstitution paléoenvironnementale traitées à partir d'exemples ; b) le *temps séculaire*, avec les outils de reconstitution de la dynamique fluviale fondée sur l'analyse des documents anciens et plus particulièrement de la cartographie historique ; c) le *temps court* avec les techniques de recueil de l'information et de diagnostic géomorphologique mises

en œuvre dans le cadre de conventions d'étude et de recherche passées avec des bureaux d'étude et/ou des collectivités territoriales.

* La seconde partie expose comment je conçois et organise mes recherches en géomorphologie fluviale. Les études sont réalisées en travaillant à différentes échelles emboîtées. Elles nécessitent la mise en œuvre de techniques adaptées à chaque niveau d'échelle. Les étudiants dont je dirige et co-dirige les travaux (Maîtrise, D.E.A. et thèse de doctorat) sont impliqués dans les programmes d'étude. J'ai choisi de présenter cet aspect de ma recherche à travers la problématique de la végétalisa-

tion du lit de l'Isère, qui, depuis 1993, est l'un des axes majeurs de mes activités. Elle a été l'occasion de développer de fructueuses collaborations interdisciplinaires internationales, notamment avec les collègues du département de Géographie de l'Université de Cambridge, dans le cadre de deux contrats de recherches sur ce thème financés par la Communauté Européenne. J'ai choisi de mettre l'accent sur les résultats des mesures effectuées à l'échelle du site et de la station d'étude. Ils bénéficient d'un suivi assidu depuis le début de l'année 1994, pour comprendre quels sont les facteurs abiotiques de la végétalisation du chenal de l'Isère.

* Depuis 1989, j'ai participé à de nombreux contrats de recherche fondamentale ou appliquée. Ces travaux m'ont permis de rédiger ou de collaborer à la rédaction de plus de vingt publications spécialisées. La plupart traitent de la dynamique fluviale des rivières nord-alpines et de leur métamorphose accélérée sous l'effet des activités humaines. Ces travaux permettent de tirer un certain nombre d'idées générales, tant en matière de fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux montagnards soumis à l'impact, que de principes de gestion globale. A ce stade de ma réflexion, il m'a paru indispensable de dresser un état des connaissances sur ce thème et de rédiger une synthèse de l'évolution des cours d'eau des Alpes du Nord, au cours des 250 dernières années. Ainsi, la troisième partie de ce DHDR a pour fil conducteur l'étude de la métamorphose des cours d'eau nord-alpins et des mécanismes ayant engendré l'impact ou plus exactement des combinaisons complexes d'impacts ; celles-ci touchent la plupart des composantes de l'hydrosystème. Elle aboutit à une série de réflexions sur la notion d'impact anthropique et expose les principes de gestion des hydrosystèmes fluviaux que j'essaie de promouvoir et de défendre dans le cadre de mes contacts institutionnels.

PARTIE I



APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES ET ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES

Introduction

Depuis une quinzaine d'années, les publications internationales en géomorphologie montrent très clairement une tendance toujours plus poussée à la spécialisation et à l'analyse quantitative des processus. Les géomorphologues mettent en œuvre des techniques toujours plus sophistiquées et nécessitant des moyens financiers de plus en plus lourds (Church, Gomez *et al.*, 1985), au risque parfois d'une démarche réductionniste se coupant de la dimension spatio-temporelle des processus (Slaymaker, 1987). Comme l'indique Richards (1990), l'objectif de la géomorphologie est d'expliquer les formes du relief par des processus dont on a compris les mécanismes. Travailler sur les processus s'avère donc indispensable, mais pour "l'émergence de nouvelles structures et relations auxquelles participent les mécanismes identifiés, et le développement de modèles rétroactifs formes-processus-formes, itératifs et distribués spatialement" (Richards, *op. cit.*). La recherche ne peut donc se cantonner à un seul niveau d'échelle spatio-temporelle, mais le chercheur doit être capable de travailler de l'unité élémentaire (micro-échelle) à l'échelle du bassin-versant (macro-échelle), de conduire une analyse à des pas de temps allant de l'événement jusqu'au temps long. Bien évidemment, les sources documentaires et les méthodes d'investigations diffèrent très fortement selon l'échelle spatiale et/ou temporelle considérée.

L'objectif de la première partie de ce DHDR est de montrer quelles sont mes principales orientations méthodologiques, à différents niveaux d'échelle spatio-temporelle, en se fondant sur des études de cas ayant fait l'objet de publications ou de rapports. Aujourd'hui, les investigations reposent de plus en plus systématiquement sur l'analyse quantitative des formes et des processus qui les construisent ou les détruisent. La quantification est une démarche généralement lourde, qui nécessite d'avoir recours à des techniques d'échantillonnage et de recueil des données variées, parfois sophistiquées, mais toujours adaptées non seulement à la problématique, mais aussi à l'échelle spatio-temporelle étudiée : le travail de quantification n'est, bien évidemment, pas le même si on travaille sur une forme élémentaire, un tronçon de cours d'eau ou un bassin-versant ; on n'utilise pas non plus les mêmes méthodes si les investigations portent sur le temps court (échelle événementielle par ex.) ou sur une reconstitution du fonctionnement paléoenvironnemental. Le chercheur en géomorphologie fluviale doit donc d'être capable de faire varier ses sources documentaires, ses techniques et ses outils d'investigation pour les adapter au cas étudié, et de mettre en œuvre des relais de méthodes, que ce soit au niveau de la recherche fondamentale ou de la recherche appliquée. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la présentation d'approches méthodologiques adaptées à l'étude du temps long à des pas de temps multiséculaire (chap. 1) ou séculaire (chap. 2).

L'Université a entamé depuis plusieurs années une démarche de professionnalisation de certains de ses cursus, avec la création des Maîtrises Sciences et Techniques (MST), des Instituts Universitaires Professionnalisés (IUP) et des Diplômes d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS). L'enseignant-chercheur en géomorphologie doit ainsi être capable de donner aux étudiants un savoir-faire qui puisse être directement valorisé sur le marché du travail. Il doit leur transmettre une connaissance théorique sur le fonctionnement morphodynamique, mais aussi enseigner des méthodes et des outils de recueil, de traitement de la donnée numérique et de restitution spatiale de l'information géographique. Le chapitre 3 est consacré à la présentation de méthodes de diagnostic géomorphologique conçues et mises en œuvre à l'occasion de travaux réalisés en partenariat avec des bureaux d'études ou pour le compte de collectivités territoriales.

CHAPITRE 1

LA RECONSTITUTION DES PALÉOENVIRONNEMENTS FLUVIAUX : LES INVESTIGATIONS SUR LE TEMPS LONG

- 1.1) Positionnement vis-à-vis de la recherche sur les paléoenvironnements fluviaux
- 1.2) L'exploitation paléogéographique des sondages et des données géotechniques fournissant l'altitude du toit de *l'alluvium* : l'exemple de Grenoble
- 1.3) La reconstitution des phases de remplissage de bras mort par l'analyse géostatistique de la granulométrie des dépôts

Résumé du chapitre 1

La reconstitution des paléoenvironnements fluviaux s'appuie, pour l'essentiel, sur l'analyse des formes et des structures géomorphologiques anciennes mémorisées dans les plaines alluviales. Elle nécessite de recourir à des investigations de terrain reposant en grande partie sur la topographie de paléoniveaux, l'observation des stratigraphies, des structures sédimentaires et de la granulométrie des dépôts. Ce chapitre expose les approches méthodologiques mises en œuvre au cours de ces dernières années, à l'occasion de recherches menées en collaboration avec les archéologues. Trois études de cas sont présentées. La première montre l'intérêt de l'exploitation des sondages pour la reconstitution de la topographie du toit de *l'alluvium*, sous la ville de Grenoble. L'étude suivante propose une technique géostatistique de reconstitution de la stratigraphie du remplissage sédimentaire d'un bras mort du Rhône, à partir de sondages. La dernière étude montre l'intérêt de ce type d'outil pour la localisation et la reconstitution du remplissage du fossé gallo-romain de Grenoble, dans le contexte difficile d'un chantier d'archéologie urbaine, où toute observation directe de stratigraphies était impossible.

1.1) Positionnement vis-à-vis de la recherche sur les paléoenvironnements fluviaux

En géomorphologie fluviale, la mémoire de l'action des écoulements de surface est progressivement révélée. Comme l'indique Starkel (1995, p. 4) la paléohydrologie continentale est une "nouvelle branche des sciences de la terre" en plein développement depuis le milieu des années 1960. Des études toujours plus nombreuses ont progressivement permis d'identifier les changements de l'activité géomorphologique des rivières. Les développements actuels montrent que nous sommes dans une phase de transition entre un approche qualitative et une quantification des modifications holocènes des débits des fleuves. La spécificité des études de géomorphologie fluviale engagées sur le temps long (à l'échelle de la période holocène) est que les données potentielles sont exclusivement liées à la capacité du milieu à mémoriser les fonctionnements anciens. Cette capacité de mémorisation tient essentiellement à la préservation de formes et d'assemblages de formes plus ou moins complets dans les plaines alluviales, qui témoignent de la dynamique des flux de matière et d'énergie qui les ont engendrés (Starkel, 1983 ; Starkel, 1991 ; Starkel, 1995a ; Starkel, 1995b). Les sources d'archives (cartes, plans anciens, témoignages écrits etc.), la documentation technique ou scientifique (profils de pentes, sections d'écoulements etc.) n'existant que pour les siècles les plus récents, c'est donc du terrain qu'il faut tirer les éléments de reconstitution paléogéomorphologique et paléohydrologique.

Depuis le début des années 1990, les publications spécialisées montrent l'émergence de groupes de techniques pour réaliser ces reconstitutions (Wohl & Enzel, 1995) : 1) étude des caractéristiques morphométriques du réseau de drainage lorsqu'il a été préservé d'un retour ultérieur du chenal, dans le but de reconstruire les bases du régime hydrologique (Rotnicki, 1983 ; Gonera & Kozarski, 1987 ; Kozarski, 1991 ; Rotnicki, 1991) ; 2) analyse des caractéristiques sédimentaires des dépôts alluviaux et mise en relation de la taille des sédiments transportés avec les paramètres de l'écoulement (paléocompétence) via les équations d'hydraulique (Church, 1978 ; Maizels, 1983 ; Church, Wolcott *et al.*, 1990 ; Gregory & Maizels, 1991 ; Maizels & Aitken, 1991) ; 3) méthodes géobotaniques dans lesquelles les caractéristiques de la végétation le long des cours d'eau sont utilisées pour reconstituer l'histoire des écoulements (Strunk, 1989 ; Strunk, 1991 ; Strunk, 1992 ; Astrade, 1996) ; 4) méthodes utilisant des indicateurs de paléoniveaux (accumulations de débris minéraux ou organiques, limites de lichens, "slackwater deposits"...) (Koutaniemi, 1987 ; Baker, 1991 ; Koutaniemi, 1991).

Sur le Rhône et ses affluents, les études portant sur les paléoenvironnements fluviaux ont principalement été développées en étroite relation avec les archéologues

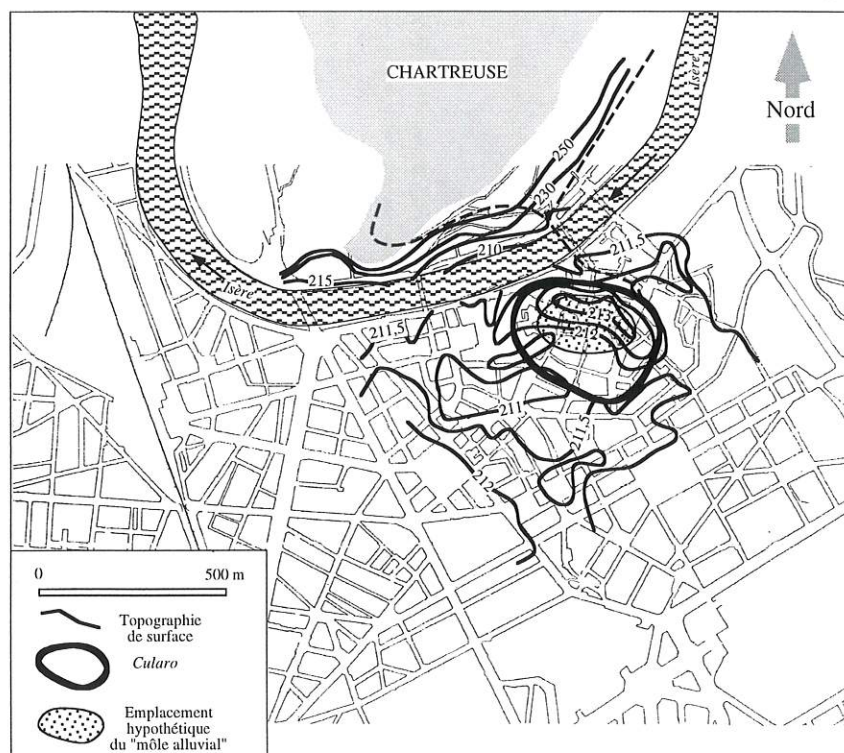
(Verot, Jacquet *et al.*, 1987 ; Bravard, Peiry *et al.*, 1991 ; Macé, Vérot-Bourrely *et al.*, 1991 ; Salvador, 1991). Dans le cadre de ma thèse de Doctorat, les investigations avaient principalement porté sur les indications paléoenvironnementales fournies par l'analyse sédimentologique des stratigraphies ou des sondages (Peiry, 1988 ; Peiry, 1990). Bien que mes travaux actuels soient essentiellement tournés vers l'analyse du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux contemporains en vue d'améliorer leur gestion, plusieurs études ont été conduites sur les paléoenvironnements de bord de rivière, à l'occasion de fouilles de sauvetage réalisées par les archéologues (TGV Sud ; tramway de Grenoble ; chantiers de l'A51 dans les vallées de la Gresse et du Lavanchon, affluents du Drac). Les pages qui suivent présentent les apports méthodologiques des études engagées sur le site de Grenoble et le tracé du TGV Sud dans sa traversée du Rhône en amont de Lyon. Une première étude de cas présente les apports paléogéographiques de l'exploitation des sondages réalisés dans le centre de la ville de Grenoble. Une seconde étude propose une méthode de reconstitution de la stratigraphie des dépôts alluviaux lorsqu'une observation directe s'avère impossible. Elle est illustrée par deux exemples : a) la reconstitution des processus de remblaiement d'un paléoméandre du Rhône en amont de Lyon, à partir de l'étude d'un transect établi perpendiculairement à l'ancien chenal ; b) la détermination de l'existence et l'étude du remplissage sédimentaire d'un fossé localisé à l'extérieur de l'enceinte gallo-romaine édifée au IV^e siècle à Grenoble.

1.2) L'exploitation paléogéographique des sondages et des données géotechniques fournissant l'altitude du toit de l'alluvium : l'exemple de Grenoble

1.2.1) Problématique de l'étude

A la suite des travaux de Blanchard (1911) et Müller (1930), les archéologues et géographes grenoblois tenaient pour acquis l'installation primitive de la ville, il y a vingt siècles, sur un "môle alluvial" entre l'Isère et le Drac. C'est ce "point haut" protégé des inondations qui aurait fixé les premières implantations humaines. Selon Blanchard (1911), ce site topographiquement surélevé prenait la forme d'un tertre localisé entre deux bras du Drac ; le géographe grenoblois prenait l'exemple des grandes inondations du XVIII^e et XIX^e siècle qui avaient exclusivement épargné le centre ancien de la ville, pour étayer son hypothèse (voir fig. 1.1). Le détail de ces crues et des zones épargnées par l'inondation fut développé par Pilot (1859) ; on peut supposer que Blanchard s'appuya très largement sur les observations du milieu du XIX^e siècle pour formuler son hypothèse.

Figure 1.1 - Topographie de la surface du Grenoble ancien ; le cœur de la vieille ville est légèrement exhaussé par rapport au reste de la cité, ce qui explique que l'inondation de 1859 ait laissé certaines rues exondées
(Source : Peiry & Féougier, 1997).



L'examen de la topographie actuelle du centre ville montre effectivement une proéminence de l'ordre d'1 mètre à 1,50 mètre par rapport à la topographie des alentours (fig.1.1). Les articles anciens ne permettent cependant pas de conclure s'il s'agit d'un point haut naturel ou si l'épaisseur du remblaiement urbain est plus forte dans la zone où l'habitat est le plus ancien. Par ailleurs, les progrès réalisés ces dernières années dans la connaissance des processus fluviaux à proximité de la confluence entre Isère et Drac, notamment depuis le XIII^e et XIV^e siècle (Bravard, 1989 ; Salvador, 1991 ; Féougier, 1994), fournissent des éléments peu compatibles avec l'existence d'un tel point haut. Il était donc nécessaire de réexaminer l'hypothèse du "môle alluvial" à la lumière des nouvelles connaissances de la dynamique de la zone de confluence Drac-Isère (Peiry & Féougier, 1997).

1.2.2) Méthodologie mise en œuvre

L'étude a été conduite sur la base d'une synthèse des connaissances portant sur le sous-sol grenoblois. L'objectif était de repérer dans les sondages disponibles l'altitude du sommet du remblaiement de gravier. Ces formations alluviales correspondent à des formes de chenal (bras vifs, bancs de galets) et traduisent donc des conditions de fort hydrodynamisme. Les faciès graveleux sont caractéristiques des formations alluviales ayant édifié le cône alluvial du Drac ; ils sont également présents dans le chenal de l'Isère.

Cinquante et un sondages localisés dans la partie nord de la ville ont été utilisés. Ils proviennent de trois sources principales : 1) des études géologiques faites lors de la

construction du tramway de Grenoble ; 2) des études réalisées par des bureaux d'études spécialisés en géotechnique ; 3) d'observations faites par nous-mêmes à l'occasion des fouilles archéologiques auxquelles nous avons collaboré. Chaque sondage a été repéré en plan par sa latitude et longitude. Un fichier informatique repérant dans l'espace les coordonnées du toit de gravier a été constitué. Il a été traité à l'aide d'un logiciel de restitution topographique calculant des grilles d'altitude et traçant des courbes de niveau (SURFER®). Les résultats du traitement géostatistique de l'altitude du toit de gravier ont été synthétisés sur la figure 1.2.

1.2.3) Interprétation paléogéographique des résultats

En raison du nombre limité de sondages et de leur très inégale répartition spatiale, la restitution cartographique en courbes de niveau du toit de l'alluvium graveleux donne une image certainement très imparfaite de la réalité. La précision du document est malgré tout suffisante pour faire apparaître l'organisation spatiale des dépôts alluviaux (fig. 1.2) :

1) Le toit de l'alluvium présente globalement une pente de direction NNE. Elle résulte de la construction du cône alluvial du Drac, la rivière s'écoulant selon un axe Sud-Nord. Ce cône est clairement identifiable jusqu'au pont Marius Gontard, près duquel était localisée la confluence Drac-Isère au XVI^e siècle. Le cône s'atténue rapidement vers l'Est de la ville, comme en témoignent des courbes de niveau parallèles et très proches. Encore

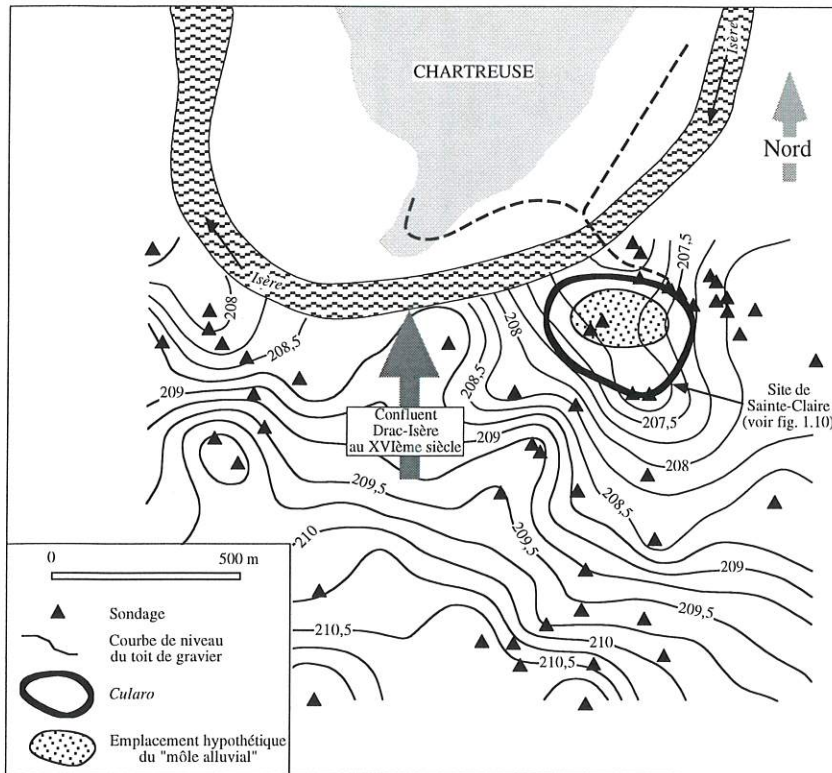


Figure 1.2 - Topographie du toit de gravier à Grenoble ; le cœur de la ville ancienne est nettement plus bas que le reste de la cité
(Source : Peiry & Féougier, 1997).

Figure 1.3 - Changements de la dynamique fluviale du confluent Drac-Isère depuis le XV^e siècle
(Source : Salvador, 1991, modifié).

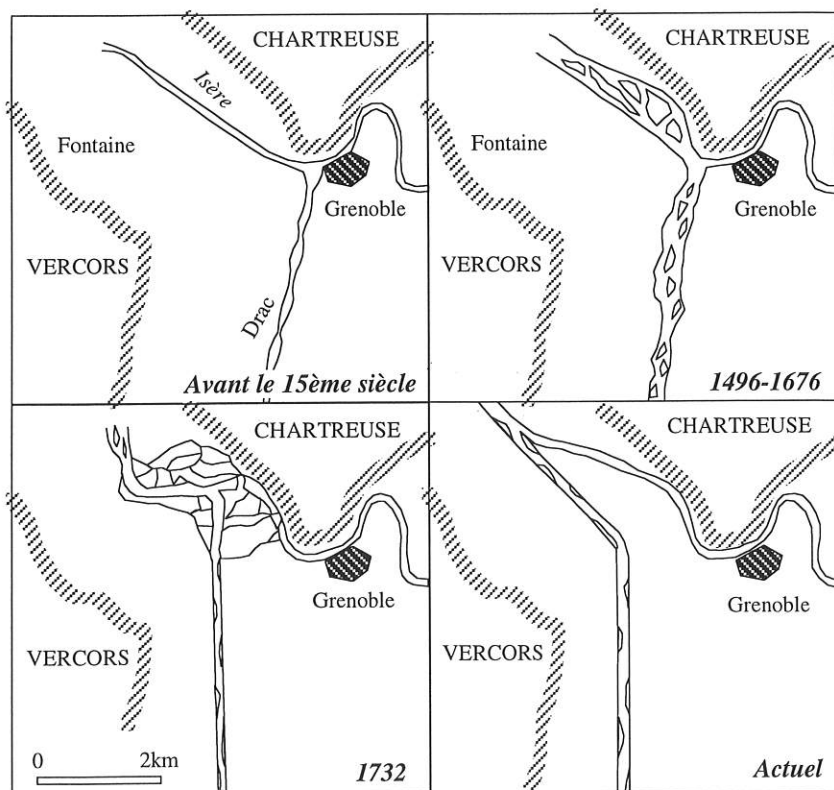
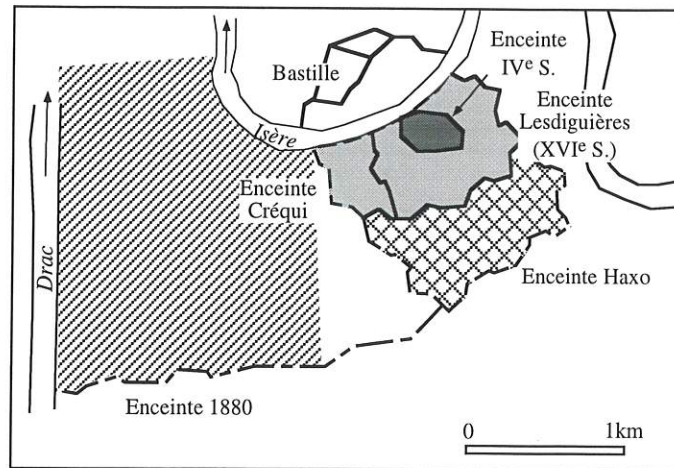


Figure 1.4 - Les enceintes successives de Grenoble : elles marquent le développement progressif de la ville en direction du Sud, puis de l'Ouest lié à la réussite du programme d'endiguement

(Source : Chomel, 1976, modifié).



plus à l'Est dans la boucle de l'Île-Verte, les formations grossières sont quasiment absentes de l'alluvium, toute cette zone paraissant être restée en dehors de l'influence du Drac (Chardon, Marnezy *et al.*, 1980).

2) La ville gallo-romaine de *Cularo* a été implantée sur la bordure orientale du cône alluvial du Drac. A l'emplacement de la cité originelle, l'altitude du toit de gravier est inférieure à 207,50 mètres NGF. Contrairement aux hypothèses de Blanchard (1911), la ville ancienne n'est pas localisée sur un point haut naturel, mais dans une zone topographiquement déprimée par rapport au reste de la plaine. Cela signifie qu'aux XVIII^e et XIX^e siècles, une partie de la ville était préservée des grandes inondations du fait d'une épaisseur de remblaiement urbain plus forte qu'ailleurs. Cette surépaisseur du remblaiement urbain remonte au moins au XVI^e siècle, l'inondation d'août 1525 ayant déjà épargné le centre ancien (Pilot, 1859).

La nette variation d'altitude du toit de gravier aux abords de la vieille ville trouve une explication dans le comportement du Drac au cours de la période historique. Reprenant les écrits de Bouchayer (1925), Salvador (1991a) montre que la population grenobloise n'a eu de cesse de repousser le cône alluvial du Drac vers l'ouest, en direction du Vercors, dès le XVI^e siècle (fig. 1.3). La cause en était la tendance à l'accroissement progressif de l'instabilité du cours d'eau, marquée par l'élargissement et l'exhaussement du chenal et un changement de style fluvial (passage d'un lit unique au lit tressé). La vieille ville étant enfermée dans ses remparts successifs depuis le IV^e siècle (fig. 1.4), les dépôts de charge de fond qui traduisent la mise en place de formes de chenal (bras vifs, bancs) n'ont plus pu se produire. Les découvertes archéologiques réalisées sur l'Isère à l'amont immédiat de Grenoble confortent cette interprétation puisqu'elles indiquent le dépôt de limons de débordement épais d'en-

viron 1 mètre entre le XVI^e et le début du XX^e siècle, sous l'influence d'un contrôle aval lié à l'exhaussement du cône alluvial du Drac (Peiry & Féougier, 1997).

En définitive, la réinterprétation des données anciennes indique clairement que le maintien hors d'eau d'une petite partie de la ville ancienne entre le XVI^e et le XIX^e siècle, base de l'argumentation de Blanchard et Müller pour fonder leur hypothèse, n'a rien à voir avec l'existence d'un môle alluvial au moment de la fondation du Grenoble gallo-romain. Du fait de l'exhaussement du cône alluvial du Drac à la l'Epoque Moderne, il n'est pas possible de restituer de manière étendue ce qu'était la topographie du site de Grenoble à cette période : les fluctuations historiques de l'activité fluviale ont apporté des masses considérables de gravier sur le cône de déjection de Drac, qui a connu, au moins à une reprise (le Petit-Age-Glaciaire), une phase de construction et d'exhaussement. Ne connaissant pas cette topographie, il est également impossible de rejeter définitivement l'hypothèse d'un ancrage de la ville ancienne sur un point haut, bien que cela nous semble très peu probable au regard de ce que l'on connaît du fonctionnement de la plaine alluviale de l'Isère et du Drac.

1.3) La reconstitution des phases de remplissage de bras mort par l'analyse géostatistique de la granulométrie des dépôts

1.3.1) Le problème de l'identification de la stratigraphie des remplissages de paléochenaux

Les études développées dans le cadre de collaborations avec les archéologues ont montré le rôle fondamental de l'observation conjointe des stratigraphies, des structures sédimentaires et de la granulométrie des dépôts alluviaux

pour pouvoir réaliser des interprétations paléoenvironnementales correctes. Sur les sites alluviaux, il est parfois difficile, voire impossible, de dresser des stratigraphies. Il arrive que l'étude paléoenvironnementale doive être faite en l'absence de coupe, ou que la coupe doive être limitée en profondeur, pour des raisons de sécurité sur les sites d'archéologie urbaine, par exemple, ou parce qu'une nappe phréatique haute empêche une excavation profonde. Dans ces cas, les possibilités de reconstituer la stratigraphie des dépôts par observation directe sont limitées aux premiers décimètres. Si l'on souhaite descendre plus profondément, il devient nécessaire de recourir à des sondages. La reconstitution de la stratigraphie des dépôts dépend alors de leur interprétation correcte. Elle est réalisée en se fondant sur les variations de texture des sédiments.

L'expérience a montré que la reconstitution de la stratigraphie des paléochenaux par la reconnaissance visuelle des variations de texture au sein des sondages est souvent difficile à mettre en œuvre. En effet, l'identification à l'œil nu des variations granulométriques peut poser problème lorsque la texture des dépôts est très fine (limons, argiles). Dans ce type de matériaux, il existe fréquemment des gradients granulométriques qui font que les sédiments s'affinent ou augmentent en taille sans rupture stratigraphique nette. Par ailleurs, les variations d'humidité des sédiments (hors d'eau ou sous nappe), les variations latérales et verticales de la compacité des dépôts induisent une certaine subjectivité de l'observateur. Pour essayer d'apporter une réponse à ces problèmes, nous avons conduit une étude méthodologique dans un bras mort du Rhône en amont de Lyon (fig. 1.5). Cette étude ayant été publiée (Peiry, 1994), nous nous contenterons d'en synthétiser ici les principaux résultats.

1.3.2) Méthodologie de reconstitution stratigraphique des remplissages sédimentaires

L'idée était de se servir de la texture des sédiments pour identifier les variations spatiales de la granulométrie des dépôts et reconstituer leur stratigraphie. Plutôt que de n'utiliser qu'un seul paramètre sédimentologique (par exemple la médiane), on a réalisé l'exploitation géostatistique de toute l'étendue granulométrique des dépôts (couvrant de 3,81 à 388 μm) distribuée au sein de 20 classes de taille (voir fig. 1.7/C). Quatre-vingt-dix-neuf échantillons de sol, prélevés dans des sondages localisés selon un axe perpendiculaire à l'ancien bras et parfaitement repérés latéralement et verticalement, furent analysés afin de constituer la base de données sédimentologiques (fig. 1.6/A et B). Un traitement statistique multivarié de type analyse en composantes principales (ACP) sur profils (théorie statistique développée *in* Dolédec 1986) fut réalisé dans le but de discriminer les ensembles sédimentaires. En fait, il s'agit d'un sous-programme d'ACP spécifique au traitement des classes de tailles enregistrées sous la forme de distributions de fréquences ;

il présente l'avantage d'autoriser la superposition des cartes factorielles des individus et des variables, ce qu'une ACP classique ne permet pas.

La plupart du temps, dans le cadre de traitements statistiques multivariés, la discrimination des ensembles sédimentaires se fait sur des graphiques croisant deux à deux les axes factoriels retenus, les cartes des plans factoriels étant en fait des représentations graphiques virtuelles, résultant du calcul statistique. Dans le cas du remplissage sédimentaire du paléochenal, la discrimination a été faite directement sur la vue en coupe du bras mort. Les trois premiers axes factoriels de l'ACP regroupant 87,5 % de la variance totale (fig. 1.7/B), on a successivement cumulé l'information synthétisée par chacun d'entre-eux (fig. 1.6, F1 à F3). Un programme de représentation graphique des traitements multivariés a facilité le dépouillement des résultats de l'ACP (Thioulose, 1989 ; 1990).

Le principe de la discrimination des ensembles sédimentaires est simple : le découpage stratigraphique est effectué successivement sur chacun des axes factoriels, par une classique opposition entre les coordonnées factorielles négatives et positives des échantillons de sols analysés. L'intérêt du programme de dessin est de faciliter la visualisation de ces oppositions en attribuant une forme ronde aux coordonnées négatives et carrée aux coordonnées positives, la taille des cercles et carrés étant proportionnelle à la valeur absolue des coordonnées factorielles. Le travail d'interprétation consiste alors à positionner les limites stratigraphiques par une simple reconnaissance des formes : l'axe F1, par exemple, permet d'établir une discrimination entre les sédiments remblayant le fond du chenal et ceux mis en place plus tardivement ; les axes F2 et F3 améliorent progressivement la discrimination et complètent le découpage stratigraphique. Les caractéristiques granulométriques des

Légende de la figure 1.5

- 1 : Moraine würmienne et rissienne ;
- 2 : Avancée maximum du glacier würmien ;
- 3 : Retrait du Würm ;
- 4 : Terrasse éoholocène ;
- 5 : Terrasse atlantique ;
- 6 : Bande active subboréale et subatlantique ;
- 7 : Bande active historique ;
- 8a : Zone hors lit majeur au XIX^e siècle ;
- 8b et c : Paléoméandres hors zone inondable au XIX^e siècle ;
- 9 : Limite de terrasse ;
- 10 : Limite de terrasse hypothétique ;
- 11 : Paléochenal ;
- 12 : Bois fossile extrait d'une gravière ;
- 13 : Bois fossile extrait sur un banc caillouteux ;
- 14 : Bois fossile extrait dans un paléochenal.

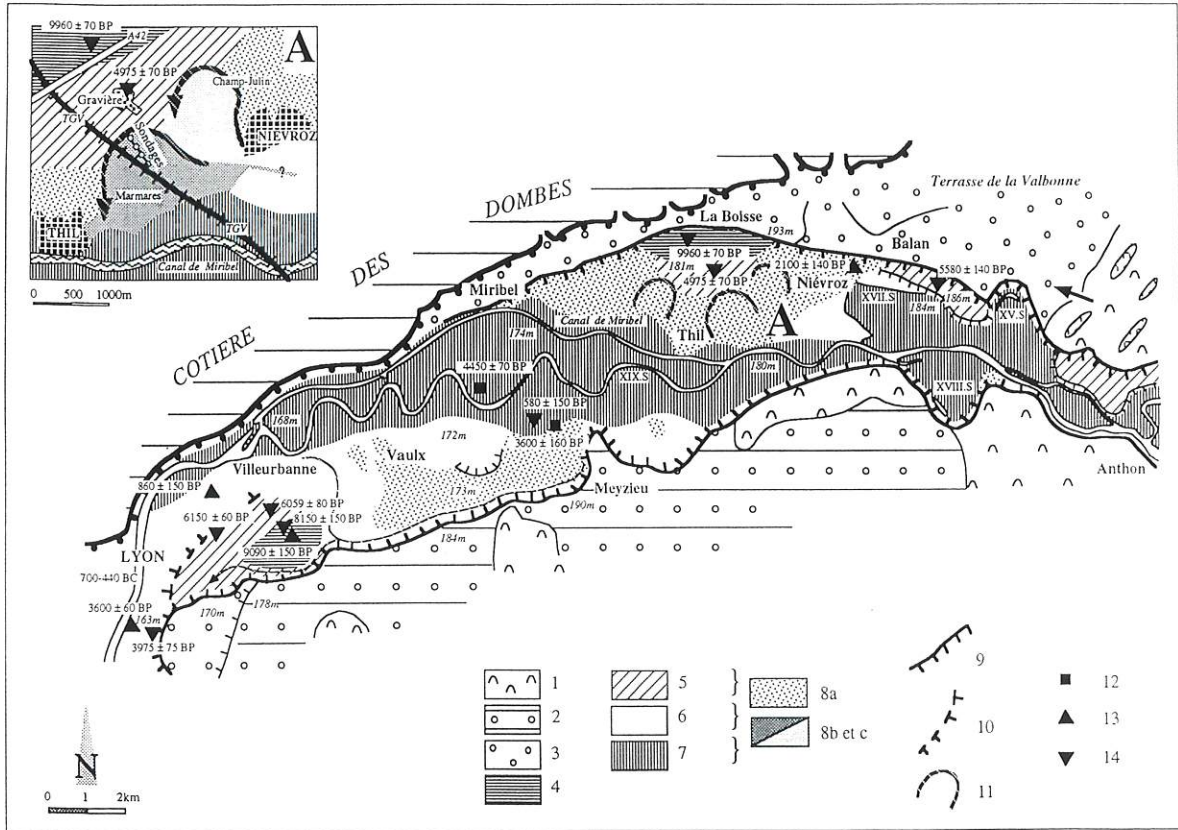


Figure 1.5 - Localisation du méandre étudié (A) dans la plaine alluviale du Rhône en amont de Lyon (Source : Bravard, Peiry *et al.*, 1991, modifié).

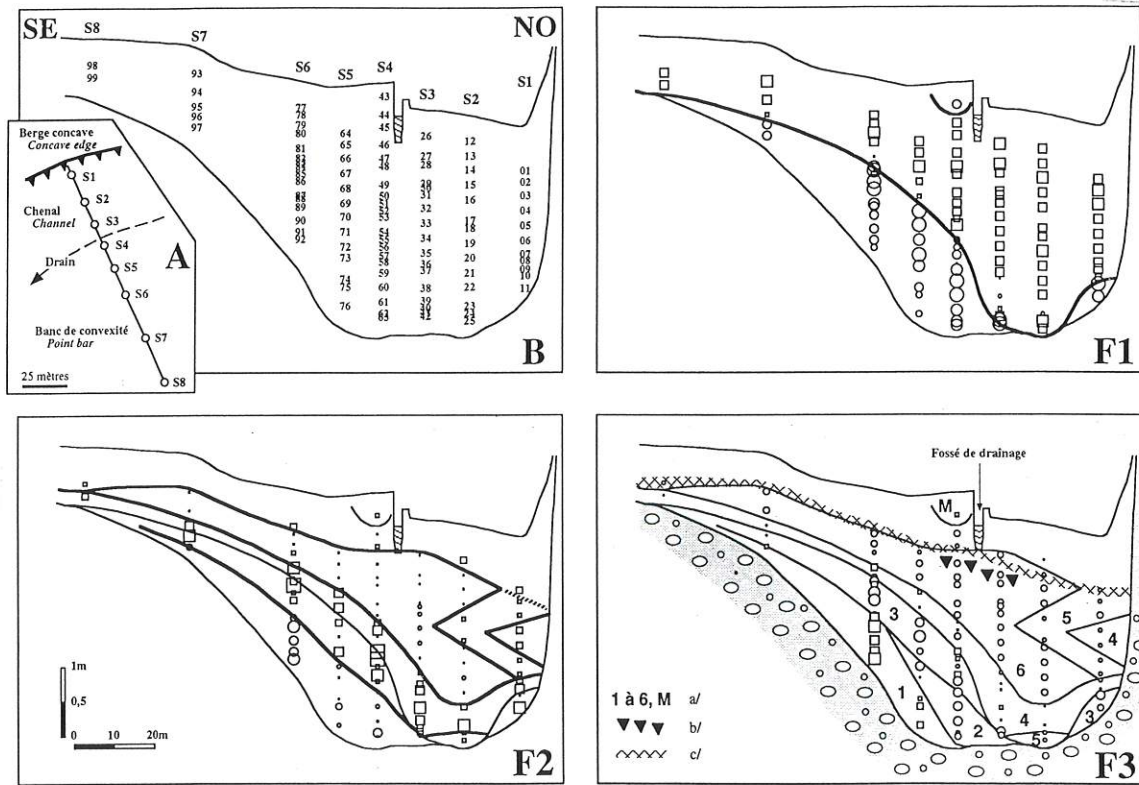


Figure 1.6 - Reconstitution stratigraphique après la discrimination statistique des unités sédimentaires par l'ACP ; A : Localisation des sondages en plan ; B : Plan d'échantillonnage ; F1 à F3 : Cartographie des coordonnées factorielles et regroupement des échantillons en 6 ensembles sédimentaires ; a/ Groupements sédimentaires (1 à 6) et mélange (M) ; b/ Matière organique ; c/ Zone de transition sédimentaire (Source : Peiry, 1994).

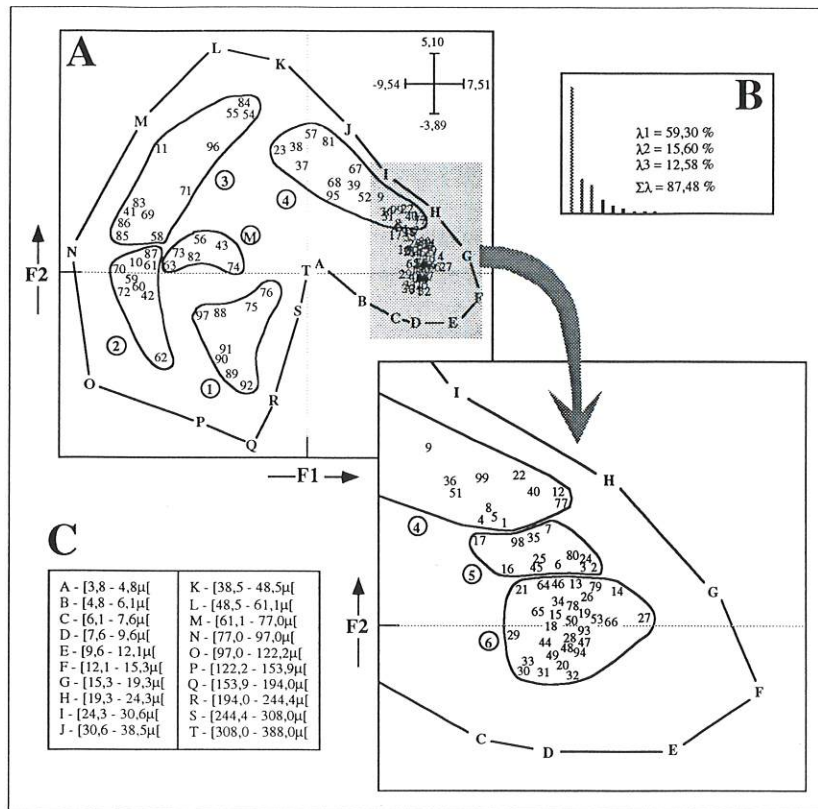


Figure 1.7 - A/ Discrimination des unités sédimentaires sur le plan factoriel F1/F2 ; B/ Graphe des valeurs propres ; C) Classes de tailles (μm) (Source : Peiry, 1994).

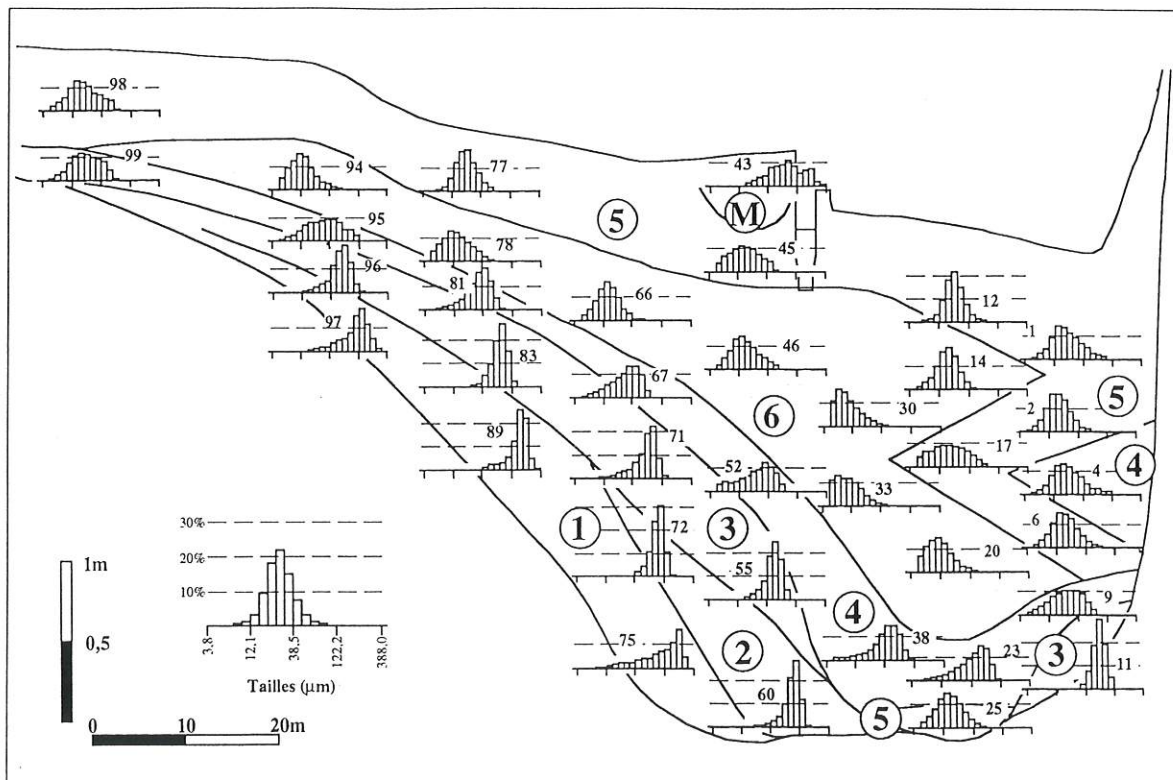


Figure 1.8 - Variations spatiales de la texture des dépôts représentée par les histogrammes des distributions granulométriques (Source : Peiry, 1994).

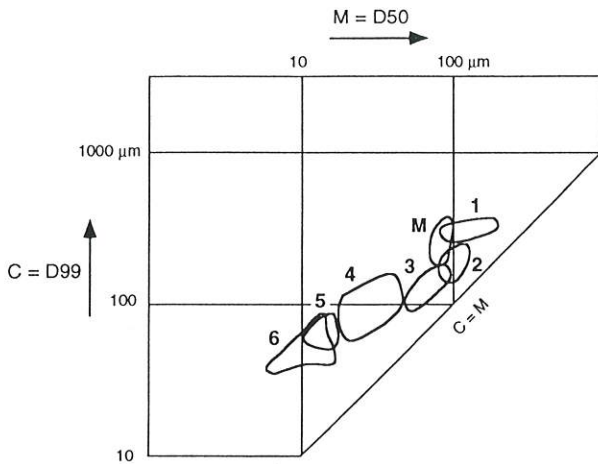


Figure 1.9 - Image CM des unités sédimentaires : chaque courbe-enveloppe regroupe les prélèvements discriminés par l'ACP dans un même sous-ensemble
(Source : Peiry, 1994).

ensembles sédimentaires discriminés graphiquement sont ensuite identifiées sur les cartes factorielles, chaque groupe d'individus ayant les caractéristiques granulométriques de la ou des classes de tailles dont ils sont graphiquement proches (fig. 1.7/A). Il est éventuellement possible, mais beaucoup plus long en temps d'interprétation, d'identifier visuellement les ensembles sédimentaires par les histogrammes des distributions granulométriques (fig. 1.8), ce qui permet alors de se passer de la représentation des plans factoriels.

Le traitement statistique multivarié facilite la discrimination, mais il ne met pas en relation la texture des sédiments et les processus fluviaux ayant permis leur dépôt. L'image CM des dépôts fluviaux présente cet avantage (Passega, 1957 ; Passega, 1964 ; Passega & Byramjee, 1969 ; Passega, 1977 ; Bravard, 1983 ; Peiry, 1988) ; la position sur l'image CM de l'enveloppe des groupements discriminés par l'ACP est représentée (fig. 1.9). L'interprétation conjointe de la position stratigraphique des dépôts sur la coupe du bras mort et des processus de dépôts sur l'image CM rend possible la reconstitution de la dynamique de remplissage du bras mort et l'interprétation paléoenvironnementale de la dynamique fluviale. Sans entrer dans le détail de l'interprétation qui a été publiée par ailleurs (Peiry, 1994), trois grandes étapes marquent l'évolution du paléoméandre du Rhône étudié : a) de texture sableuse (groupements 1, 2 et 3), la partie inférieure du remplissage, principalement localisée sur le banc de convexité, est contemporaine de la période de fonctionnement du chenal ; b) les sédiments déposés dans la partie la plus profonde du chenal sont de texture beaucoup plus fine et proviennent d'un transport en suspension uniforme (groupement 4) ou résultent d'une sédimentation forcée dans un plan d'eau fortement ralenti par un processus de contrôle aval (groupements 5 et 6).

Ils se sont déposés après le recouplement du chenal, dans une masse d'eau circulant à vitesse réduite dans l'axe du chenal, probablement lors des crues du fleuve ; c) les dépôts de la partie supérieure du remplissage présentent une texture très fine et remarquablement homogène en tout point du transect (groupement 5), traduisant un dépôt dans une masse d'eau stagnante, probablement à la suite du débordement latéral des eaux du fleuve.

1.3.3) Application de la méthode à l'identification du fossé gallo-romain de Grenoble.

La méthode de reconstitution stratigraphique mise au point sur un paléochenal du Rhône en amont de Lyon a été utilisée sur le chantier archéologique du tramway de Grenoble en 1990. Un des objectifs de l'étude était d'identifier l'extension du fossé gallo-romain ceinturant le rempart du IV^e siècle et d'étudier son remplissage sédimentaire. L'épaisseur du remblaiement urbain fait que les niveaux topographiques de la période romaine sont environ 2,50 mètres sous la surface actuelle. L'une des particularités de ce chantier était la très grande difficulté à laquelle les archéologues se heurtaient pour ouvrir des sondages plus profonds, pour des raisons de sécurité tout d'abord, la proximité des immeubles imposant la plus grande prudence pour éviter tout risque de déstabilisation de leurs fondations ; ensuite, à cause d'une nappe phréatique très haute, alimentée par de fortes infiltrations dans les matériaux particulièrement filtrants de l'Isère toute proche.

Sur le site de Sainte-Claire (voir fig. 1.2 pour localisation), l'étude de terrain a révélé que seule la partie supérieure du remplissage du fossé était visible en coupe (voir fig. 1.10, coupe 10 A-B). Cela ne suffisait ni à localiser l'extension spatiale du fossé, ni à étudier son remplissage sédimentaire et ses modalités de fonctionnement. La seule solution pour obtenir de l'information était de procéder par sondages selon un axe approximativement perpendiculaire à celui supposé du fossé de drainage. Huit sondages à la tarière équidistants de 1,50 à 2,00 mètres furent réalisés jusqu'au contact des formations grossières (graviers) constituant la base de la plaine d'inondation de l'Isère. Deux sondages étaient localisés à l'intérieur du rempart où le fossé n'était pas supposé exister ; cinq sondages étaient situés à l'extérieur du rempart et devaient normalement recouper le fossé ; un dernier sondage, légèrement désaxé par rapport aux précédents, était localisé dans une fouille légèrement décentrée en direction de l'est (d'environ 5 mètres) (voir fig. 1.10 pour localisation en plan).

Soixante-quatre échantillons de sol furent collectés selon le plan d'échantillonnage de la figure 1.10. Onze prélèvements furent effectués dans le sondage complémentaire. Douze échantillons de sol furent également collectés dans la coupe 10 A-B, visible depuis la surface (voir localisation sur la figure 1.10). Les courbes granulomé-

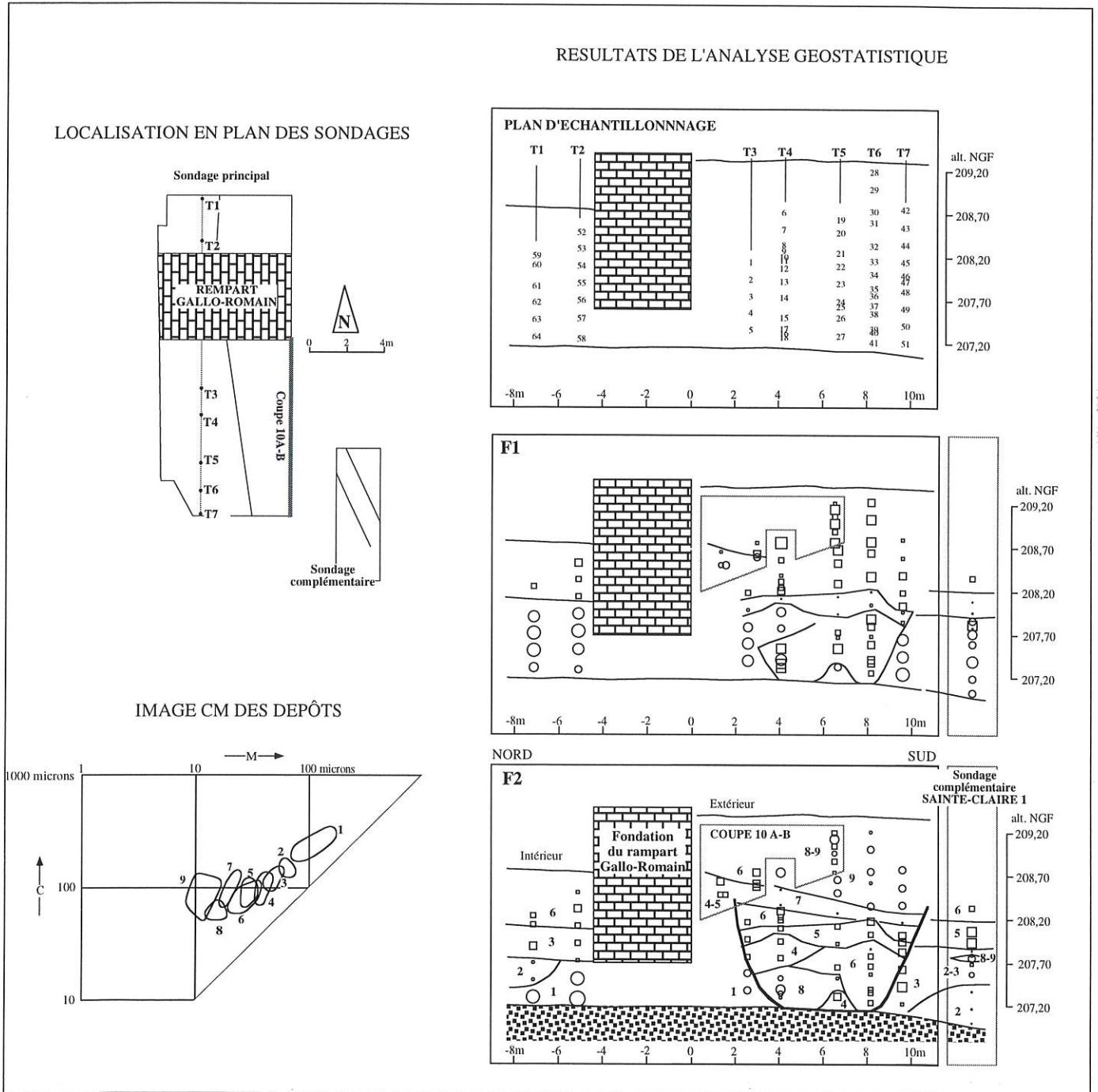


Figure 1.10 - Reconstitution de la stratigraphie du fossé gallo-romain par l'étude sédimentologique des dépôts de remplissage.

triques de tous ces prélèvements furent dressées, la distribution se faisant au sein de vingt classes de tailles comprises entre 4 μm et 400 μm . La base de données granulométriques fut l'objet d'un traitement statistique en ACP sur profils, en suivant une technique similaire à celle utilisée sur le haut-Rhône. La seule différence a été l'introduction des échantillons de sol provenant du sondage complémentaire et de la coupe 10 A-B comme individus supplémentaires. Cela permet de représenter leur position sur les axes factoriels sans qu'ils participent aux calculs du modèle sédimentaire. Une telle procédure

nous paraissait plus rigoureuse, les prélèvements ayant été exécutés selon des axes un peu différents du plan d'échantillonnage principal.

L'existence et l'extension spatiale du fossé ont été remarquablement mises en évidence par le traitement statistique multivarié. Les deux premiers axes factoriels totalisant près de 78 % de la variance totale ont été interprétés (fig. 1.11). La représentation des coordonnées factorielles a été faite selon le même principe que sur le paléoméandre du Haut-Rhône (voir fig. 1.10, F1 et F2).

L'interprétation graphique du premier axe factoriel individualise deux ensembles sédimentaires à l'intérieur du rempart et quatre groupements *extra muros*, ces derniers matérialisant la forme d'un chenal. Le deuxième axe factoriel amène de l'information supplémentaire, principalement sur la stratigraphie du fossé. L'analyse de la texture des dépôts montre l'existence de deux types de séquences granulométriques :

1- À l'intérieur du rempart et dans le sondage complémentaire *extra muros* le plus éloigné de l'enceinte de protection (Sainte-Claire 1), des séquences sédimentaires présentant un affinement progressif vers le haut, typique de la construction d'une plaine d'inondation, ont été repérées (groupements 1, 2, 3, 5 et 6). L'image CM des dépôts (voir fig.1.10) indique que les sédiments passent progressivement des sables moyens issus d'un transport

en suspension graduée à des limons sableux transportés en suspension uniforme. Leur composition minéralogique riche en schistes noirs montre qu'ils proviennent des débordements de l'Isère ; ils indiquent une phase de construction de la plaine d'inondation. Il est également possible que cet exhaussement naturel ait été repéré sur la coupe 10A-B, à proximité immédiate du bord extérieur du rempart (groupement 4-5) ; le nombre réduit d'analyses sédimentologiques réalisées en ce point ne permet cependant pas d'en être sûr. Le modèle sédimentaire révèle donc que les formations sablo-limoneuses localisées à l'intérieur du rempart et dans le sondage complémentaire Saint-Claire 1 se sont mises en place antérieurement à l'occupation gallo-romaine du site et témoignent des processus de construction de la plaine d'inondation par les débordements de l'Isère. C'est à la surface de ces formations fines, épaisses au moins de 2

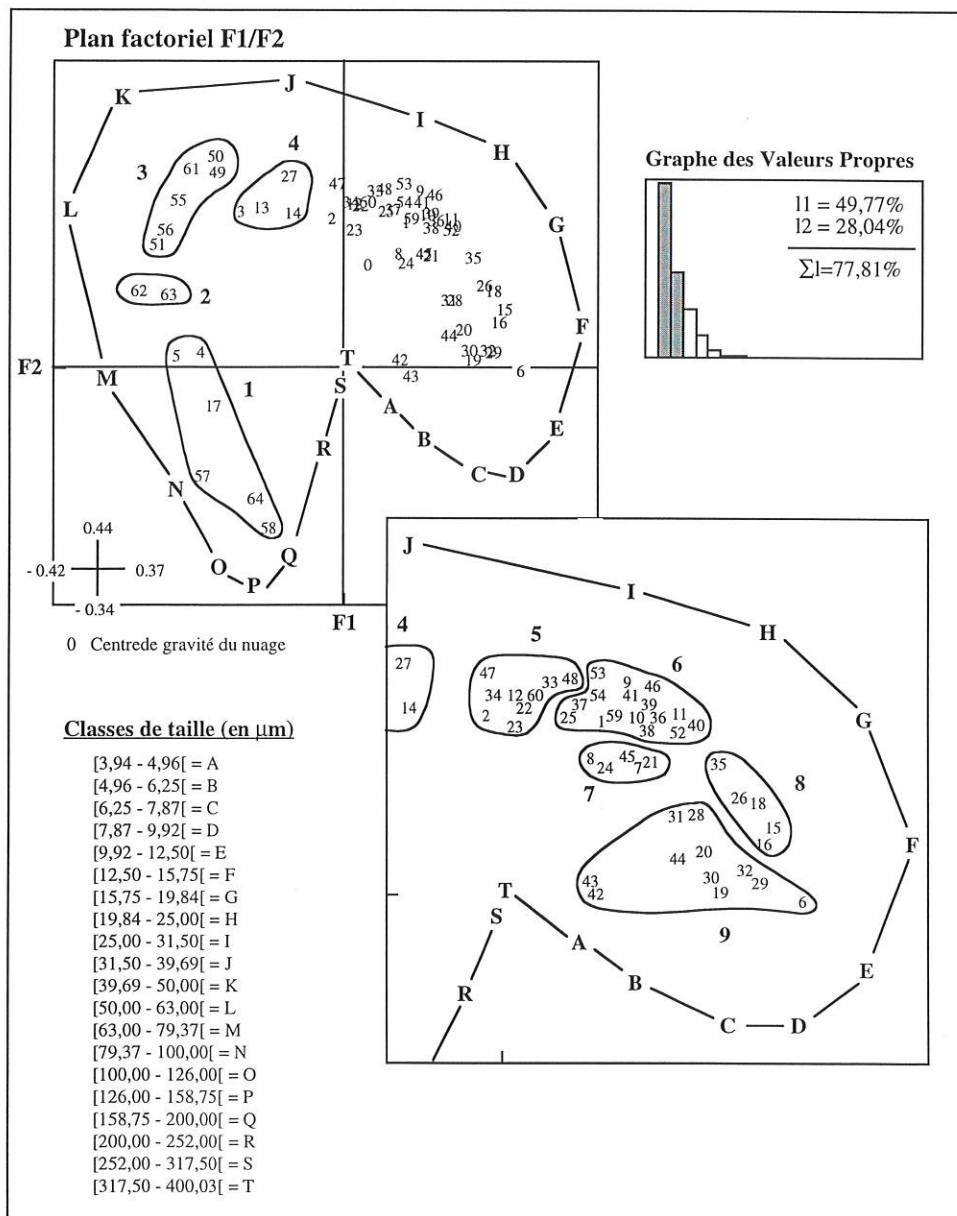


Figure 1.11 - Reconstitution du fossé de Sainte-Claire ; plan factoriel F1/F2 de l'ACP sur profils.

mètres, que les premières infrastructures gallo-romaines furent édifiées.

2- À l'extérieur du rempart, l'organisation des dépôts laisse apparaître une véritable anomalie sédimentaire. Au contact du fond caillouteux, les sédiments sont extrêmement fins et leur position sur l'image CM est typique d'un dépôt dans des eaux stagnantes (groupements 6 et 8). Cela suggère le remplissage d'un chenal artificiel qui, vu sa position par rapport au rempart, ne peut être que le fossé gallo-romain. Les dépôts sont légèrement plus grossiers au dessus de ce remplissage, ce qui témoigne de phases hydrodynamiques plus actives que les précédentes ; ils résultent probablement de la mise en place de circulations d'eau se produisant dans l'axe du fossé, à l'occasion des débordements de l'Isère. Il est fort possible que ces dépôts aient été très postérieurs au premier creusement, des phases de curage du fossé ayant été observées dans les stratigraphies dressées place Notre-Dame, sur une autre section du rempart. Ce creusement a été entrepris dans les formations superficielles de la plaine d'inondation, sur environ 2,00 mètres de profondeur, jusqu'au toit de gravier qui paraît avoir constitué une barrière physique pour les terrassiers. L'absence de matériel archéologique n'a pas permis de fournir de chronologie précise de l'épisode de remplissage sur lequel les prélèvements ont été faits ; en fait, il est fort possible qu'il date de plusieurs siècles après l'édification de l'enceinte, lors de l'abandon définitif du fossé défendant l'enceinte gallo-romaine.

Comme en témoignent les études de cas présentées ci-dessus, les recherches entreprises sur les paléoenvironnements fluviaux imposent de mettre en place des méthodes et techniques fondées sur une analyse approfondie du terrain. Pour le géomorphologue, les indicateurs les plus courants sont de nature topographique, stratigraphique et sédimentologique. Sur les sites urbains, ceux-ci sont particulièrement difficiles à observer, en raison des contraintes imposées par le bâti et les infrastructures anciennes. Fournir un diagnostic paléoenvironnemental impose parfois de recourir à des techniques se substituant à une observation directe. La restitution de la topographie du toit alluvial par l'analyse des sondages, comme à Grenoble, ou la reconstitution "en aveugle" de la stratigraphie des dépôts dans la zone du fossé ceinturant le rempart du Grenoble gallo-romain (*Cularo*) rendent possible un diagnostic, là où des techniques plus légères auraient rapidement montré leurs limites. Il n'en demeure pas moins que ce gain d'information nécessite un très lourd travail puisqu'il impose un nombre accru d'analyses granulométriques et la mise en œuvre d'un traitement de données relativement sophistiqué. Comme toujours, il est nécessaire d'utiliser ce type de techniques avec discernement et de le réserver aux cas où il est strictement indispensable.

CHAPITRE 2

LA RECONSTITUTION MORPHODYNAMIQUE AU PAS DE TEMPS SÉCULAIRE

- 2.1) L'inégal intérêt des variables morphodynamiques de base vis-à-vis de l'étude des changements séculaires.
- 2.2) L'exploitation géostatistique des documents en plan
- 2.3) L'apport du SIG pour la quantification des ajustements en plan de la dynamique fluviale

Résumé du chapitre 2

La reconstitution de la géomorphologie fluviale au pas de temps séculaire nécessite la mise en place de méthodes de travail adaptées aux sources documentaires anciennes. Parmi celles-ci, les données altimétriques du chenal (profils en travers, profils en long) et les cartes anciennes, qui permettent l'étude du style fluvial, constituent la source documentaire la plus riche. Leur intérêt respectif et les difficultés de leur utilisation sont discutées. Dans un deuxième temps, l'exploitation géostatistique des documents en plan, et plus particulièrement des cartes anciennes, est présentée. Deux indices morphométriques permettent de quantifier la forme en plan du chenal : la sinuosité du chenal et la multiplicité des bras. Le calcul du premier indice ne pose guère de difficultés sur les cartes anciennes. Par contre, l'indice de multiplicité des bras est d'un intérêt moindre, le nombre bras en eau, dans une même section de chenal tressé, variant avec le débit ; or, les cartes anciennes ne font jamais référence aux conditions hydrologiques. Cela impose d'être extrêmement prudent lorsque l'on calcule un indice de multiplicité des bras pour comparer différents cours d'eau. Dans ce cas, on leur préférera le calcul de la largeur de la bande active, plus simple et moins sujet à caution. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) peut faciliter la quantification des ajustements en plan de la dynamique fluviale. Ils permettent d'homogénéiser les échelles, de géoréférencer les documents dans un système de coordonnées communes, de traiter et de créer de l'information géographique, et de quantifier les éléments structurant du paysage fluvial. Quelques applications sont décrites ; l'exemple des effets des crues du Drac sur la géomorphologie du chenal tressé entre 1948 et 1956 est présenté plus en détail.

A la suite de Hey (1978), Gilvear & Bravard (1993, p. 61 et suiv.) indiquent que les chenaux fluviaux présentent 5 degrés de liberté de base appelés "variables libres". Ces variables élémentaires sont la largeur, la profondeur et la pente du chenal, le style fluvial et la rugosité du lit. La base de l'étude morphodynamique et des mécanismes à processus-réponse est l'analyse comparative. La reconstitution de la dynamique fluviale au pas de temps séculaire impose que l'on s'appuie sur le suivi spatio-temporel de ces variables de base pour mettre en évidence les éventuels changements morphodynamiques. La difficulté de ce type d'étude est double : a) il faut d'abord disposer de données ; b) il faut ensuite s'assurer de leur validité et de leur homogénéité pour que la comparaison ait un sens. Dans ce chapitre, on examinera tout d'abord l'inégal intérêt de ces variables vis-à-vis des problématiques de reconstitution du fonctionnement géomorphologique des cours d'eau au pas de temps séculaire, en raison de leur inégaie disponibilité et, bien souvent, de leur hétérogénéité. Ensuite, on se focalisera sur le type le plus fréquent de données anciennes, les documents en plan et on mettra l'accent sur leur exploitation géostatistique ; la métamorphose du style fluvial de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan servira à illustrer l'usage que l'on peut en faire. Un dernier paragraphe présentera quels sont les apports des systèmes d'information géographique pour la quantification des ajustements en plan de la dynamique fluviale.

2.1) L'inégal intérêt des variables morphodynamiques de base vis-à-vis de l'étude des changements séculaires

2.1.1) Une inégaie disponibilité des sources documentaires anciennes

Réaliser une analyse rétrospective au pas de temps séculaire impose que des données existent sur cette durée. De ce point de vue, toutes les variables de base n'offrent pas les mêmes potentialités :

A) Le calcul *d'indices de rugosité* du chenal, par exemple, nécessite des mesures de terrain très fines, rarement disponibles à plusieurs dates dans un passé récent, et inexistantes à l'échelle séculaire. L'analyse de ce type d'indice est ainsi plus souvent synchronique que diachronique.

B) Les séries diachroniques de *profils en travers* permettent le calcul des variables hydrauliques élémentaires (largeur, profondeur, rayon hydraulique...). Ici encore, elles sont peu fréquentes au pas de temps séculaire, sauf, peut-être, sur quelques grands cours d'eau navigables.

C) Des *profils en long* sont dressés sur certains cours d'eau depuis 1820 environ. Les premiers d'entre-eux

sont contemporains des projets d'endiguement généralisé des rivières. L'ancienneté de la mesure en fait des documents particulièrement intéressants, à condition que l'on soit capable de les exploiter, ce qui n'est pas toujours le cas (voir P1, § 2.1.2) ;

D) Le suivi dans le temps du *style fluvial* est sans conteste le type d'étude pour laquelle la documentation disponible est la plus abondante (Bravard, 1991). Peu fréquentes avant le milieu du XVIII^e siècle, les cartes anciennes sont plus nombreuses et de bien meilleure précision après 1750. Leur origine est très variable : documents fiscaux à l'origine (Mappe Sarde dans les départements savoyards, cadastre napoléonien sur le territoire français), les cartes anciennes se sont multipliées et ont gagné en qualité et précision au cours des premières décennies du XIX^e siècle, à l'occasion du développement des projets d'endiguement généralisé. Les premières cartes topographiques dont l'échelle soit compatible avec une analyse détaillée du style fluvial sont beaucoup plus récente et datent du premier quart du XX^e siècle. La photographie aérienne prend le relais vers 1930, pour les missions les plus anciennes. Sur les rivières les plus actives, elle constitue un moyen particulièrement intéressant d'analyser le dynamisme latéral du chenal.

2.1.2) L'hétérogénéité des sources documentaires anciennes, facteur de difficultés d'utilisation

L'une des difficultés majeures de l'utilisation des données anciennes est leur manque d'homogénéité :

A) Il est relativement rare que des *profils en travers* aient été dressés à de multiples reprises sur un même cours d'eau. Leur exploitation se heurte fréquemment à des changements de leur nombre et de leur position, d'une campagne de mesure à une autre, ce qui ne facilite pas l'analyse des changements morphométriques et l'établissement de bilans sédimentaires. Il arrive aussi souvent que leur comparaison soit rendue compliquée du fait de modifications des référentiels de nivellement (données en altitudes relatives, modification dans le temps du référentiel de nivellement absolu...).

B) Le manque d'homogénéité des *profils en long* rend leur exploitation aussi difficile que celle des profils en travers. L'hétérogénéité des données est tout d'abord spatiale, les suivis topographiques généralisés, qui étaient la règle au début du siècle, étant depuis plusieurs décennies morcelés et discontinus. Cela tient principalement au fait qu'ils sont réalisés à l'occasion de travaux ou d'aménagements ponctuels ; il en résulte la constitution de bases de données fragmentaires, difficilement exploitables spatialement.

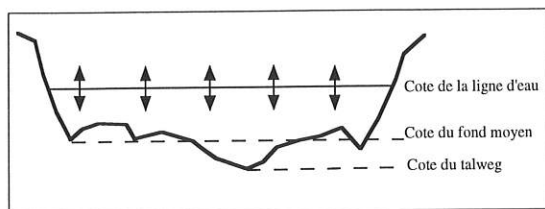


Figure 1.12 - Différentes cotes mesurées pour dresser le profil en long d'un cours d'eau à partir des profils en travers.

L'hétérogénéité concerne également la nature des variables mesurées : selon les études et les époques, on dispose : 1) des profils en long *du fond moyen* ; 2) des profils en long *du talweg* ; 3) des profils en long *de la ligne d'eau*. Les profils en long *du fond moyen et du talweg* résultent de l'exploitation des profils en travers (fig. 1.12).

1- Le calcul du *fond moyen* permet de substituer à la topographie complexe d'un profil en travers un fond plat fictif, dont l'altitude est la moyenne des valeurs mesurées lors du levé topographique ; cela permet de s'affranchir des variations d'altitude des fonds à mettre en relation avec la forme du chenal (symétrique, asymétrique) et la distribution des successions seuils-mouilles (rugosité de forme).

2- Le *profil en long du talweg* représente la ligne des points les plus bas du lit ; son utilisation est peu fréquente car l'altitude du talweg est fortement liée à la forme du chenal (successions seuils-mouilles). Celui qui donne lieu à une forte dispersion des points lors de la construction du profil en long et à l'apparition fréquente de contre-pentes.

3- Le *profil en long de la ligne d'eau* est généralement dressé en période de basses-eaux. Des lignes d'eau de crue destinées au calage des modèles hydrauliques existent également dans les études hydrauliques récentes. L'exploitation de ces données topographiques à des fins de comparaison nécessite obligatoirement de faire référence aux conditions de mesure (date du levé topographique, débit à la station hydrologique la plus proche), de manière à pouvoir distinguer les changements résultant d'un exhaussement ou d'un abaissement des fonds, des variations de niveau simplement liées à des différences de débit. Les données hydrologiques de référence n'existent pas forcément pour les profils en long les plus anciens, ce qui ne permet pas de déterminer avec précision quelles étaient les conditions d'écoulement au moment du levé topographique.

D'inévitables problèmes de calage altitudinal et longitudinal des données viennent compléter la difficulté d'uti-

lisation des profils en long. D'un levé à l'autre, ils sont relatifs à des changements des références de nivellement (cotations relatives dans le pire des cas, cotations absolues selon différents référentiels d'altitude...) et aux inévitables allongements ou réductions de la longueur du cours d'eau d'origine naturelle ou artificielle. Ici encore, l'exploitation des documents doit être faite avec la plus grande prudence, une rigueur élémentaire imposant d'écarter des données dont on n'est pas capable d'évaluer la qualité.

C) Le suivi temporel du *tracé en plan* et du style géomorphologique par la carte ancienne impose lui aussi du discernement. En raison d'une activité morphodynamique généralement forte, de tels documents sont bien adaptés pour analyser les changements du style fluvial des rivières alpines à fond mobile. Ce n'est malheureusement pas le cas partout : sur la Saône par exemple, Astrade (1996) montre que, du fait de la très grande stabilité du chenal, les retouches du style fluvial sont pour l'essentiel artificielles, s'étant produites à la suite des travaux de correction du lit. L'utilisation des cartes anciennes demande beaucoup de rigueur et de prudence. Si elles sont des documents irremplaçables pour l'étude de la dynamique fluviale du passé, leur utilisation nécessite de connaître les limites de l'information qu'elles recèlent, afin de réduire les erreurs d'interprétation. Les difficultés auxquelles les utilisateurs se heurtent sont multiples :

1- Des incertitudes peuvent porter sur la date de réalisation et l'échelle des documents. Par exemple, le cadastre savoyard (Mappe Sarde) fut mis en place entre 1728 et 1732 ; selon les sources, son échelle varie du 1/2350^e au 1/2500^e. Sur d'autres documents, l'échelle n'est pas indiquée comme sur "*l'ancienne carte de la vallée de l'Isère, lit de la rivière, vue du couchant*" (AD Isère, 1FI 2183) datant de 1737. Par ailleurs, les anciennes unités de mesures (toise pour les longueurs, sétérées pour les surfaces) peuvent prêter à confusion en raison de leur variabilité régionale et leur conversion dans le système métrique nécessite la plus grande prudence.

2- La grande diversité des échelles cartographiques rend parfois problématique la comparaison diachronique et les analyses de déplacement de lit par la superposition de documents. Dans une étude portant sur la mise en valeur du méandre abandonné des Eparres¹ en amont de Grenoble, Caussin (1995) souligne la grande difficulté qu'il a eu à déterminer la longueur et la surface de l'ancien bras, à partir des cartes anciennes (tab. 1.1). Bien que la qualité des documents cartographiques s'améliore très nettement au XX^e siècle, l'estompement des formes fluviales avec le temps ne permet pas toujours de retrouver avec exactitude les anciens tracés sur des documents contemporains ; un gain de précision nécessite alors de lourdes investigations sur le terrain.

¹ Ce grand méandre est localisé à l'emplacement actuel du Campus de Grenoble.

Date	Document	Longueur (m)	Surface (ha)
1736	Lettre à l'intendance du Dauphiné	8000	79
1764	Plan parcellaire de 1764	6200	60
1788	Mémoire des Dames de Montfleury	-	77
1808	Plan cadastral napoléonien	6900	67
1932	Plan de Saint-Martin-d'Hères	5000	48
1942	Article de Agard (RGA, 1942)	6860	67

Tableau 1.1 - Longueur et superficie du méandre des Eparres (Isère) recoupé en 1729, d'après divers documents d'archives (commune de Saint-Martin-d'Hères)

(d'après les données de Caussin, 1995).

3- Dans la plupart des cas, les documents cartographiques ont été établis dans des systèmes de projection non précisés, ce qui rend problématique la superposition des cartes lors d'études diachroniques. Dans les études de détail, il est parfois difficile de différencier les erreurs de positionnement provenant du système de projection utilisé, d'un déplacement progressif du chenal : ainsi, sur l'Isère au droit de Saint-Ismier (Pupier, 1996) (fig. 1.13), les changements de la position du chenal sont essentiellement dus aux déformations engendrées par des systèmes de projections qui diffèrent. Les déplacements du lit peuvent être différenciés des erreurs de positionnement dues aux systèmes de projections, si l'on parvient à établir quelles sont les modalités de leur migration latérale et aval (Lewin, 1978 ; Hooke & Harvey, 1983 ; Lewin, 1983 ; Hooke, 1995).

4- Les documents cadastraux anciens (Mappe Sarde, cadastre napoléonien ou premier cadastre français dans les départements savoyards) présentent fréquemment des imprécisions de tracé ou de positionnement, voire des incohérences, principalement dans les zones où les feuilles de paroisses ou de communes se joignent. Le géomorphologue doit alors localement réinterpréter la dynamique fluviale.

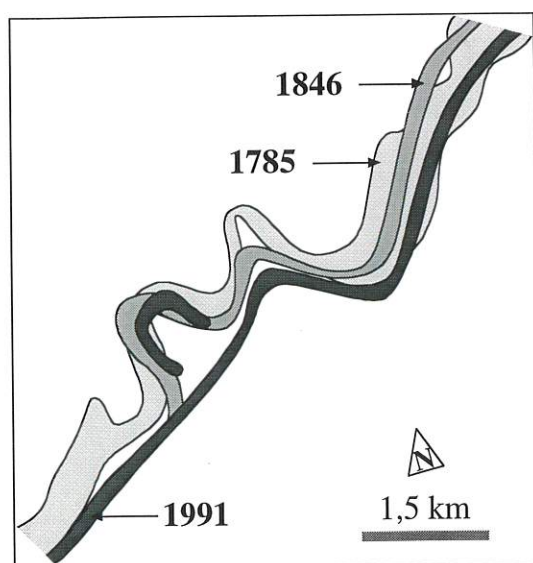


Figure 1.13 - Superposition des cartes de 1785 (Ing. Marmillot), de 1846 (Charpin) et de 1991 (IGN) sur une courte section de l'Isère en amont de Grenoble
(Source : Pupier, 1996).

5- La nature des informations représentées sur les documents diffère souvent fortement d'une carte à l'autre. Par exemple, sur certaines feuilles du premier cadastre français des départements savoyards figurent exclusivement les berges du cours d'eau ; les bancs de galets, la localisation des bras en eau des lits tressés n'y apparaissent pas. L'absence de ces informations, si elle se comprend aisément dans le cadre de l'élaboration d'un document fiscal, est difficilement compatible avec la reconstitution du paysage fluvial ancien. Il devient alors nécessaire de réserver le document à une exploitation géostatistique : par exemple, la feuille cadastrale sur laquelle figurent exclusivement les limites de berges pourra valablement le renseigner sur l'évolution amont-aval de la largeur de la bande d'activité fluviale.

2.2) L'exploitation géostatistique des documents en plan

L'intérêt de la carte ancienne ne réside pas seulement dans la fourniture d'une "image" de la rivière à un date ancienne, mais aussi dans la possibilité qu'elle offre de calculer des indices quantitatifs décrivant la morphologie en plan du chenal. Depuis une quarantaine d'années, de nombreux indices de la morphométrie en plan du chenal ont été établis (Leopold & Wolman, 1957 ; Brice, 1964 ; Rust, 1978). Ils sont regroupés au sein de trois catégories : a) la sinuosité ; b) la multiplicité des chenaux ; c) la forme (largeur, longueur d'onde, amplitude, rayon de courbure...).

2.2.1) Les indices morphométriques

A) la sinuosité

Leopold & Wolman (1957) définissent le *taux de sinuosité* comme le rapport de la "longueur du talweg sur la longueur de la vallée" ; ils le réservent généralement aux rivières à lit unique. Pour Brice (1964), l'*indice de sinuosité* est le rapport de la "longueur du chenal sur la longueur de l'axe de la bande de méandrage". Cette seconde définition paraît préférable, car il arrive fréquemment que la rivière sinue à l'intérieur de la vallée qu'elle occupe. Divers travaux ont montré que des rivières à bras multiples peuvent avoir une sinuosité marquée (Church, 1983 ; Ferguson & Werritty, 1983) ; les études menées dans les grandes vallées alpines confirment que cela était fréquemment le cas au XVIII^e et XIX^e siècle, sur cer-

tains tronçons de cours d'eau, avant l'aménagement des lits (Peiry, 1988 ; Peiry, ce volume). Le calcul d'un taux de sinuosité est donc susceptible de fournir des éléments de discrimination très intéressants au sein même de la catégorie des rivières à lit tressé. Maizels (1979), travaillant sur la marge proglaciaire du glacier des Bossons, calcule la *sinuosité moyenne*, rapport de la "longueur totale des chenaux sur le nombre moyen de bras en eau dans la vallée ou la section de vallée". Bravard (1987), calcule deux indices complémentaires sur les secteurs tressés du haut-Rhône français : le premier est établi pour le bras principal, le second pour le bras le plus sinueux. Afin d'utiliser le même type d'indice quel que soit le type de cours d'eau (rivière tressée ou à lit unique) ou la nature du document servant de support à la quantification (cartes anciennes pour lesquelles ne figurent pas forcément tous les bras en eau, photographies aériennes...), nous calculons le *taux de sinuosité du chenal principal* (Peiry, 1989), rapport de la "longueur du bras principal sur la longueur de la bande d'activité fluviale" ; ces deux distances sont mesurées au niveau de l'axe du chenal principal ou de la bande d'activité fluviale (fig. 1.14.A).

B) La multiplicité des chenaux

La détermination d'un *indice de multiplicité des chenaux*, adopté pour caractériser la morphologie en plan des rivières tressées, est beaucoup plus complexe. Si l'on revient à la classification des chenaux alluviaux de Schumm (1977 ; 1985), bande d'activité fluviale et chenal sont deux termes identifiant une même entité géomorphologique ; le nombre de bras en eau importe peu, car il dépend uniquement des conditions hydrologiques du moment. Ainsi, dans la terminologie des auteurs anglo-saxons, le chenal est défini par les limites mor-

phologiques que constituent les berges ; sa dimension est ajustée pour l'écoulement d'un "débit dominant", débit stable "qui produirait le même effet que la gamme réelle des débits" (Wolman & Miller, 1960). Ce débit dominant coïnciderait avec le débit "plein bord", le début de débordement étant marqué par une forte discontinuité hydraulique. Une analyse de la période de retour du débit "plein bord" a montré qu'elle varie de 1 à 3 ans, avec une valeur modale de 1,5 an. Pour de telles conditions de débit, le chenal est complètement immergé, les bancs de galets disparaissent et les bras en eau ne peuvent plus être individualisés. Ce rappel des conditions de fonctionnement des rivières tressées impose que l'on relativise l'intérêt d'un indice de multiplicité des bras, si l'on ne définit pas les conditions hydrologiques au moment de son calcul. Or, celles-ci ne figurent jamais sur les cartes anciennes et on ne les connaît pas toujours lorsqu'on utilise les photographies aériennes. Le calcul d'un indice de multiplicité des chenaux est donc particulièrement difficile à maîtriser lorsque l'on travaille à partir de cartes anciennes.

Nombreux sont les auteurs qui ont établi un indice de multiplicité des chenaux. Bravard (1987, p. 101), à la suite de Leopold & Wolman (1957) calcule "la longueur développée des chenaux ou bras en eau courante", que Maizels (1979) appelle de manière ambiguë "taux de sinuosité brut". Elle préconise de compter le nombre de segments de chenaux par unité de longueur de la bande active comme mesure du degré de multiplicité des chenaux. Brice (1964) a une démarche beaucoup plus complexe sur la base des observations suivantes : les îles végétalisées sont les seules formes émergées avant débordement (on retrouve ici la notion de lit unique développée par Schumm) ; pour ces conditions d'écou-

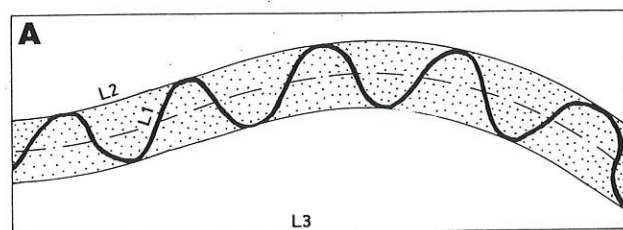
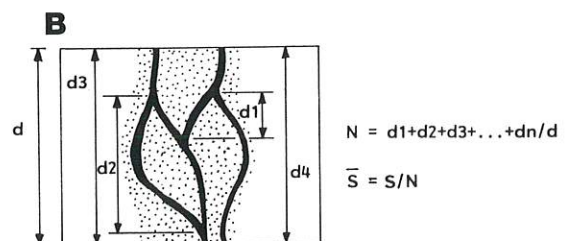


Figure 1.14 - Indices de sinuosité (A) et de tressage (B) des rivières à bras multiples. N : nombre de bras ; S : taux de sinuosité moyen

(Source : Peiry, 1989).

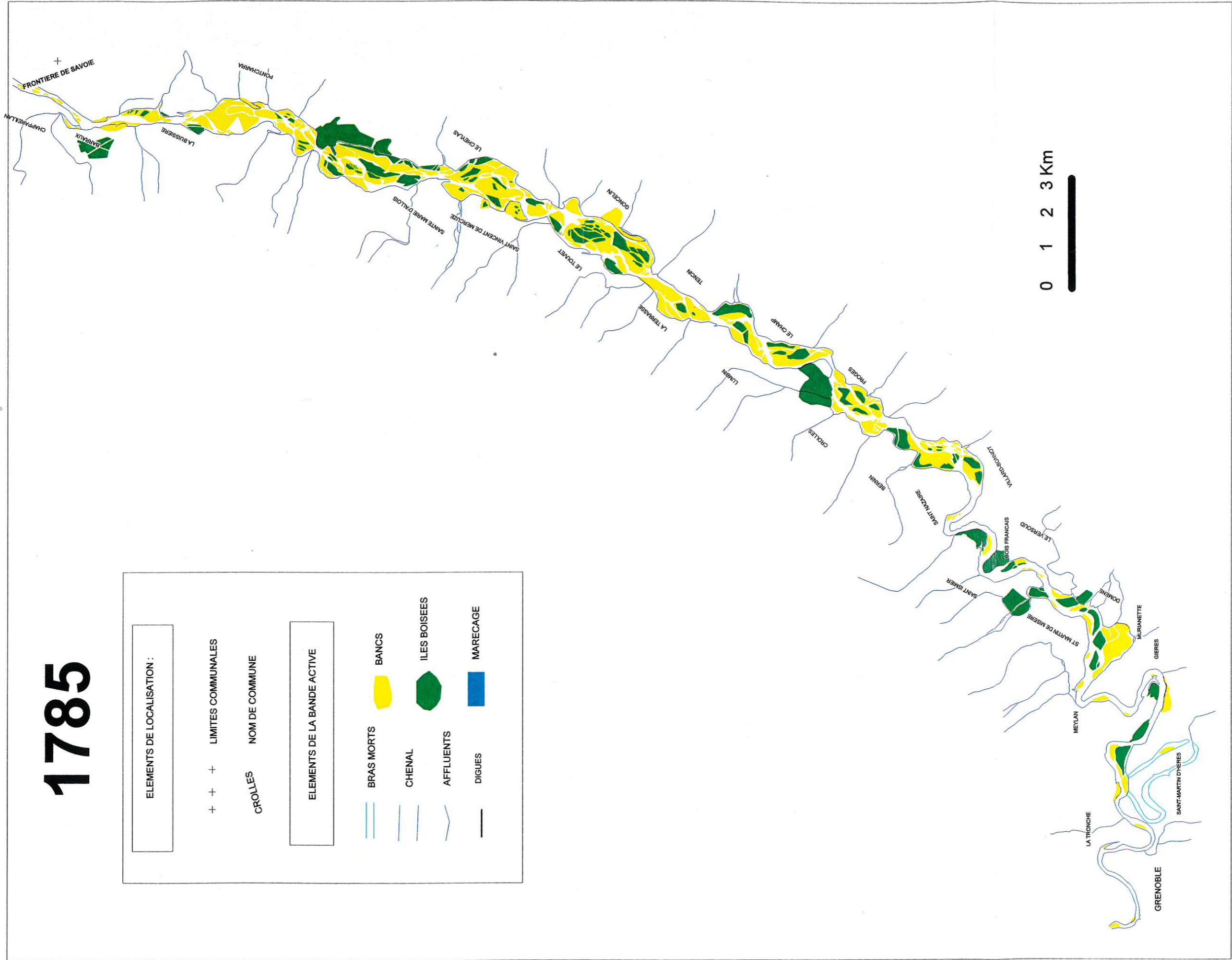
L1=longueur développée du chenal (des chenaux)
L2=longueur développée de la bande active mesurée à son axe
L3=longueur de la vallée
Taux de sinuosité brut $S = L1/L2$



$$N = d1+d2+d3+\dots+dn/d$$

$$\bar{S} = S/N$$

1785










1846

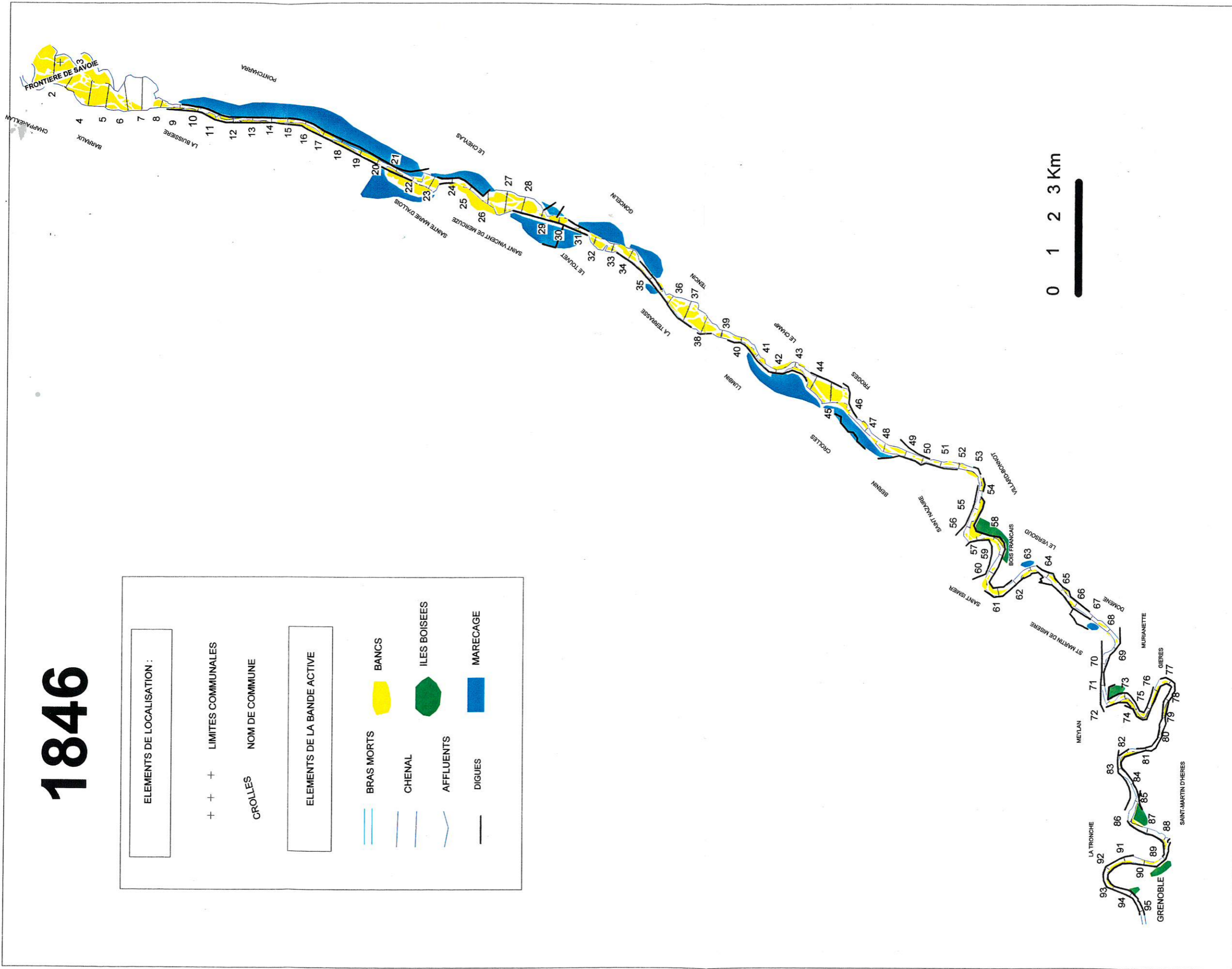
ELEMENTS DE LOCALISATION :

++ + LIMITES COMMUNALES

++ + NOM DE COMMUNE

ELEMENTS DE LA BANDE ACTIVE

	BRAS MORTS		BANCS
	CHENAL		ILES BOISEES
	AFFLUENTS		MARECAGE
	DIGUES		



lement, il calcule un indice de tressage "stabilisé", rapport du périmètre total des îles (somme des périmètres) sur la longueur de l'axe de la bande active. Plutôt que de mesurer le périmètre des îlots boisés, Bravard, Franc *et al.* (1990) en font plus simplement un comptage par tronçons de bande active, cet indice servant à "évaluer le degré de connexion entre la bande active et le lit majeur ainsi que la complexité de la mosaïque fluviale" (Piégay, 1995, p. 126). La physionomie du tressage changeant avec les variations du débit, Brice (1964) calcule également des indices de tressage "éphémères", rapport du périmètre total des bancs sur la longueur de l'axe de la bande active. Seul l'indice de tressage "stabilisé" est utilisable dans le cadre d'une comparaison entre cours d'eau. Son utilité est contestable, car certaines rivières tressées sont tellement instables que la construction d'îles végétalisées ne peut se produire et un tel indice ne peut être calculé.

Afin de se libérer de la contrainte imposée par les variations de niveau d'eau, Rust (1978) comptabilise tous les chenaux, qu'ils soient en eau ou pas ; l'indice de tressage résultant d'un comptage des bras entourant les bancs préalablement hiérarchisés selon leur numéro d'ordre. L'indice de tressage de Rust, fastidieux à mettre en oeuvre, peut être calculé avec rigueur sur les photographies aériennes où la photo-interprétation révèle l'ensemble des lits. Cela ne règle pas le problème des cartes anciennes où ne figurent que les bras en eau que le cartographe a bien voulu faire apparaître. Pour notre part, nous calculons le *nombre moyen de bras en eau* par tronçon de bande active. Il est défini comme étant la "somme des longueurs de chaque segment de chenal mesuré parallèlement à l'axe de la bande active que divise la longueur du tronçon" (fig. 1.14/B). Piégay (1995) adopte une démarche simplifiée en travaillant non pas sur des tronçons de bande active, mais sur des transects équidistants de 250 mètres ; il effectue un comptage du nombre de bras que recoupe chaque transect ce qui permet d'obtenir "un indice moyen de multiplicité des chenaux, le nombre moyen de chenaux observé sur l'ensemble des transects, ainsi qu'une rapide sectorisation du tronçon selon la variabilité de la multiplicité des chenaux" (p. 126).

Lorsque la qualité des documents anciens ne permet pas de calculer un indice de tressage, une évaluation de "l'activité du tressage" peut être aisément déterminée par des mesures de la *largeur de la bande active*. Sur des transects régulièrement espacés, on mesure l'emprise des chenaux en eau et des bancs de galets, à l'exclusion des îles végétalisées. L'absence de végétation sur les bancs indique des submersions fréquentes et le remaniement des formes fluviales avec une fréquence approximativement annuelle. La largeur de la bande active est un indice très utile dans le cadre d'un suivi diachronique et est particulièrement facile à mettre en oeuvre, à tel point qu'il est une variable classique dans les études de géomorpho-

logie fluviale historique. L'analyse de la métamorphose du style fluvial de l'Isère au XIX^e siècle sous l'effet de l'endiguement longitudinal insubmersible illustre tout l'intérêt d'indices quantifiant la morphologie en plan des cours d'eau.

2.2.2) La métamorphose du style fluvial de l'Isère illustrée par le suivi diachronique des indices morphométriques

Sur l'Isère, comme sur beaucoup de grandes rivières françaises, la cartographie ancienne constitue une source fondamentale de la connaissance de la dynamique fluviale avant la période des grands travaux du XIX^e siècle (fig. 1.15/A et B) (Bravard & Bethemont, 1989). Deux cartes, couvrant la presque totalité de la vallée du Grésivaudan, furent dressées pendant la deuxième moitié du XVIII^e siècle, en 1766-67 et 1785 :

a) La carte en couleur la plus ancienne représente le "Cours de l'Isère depuis la frontière de Savoie jusques à Grenoble levé en 1766 et 1767". Sont figurés le cours d'eau et ses affluents, les bancs de galets et les îles couvertes de végétation ; le parcellaire est lui aussi représenté, avec une distinction entre les bois, les prairies, les champs labourés ou cultivés et les vignobles. Les lieux-dits sont représentés de manière figurative et nommés ; le réseau de routes et de chemins est également clairement cartographié.

b) La carte de 1785 est intitulée "Plan de la rivière d'Izère dans la vallée de Grésivaudan depuis la limite de Savoie jusques à Grenoble avec le projet de redressement de cette rivière et l'établissement des digues sur l'une ou l'autre des rives" (fig. 1.15/A). Elle est plus connue sous le nom de "plan Mermillot", du nom de l'ingénieur chargé du premier projet d'endiguement généralisé de la rivière. La carte recèle le même type de renseignements que celle dressée en 1766-67, à l'exception des éléments figuratifs qui sont cartographiés en plan.

Une troisième carte ancienne, le "plan Charpin" datant de 1846, représente le cours d'eau du "pont de pierre de Grenoble" à la Savoie. Elle fut dressée en 1845 pendant les basses eaux d'hiver, au moyen d'un triangulation générale. Son échelle initiale était le 1/5.000^e ; elle fut par la suite réduite à l'échelle du 1/20.000^e. Cette carte constitue le premier témoignage cartographique de la progression des travaux d'endiguement général entamés vers 1840 (fig. 1.15/B). Figurent en particulier sur ce document les espaces que l'endiguement a permis de gagner sur la rivière, ces nouveaux "marais" qui bordèrent le chenal pendant toute la seconde moitié du XIX^e siècle.

Rousset (1993) a procédé à la numérisation des cartes anciennes. Ce lourd travail avait pour triple objectif : 1) de permettre de disposer de ces documents à une échelle identique, le 1/25.000^e ; 2) d'utiliser les capacités des logiciels de cartographie pour redresser les déformations liées à l'utilisation de systèmes de projections non clairement identifiés ou aux approximations et erreurs des cartographes, en se recalant sur la carte topographique contemporaine ; 3) de mettre en place aisément une base de données morphométriques qui puisse être utilisée pour caractériser la dynamique fluviale. Les tests effectués sur les différentes cartes ont montré que les déformations du plan de 1766-67 étaient trop importantes pour être corrigées avec une précision suffisante. C'est pourquoi, par la suite, cette carte a été utilisée uniquement de manière qualitative. Les déformations affectant les cartes de 1785 et 1846 se sont révélées être suffisamment limitées pour que des indices morphométriques aient pu être calculés.

Deux indices ont été utilisés pour caractériser le style fluvial : 1) la quantification de la sinuosité sur des tronçons présentant des caractéristiques morphologiques homogènes. Il est à noter que dans certains cas, une démarche plus systématique de calcul de la sinuosité sur des tronçons de même longueur peut être adoptée (Peiry, 1989) ; 2) utilisant des cartes anciennes dont on maîtrisait mal la précision, à un indice de multiplicité des chenaux on a préféré la quantification de la largeur de la bande active, le long de transects équidistants de 500 mètres établis perpendiculairement à l'axe d'écoulement (voir fig. 1.15/B, numérotation des transects).

L'analyse diachronique de la sinuosité d'après les cartes anciennes montre que l'Isère en amont de Grenoble a très nettement évolué dans le temps (tab. 1.2). A la fin du XVIII^e siècle, les caractéristiques de la rivière étaient les suivantes : a) sur les 27 premiers kilomètres, en aval de la frontière savoyarde, l'Isère présentait un cours légèrement sinueux, les bras en eau enserrant de vastes bancs de graviers parfois largement végétalisés (bois ou broussailles) ; b) sur les 20 kilomètres suivants, la rivière suivait un cours que l'on peut qualifier de méandrique (SI

≥ 1,5) ; c) sur les 12 derniers kilomètres en amont de Grenoble, l'augmentation de la sinuosité était sensible et conduisait au développement de grands méandres aux abords de Grenoble². Au milieu du XIX^e siècle (1846), la modification du tracé, alors que l'endiguement longitudinal insubmersible restait incomplet, se révélait sensible, sauf dans la section aval où le tracé méandrique de l'Isère fut respecté. La situation de l'Isère endiguée (env. 1870) montre que la sinuosité du tronçon intermédiaire a été encore fortement altérée par la poursuite des travaux de correction (voir tab. 1.2).

Comme le traduit l'analyse de la *largeur de la bande active*, en 1785, la transition entre le tressage et le méandrage se produisait de manière très graduelle (fig. 1.16) :

a) Sur le tronçon amont, la largeur de la bande active atteignait en moyenne 700 mètres dont les 3/4 étaient constitués de bras en eau et de bancs de graviers dépourvus de végétation. Alternaient une succession de tronçons occupés par de vastes surfaces de graviers et des zones où les îles végétalisées étaient plus développées ; ce style fluvial du dernier quart du XVIII^e siècle n'est pas sans rappeler le type "wandering channels" des cours d'eau soumis à une forte fourniture en charge de fond (Church, 1983). Ce type de style fluvial semble avoir été fréquent au cours du XVIII^e siècle dans les parties médianes et distales des grandes vallées intra-alpines, comme en témoigne également sa présence dans la moyenne vallée de l'Arve (Peiry, 1988) (voir P3, § 1.1).

b) Entre les kilomètres 26,5 et 36, la largeur de la bande active se réduisait à une moyenne de 350 mètres, la plus grande partie du chenal continuant à être occupée par des bras en eau et des bancs de galets nus. Au droit de Murianette (km 35,5), un ancien méandre recoupé probablement lors des décennies précédentes faisait brutalement, mais très localement, remonter la largeur de la bande d'activité fluviale à plus de 800 mètres.

c) En aval du kilomètre 36, la largeur de la rivière diminuait encore pour s'établir à environ 120-150 mètres, tandis que les surfaces en gravier ou couvertes de

Tableau 1.2 - Evolution du taux de sinuosité (SI) avant, pendant et après l'endiguement de l'Isère
(d'après les cartes de Rousset, 1993)

Tronçon	avant 1729	1766-67	1785	1846	Isère endiguée
km 0 à 26,5	-	1,11 (S)	1,09 (S)	1,02 (R)	1,02 (R)
km 26,5 à 36	1,66 (M)	-	1,58 (M)	1,44 (TS)	1,12 (S)
km 36 à 48,5	2,97 (M)	-	2,04 (M)	2,04 (M)	2,04 (M)

avec : SI < 1,05 ---> (R) : Rectiligne
 1,05 ≤ SI < 1,25 ---> (S) : Sinueux
 1,25 ≤ SI < 1,50 ---> (TS) : Très sinueux
 1,50 ≥ SI ---> (M) : Méandrique

² Noter le fort taux de sinuosité de l'Isère aval en 1729 (SI = 2,97). Sa diminution dans les décennies qui suivirent (SI = 2,04) est due au recoupement du méandre des Eparres où est actuellement localisé le campus de Grenoble ; l'analyse historique a montré que la longueur du lit de l'Isère fut réduite de 6200 mètres par la coupure du méandre (voir tab. 1.1)

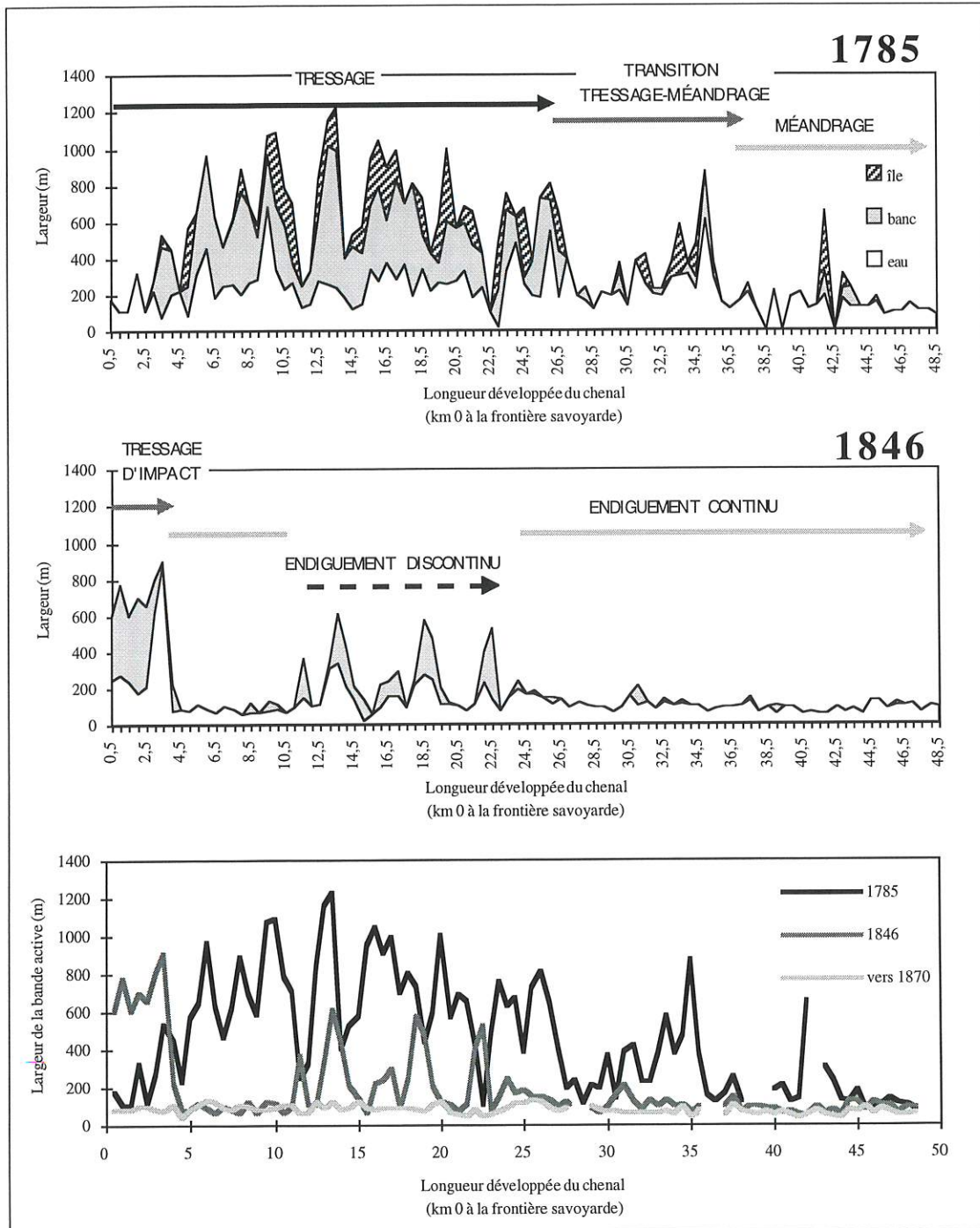


Figure 1.16 - Evolution amont-aval de la largeur du chenal en 1785 et 1846. La figure inférieure superpose les courbes enveloppes à trois dates successives, traduisant la transformation du paysage fluvial suite au développement de l'endiguement
(Source : d'après les mesures de Rousset, 1993).

végétation devenaient fort rares, à l'exception de l'ancien méandre des Eparres au km 42. Caussin (1995) signale que, dès 1736, des travaux étaient entrepris en vue de drainer les 70 hectares gagnés sur la rivière. Leur succès fut très mitigé puisqu'en 1904, date à laquelle la moitié de la surface de l'ancien chenal étaient encore constituée de marais. Une analyse fine de la carte de 1785 a montré que 56 ans après le recoupement du méandre des Eparres, la rivière avait déjà commencé à allonger son cours en construisant une nouvelle sinuosité quelques centaines de mètres en amont du bras mort.

Le changement de la largeur du chenal en 1846 est particulièrement frappant. D'amont en aval, on observe une courte zone où elle s'est considérablement accrue, au débouché des digues construites par les sardes sur la partie savoyarde du cours d'eau (Bravard & Peiry, 1993 ; voir P3, § 2.2). A partir du kilomètre 4,5, le chenal est calibré à moins de 100 mètres de largeur par des digues insubmersibles. A l'aval du kilomètre 11, un tronçon d'environ 22 kilomètres présente une forte variabilité de largeur, en raison d'un endiguement incomplet. Sur le cours aval sinueux et rectiligne, la largeur du lit connaît une nouvelle décroissance. Vers 1870, la totalité du lit de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan était rectifiée et la largeur de la bande active n'excédait qu'exceptionnellement 100 m.

Comme l'illustre l'exemple de l'Isère dans le Grésivaudan, des indices simples de morphologie en plan, comme le sont la sinuosité et la largeur de la bande active, permettent d'utiliser efficacement les cartes anciennes pour l'analyse du style fluvial et de ses changements dans le temps. Cependant, dans la plupart des cas, ils ne doivent pas être utilisés seuls, mais s'appuyer sur une lecture approfondie des archives ; son intérêt est à la fois de recouper les informations fournies par les cartes avec les textes de l'époque, et de fournir des éléments d'explication sur les processus en activité au moment où les documents ont été dressés (Peiry, 1987 ; 1989).

2.3) L'apport du SIG pour la quantification des ajustements en plan de la dynamique fluviale

Depuis quelques années, le développement de l'informatique et des outils de type Système d'Information Géographique (SIG) offre au chercheur de nouveaux moyens d'investigation. Les SIG *raster*³ (IDRISI, MAP2...) sont particulièrement adaptés lorsqu'il s'agit d'étudier la dynamique de l'occupation du sol (Waniez, 1990 ; Charre, Mielliet *et al.*, 1991). L'objectif est alors

non seulement de spatialiser et de quantifier les changements de manière simple et rapide (Piégay, 1993 ; Marston, Girel *et al.*, 1995 ; Piégay, 1996 ; Ployon, 1996), mais de plus en plus fréquemment de prévoir les modes futurs d'occupation de l'espace, par une modélisation spatiale de la dynamique des milieux en cours de transformation (Chiarello, 1994 ; Josselin, 1995). L'outil est particulièrement adapté lorsqu'il s'agit de combiner des cartes d'occupation et de procéder à une évaluation précise des surfaces ayant changé d'affectation au cours du temps ; cela permet la création de bases de données originales susceptibles ultérieurement de faire l'objet d'une analyse géostatistique (tab. 1.3).

Tableau 1.3 - Avantages présentés par l'adoption d'une approche basée sur le SIG en géomorphologie fluviale

(d'après Downward, Gurnell *et al.*, 1994).

1) Les frontières dérivées directement du document original fournissent des représentations géométriquement stables pouvant être rapidement stockées, récupérées et manipulées.
2) Les méthodes digitales de traitement des déformations permettent la correction des erreurs planimétriques des documents originaux et l'enregistrement des documents sous une échelle et un système de projection communément utilisés.
3) Une analyse quantitative des déplacements linéaires et en surface peut être menée à bien par la comparaison des enregistrements individuels ou de séquences d'enregistrements.
4) Une grande variété de cartes peut être produite, l'objectif étant de fournir les documents les plus adaptés à la problématique traitée.
5) Des sorties statistiques peuvent être directement exportées du SIG en direction de logiciels adaptés à des analyses complémentaires

L'outil SIG trouve une application dans les travaux de géomorphologie fluviale : Piégay (1995, 1996) l'a principalement utilisé pour analyser la dynamique de colonisation forestière consécutivement à la contraction de la bande d'activité fluviale sur l'*Ardèche* et le *Giffre*. Dans la basse vallée de l'*Ain*, Marston, Girel *et al.*, (1995), se fondant sur six cartes provenant de photographies aériennes et d'investigations de terrain, emploient le logiciel Arc/info pour déterminer, par des combinaisons de cartes, quels sont les changements des unités du paysage relatifs à la modification de la dynamique fluviale ; à chaque date, le calcul des surfaces de chaque unité paysagère permet de déterminer des indices de diversité du paysage et de suivre leur évolution dans le temps. Sur les rivières à lit mobile, le SIG peut être avantageusement utilisé pour quantifier les déplacements latéraux ou longitudinaux : sur la rivière *Dee* en Grande-Bretagne, sui-

³ La données spatiales sont structurées selon une matrice de mailles carrées indépendantes les unes des autres repérées par leurs coordonnées géographiques X et Y. Chacune d'entre-elles est un individu au sens statistique du terme, dont la surface peut être gérée par l'utilisateur. On leur affecte des caractères qui peuvent être qualitatifs (présence/absence ; modalités d'occupation du sol...) ou quantitatifs (altitude, distance, variables climatiques...). Les modules de calcul du logiciel permettent d'effectuer des reclassements, des superpositions etc., et ainsi, de générer de nouvelles matrices d'information dont on peut faire une représentation spatiale et tirer des calculs statistiques.

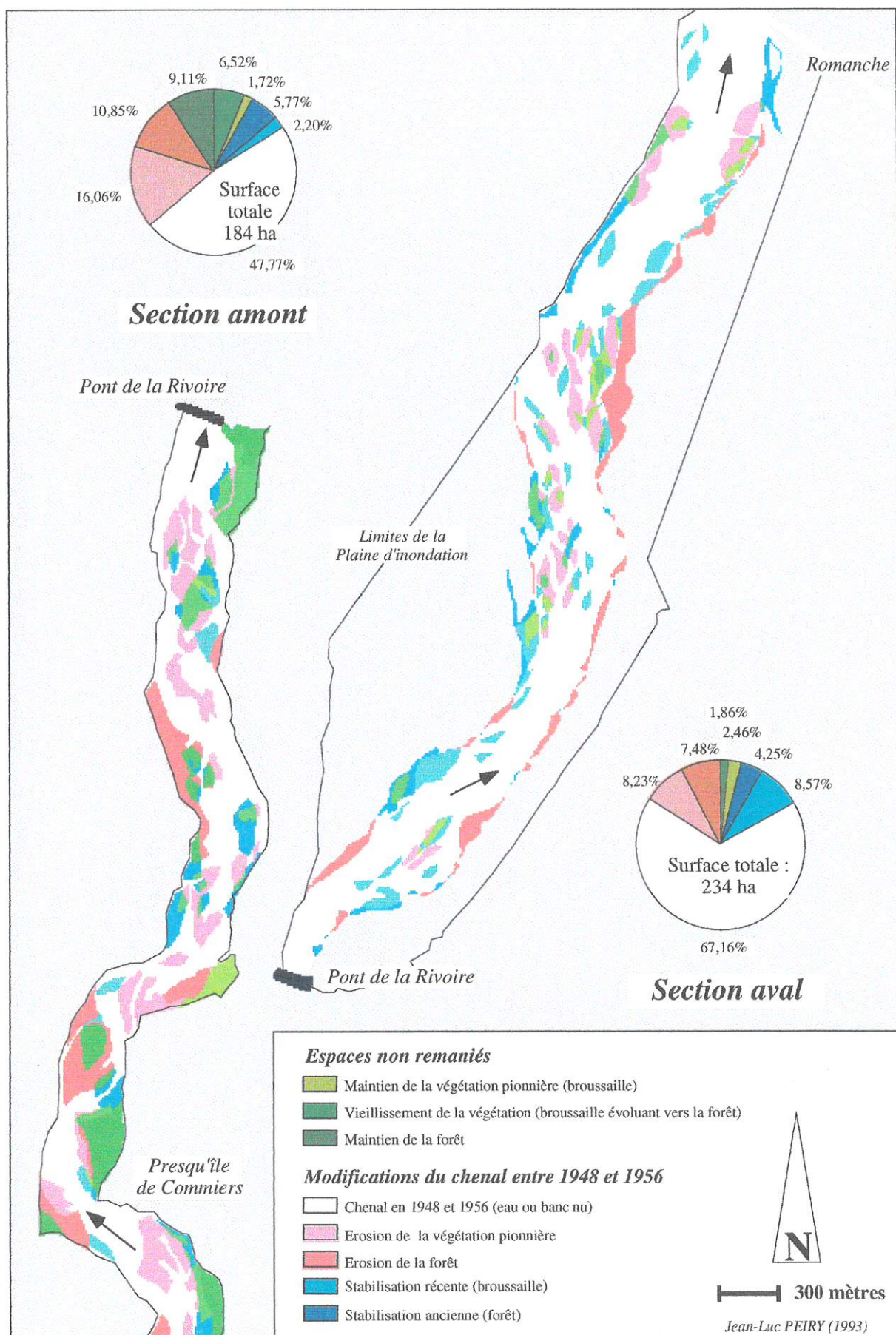


Figure 1.17 - Changements géomorphologiques affectant le chenal du Drac avant la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers, à l'occasion des crues de la période 1948-1956.

vie sur une période de 115 ans par différents documents cartographiques, Downward, Gurnell *et al.* (1994) sont parvenus à montrer la progression amont-aval de la stabilisation du chenal ; sur la rivière *Towy* au Pays de Galles, Downward (1995), utilisant des données topographiques, a quantifié la migration du chenal de méandrage entre 1842 et 1986.

Le SIG peut également être utilisé pour étudier l'incidence géomorphologique de phénomènes hydrologiques exceptionnels : sur un tronçon de 18 kilomètres de l'*Ouvèze*, Piégay (1993, 1995) l'a mis en œuvre consécutivement à la très violente crue du 22 septembre 1992 ; il montre une augmentation de 32 % de la surface de la bande active au détriment de la forêt alluviale, et la destruction ou l'altération par la crue de 25 % de la surface forestière initiale. L'outil a aussi montré tout son intérêt dans le cadre d'une analyse du fonctionnement du *Drac tressé*, avant la construction de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers (fig. 1.17). Les photographies aériennes de 1948 et 1956, antérieures à la construction de la retenue hydroélectrique (1963), ont été numérisées, redessinées sur un logiciel de dessin et exportées sur le logiciel MAP2. La superposition informatique des deux états a permis de mettre en évidence les ajustements du chenal consécutifs à une série d'années humides ayant engendré plusieurs petites crues (Peiry & Vivian, 1994). L'analyse spatiale du document construit par superposition graphique met en évidence deux phénomènes : 1) en amont du pont de la Rivoire (voir figure 1.17), le confinement du chenal dans une vallée étroite influence directement les processus érosifs et d'extension du chenal, au détriment de la colonisation végétale pionnière. Ainsi, en amont du pont, les érosions remanient près de 27 % de la surface du chenal, alors qu'elles ne perturbent qu'environ 16 % du chenal de la zone aval, où les écoulements peuvent librement envahir un vaste espace inondable ; 2) en aval du pont de la Rivoire, le chenal a développé une tendance à la migration latérale en direction de l'Est à la suite de la série de crues de la période 1948-56, alors que la rive gauche était soumise à une végétalisation intensive. Chaque pixel représentant sur le terrain un carré de 10 m de côté, on peut estimer le déplacement latéral à 20-30 mètres en moyenne (voir fig. 1.17).

En définitive, deux sources documentaires majeures permettent l'analyse historique de la dynamique fluviale à l'échelle de temps séculaire : les profils en long et les cartes anciennes ; tous deux imposent une extrême rigueur, en raison des nombreux pièges que leur utilisation recèle. Dans ce chapitre, nous avons plus spécifiquement développé l'utilisation des documents en plans, en particulier de la carte ancienne. Celle-ci autorise le calcul d'indices décrivant le style fluvial. Le classique *taux de sinuosité* peut sans grande difficulté être calculé sur ce type de document ; par contre, le chercheur devra éviter d'utiliser *l'indice de multiplicité*, les cartes anciennes étant inappropriées en raison de la méconnaissance

du niveau de la rivière à laquelle la cartographie se réfère. De manière à pouvoir comparer entre eux les documents dressés à diverses dates, on leur préféra la largeur de la bande active. L'exemple de la métamorphose de l'Isère dans le Grésivaudan au XIX^e siècle montre tout l'intérêt que l'on peut tirer de la quantification du style fluvial sur les documents anciens. L'informatisation des cartes anciennes et le recours au SIG peuvent encore améliorer l'usage que l'on fait des données cartographiques, par leur capacité à homogénéiser les échelles, à géoréférencer les documents dans un système de repérage commun, à traiter et créer l'information géographique, à quantifier les éléments structurants du paysage fluvial. Il est probable que ce type d'outil permettra de faire des progrès notables dans l'avenir, en dépit du fait que son développement soit très consommateur de temps de recherche.

CHAPITRE 3

LE DÉVELOPPEMENT DE TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC MORPHODYNAMIQUE ET D'AIDE À LA GESTION

- 3.1) Une nécessité : pouvoir mettre en œuvre sur le terrain des techniques de recueil des données adaptées au diagnostic morphodynamique
- 3.2) Le diagnostic morphodynamique sur un bassin-versant composé de plusieurs petits cours d'eau : l'exemple de l'Aire et de la Drize
- 3.3) Le diagnostic des causes d'érosion des berges sur le Tacon et le Flumen (Parc Naturel Régional du Haut-Jura)
- 3.4) Analyse de la fermeture des bras morts du Rhône dans l'île de Miribel-Jonage (amont de Lyon)
- 3.5) Synthèse méthodologique de l'approche experte

Résumé du chapitre 3

Depuis quelques années, la géomorphologie fluviale prend une place croissante dans les études environnementales ; elle vient compléter les approches d'ingénierie classiques (modélisation hydrologique et hydraulique) par un volet plus "naturaliste" reposant sur la compréhension des mécanismes du fonctionnement des cours d'eau. De ce fait, le géomorphologue doit développer des techniques et des outils permettant de dresser des diagnostics fonctionnels. Il ne suffit plus que ceux-ci soient uniquement fondés sur une expertise qualitative ; il est nécessaire de se baser sur des critères précis et quantifiés. Trois études de cas, montrant différentes méthodes mises en œuvre à l'occasion d'études de cours d'eau, sont présentées ; l'objectif est de dégager un certain nombre de caractéristiques méthodologiques communes, qui constituent le fondement de l'approche géomorphologique. Dans tous les cas de figure, elles font appel à une analyse approfondie du terrain. Les données sont collectées sur des fiches de terrain, permettant l'élaboration d'un échantillon ; chaque fiche est un questionnaire de terrain, à l'image des techniques d'enquête de géographie sociale. La problématique guide le choix des caractères étudiés, qui sont qualitatifs ou quantitatifs. La base de données peut, selon les cas, faire l'objet d'un simple traitement cartographique (cartographie morphodynamique de terrain, production de cartes analytiques et synthétiques) ; elle peut aussi, si cela est nécessaire, faire l'objet d'un codage et d'un traitement géostatistique plus sophistiqué, ayant un objectif de démonstration scientifique. Dans certains cas, les études débouchent directement sur des propositions de travaux et de gestion de l'espace fluvial.

3.1) Une nécessité : pouvoir mettre en œuvre sur le terrain des techniques de recueil des données adaptées au diagnostic morphodynamique

Les recherches en géomorphologie fluviale nécessitent très fréquemment de dresser un diagnostic du fonctionnement géomorphologique des rivières, notamment à l'usage des gestionnaires de cours d'eau. Il s'agit, le plus fréquemment, d'analyser la distribution et l'organisation spatiale des formes fluviales et des mécanismes qui les mettent en place, en s'appuyant sur une argumentation solide et objective, issue si possible d'une base de données quantitatives. Ainsi, le diagnostic doit s'appuyer sur une connaissance approfondie du terrain et repose en partie sur l'analyse spatiale de variables géomorphologiques indicatrices du fonctionnement, ces indicateurs pouvant être qualitatifs ou quantitatifs. Recueillir de l'information sur le fonctionnement géomorphologique d'un cours d'eau nécessite la mise en place de techniques d'échantillonnage, de collecte, et de traitement statistique et cartographique des données de terrain. Le diagnostic portant généralement sur des tronçons de plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres de rivières, la difficulté réside dans le risque d'être rapidement submergé par la taille de l'espace à couvrir et la masse des données à collecter, puis à traiter. Certaines études réalisées depuis 1990 nous ont conduits à nous interroger sur les outils du diagnostic géomorphologique, ainsi que leur adaptation à la demande du maître d'œuvre et aux contraintes imposées par le terrain d'étude.

Le développement d'outils d'expertise et d'aide à la gestion sur les rivières relève d'une double nécessité :

1) Depuis environ dix ans, il existe une demande croissante pour que les approches d'ingénierie classiques (modélisation hydrologique, étude hydraulique...) soient accompagnées d'une approche plus "naturaliste" reposant sur la compréhension des mécanismes de fonctionnement des rivières. Il est donc nécessaire de disposer de techniques et d'outils permettant d'intervenir efficacement dans le cadre d'études visant à dégager des modalités de gestion des cours d'eau. Au delà de l'approche appliquée, le géomorphologue, sans cesse confronté à la complexité du terrain, ne peut plus se contenter de fonder son diagnostic sur la seule démarche experte, mais doit l'établir sur des éléments objectifs décrivant les formes et les processus qu'il doit analyser et comprendre. Cela impose de mettre en place des techniques laissant une large place au recueil de données quantitatives de terrain, à leur traitement statistique et à leur représentation cartographique.

2) Les directives récentes en matière de formation universitaire tendent de plus en plus vers la professionnalisation de certaines filières (MST, IUP, DESS). Par

ailleurs, un nombre croissant d'étudiants géographes ne souhaitent pas s'orienter vers les carrières de l'enseignement, mais ont pour objectif d'acquérir des outils et des compétences techniques qu'ils puissent ensuite valoriser sur le marché de l'emploi. En tant qu'enseignant, il nous a paru indispensable de pouvoir répondre à cette demande. Les chaînes de recueil de l'information, de traitement statistique et cartographique des données présentées dans les paragraphes suivants sont enseignées auprès des étudiants de 2^e et de 3^e cycle se destinant à des carrières professionnelles dans les bureaux d'étude.

Les réflexions méthodologiques pour la mise en place d'outils d'expertise et de diagnostic ont fréquemment été engagées dans le cadre de contrats d'étude réalisés pour le compte de syndicats intercommunaux, souvent en partenariat avec des bureaux d'étude. Dans un tel contexte, une étude de géomorphologie fluviale basée sur une analyse fine des processus et de leur dynamique est impossible, à la fois par manque de temps et parce que l'enveloppe financière mise à la disposition de l'expert est limitée. Ces deux contraintes nous ont conduits à développer des outils d'expertise et d'aide à la gestion, à la fois rapides et d'un coût limité, qui permettent d'aller plus loin qu'une simple analyse descriptive et de dresser un état du fonctionnement du cours d'eau. L'objectif général d'une telle approche méthodologique est de mettre en place des modalités d'observation fondées sur des variables clairement identifiées et dont on connaît la signification géomorphologique. Ces observations seront répétées lors de l'étude de terrain selon des modalités d'échantillonnage qui varieront selon la nature de la demande et la manière dont on a choisi d'exploiter les données. L'exploitation des observations de terrain peut être très classique pour un géographe, comme par exemple le recours à la cartographie. Elle peut parfois être plus sophistiquée, si l'étude de terrain donne lieu à la constitution d'une base de données que l'on cherchera dans un deuxième temps à exploiter par un traitement statistique, puis par de l'infographie.

De manière à rester très concret, nous avons choisi de présenter diverses techniques d'expertise et de diagnostic géomorphologique, en nous appuyant sur les études au cours desquelles elles ont été mises en œuvre. On mettra systématiquement l'accent sur la problématique de l'étude, qui constitue le guide fondamental de la technique de recueil de l'information choisie. Les méthodologies de terrain seront présentées selon un degré de sophistication croissant. Un dernier paragraphe dressera une synthèse des principaux enseignements d'ordre méthodologique que l'on peut tirer de ces études de cas.

3.2) Le diagnostic morphodynamique sur un bassin-versant composé de plusieurs petits cours d'eau : l'exemple de l'Aire et de la Drize

3.2.1) Problématique de l'étude

Cette étude revêtait une importance politique toute particulière puisqu'il s'agissait de la première réflexion visant à définir des modalités de gestion sur deux petits bassins-versants franco-suisse, l'Aire et la Drize. Dans la partie supérieure de leur cours, les rivières drainent le territoire français essentiellement rural. Dans la partie aval, elles s'écoulent en Suisse, principalement en zone péri-urbaine puis urbaine, et confluent avec l'Arve à Genève (localisation sur la fig. 1.18). La qualité environnementale des rivières de l'Aire et de la Drize s'est très gravement dégradée avec le développement urbain de la couronne genevoise. Les problèmes portent essentiellement sur la faiblesse des débits à certaines périodes de l'année et la très mauvaise qualité des écoulements : a) les étiages estivaux ont été très fortement renforcés par d'intenses prélèvements agricoles pour le maraîchage, de sorte que les effluents des stations d'épuration et des habitations particulières non raccordées à un réseau d'assainissement constituent pendant les mois d'été l'essentiel des apports ; b) l'accroissement des surfaces imperméabilisées engendre une inquiétude des riverains localisés dans les zones densément urbanisées de la partie aval des bassins-versants, leur crainte étant de voir la puissance des crues se renforcer.

La demande des maîtres d'œuvre était la réalisation d'un diagnostic environnemental permettant d'améliorer la gestion des eaux en période d'étiage et en crue. Pour se faire, l'étude comportait différents volets : diagnostic sur les rejets d'effluents et la qualité de l'eau ; état de l'assainissement ; analyse hydrogéologique avec un point particulier sur les potentialités des ressources karstiques ; diagnostic de la qualité hydrobiologique des cours d'eau ; étude hydrologique, l'accent étant mis sur l'analyse des étiages et la modélisation des crues en fonction de différents scénarios de développement urbain. Le volet géomorphologique de l'étude avait un double objectif :

1) sur l'ensemble du réseau hydrographique des deux bassins-versants, totalisant une cinquantaine de kilomètres de toutes petites rivières et ruisseaux, il s'agissait d'établir un diagnostic de la dynamique fluviale, de définir des modalités de gestion et de dégager des priorités d'intervention ;

2) sur la partie aval des rivières localisée en Suisse, il s'agissait d'évaluer les risques de déstabilisation généralisée des fonds et des berges en relation avec un accroissement de l'ampleur des crues, les bruits les plus alarmistes courant sur la stabilité des berges du cours d'eau.

Une telle évaluation imposait de travailler à une échelle beaucoup plus fine dans les zones urbanisées, c'est-à-dire dans leur parcours suisse.

3.2.2) Méthodologie de l'étude

La longueur du chevelu hydrographique à étudier imposait de mettre en œuvre une méthodologie d'expertise très rapide (voir fig. 1.30/A). Une première visite sur le terrain a permis d'analyser succinctement les caractéristiques fonctionnelles des rivières et de définir une méthodologie d'intervention. Elle a révélé que les problèmes d'instabilité géomorphologique provenaient pour l'essentiel d'une insuffisance d'entretien du chenal d'écoulement. Le rôle fondamental de la végétation poussant non seulement sur les berges, mais aussi dans le lit même des cours d'eau, a été mis en évidence. Il est apparu que ce rôle était complexe et ambigu puisque la végétation peut avoir, selon les circonstances, des effets déstabilisateurs ou stabilisateurs sur la géomorphologie :

a) Lorsqu'elle n'est plus coupée depuis des décennies, elle surcharge les berges et provoque leur effondrement dans le chenal ; elle réduit parfois de 50 % la surface mouillée et accélère fortement les écoulements, ce qui engendre immédiatement en aval des érosions de berge et de profonds surcreusements du chenal.

b) Basculés dans le lit et emportés vers l'aval, les arbres morts créent de volumineux embâcles dont la rupture lors des crues a de graves conséquences sur la stabilité du chenal. Par contre, la fragilité des berges, très fréquemment incisées dans des argiles morainiques, serait incomparablement plus forte sans la présence d'un très dense appareil racinaire provenant de ces mêmes arbres ; ce réseau de racines assure une très efficace protection des parois du chenal, augmentant ainsi la résistance de formations géologiques à l'origine très médiocre.

En raison de la nécessité d'intervenir à des niveaux d'échelle emboîtés, deux types de techniques ont été mis en œuvre :

1) Sur les cours de l'Aire et de la Drize, ainsi que sur leur principaux affluents, un relevé intégral a été réalisé. Il a permis de découper le terrain en tronçons de longueur variable au sein desquels le comportement géomorphologique du cours d'eau est sensiblement homogène. Des fiches de tronçons ont été élaborées et remplies sur le terrain (tab. 1.4). Elles reprenaient les principaux éléments contribuant au diagnostic géomorphologique. Trois rubriques ont été développées : a) un état général de la géomorphologie du tronçon où les processus affectant les berges et le fond sont brièvement analysés, ainsi que l'incidence de la végétation sur la stabilité (bois morts et arbres poussant dans le chenal) ; b) quelques éléments sur l'évolution prévisible du tronçon en l'absence de gestion ; c) des propositions d'intervention visant à gérer le

Tableau 1.4 - Exemple de fiche de tronçon sur la Drize. Sa localisation figure sur la carte de synthèse (fig. 1.18). La cartographie au 1/2.500e de cette zone correspondant à un avant-projet sommaire apparaît également sur la figure 1.18, comme extrait de la carte originale.

DRIZE
FICHE N° 5

Localisation du tronçon :

- PK 6,480 à 5,880.
- du lieu-dit "Pierre-Grtrand" au lieu-dit "Champ-Moulin"

Caractéristiques géomorphologiques :

Sur une cinquantaine de mètres, la Drize suit un lit canalisé qui la conduit à un moulin avec seuil et dérivation. Des murs maçonnés protègent les berges de tout affouillement. A l'aval de cet ouvrage, la rivière décrit une succession de 7 méandres prononcés avant de reprendre un cours plus rectiligne.

Le comportement géomorphologique de la rivière est soumis aux mêmes contraintes que sur la section précédente. Ici encore la végétation ancienne a très largement colonisé le lit de la Drize, avec une densité encore plus forte que sur le tronçon décrit sur la fiche n° 4. Cette végétation est ici directement responsable d'importantes attaques de berges dans les concavités de méandres, ou de part et d'autre du chenal lorsque les arbres obstruent le lit. Ces attaques de berge sont même parfois engendrées par les racines qui dirigent le courant sur les rives à la manière d'un épis.

En amont immédiat du lieu-dit "Champ-Moulin", sur un cours tronçon d'environ 50 mètres, la rivière n'est pas au gabarit, tant la végétation encombrant le chenal est dense. Cela se traduit par de hauts niveaux d'écoulement pour des débits courants. L'accélération des écoulements provoque la mise à nu des réseaux de racines.

- *Berges* : localement sapées, en particulier dans les zones où la végétation encombre le lit et dans les concavités des méandres.
- *Fond* : pavage de médiocre résistance, voire inexistant dans des zones où affleurent les argiles morainiques.
- *Embâcles* : pas d'arbre mort, mais de très nombreux troncs réduisant dans une forte proportion la section d'écoulement. La présence de végétation dans le lit peut contribuer à la formation d'embâcles lors d'une crue, soit en alimentant les débris ligneux grossiers, soit en bloquant les transferts de bois mort.

Evolution prévisible

L'envahissement du chenal par la végétation laisse craindre une déstabilisation de cette section lors d'une forte crue. L'appareil racinaire des arbres apparaît primordial dans la protection des berges. Il est en plusieurs points mis à nu par les écoulements et il est difficile de dire avec certitude comment il résistera en cas d'événement paroxysmique.

Gestion du tronçon

Les grands arbres poussant dans le lit même de la Drize *devraient être coupés*. Il semble *dangereux de procéder à un arrachage des souches* qui aurait pour conséquence de fragiliser un chenal dont le substratum est essentiellement composé de formations morainiques argileuses. Quelques souches trop hautes ont un rôle négatif sur la stabilité ; il paraît important de couper les arbres relativement bas de manière à éviter que les souches se transforment en épis. De la même manière, la gestion doit absolument *préserver les entrelacements de racines qui arment les berges*.

Il ne paraît pas *utile de combattre activement les érosions de berge* par des aménagements spécifiques (gabions, blocs, murs). Leur activité est fortement liée à la présence de grands arbres et le seul fait de couper la végétation devrait suffire à les stabiliser.

ZONE À SURVEILLER
INTERVENTION URGENTE NÉCESSAIRE

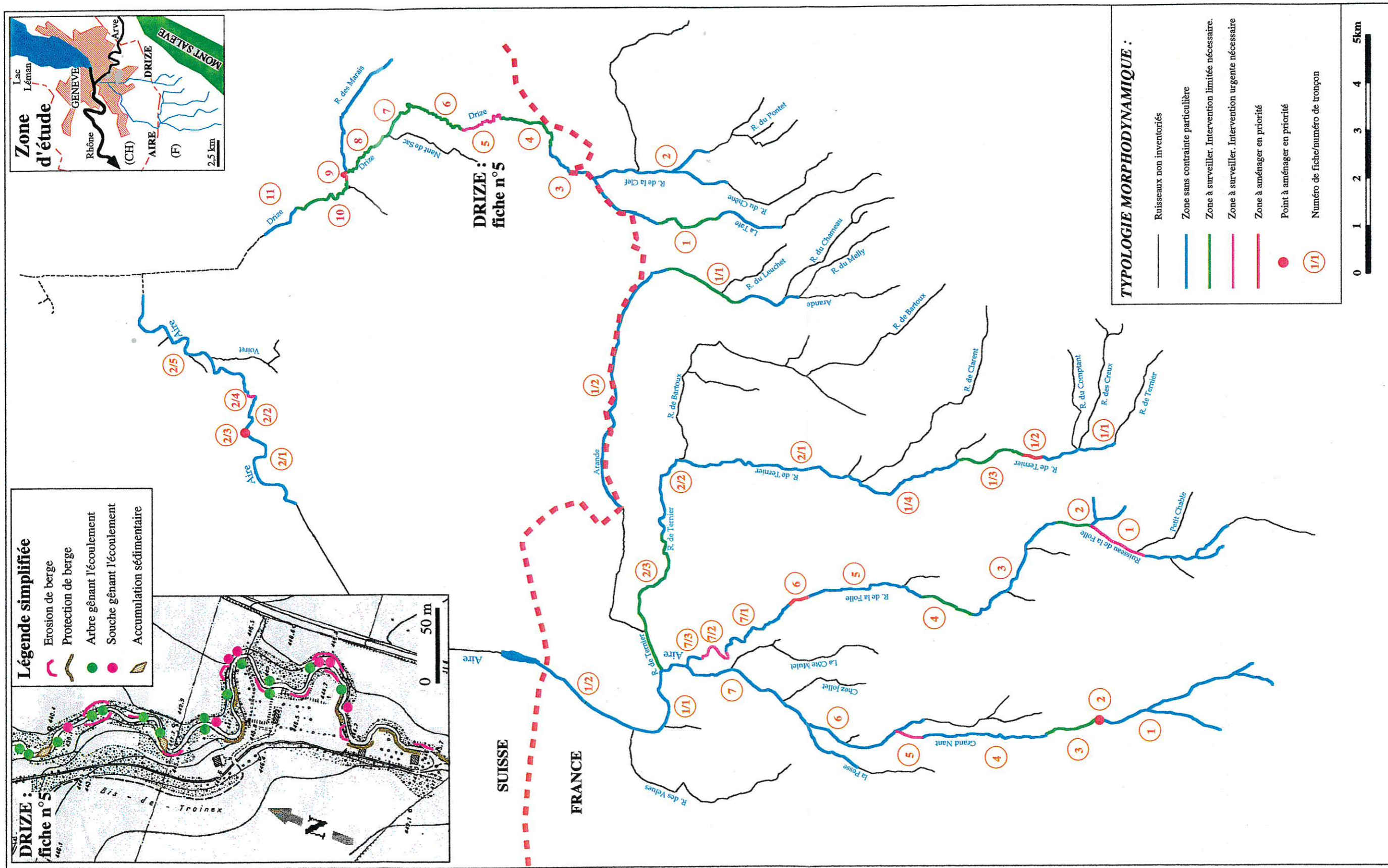


Figure 1.18 - Carte de sectorisation morphodynamique de l'Aire et de la Drize et extrait de la carte morphodynamique au 1/2500e (Fiche Drize n°5).

tron
cara
L'in
tuée
(fig.

2) D
haita
d'av
gesti
à l'é
re de
les m
cette
ment
comm
viale
ont é

3.3)
berg
Natu

3.3

Une e
dans
Biem
connu
1994)
tiers c
d'eau.
et les
sions

Entre
le fure
dans l
lité de
("égre
glisser
très lo
érosion
d'eau p
b) de l
amont
constr
pour e
les plu
à sédir
23.000
million

En déc
mettait
haitait

tronçon. Chaque fiche se terminait par une évaluation du caractère d'urgence des interventions de gestion. L'information collectée sur les fiches a été ensuite restituée sous la forme d'une carte de synthèse au 1/25.000^e (fig. 1.18).

2) Dans la zone aval, les maîtres d'œuvre de l'étude souhaitaient avoir un diagnostic très précis pouvant servir d'avant-projet sommaire et à guider les interventions de gestion. L'étude de terrain a consisté à dresser une carte à l'échelle du 1/2.500^e localisant avec précision la nature des aménagements existants, les zones à problèmes et les moyens d'améliorer la situation (voir un extrait de cette carte sur la fig. 1.18). L'accent a plus particulièrement été mis sur la gestion de la végétation, révélée comme étant le facteur prépondérant de l'instabilité fluviale ; ainsi, les souches et les arbres gênant l'écoulement ont été localisés avec précision.

3.3) Le diagnostic des causes d'érosion des berges sur le Tacon et le Flumen (Parc Naturel Régional du haut-Jura)

3.3.1) Contexte local et problématique de l'expertise

Une expertise géomorphologique a été réalisée en 1994 dans le Jura, sur deux affluents montagnards de la Bienne, les rivières du Tacon et du Flumen, qui ont connu de fortes crues en 1978 et 1983 (Bravard & Peiry, 1994). Ces crues ont entraîné l'inondation des bas quartiers de la ville de Saint-Claude sous près de 1,50 mètre d'eau. Les transports solides (estimés à 20-25.000 m³.an⁻¹) et les rehaussements du lit qui se sont produits à ces occasions furent rendus responsables des débordements.

Entre 1984 et 1992, plusieurs études d'ingénierie fluviale furent réalisées ; elles conclurent que l'incision du lit dans les dépôts morainiques était à l'origine de l'instabilité des versants et de la mise en place de zones d'érosion ("égrevines") par suppression de la butée de pied des glissements. Elles préconisaient des travaux d'ingénierie très lourds ayant pour double objectif : a) d'empêcher les érosions et la recharge en sédiments le long des cours d'eau par des actions de stabilisation du lit et des berges ; b) de limiter les transits de matériaux en les piégeant en amont de la ville. Les travaux devaient consister à construire 36 seuils transversaux avec passes à poissons pour empêcher le lit de s'abaisser, à protéger les berges les plus exposées par des gabions et à créer deux pièges à sédiments en amont de la ville, d'une capacité totale de 23.000 m³. Le coût total des travaux était évalué à 14,2 millions de francs.

En décembre 1993, le Conseil Supérieur de la Pêche mettait en doute l'intérêt des pièges à sédiments et souhaitait que soit précisée la dynamique d'ensemble du

Tacon et du Flumen avant toute réalisation de travaux. Par ailleurs, dans le cadre de la mise en place du Contrat de Rivière portant sur la Bienne et ses affluents localisés dans le Parc Naturel Régional du Haut-Jura, il était expressément demandé que les interventions jugées prioritaires privilégient les techniques douces plus respectueuses de l'environnement. Une étude morphodynamique complémentaire était commandée de manière à affiner la connaissance du fonctionnement global des affluents de la Bienne (Bravard & Peiry, 1994) : la demande était que cette nouvelle étude fournisse des éclaircissements sur la dynamique de la recharge sédimentaire à la fois dans l'espace et le temps, que soit réexaminée la question de la stabilisation des berges par des travaux de génie civil lourds, ainsi que celle du blocage de la charge transportée par des pièges à sédiments.

La philosophie générale de l'étude fut non seulement de fournir un diagnostic géomorphologique de fonctionnement des "égrevines" du Tacon et du Flumen, mais en plus de dégager des modalités d'intervention et de gestion des sites instables. Autant que faire se peut, ces interventions devaient être en accord avec les impératifs de protection et de préservation du milieu, c'est-à-dire d'ampleur limitée, exploitant au mieux les caractéristiques fonctionnelles de chacune des zones instables et utilisant les matériaux en place ou à proximité, lorsque des interventions de protection des berges et du chenal étaient nécessaires (reconstitution du pavage du chenal, protection des berges attaquées par des lignes de blocs, phytostabilisation des pieds de versant par des travaux de génie biologique).

3.3.2) Méthodologie de l'étude

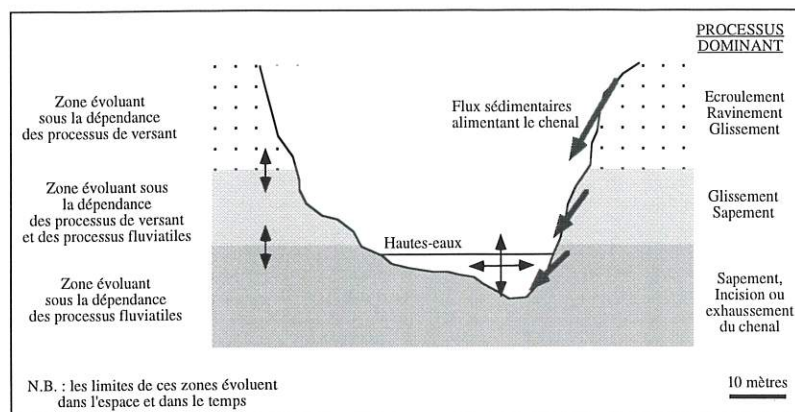
La méthodologie mise en place à l'occasion de cette étude est synthétisée sur la figure 1.30/B. Une prise de connaissance de terrain a d'abord permis d'élaborer des *fiches de site* (voir tab. 1.6). Les zones d'érosion (égrevines) ont été ensuite systématiquement inventoriées, à l'occasion d'un relevé intégral du terrain. Les observations étant réalisées par deux opérateurs travaillant en parallèle, les fiches de terrain ont permis l'acquisition d'une information homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, ainsi que d'éviter tout oubli.

A) Choix des variables décrivant le fonctionnement

L'encaissement du cours d'eau dans son étroite vallée imposait la mise en œuvre d'investigations portant à la fois sur les processus de versant et les processus fluviaux, la dynamique des versants et du chenal étant en étroite interaction (fig. 1.19) :

1) Les versants agissent sur les processus fluviaux par l'intermédiaire des flux de matériaux qu'ils fournissent au chenal. Sur ce type de rivière, les contraintes imposées

Figure 1.19 - Relations entre les processus de versant et les processus fluviaux sur le Tacon et le Flumen.



par la structure géologique sont fortes et son fonctionnement est très différent de celui des cours d'eau à chenal autoformé s'écoulant dans de larges plaines alluviales. Cependant, la morphologie du chenal (largeur, profondeur, type, taille et fréquence des bancs, granulométrie et imbrications sédimentaires...) reste très fortement dépendante de la nature et du volume des sédiments fournis par les versants. En période d'abondance sédimentaire, la rivière est susceptible d'exhausser son lit et de remblayer la vallée dans laquelle elle s'écoule ; au contraire, en période de pénurie sédimentaire, elle dissipe son énergie excédentaire en évacuant le stock de charge disponible dans le chenal.

2) Dans une certaine mesure, la dynamique fluviale influence également l'activité des versants. L'évolution altitudinale du chenal et les déplacements latéraux du lit déséquilibrent les flancs de la vallée et réactivent certains processus de versants. Les glissements de terrain, par exemple, sont fortement sensibles à l'évolution des talwegs, une simple suppression de la butée de pied en relation avec une modification altitudinale du lit fluvial ou son déplacement latéral pouvant provoquer leur réactivation. Lorsque les déplacements latéraux du chenal sont forts et que les pentes des versants sont très redressées, la déstabilisation peut alors intéresser de vastes surfaces et remonter très haut sur le versant, en particulier si les formations géologiques sont de médiocre résistance.

1) Les critères d'évaluation du fonctionnement des égrevines (processus de versant)

Dans le cas du Tacon et du Flumen, les premières observations de terrain montrèrent que la présence de marnes, de marno-calcaires et d'épais placages morainiques rendaient les berges du cours d'eau et les flancs de la vallée très fragiles. Quatre principaux types de processus géomorphologiques participant à l'activité des égrevines furent observés agissant soit isolément, soit de manière combinée. Tous n'assurent pas la recharge sédimentaire du cours d'eau avec la même efficacité ; ils ont été classés ci-dessous par ordre décroissant d'efficacité :

a) La recharge par *sapement de berge* est généralement

concentrée dans la concavité des sinuosités directement exposées à l'action des eaux courantes. Les sapements sont verticaux ou subverticaux dans les argiles compactes, leur hauteur varie de quelques décimètres à plus de 10 mètres, lorsqu'ils éventrent la base du versant.

b) Les *glissements de terrains* affectent les égrevines de très grande dimension, lorsque les placages morainiques aux médiocres propriétés géotechniques sont épais. Généralement en planches, plus rarement rotationnels, les glissements ont une dynamique fortement liée aux modalités de fonctionnement des lignes de sources qui drainent le versant. L'évolution du talweg les affecte également, par l'intermédiaire des déplacements latéraux du lit et d'éventuels processus d'incision qui fragilisent, voire suppriment la butée de pied.

c) Le *ravinement* affecte les surfaces dénudées des égrevines ; son activité est faible lorsque le versant instable est en voie de colonisation végétale. Existente également des ravines affluentes de plus grande dimension qui alimentent le chenal en matériaux généralement grossiers. Leur dynamique est indépendante de celle du cours d'eau.

d) Les *écroulements* affectent presque exclusivement les corniches très délitées du substratum (blocs calcaires, marnes se délitant en plaquettes). Ils constituent un processus relativement marginal de l'alimentation en sédiments des deux cours d'eau.

Outre l'identification des processus géomorphologiques de versant actifs, la caractérisation des égrevines consista à évaluer leur hauteur et leur surface approximative (tab. 1.5). Une importance toute particulière fut accordée à la nature des matériaux libérés. En effet, les observations de terrain montraient que le fond du lit était stable lorsque les érosions latérales se produisaient au détriment de formations riches en blocs ; la recharge du chenal en matériaux de forte taille contribuait à limiter les processus d'incision par pavage du fond et ce, alors même que le versant reculait. A l'inverse, l'absence d'une libération de blocs par l'égrevine était l'indice

d'un risque d'incision accélérée du chenal et de la déstabilisation rapide et durable du versant. Une estimation du degré d'activité de l'égrevine fut également conduite, principalement sur la base de la fraîcheur des formes et du matériel en place (patine des blocs par ex.) et de l'existence et l'extension spatiale d'une couverture végétale pionnière cicatrisant les formes érodées.

2) Les critères d'évaluation de la dynamique du chenal au contact des égrevines

Une analyse de l'influence des processus fluviaux sur l'évolution des égrevines a également été entreprise sur le Tacon et le Flumen (voir tab. 1.5 et 1.6). Plusieurs variables traduisant l'état du lit et sa tendance évolutive furent étudiées :

a) La nature du matériel composant le fond du chenal fut identifiée, celle-ci constituant un indicateur de la stabilité des fonds. La présence de blocs imbriqués témoigne d'un chenal susceptible de résister efficacement aux processus d'incision, alors que l'affleurement d'argiles morainiques indique qu'un processus d'incision était en cours ; la présence d'argile permet également de pronostiquer la poursuite de l'abaissement des fonds et de la déstabilisation de l'égrevine concernée.

b) La tendance générale de la dynamique du chenal (érosion latérale, incision) fut établie sur la base de critères morphologiques et morphométriques (présence de basses terrasses ou de hauts bancs, dissymétrie anormalement marquée du chenal...). Elle s'appuyait également sur des observations complémentaires, comme la présence de boisements plus ou moins denses dans le lit d'inondation et les chenaux de crue, ou le développement d'une patine, voire de lichens sur les galets et blocs

qui traduit une raréfaction des épisodes d'inondation active et de mise en mouvement de la charge de fond.

B) Description des fiches de site et établissement de la base de données

Toutes les égrevines, quels que soient leur taille ou leur degré d'activité, furent identifiées et étudiées. Les fiches de site classaient chacune d'entre elles en fonction du degré de priorité que requéraient les interventions de gestion (tab. 1.6). En effet, l'encaissement du Tacon et du Flumen limite très fortement les accès au chenal et une opération d'aménagement soucieuse de ménager un espace naturel protégé (PNR) ne pouvait envisager la multiplication de nouveaux accès, forcément traumatisants pour le milieu.

Suivait une description de la berge érodée, puis du lit du cours d'eau, détaillant les variables dont on a justifié le choix ci-dessus. Un commentaire décrivait de manière un peu plus détaillée les observations faites sur le terrain. Lorsqu'une intervention de stabilisation était jugée possible sans trop de difficultés d'accès, un descriptif des interventions nécessaires était proposé en fin de fiche. Il était complété par un croquis géomorphologique présentant la physionomie générale du site et identifiant et localisant les travaux à entreprendre (voir fig. 3.44). Comme on l'a évoqué plus haut, la philosophie des propositions d'intervention était d'une part, de limiter au maximum leur ampleur, les opérations d'entretien entreprises dans le cadre d'une gestion courante étant privilégiées au détriment d'interventions de génie civil lourdes et coûteuses ; d'autre part, d'utiliser au maximum les potentialités des sites pour diminuer les contraintes exercées sur le chenal et le pied du versant, par la concentration de l'énergie cinétique.

Tableau 1.5 - Liste des caractères et modalités répertoriés sur chaque fiche de site.

NB : Q (quantitatif) ; qN (qualitatif nominal) ; qO (qualitatif ordinal) ; QRM (question à réponses multiples)

	<i>Nature de la variable</i>	<i>Modalités</i>	<i>Type</i>
Information à destination des gestionnaires	Intervention possible	oui-non	qN
	Degré de priorité Accès	A-B-C (si accessibilité) Existant-Facile-Difficile	qO qO
Egrevine	Nature des processus actifs	Sapement, Glissement, Ravinement, Eroulement	QRM
	Localisation	Rive droite - Rive gauche	qN
	Hauteur moyenne	valeur (m)	Q
	Hauteur maxi	valeur (m)	Q
	Surface approximative	valeur (m ²)	Q
Chenal	Degré d'activité	Fort-Moyen-Faible	qO
	Type de sédiments délivrés	Grossier-Fin-Tous types	qN
Chenal	Largeur	valeur (m)	Q
	Nature du fond	Blocs-Galets-Argiles	qO
	Erosion latérale	Oui-Non	qN
	Incision	Oui-Non	qN
	Boisement du lit	(valeur approximative si réponse positive) Oui-Non (bref commentaire si Oui)	qN

Tableau 1.6 - Exemple d'une fiche de terrain dressée sur le Tacon.
(Source : Bravard & Peiry, 1994)

FICHE DE SITE N°38			
COURS D'EAU : TACON			
COMMUNE : Villard-St-Sauveur			
Lieu-dit : Pré-Martinet			
Intervention : oui		Degré de priorité : A	
Accès : chemin carrossable *			
accès aménageable			
accès exigeant des travaux coûteux			
DESCRIPTION DE LA BERGE ÉRODÉE :			
Type de l'égrévine : sapement de berge *			
glissement de terrain *			
écroulement			
ravine affluente			
Rive : droite			
Hauteur moyenne (m) : 40		hauteur maximale (m) : 60	
Surface approximative (m²) : 3000			
Degré d'activité :			
faible	moyenne	forte *	
Types de matériaux libérés : prédominance de la fraction fine à la base de l'égrévine (argile). Toutes les granulométries sont libérées par la partie supérieure de l'égrévine, avec cependant une trop faible abondance en matériaux grossiers pour assurer la stabilisation des fonds.			
DESCRIPTION DU LIT DU COURS D'EAU			
Largeur (m) : 5-6			
Nature du matériel du fond : Affleurement d'argile dans la partie inférieure de l'égrévine correspondant à la zone la plus active.			
Dynamique apparente :			
érosion latérale : lent déplacement latéral			
incision : dans la partie aval de l'égrévine où le pavage du chenal par les blocs est insuffisant. Cette incision ne dépasse pas 1,50 m.			
boisement du lit : Le lit d'inondation venait d'être déboisé lors de notre passage.			
COMMENTAIRE			
Cette égrévine est typique du fonctionnement d'un grand nombre de celles existant dans les lits du Tacon et du Flumen. Sa forte activité actuelle tient plus à un mauvais entretien du chenal qu'à une hypothétique phase d'accroissement de l'activité du glissement. En effet, l'absence d'un nettoyage régulier du chenal a engendré la végétalisation progressive du lit majeur ; les embâcles et accumulations de blocs et galets ont notamment obstrué un chenal de crue établi en rive gauche. Celui-ci avait pour fonction de diminuer la vitesse des écoulements circulant dans le lit principal, au pied de l'égrévine. L'abandon de ce chenal lors des crues courantes a favorisé la concentration des eaux dans la concavité et l'attaque du pied du glissement. La faible fréquence des blocs dans les matériaux morainiques entaillés par le Tacon lors de sa migration latérale n'a pas permis la reconstitution d'un pavage et la protection du chenal. Il s'en est suivi une incision des formations argileuses constituant la base de l'égrévine, incision qui est assez sensible dans la partie inférieure de l'égrévine, où elle apparaît sous la forme de deux seuils entaillés dans l'argile (voir croquis).			
INTERVENTION PROPOSÉE			
Lors de notre passage sur le terrain à la fin du mois d'août 1994, des travaux d'essartement avaient eu lieu sur ce site : la végétation couvrant l'île avait été essartée et l'embâcle végétal obstruant l'entrée du chenal de crue dégagé. Cette première intervention visant à faciliter les écoulements de crue et réduire les vitesses au pied de l'égrévine nous a paru très positive. Elle pourrait être améliorée en entreprenant les actions suivantes :			
1) en augmentant la fréquence de la mise en eau du chenal de rive gauche par l'enlèvement du bourrelet de blocs qui obstruit son extrémité amont. Les blocs prélevés en ce point devront être placés en protection de berge, dans la zone où affleurent les argiles ;			
2) en prélevant les blocs situés dans la convexité du chenal d'étiage (bordure de l'île) et en les utilisant pour reconstituer le pavage et protéger la berge concave ;			
3) en maintenant l'île déboisée par un essartement régulier et veillant au maintien d'une circulation d'eau dans le chenal de crue ;			
4) des travaux de génie biologique peuvent éventuellement être engagés afin de limiter les apports de matériaux issus du ruissellement superficiel ; l'installation de la végétation en plusieurs secteurs de l'égrévine témoigne d'une tendance à la stabilisation (cf croquis).			

Outre l'avantage de recueillir une information homogène sur l'ensemble de la zone étudiée, la mise en place de fiches de site permettait de construire une base de données comportant à la fois des caractères quantitatifs et qualitatifs (voir tab. 1.5), chacune des 52 égrevides répertoriées constituant un individu de la base. Celle-ci étant en grande partie codable, il devenait ultérieurement possible d'en faire une exploitation statistique et cartographique.

3.3.4) L'exploitation cartographique de la base de données

Les échéances très courtes de l'étude n'ont pas permis de pousser très loin l'exploitation statistique. Par contre, les 4 principales variables portant sur les modalités de fonctionnement des égrevides furent synthétisées sur deux cartes, replaçant ainsi les observations dans leur contexte spatial. Les choix sémiologiques furent de représenter exclusivement des variables traitant des processus de versant. Quatre variables furent cartographiées par combinaison deux à deux (fig. 1.20).

La combinaison cartographique des deux variables qualitatives que sont les *processus géomorphologiques actifs* et la *nature des apports sédimentaires* montre très clairement l'existence d'une organisation spatiale (fig. 1.21). Sur le Tacon par exemple, les glissements fournissant un charge grossière ou mixte prédominant en amont de la Tailla (égrevine 1 à 17) ; en aval (égrevine 26 à 40), ce sont en revanche les sapements apportant des argiles au lit fluvial qui sont les plus fréquents. Sans entrer dans le détail, cette organisation spatiale est à mettre en relation avec les variations locales de faciès de la moraine ; elle est également liée à l'ouverture de la vallée vers l'aval, qui entraîne la raréfaction progressive des glissements et leur remplacement par des processus de sapement de berge.

La seconde carte (fig. 1.22) croise la *surface active* et le *degré d'activité* des égrevides et permet de localiser quelles sont les zones qui contribuent le plus à alimenter le chenal en sédiments. Même s'il ne remplace pas une étude quantitative, un tel document fournit un certain

nombre d'arguments sur les risques que la recharge sédimentaire fait courir aux activités humaines situées à l'aval. Plus la distance les séparant est forte, moins le risque est élevé. En effet, les processus de fragmentation et d'attrition de la charge de fond, extrêmement rapide sur les cours d'eau de montagne, engendrent une diminution vers l'aval de la granulométrie de la charge (les éléments les plus grossiers — blocs et galets — transportés par charriage sont très sensibles aux variations locales de compétence et sont facilement stoppés en masse). D'autre-part, l'étalement de la charge de fond peut d'autant mieux se produire que le nombre de zones susceptibles de piéger une partie de la charge en transit est plus élevé.

Une analyse succincte de cette deuxième carte montre qu'il est possible de dissocier très facilement les égrevides localisées en amont du pont des Bouchoux (égrevides 1 à 8) de celles situées entre ce pont et le hameau de la Palud (égrevides 9 à 22) : les premières, malgré parfois leur forte surface, ont un degré d'activité généralement faible, en raison du contexte géologique et parce qu'elles sont pour la plupart en voie de végétalisation ; les secondes, très actives et étendues, fournissent une charge abondante au chenal. En raison de leur proximité par rapport à la ville de Saint-Claude, c'est malgré tout l'activité des égrevides du Tacon inférieur (égrevides 32 à 40) et du Flumen (égrevides 1 à 12) qui fait courir les risques les plus grands à l'aval, en particulier lorsqu'elles alimentent le chenal en matériaux grossiers ; la fragmentation durant un transport sur une courte distance demeure limitée et les zones susceptibles de piéger les transports solides sont peu nombreuses.

3.4) Analyse de la fermeture des bras morts du Rhône dans l'île de Miribel-Jonage (amont de Lyon)

Les exemples de techniques d'expertise présentés précédemment sont tous les deux basés sur une même approche méthodologique : des relevés de terrain qui sont synthétisés sur des fiches types. L'étude de cas qui suit utilise à nouveau des fiches de terrain, mais va plus loin dans leur exploitation puisqu'elles perdent leur caractère partiellement descriptif pour devenir les individus d'une base de données multivariées, après dépouillement et codage des informations collectées sur le terrain. La constitution d'une telle base de données présente un double avantage : a) il devient très facile de représenter individuellement chacune des variables, les logiciels de cartographie assistée par ordinateur permettant la réalisation rapide de cartes analytiques ; b) un traitement statistique multivarié peut être entrepris, afin de dresser une typologie des milieux étudiés en croisant plusieurs catégories de variables.

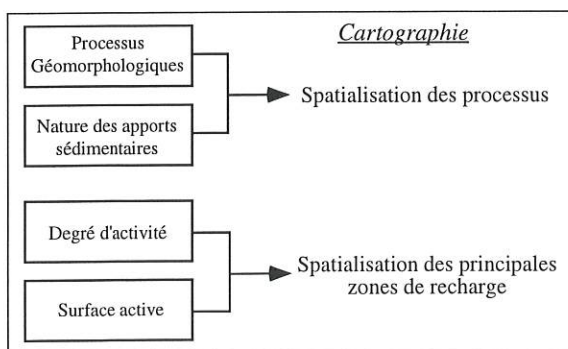


Figure 1.20 - Croisement cartographique des variables décrivant la dynamique des versants.

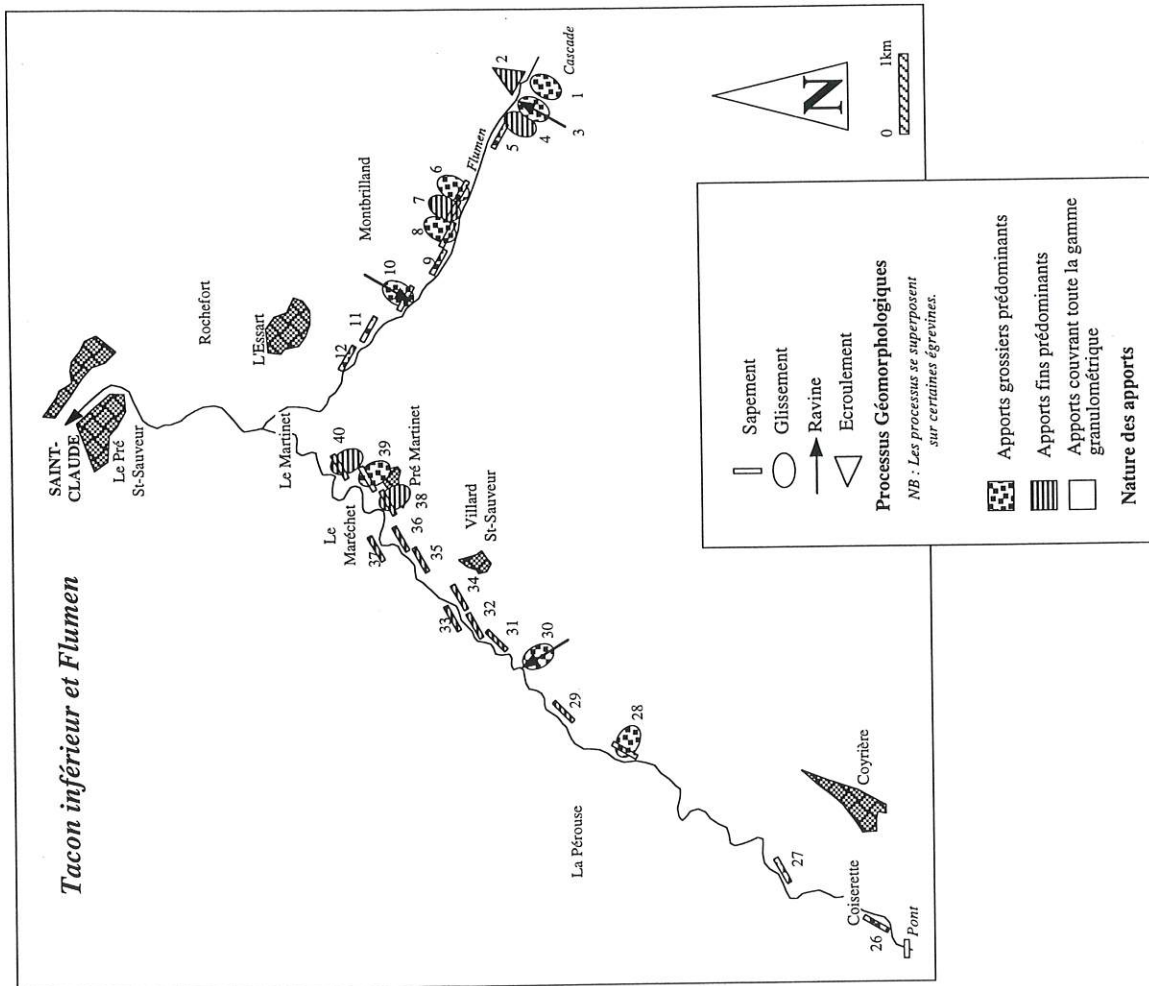
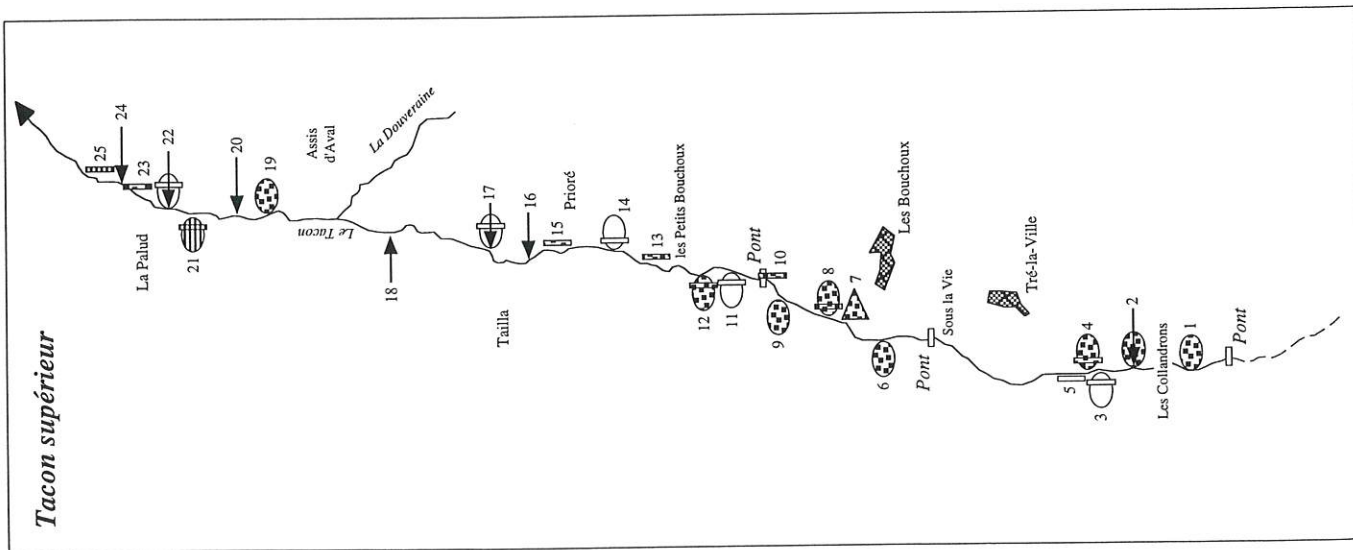


Figure 1.21 - Processus géomorphologiques et nature des apports sur les égrèvinnes du Tacon et du Flumen



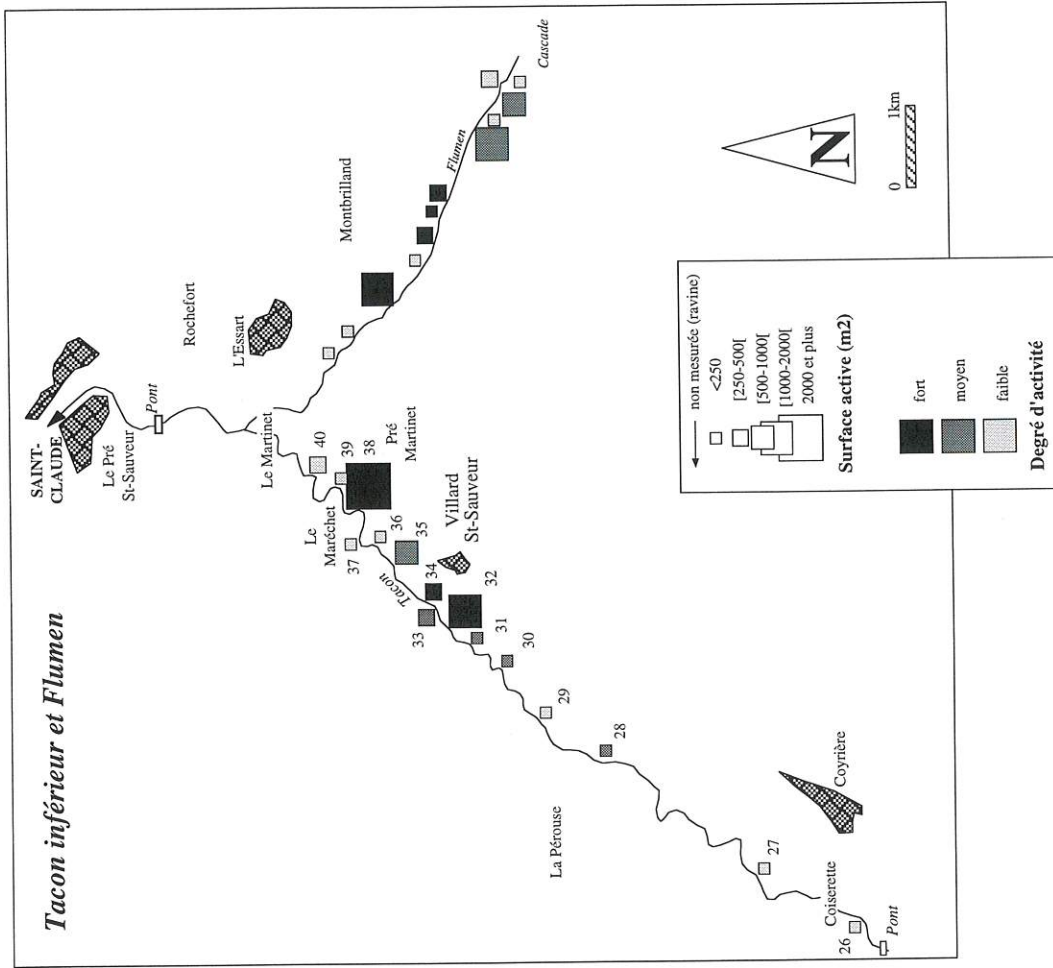
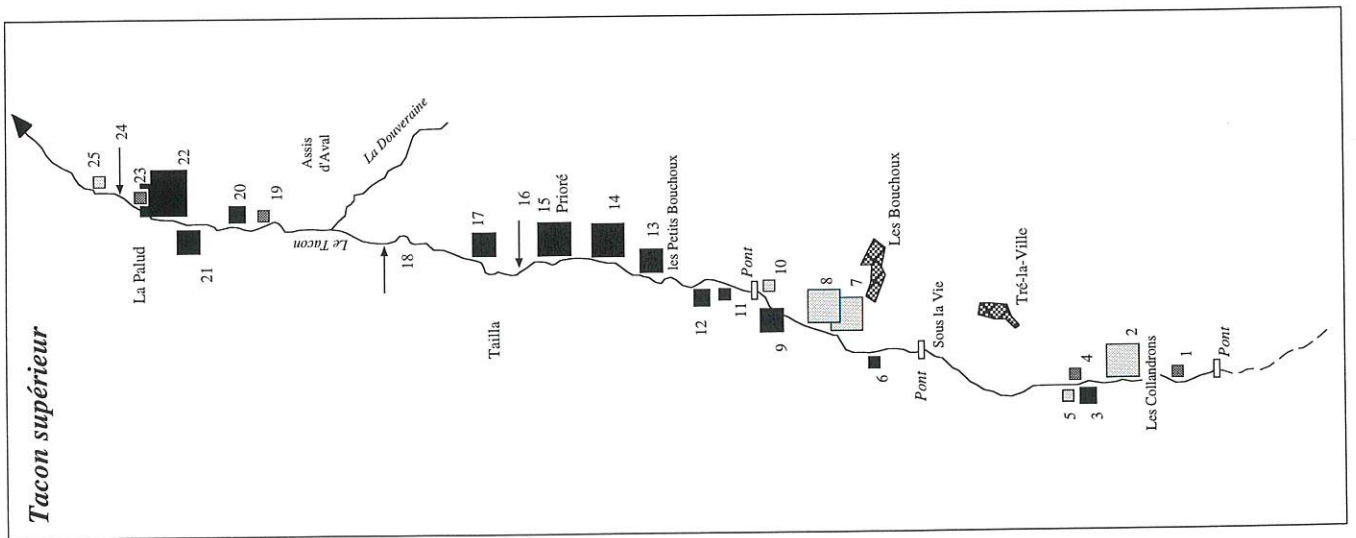


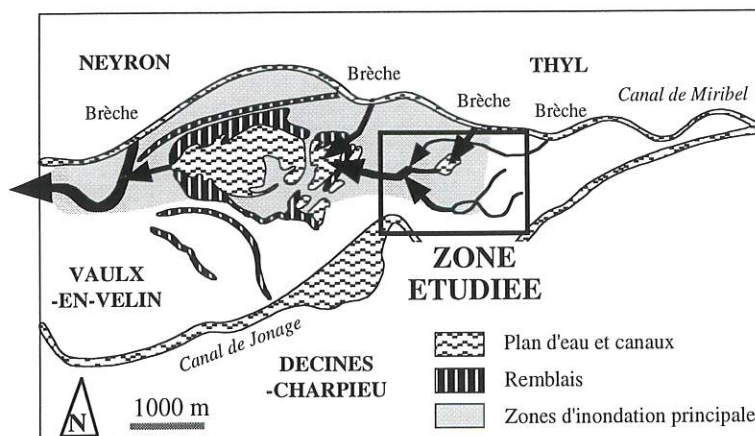
Figure 1.22 - Degré d'activité et estimation des surfaces actives sur les égrevines du Tacon et du Flumen

L'étude de la fermeture des bras morts du Rhône a été réalisée par Juliette Bakès, étudiante de Maîtrise Sciences et Techniques dont nous avons dirigé le travail (Bakès, 1995). Etant à l'origine de la méthode d'échantillonnage et de traitement des données, nous nous sommes permis d'en présenter le déroulement et les principaux résultats, les données ayant été recueillies sur le terrain par l'étudiante dans le cadre d'un stage effectué à la SEGAPAL, organisme responsable de la gestion de l'île de Miribel-Jonage.

3.4.1) Problématique de l'étude

L'étude a porté sur les anciens bras du Rhône localisés dans la partie amont de l'île de Miribel-Jonage (fig. 1.23). Sur cet espace, les changements affectant la dynamique fluviale ont fait l'objet d'une attention toute particulière au cours des dernières années : Bravard (1987), se fondant sur des documents d'archives, a analysé en détail la géomorphologie du chenal tressé au milieu du XIX^e siècle ; il a montré que dans les environs de Miribel, le lit principal du fleuve nommé "*Grand-Rhône*" était accompagné "*par un ensemble changeant de bras vifs secondaires, de plages, de graviers et de brotteaux*" (p. 94). La construction du canal de Miribel entre 1848 et 1857 destiné à concentrer les eaux du Rhône et à faciliter la navigation, puis celle du canal de Jonage de 1892 à 1899 pour la production hydroélectrique déconnectèrent brutalement les bras secondaires du lit chenalisé. L'impact des travaux de chenalisation accrut encore l'isolement des anciens bras, puisque dès 1872, les ingénieurs du Service de la Navigation observaient une tendance au basculement du canal de Miribel, le surcreusement de la partie amont achevant de déconnecter les anciens bras (Poinsart, 1992). Au cours du XX^e siècle, l'évolution complexe de "*l'île de Miribel-Jonage*" sous l'effet des multiples activités humaines (modifications du système d'endiguement, extractions alluvionnaires, remblaiements et mises hors d'eau de vastes surfaces de la plaine d'inondation...) n'a pas permis de réduire l'isolement des anciens bras ; ceux-ci, de moins en moins fréquemment inondés, ont été progressivement envahis par la végétation.

Figure 1.23 - Localisation des bras morts étudiés dans la zone de Miribel-Jonage



Dans le cadre de l'aménagement de la base de loisirs entrepris par la SEGAPAL, la réhabilitation des anciens chenaux est projetée. L'objectif poursuivi est leur remise en eau partielle ou totale de manière à recréer des zones humides (et ainsi de diversifier les biotopes) et à assurer une alimentation en eau permanente du plan d'eau de Miribel-Jonage qui connaît de graves problèmes d'eutrophisation. Le préalable à cet aménagement était de dresser un état des bras morts et d'analyser leurs modalités de fonctionnement.

3.4.2) Méthodologie de l'étude

L'étude de la fermeture des anciens bras a donné lieu à une campagne de terrain à l'occasion de laquelle 88 relevés ont été réalisés (localisation sur la fig. 1.27). Le diagnostic est basé sur des relevés effectués de manière systématique le long de transects établis perpendiculairement au chenal et équidistants de 100 mètres. Trois groupes de variables quantitatives ou qualitatives ont fait l'objet d'une analyse (fig. 1.24) :

1- La *morphométrie du chenal* a été étudiée par des mesures de sa largeur à plein bord, de sa largeur au fond et des hauteurs de ses deux rives. Ces mesures devaient permettre ultérieurement, par combinaison, de reconstituer les sections d'écoulement et d'avoir une idée de la capacité d'écoulement de chacune des sections.

2- La *végétation* a fait l'objet d'une analyse qualitative (espèces dominantes) et semi-quantitative (densité). Les différentes strates présentes ont été étudiées de manière indépendante afin de conserver toute la richesse de l'information, la distinction entre les peuplements occupant le fond du chenal et ses berges étant maintenue.

3- Les *formations superficielles* colmatant les anciens bras ont également été étudiées. Deux types d'informations ont été collectés : l'*épaisseur des dépôts* a été mesurée à l'aide d'une tarière de pédologie ; la *nature des sédiments* présents en surface a été déterminée par comparaison avec une série de tubes d'étalonnage transparents contenant des échantillons couvrant la gamme granulométrique s'étendant des limons aux graviers. La

Transect n°5

MORPHOMÉTRIE

LARGEUR		HAUTEUR		Remarques (état des berges, circulation d'eau présence d'embâcle...)
Plein bord	Fond	Rive G.	Rive D.	
25 m	20 m	3 m	3 m	Circulation d'eau (léger courant)

VÉGÉTATION

(Espèce dominante et densité)

		FOND	TALUS
ARBRES	Adultes > 5m	3 peupliers 4 saules	
	Pionniers		
ARBUSTES		Cornouillers (C) Ronces (C)	
HERBACÉES			Carex (TC)

Classes de densité : très clair (TC) -> 0-25% de recouvrement
clair (C) -> 26-50% de recouvrement
Dense (D) -> 51 à 75% de recouvrement
Très dense (TD) -> 76 à 100% de recouvrement

FORMATIONS SUPERFICIELLES

Epaisseur sédiment (cm)	Classes de texture			
	Graviers	Sables grossiers	Sables fins	Limons
0	X			

CROQUIS DU TRANSECT

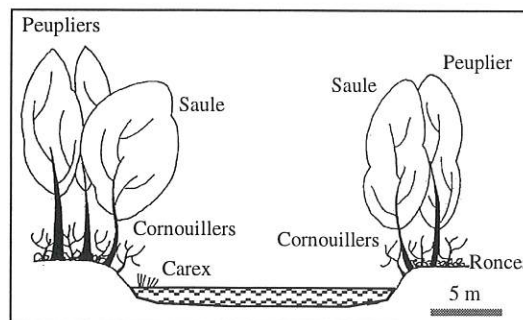


Figure 1.24 - Exemple de fiche de terrain dressée à l'occasion de l'étude des bras morts de Miribel-Jonage
(Source : Bakès, 1995, modifié).

connaissance des formations superficielles est une donnée fondamentale permettant le diagnostic fonctionnel, car elle témoigne de la rapidité des flux transitant dans l'ancien bras et de la dynamique des transports solides. Elle permet également, dans une certaine mesure, de déterminer quel est le degré de connexion du chenal avec les processus fluviaux contemporains (mise en eau par les crues, éloignement des sources sédimentaires). Elle est aussi une donnée essentielle pour déterminer le degré de colmatage des anciens bras et évaluer leur devenir.

3.4.3) Analyse géostatistique des données et typologie fonctionnelle thématique

A) Cartographie des variables

Une fois l'information collectée, différents types de traitement cartographique des données ont été réalisés.

Le premier type de représentation des données, sans contester le plus simple et le plus rapide, est la cartographie des données quantitatives ou qualitatives ordinales brutes. Les logiciels actuels de cartographie assistée par ordinateur facilitent ce travail de dépouillement des données et permettent aisément de constituer un catalogue de cartes analytiques. Trois thèmes ont été cartographiés, la morphométrie du chenal, les formations superficielles et la végétation, la liste des cartes présentées dans ce mémoire n'étant pas exhaustive (fig. 1.26/A, B et C).

La cartographie de tous les caractères selon cette technique ne présentant pas forcément un intérêt, ou étant parfois difficile à interpréter, l'option de retravailler préalablement l'information avant de la spatialiser a été choisie. Deux types de techniques ont été utilisés :

1- Le calcul d'indices résultant de la combinaison de variables permet de conserver aux données transformées leur caractère quantitatif et de garder un maximum de latitude pour le traitement statistiques. Les combinaisons sont généralement bivariées et thématiques (morphométrie, sédimentologie, végétation). Par exemple, les variables morphométriques ont été combinées entre elles pour établir d'autres indices morphométriques tels la section d'écoulement ou le *ratio* largeur/profondeur qui sont des variables clés de l'hydraulique fluviale (fig. 1.25 et 1.26).

2- L'établissement d'une *typologie fonctionnelle* résulte du croisement des caractères d'état du chenal. Elle procède ici d'un classement visuel des variables ou combinaisons de variables recueillies sur le terrain. La plus grande partie des données étant quantitatives ou qualitatives ordinales, la typologie aurait pu être dressée par l'intermédiaire d'un traitement statistique adéquat. Les documents réalisés sont par thèmes (voir fig. 1.26) :

a) l'étude des variables morphométriques élémentaires

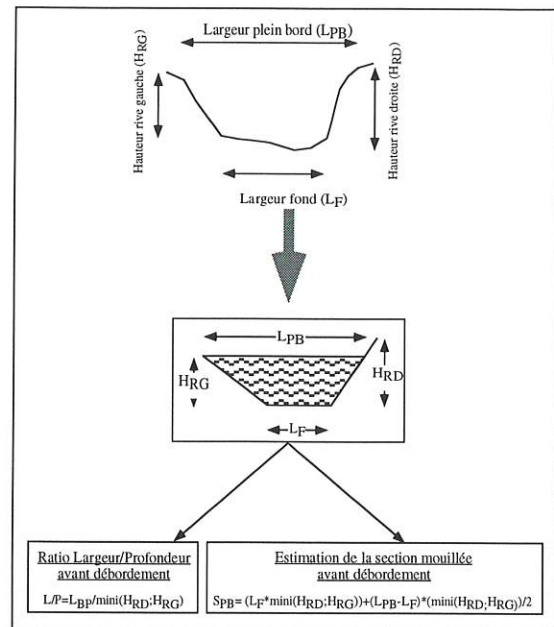


Figure 1.25 - Calcul de nouvelles variables morphométriques par recombinaison des variables initiales.

taires ou combinées a permis de réaliser une typologie morphométrique des bras morts et d'analyser leur distribution spatiale ;

b) l'interprétation conjointe de la nature et de la variation spatiale de l'épaisseur des formations superficielles a permis d'établir une typologie des bras morts fondée sur l'existence ou non de gradients affectant l'épaisseur et la granulométrie des dépôts ;

c) l'exploitation des données portant sur la végétation a permis l'identification et la spatialisation des principales caractéristiques de la dynamique végétale (zones d'obstruction du chenal par la végétation, berges artificiellement essartées, embâcles végétaux).

La mise en place de ces typologies est un élément essentiel du traitement des données brutes, car il débouche sur la compréhension des modalités de fonctionnement du milieu étudié. Comme on va le voir ci-dessous, ces typologies ne constituent cependant pas forcément l'aboutissement de la démarche de traitement des données, mais peuvent être complétées par un traitement statistique plus approfondi.

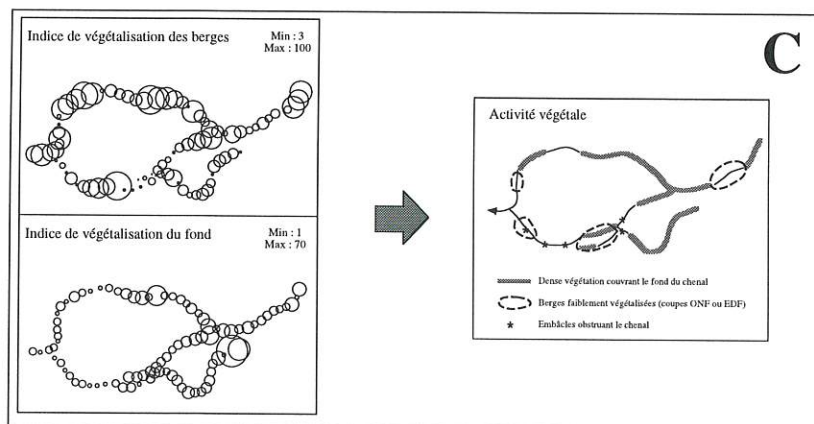
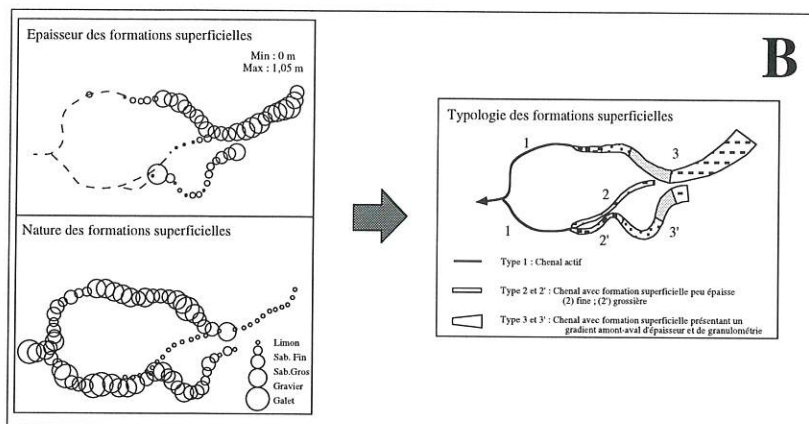
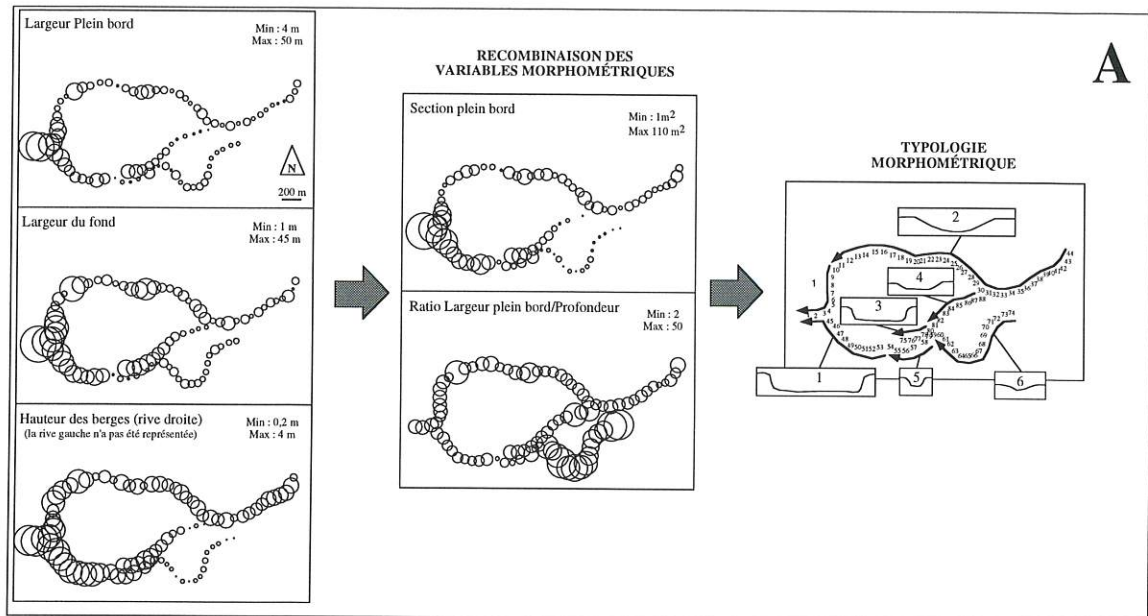


Figure 1.26 - Types de cartes thématiques pouvant être dressées à partir de la base de données quantitative ; A : morphométrie ; B : formations superficielles ; C : végétation (d'après les données de Bakès, 1995).

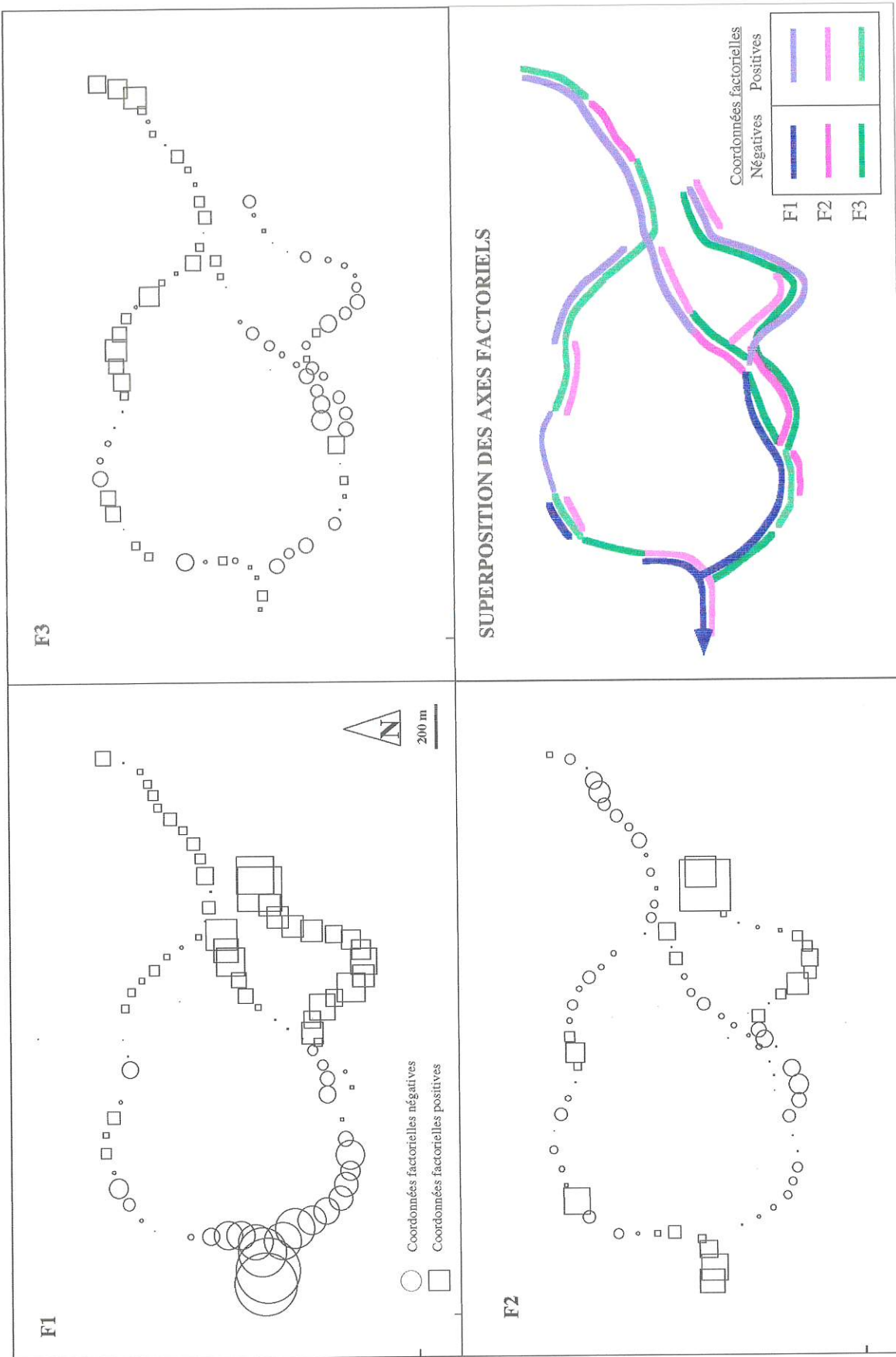
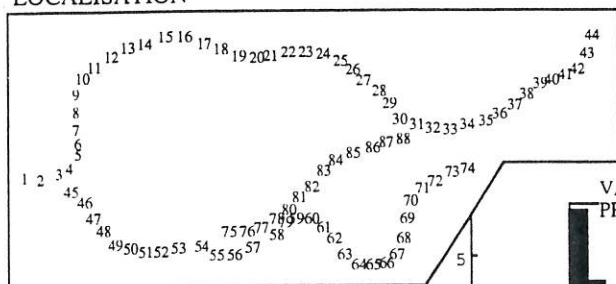
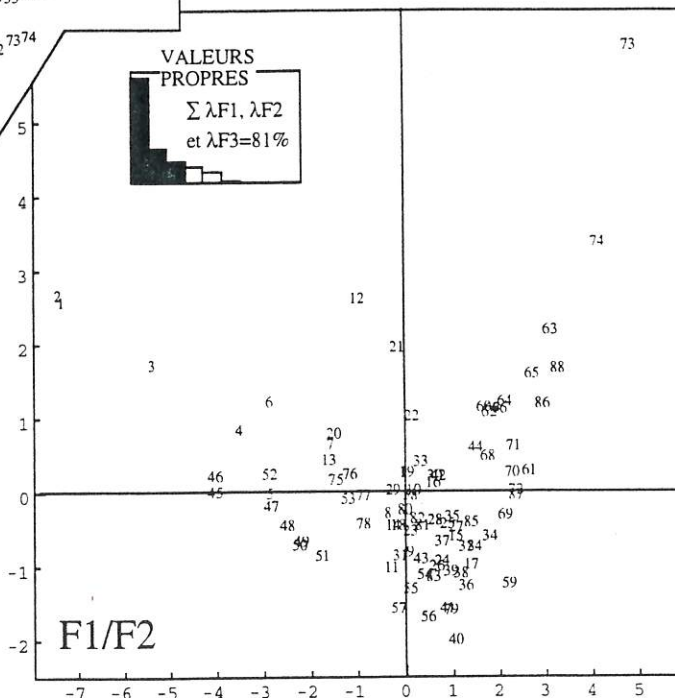
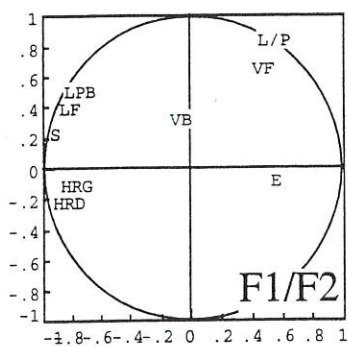


Figure 1.27 - Cartes factorielles F1 à F3 et découpages en tronçons homogènes par superposition des axes factorielles F1 à F3

LOCALISATION



VALEURS PROPRES
 $\Sigma \lambda F1, \lambda F2$
 et $\lambda F3=81\%$



VARIABLES :

- LPB : largeur plein bord (m)
- LF : Largeur du fond (m)
- HRD : Hauteur rive droite (m)
- HRG : hauteur rive gauche (m)
- S : Section d'écoulement (approximative (m))
- L/H : Ratio largeur/hauteur
- E : Epaisseur formations superficielles (m)
- VB : Indice de végétalisation des berges
- VF : Indice de végétalisation du fond

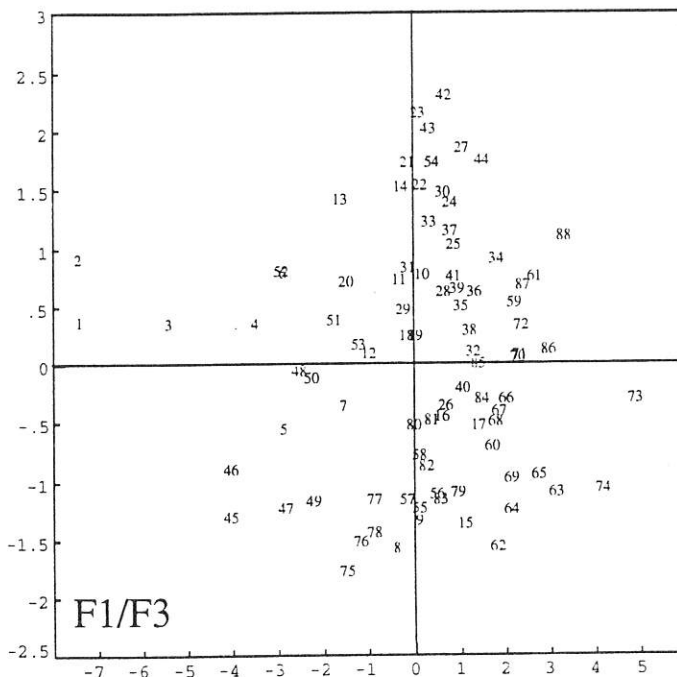
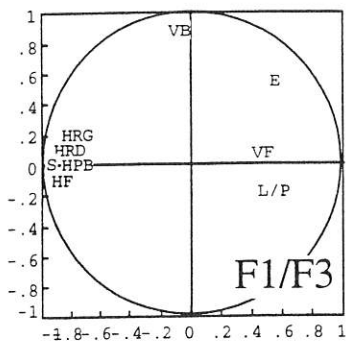


Figure 1.28 - Plans factoriels et cercles des corrélations montrant la position des variables et des individus

B) Traitement statistique multivarié et typologie des bras morts

Les données collectées sur le terrain ont fait l'objet d'un traitement statistique multivarié. L'intérêt de ce croisement multi-critères est de faciliter la réalisation d'une typologie qui synthétise l'essentiel des informations de terrain. Neuf variables portant sur les trois thèmes sur lesquels ont porté les efforts de recueil de données ont été retenues pour le traitement statistique multivarié (tab. 1.7) : une analyse en composantes principales (ACP) centrée réduite.

Plus de 80 % de l'information ont été synthétisés sur les 3 premiers axes factoriels ; le premier axe, à lui seul cumule 52 % de la variance totale (voir valeurs propres, fig. 1.27). La signification des 3 axes factoriels sur les cercles des corrélations montre que l'axe F1 concentre pour l'essentiel l'information morphométrique (largeurs du chenal, hauteur des berges et section d'écoulement). L'axe F2 apporte des informations sur le *ratio* largeur/profondeur et la densité de la végétalisation du fond du chenal. L'axe F3 fournit des éléments complémentaires d'interprétation vis-à-vis de la végétalisation des berges et de l'épaisseur des formations superficielles.

La cartographie des coordonnées factorielles des individus pour chacun des 3 axes retenus constitue une aide particulièrement efficace pour l'interprétation des résultats de l'ACP (Thioulouse, 1989 ; Thioulouse, 1990) (fig. 1.28). En mettant graphiquement en valeur les oppositions entre les coordonnées factorielles positives et négatives, elle aide à opérer des regroupements d'individus (ici les transects relevés sur le terrain) ayant des caractéristiques physiologiques et fonctionnelles voisines. Le cumul des informations représentées sur chacun des axes factoriels permet ainsi progressivement de parvenir à une typologie spatiale des bras morts fondée sur la combinaison des 9 variables prises en compte dans le traitement statistique (voir tab. 1.7). Six principales catégories de transects sont issues de l'interprétation du traitement statistique. Certaines d'entre-elles regroupent des sous-types qui traduisent des changements graduels de la mor-

phométrie, des sédiments ou de la végétalisation (fig. 1.29) :

1- Le *vieux Rhône* regroupe trois types principaux de profils (1, 2 et 6). Dans la partie aval, l'analyse factorielle met en évidence un chenal à grand gabarit, aux berges escarpées et dont le fond est dépourvu de formations superficielles (type 1). Sa capacité diminue rapidement de l'aval vers l'amont. La végétalisation du fond est généralement modérée ; celle des berges oppose des zones d'occupation dense et des zones de coupe et d'esartement. Progressivement, la profondeur du chenal diminue et les berges s'adoucent, tandis que des formations superficielles d'abord grossières et peu épaisses, puis de plus en plus fines et épaisses occupent le fond du chenal (type 2). La végétation du fond du chenal se densifie progressivement de l'aval vers l'amont, tandis que les berges sont partout densément végétalisées. A l'extrémité amont du bras mort (type 6), le chenal est de moins en moins bien marqué et son fond disparaît sous une très dense couverture végétale arbustive et herbacée. La variable végétalisation des berges permet d'individualiser deux sous-types, l'un où la végétation est présente (6), l'autre où elle est absente en raison de l'existence d'une coupe (6').

2- Dans sa partie aval, le bras mort de *Grella Nord* présente un chenal ayant un gabarit fort et relativement constant sur une distance d'environ 1000 mètres. Les berges sont généralement escarpées, couvertes de végétation (3') ou soumises à des coupes (3) ; le substrat est partout grossier et les formations superficielles sont quasiment absentes, la végétalisation du fond demeurant modérée. Dans la partie amont du bras, le chenal au profil d'abord bien marqué mais au gabarit réduit (4') tend progressivement à disparaître (5). L'épaisseur des formations superficielles reste partout faible et le fond est couvert de sédiments de texture fine (limons). La végétation du fond, composée de formations arbustives et herbacées, est très dense et les berges sont végétalisées.

3- Le bras mort du *Grella Sud* est un petit chenal dont le fond est très densément végétalisé. Il est caractérisé par

Tableau 1.7 - Variables retenues pour le traitement statistique en ACP centrée réduite.

<i>Thème</i>	<i>Intitulé de la variable</i>	<i>Code variable</i>
Morphométrie	Largeur plein bord	LPB (m)
	Largeur du fond	LF (m)
	Hauteur berge rive droite	HBD (m)
	Hauteur berge rive gauche	HBG (m)
	Section	S (m ²)
	ratio largeur /profondeur	L/P
Sédimentologie	Epaisseur des dépôts	E (m)
Biogéographie	Indice de végétalisation des berges	VB
	Indice de végétalisation du fond	VF

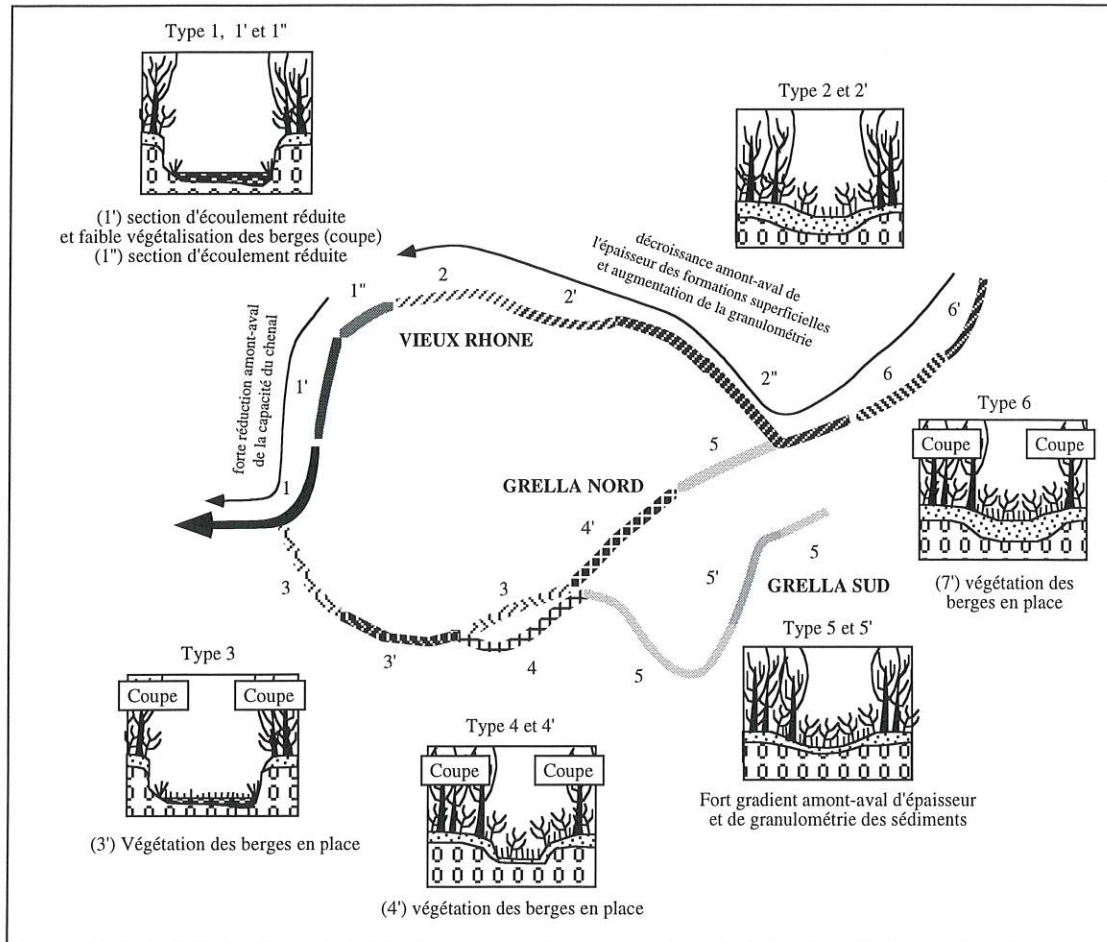


Figure 1.29 - Typologie des bras morts de l'île de Miribel-Jonage (Source : Bakès, 1995, modifié).

un très fort *ratio* largeur/profondeur, ce qui indique que ses berges sont de faible hauteur et qu'il est topographiquement très mal marqué. Peu épaisses et grossières dans la partie aval du bras mort, les formations superficielles s'épaississent et leur granulométrie s'affine progressivement vers l'amont. La végétation des berges est coupée dans la partie aval du bras mort (4) ; elle est par contre très dense dans sa partie médiane et amont (5 et 5').

Cette typologie est intéressante à plusieurs titres :

1) Elle permet tout d'abord la mise en évidence des modalités de fonctionnement des bras morts lors des débordements du Rhône. Par exemple, la forte variation amont-aval affectant la section d'écoulement de la partie aval du vieux Rhône traduit le contrôle de la forme du chenal par des processus d'érosion régressive, liés à l'évacuation des écoulements de débordement dans un des plans d'eau de Miribel-Jonage. De la même manière, l'élargissement brutal du chenal et l'augmentation localisée de la section d'écoulement au droit des profils 19 à 21 coïncide avec d'importantes arrivées d'eau de

crue provenant d'une brèche établie dans le système d'endiguement du canal de Miribel.

2) Elle facilite également les prises de décisions en matière d'aménagement. A l'issue de cette étude, les gestionnaires de la base de loisir (SEGAPAL) ont été surpris de l'intensité de la végétalisation de certains bras morts et envisagent maintenant des opérations d'essartement afin de restituer leur capacité d'écoulement. L'un des grands projets de la SEGAPAL est la remise en eau des anciens bras dans le but de rétablir et de diversifier les zones humides. L'étude montre que certains bras fortement atterris par d'épaisses formations superficielles se prêtent assez mal à une remise en eau permanente ou que celle-ci nécessitera des travaux de recréusement .

3.5) Synthèse méthodologique de l'approche experte

Au-delà des problématiques et des résultats de recherche appliquée présentés dans chacune des trois études de cas développées, les démarches méthodologiques mises en œuvre montrent un certain nombre de similitudes dont la synthèse est nécessaire (fig. 1.30) :

1- Une prise de contact avec le terrain intervient toujours préalablement à la mise en place de la méthodologie d'étude. Elle permet de confronter les premières observations de terrain aux questions posées par le maître d'ouvrage, de poser clairement la problématique de l'étude et d'affiner la méthodologie qui sera développée, notamment de sélectionner les critères qui seront étudiés. Cette sélection, en étroite relation avec les objectifs de l'étude, permet de limiter le nombre de variables à celles dont la pertinence apparaît être la meilleure vis-à-vis de la question posée. Cette étape est essentielle : mieux ce travail préparatoire est exécuté, meilleure sera l'adéquation entre les questions posées et les réponses apportées. La bonne exécution de ce travail permettra également d'optimiser la collecte de l'information en évitant de passer beaucoup de temps à recueillir des données pas forcément utiles pour la suite de l'étude.

2- La tendance actuelle des études appliquées est de synthétiser l'information collectée sur des fiches de terrain. Celles-ci présentent l'avantage d'homogénéiser la collecte des données, d'éviter que la nature de l'information sélectionnée varie dans l'espace d'une manière subjective. Par ailleurs, plusieurs personnes peuvent opérer simultanément sur des espaces différents, ce qui allège les investigations de terrain, tout en raccourcissant les délais de la collecte des données. La mise en œuvre de fiches de terrain n'est cependant pas systématique : dans le cadre d'une étude en cours sur l'Arc d'Aix-en-Provence pour le compte du Syndicat pour l'Aménagement du Bassin de l'Arc (SABA), les fiches de terrain ont été remplacées par une collecte fondée sur une cartographie multi-critères exécutée simultanément sur plusieurs fonds de carte. Lors d'une étude plus ancienne réalisée sur la *basse vallée de l'Ain* (Bravard, Franc *et al.*, 1990), la collecte des données n'avait pas non plus nécessité de recourir à des fiches de terrain, l'essentiel des informations étant tiré de l'analyse de plusieurs centaines de photographies obliques de la rivière, prises à très basse altitude à l'occasion d'un survol en ULM ; une documentation d'une telle qualité est cependant rarissime.

3- Les fiches constituent de véritables questionnaires de terrain qui, comme les questionnaires d'enquête des études de géographie sociale, peuvent faire l'objet d'un codage et d'un traitement de données. Les individus (au sens statistique du terme) sur lesquels porte la collecte de

données peuvent, selon les problématiques et les questions posées, prendre différentes formes. Sur *l'Aire* et la *Drize*, on a découpé la rivière en tronçons homogènes de longueur variable, chacun faisant l'objet d'une fiche de terrain. Sur le *Tacon* et le *Flumen*, il n'y a eu pas d'échantillonnage, mais analyse de toutes les égrèvinas recensées lors de l'étude de terrain. Sur les *bras morts de Miribel-Jonage*, les 88 individus sont des transects avec échantillonnage systématique tous les 100 mètres. Sur *l'Ain* (Bravard, Francet *al.*, op. cit.), la rivière a été découpée en plus de 400 tronçons d'une longueur de 100 mètres ; sur *l'Arc d'Aix-en-Provence*, le 60 km de cours d'eau étudiés ont été subdivisés en segments de 500 mètres. On voit ainsi, et ceci est important pour la spatialisation des données sous la forme de cartes, que les individus sur lesquels porte l'étude correspondent à deux types d'entités géographiques : des entités ponctuelles (*Tacon-Flumen*, bras morts de *Miribel-Jonage*) ; des entités linéaires (*Aire-Drize*, basse vallée de l'*Ain*, *Arc d'Aix-en-Provence*).

4- Les caractères faisant l'objet d'une collecte sur les fiches de terrain appartiennent à toutes les catégories ; ils sont fréquemment qualitatifs nominaux ou ordinaux. De plus en plus, nous essayons de privilégier la collecte de données quantitatives (*Tacon-Flumen*, bras-morts de *Miribel-Jonage*), beaucoup plus lourde à réaliser, mais présentant des possibilités de représentation graphique et de traitement statistique plus grands. Un important travail de codage et d'homogénéisation des données est généralement nécessaire à l'issue des investigations de terrain. Il permet la constitution d'une base de données géoréférencée indispensable lorsque l'un des objectifs est la spatialisation des caractères étudiés sous la forme de cartes analytiques. C'est sur cette base de données utilisée, en totalité ou en partie, que portera un éventuel traitement statistique.

5- La production de cartes analytiques constitue la première étape de la représentation spatiale des données de terrain. Ces cartes analytiques peuvent reproduire fidèlement les contours de la zone d'étude, comme cela est le cas sur les bras morts de *Miribel-Jonage* (voir fig. 1.26). Sur de longues sections de rivières où les individus statistiques sont des entités linéaires difficiles à représenter fidèlement, le recours à des anamorphoses rend possible le traitement graphique rapide de l'information : c'est un tel choix qui a été fait sur la basse vallée de l'*Ain* (fig. 1.31). La combinaison des variables initiales permet, dans une certaine mesure, de créer une information nouvelle :

a) Dans les bras morts de *Miribel-Jonage*, les combinaisons des variables qualitatives et/ou quantitatives sont réalisées par grands thèmes (morphométrie, formations superficielles, végétalisation) et permettent de créer des documents graphiques présentant des typologies beaucoup plus riches que les cartes analytiques initiales ; celles-ci constituent des supports extrêmement précieux pour

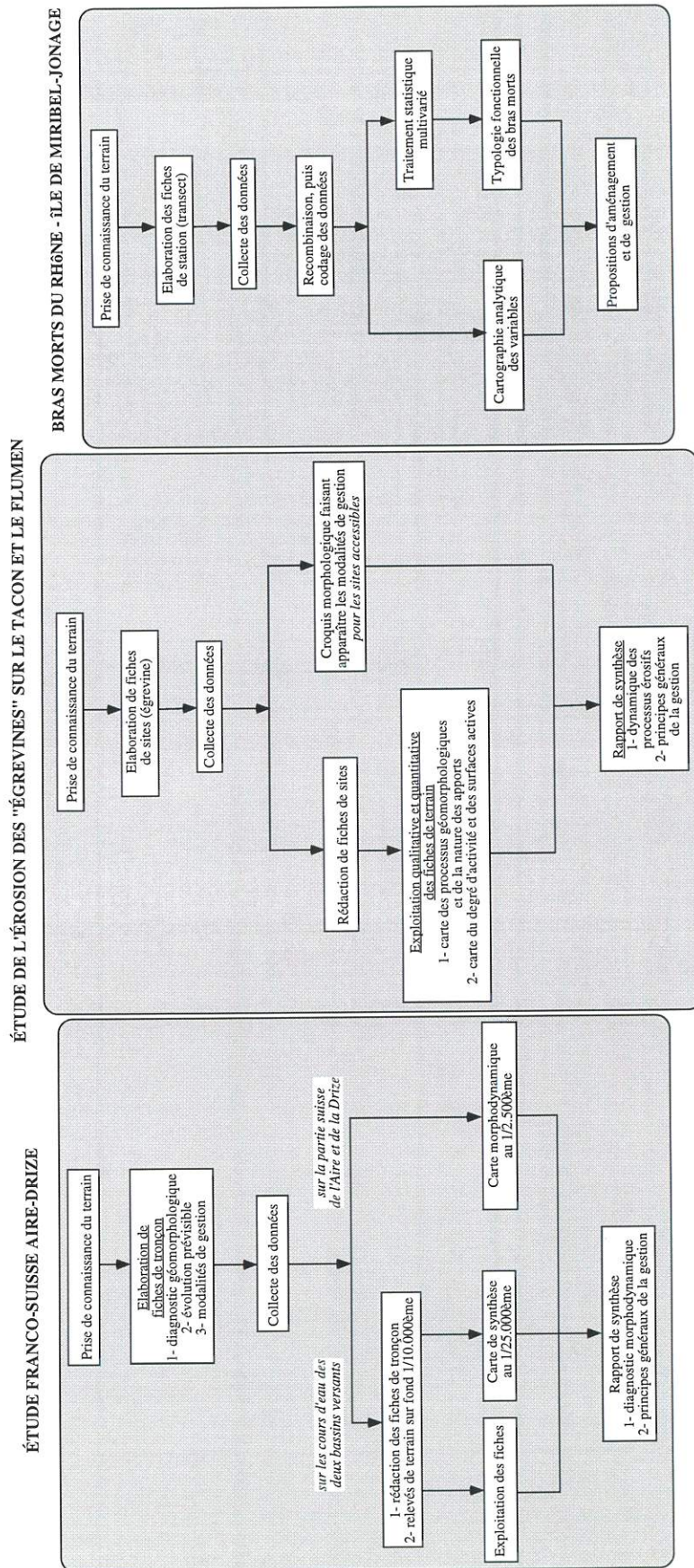


Figure 1.30 - Organigramme des méthodes mises en œuvre dans le cadre des trois études de cas présentées.

l'interprétation physionomique et fonctionnelle des bras morts.

b) Sur le Tacon et le Flumen, la combinaison de deux à deux des critères identifiant les modalités de fonctionnement des égrevines permet de produire des cartes originales établissant l'organisation spatiale des processus géomorphologiques et de la recharge sédimentaire ; de tels documents facilitent très fortement l'interprétation des données de terrain.

c) Sur l'Aire et la Drize, les éléments collectés sur les fiches de terrain ont été synthétisés pour produire une carte de sectorisation morphodynamique fondée sur l'intensité et l'urgence des interventions d'aménagement et de gestion à prévoir. Le recours aux fiches de terrain permet au gestionnaire d'avoir le descriptif à la fois des modalités de fonctionnement de la section de cours d'eau examinée et un descriptif sommaire des principales interventions de gestion qui sont nécessaires.

6- La base de données géoréférencée peut aussi faire l'objet d'un traitement statistique approfondi de manière à dresser une typologie physionomique et fonctionnelle fondée sur tout ou partie des données recueillies sur le terrain :

a) Sur les bras morts de Miribel-Jonage, un traitement multivarié de type analyse en composantes principales normées (ACPN) est exécuté sur les données quantitatives. Il débouche sur le découpage des bras morts en sept types physionomiques, l'interprétation des variations spatiales de la morphométrie, de la texture des sédiments et de la végétation étant riche d'enseignements pour l'analyse des processus et de la dynamique du système (voir fig. 1.29). Un tel document présente un grand intérêt quand on aborde l'étape ultime de toute étude d'aménagement, c'est-à-dire la mise en place d'un programme de gestion et de réhabilitation du milieu. Les récents travaux fait par Piégay (1995) sur la moyenne Ubaye indiquent que l'ACP peut également être un précieux outil de sectorisation de la mosaïque paysagère le

long des corridors fluviaux, en facilitant la localisation des zones où la diversité est maximale. L'aide à la décision en matière de gestion et de conservation des milieux remarquables en est ainsi facilitée.

b) Dans la basse vallée de l'Ain, la base de données, exclusivement composée de caractères qualitatifs nominaux et ordinaux (tab. 1.8), a fait l'objet d'un traitement multivarié du type analyse factorielle des correspondances multiples (ACM). Sur cette rivière où l'objectif était de délimiter l'espace de liberté du chenal, un tel traitement présentait l'intérêt de calculer un indice statistique d'instabilité latérale du cours d'eau et d'en faire une spatialisation cartographique ; il permettait aussi de déterminer quelles étaient, parmi les 10 variables utilisées, celles qui étaient le plus discriminantes vis-à-vis de l'instabilité latérale du chenal (Bravard, Franc *et al.*, 1990 ; Piégay, Barge *et al.*, 1996) (fig. 1.31). Une telle analyse a largement conforté le diagnostic établi sur les potentialités de divagation de la basse vallée de l'Ain et a pu ainsi être directement utilisé à des fins de gestion. C'est également ce type de traitement qu'a utilisé un des étudiants dont nous avons dirigé les travaux (Morin, 1996), à l'occasion de la mise au point d'une méthode de diagnostic géomorphologique des petits cours d'eau, testée sur 3 bassins de l'avant-pays dauphinois.

7- Les méthodologies d'expertises développées et expérimentées au cours des dernières années peuvent déboucher directement sur des propositions de travaux. Sur l'Aire et la Drize inférieure, le diagnostic géomorphologique général a été complété par une cartographie à grande échelle (1:2.500) qui localise les principales zones instables et montre le lien étroit qui les lie au développement de grands arbres dans le chenal. Le document dressé sur le terrain est suffisamment précis et détaillé pour servir d'avant-projet sommaire et permettre au gestionnaire d'intervenir directement sur terrain, dans le cadre d'opérations de régulation de la végétation arborée (voir fig. 1.18, tronçon Drize n° 5). Son objectif est de faire diminuer les contraintes qu'exercent sur le chenal

Tableau 1.8 - Les variables géomorphologiques étudiées sur la basse vallée de l'Ain et leurs modalités

(Source : Piégay, Barge *et al.*, 1996).

<i>Variable</i>	<i>Modalités</i>
Iles boisées	présence ; absence
Faciès du chenal	plat ; mouille ; surcreusé ; radier
Nature du fond	galet ; substratum
Pente du chenal (m.km ⁻¹)	<0,9 ; [0,9-1,1[; [1,1-1,4[; ≥1,4
Largeur de la bande active (m)	(25-55) ; (60-75) ; (80-100) ; (105-125) ; (130-155) ; (160-195)
Nombre de blocs	aucun ; (1 à 10) ; (11 à 80)
Nombre de troncs	aucun ; (1 à 5) ; (6 à 35)
Hauteur des berges (RD/RG) (m)	(>2/>2) ; (1-2/1-2) ; (<1/<1) ; (<1/>2) ; (1-2/>2) ; (<1/1-2)
Nature des berges (RD/RG)	(G/G) ; (SL sur G/SL sur G) ; (G/SL sur G) ; (substratum sur 1 ou 2 rives) ; (1 rive endiguée) ; (2 rives endiguées)
Types d'associations de berge	8 modalités fondées sur les formes de berges

Nota : G : galet ; SL : sable limoneux

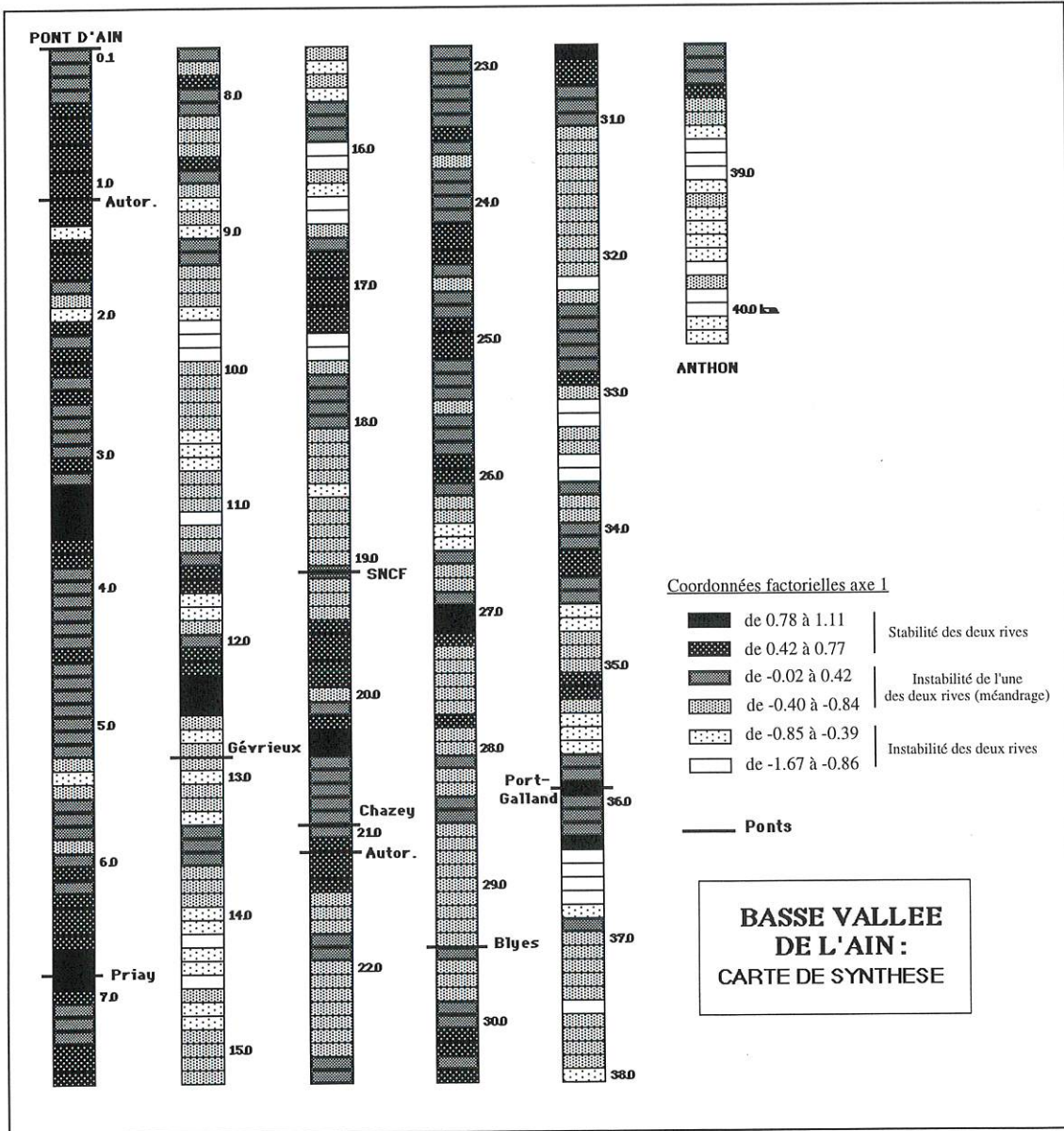


Figure 1.31 - Sectorisation de l'instabilité latérale le long de la basse vallée de l'Ain

(Source : Bravard, Franc *et al.*, 1990, modifié).

(berges et fond) les diminutions de section d'écoulement causées par la présence des arbres. Sur le Tacon et le Flumen, les égrevines recensées comme étant susceptibles d'être réhabilitées ont toutes fait l'objet de propositions d'aménagement très précises que l'on peut qualifier d'ingénierie géomorphologique (voir P3, § 7.3.2 et fig. 3.44).

En conclusion, les trois études de cas présentées ci-dessus constituent une partie du savoir-faire que nous avons développé ces dernières années pour réaliser un diagnostic morphodynamique de terrain, sur des tronçons de rivière de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres de longueur. Elles témoignent d'un souci de

plus d'objectivité et de rigueur dans la manière d'aborder le terrain, en fondant le diagnostic sur l'échantillonnage et l'analyse spatiale de variables clés de fonctionnement. Dans tous les cas de figure, les données, mélangeant des variables qualitatives et quantitatives, sont recueillies sur des fiches de site lors "d'enquêtes de terrain". Leur homogénéisation et codage ultérieur permet éventuellement par la suite des traitements statistiques élémentaires ou plus sophistiqués (analyse multivariée), ainsi que la spatialisation cartographique des données. Ces types de traitement, qu'ils soient cartographiques ou statistiques, constituent une aide à l'analyse spatiale et au diagnostic morphodynamique. Toute la difficulté est le plus souvent de trouver le juste équilibre entre le temps du recueil de

la donnée et la finesse que l'on veut donner à l'étude. Les niveaux de quantification qui sont développés dépendent très fortement de la demande du maître-d'œuvre, de la problématique de l'étude et de la dimension de l'espace à étudier. Pour des études appliquées à destination des gestionnaires, on doit, le plus souvent, se contenter d'une quantification minimale, de manière à limiter les coûts d'acquisition et d'exploitation des données (Aire-Drize, Tacon-Flumen) ; l'expertise de terrain doit alors être étayée par l'observation d'un nombre limité de variables clés de fonctionnement. Lorsque de telles contraintes n'existent pas, les principes du diagnostic sont les mêmes, mais la quantification peut être beaucoup plus poussée. Il s'agit alors de dépasser le cadre de l'expertise, pour élaborer des diagnostics et des typologies fonctionnelles fondées sur les résultats de traitement de données statistiquement significatifs. L'étude des bras morts de Miribel-Jonage constitue un exemple de ce mode opératoire que nous avons poussé à l'extrême, pour des raisons méthodologiques et pédagogiques. Dans ce cas, le recueil des données sur le terrain est beaucoup plus lourd ; il ne saurait être justifié par la seule amélioration de la finesse des résultats, mais a pour finalité une démonstration scientifiquement fondée.

Conclusion

La première partie de ce diplôme d'habilitation à diriger les recherches avait pour objectif de présenter des méthodes et techniques mises en œuvre pour recueillir de l'information géomorphologique quantitative. Parmi le panel de méthodes que j'utilise, j'ai délibérément choisi de me placer à l'échelle spatiale du tronçon de cours d'eau (voir introduction générale, figure I.2) et de concentrer ma présentation sur les changements méthodologiques que nécessitent des investigations menées sur trois pas de temps complémentaires (échelle multiséculaire, échelle séculaire, diagnostic géomorphologique contemporain). Les méthodes et techniques développées sont complémentaires les unes des autres et adaptées à différents types de données, sources documentaires. Chaque pas de temps fait l'objet d'un chapitre, l'emboîtement d'échelle allant du temps long vers le temps court.

1) Les études de cas traitant des paléoenvironnements fluviaux ont permis de montrer l'intérêt de l'analyse des formations sédimentaires repérées en plan ou en coupe, pour la reconstitution des processus fluviaux. Les techniques utilisées s'appuient d'une part, sur la spatialisation des données tirées des sondages à l'aide de logiciels de représentation cartographique, d'autre part sur l'apport des techniques géostatistiques dans le cas particulier de l'étude des structures sédimentaires de formations alluviales que l'on ne peut pas observer en coupe. Les exemples sélectionnés sont issus d'études menées en collaboration avec les archéologues lyonnais

et grenoblois, dans le cadre de l'extension de la ligne du TGV en direction de Marseille et sur le site de Grenoble.

2) A l'échelle de temps séculaire, les sources documentaires sont radicalement différentes puisque le géomorphologue peut s'appuyer sur des documents techniques (en particulier des profils en long et en travers) et une riche iconographie (notamment des plans et cartes anciennes à grande échelle depuis la fin du XVIII^e siècle). Leur intérêt respectif et les difficultés de leur utilisation ont été discutées. Puis j'ai mis l'accent sur les possibilités de quantification du style fluvial, fondées sur l'utilisation d'indices morphométriques (sinuosité, multiplicité des bras, largeur du chenal...), en montrant notamment les difficultés de leur mise en œuvre et la prudence qu'elle requiert. Dans le cadre de l'analyse des documents anciens (cartes) ou plus récents (photographies aériennes), les Systèmes d'Information Géographique sont un outil qui est de plus en plus fréquemment utilisé par les géomorphologues fluviaux, aussi bien pour des études synchroniques que diachroniques. Ils permettent d'homogénéiser les échelles de documents divers, de géoréférencer des documents établis dans des systèmes de coordonnées différents par leurs capacités de redressement des images, de traiter, de créer et de quantifier de l'information géographique : l'exemple des effets d'une série de crue sur la morphométrie du chenal du Drac entre 1948 et 1956 a permis d'illustrer leur intérêt pour les études de géomorphologie fluviale.

3) Le diagnostic du fonctionnement contemporain des cours d'eau nécessite également le développement de méthodes et d'outils adaptés, que ce soit pour les recherches appliquées (contrats d'étude en vue de définir des modalités de gestion des cours d'eau) ou pour l'acquisition de connaissances fondamentales sur le fonctionnement des rivières. Dans l'un et l'autre des cas, la demande s'oriente de plus en plus vers l'acquisition, la mise en forme et le traitement géostatistique de variables descriptrices du fonctionnement. Le troisième chapitre fait le point sur les techniques développées pour répondre à ces besoins. Sur la base de trois études de cas présentant un degré de sophistication croissant dans l'acquisition et le traitement des données, il tente de dégager un certain nombre de caractéristiques méthodologiques communes, qui constituent le fondement du diagnostic géomorphologique.

Mais la recherche en géomorphologie nécessite également que le chercheur soit capable d'organiser et de structurer une recherche, et de travailler à une échelle spatio-temporelle encore plus réduite, celle des processus et des mécanismes. La seconde partie de ce DHDR se focalise sur la problématique qui retient toute mon attention depuis 3 ans, la végétalisation du chenal de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. Ces recherches se déroulent dans un contexte international et interdisciplinaire ; elles

résultent de la collaboration avec des équipes de phytoécologues et de géomorphologues. Le fil conducteur de cette seconde partie est double. Il s'agit d'une part, de montrer comment j'ai organisé mes recherches et celles des étudiants dont je dirige les travaux, et d'autre part, de présenter les premiers résultats de ces travaux, en mettant l'accent sur les liens parfois complexes entre les multiples problématiques et techniques développées.

PARTIE II



LA PROBLÉMATIQUE DU DÉVELOPPEMENT VÉGÉTAL SUR L'ISÈRE DANS LA VALLÉE DU GRÉSIVAUDAN : STRATÉGIE DE RECHERCHE ET PREMIERS RÉSULTATS

Introduction

La première partie de ce DHDR était centrée sur la présentation de techniques et d'outils développés pour établir des diagnostics morphodynamiques à différentes échelles de temps. La seconde partie de ce mémoire a pour premier objectif de montrer au lecteur comment nous bâtissons nos problématiques et organisons nos recherches en géomorphologie fluviale, en faisant participer aux travaux les étudiants de second et troisième cycle (chap. 1). Pour illustrer notre manière de faire, nous avons choisi de développer un exemple d'étude, sur lequel nos étudiants et nous-mêmes avons beaucoup investi au cours des trois dernières années : il s'agit de la problématique de la végétalisation du chenal de l'Isère en amont de Grenoble et des facteurs abiotiques qui la contrôlent. Plusieurs études récentes de géomorphologie fluviale ont révélé que le développement végétal est l'une des constantes de l'évolution contemporaine des lits fluviaux à fond mobile (Peiry & Nougier, 1994 ; Peiry & Vivian, 1994 ; Piégay, 1995 ; Morin, 1996 ; Pautou, Peiry *et al.*, 1997). Les processus contrôlant l'expansion des ligneux dans les lits fluviaux sont encore insuffisamment connus, alors que la gestion de la végétation constituera sans nul doute l'un des enjeux majeurs de la décennie à venir. L'objectif de recherches fondamentales développées sur ce thème est donc de mieux comprendre quels sont les processus de contrôle en jeu, afin d'améliorer les procédures de gestion. La démarche adoptée pour étudier la végétalisation du chenal de l'Isère a consisté à travailler simultanément sur plusieurs échelles spatio-temporelles emboîtées, de l'analyse de la dynamique d'un tronçon de rivière au cours des 200 dernières années, à l'étude des processus, sur un site de quelques centaines de mètres carrés dûment instrumenté. Cette complémentarité des échelles d'investigation est fondamentale à bien des égards. Par exemple, la sélection d'un site sur lequel implanter une station d'étude des processus contemporains nécessite que l'on soit capable d'identifier sa représentativité par rapport au tronçon de cours d'eau étudié. Elle passe donc par une bonne connaissance préalable de la dynamique fluviale et des changements qui ont pu l'affecter. *A posteriori*, l'interprétation des résultats de mesures locales requiert que l'on puisse les replacer dans le contexte d'évolution de l'ensemble de la zone étudiée.

Une masse considérable de données de terrain a été acquise depuis 1994. Le second objectif de cette partie est la présentation d'un certain nombre de résultats de recherche non publiés, liés à la problématique du développement végétal dans le chenal de l'Isère. L'accent est mis sur des études apparemment déconnectées les unes des autres, mais dont les résultats participent à la compréhension des processus de végétalisation et d'identification des contrôles abiotiques. Dans les chapitres 2 et 3, nous avons choisi de privilégier la présentation des résul-

tats des mesures de terrain et l'analyse des processus, à l'échelle du site ou de la station. En effet, les techniques et les méthodes de mesure utilisées, la chaîne de traitement et la modélisation des données constituent une démarche de recherche relativement originale en géographie, dont nous devons rendre compte. Deux thèmes de recherche seront successivement développés : a) celui des flux de matière dissoute et de matière en suspension mesurés à la station de Grenoble-Campus, qui sont, selon les situations, des facteurs qui limitent ou favorisent la régénération végétale (chap. 2) ; b) celui de la réduction de la fréquence d'inondation d'une île végétalisée de l'Isère et de son exhaussement par les dépôts fins, en relation avec le ralentissement du courant par la végétation et l'occurrence des flux fortement chargés en matière en suspension (chap. 3).

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET STRATÉGIE DES RECHERCHES ENGAGÉES SUR L'ISÈRE

- 1.1) La problématique du développement végétal dans le chenal de l'Isère en amont de Grenoble
- 1.2) Les stratégies de recherche développées sur l'Isère

Résumé du chapitre 1

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter la problématique et les stratégies de recherche engagées sur l'Isère depuis 1994. Le constat initial est que, depuis une quinzaine d'années, les bancs de graviers de l'Isère se sont stabilisées et se sont très rapidement couverts de végétation ; celle-ci se densifie et évolue progressivement vers des formations matures composées de grands arbres. Leur présence dans le chenal n'est pas sans conséquence hydraulique : localement, la végétation rehausse les niveaux de crue ; en cas d'épisode exceptionnel, le déchaussement des arbres et leur exportation vers l'aval accroît le risque de formation d'embâcles, notamment dans la traversée de la ville de Grenoble. En l'état actuel de nos connaissances, il semble que la raréfaction des transports solides en relation avec une diminution des disponibilités de la charge grossière soit une des causes majeures de la végétalisation.

Une étude interdisciplinaire associant la géomorphologie, l'hydrologie et la phytoécologie est en cours. Elle est fondée sur des investigations de terrain menées aux échelles de la vallée, du banc végétalisé et de la parcelle-témoin, complétées d'études de laboratoire. La stratégie de recherche en géomorphologie et en hydrologie est de travailler en même temps à différentes échelles spatio-temporelles. A l'échelle de la vallée, le but est de recueillir des informations sur l'évolution progressive de l'hydrosystème fluvial sous l'effet des activités de l'homme, afin de comprendre quel fut l'enchaînement des processus ayant conduit à la végétalisation actuelle. A l'échelle du site et de la station d'étude, il s'agit de recueillir des données quantitatives sur les processus qui contrôlent le développement végétal. Les variables suivies permettent d'une part, d'étudier la dynamique des flux transitant dans le système (débits, concentration en matière en suspension ou en matière dissoute), et d'autre-part, de dresser l'état du site étudié et de suivre son évolution dans le temps (topographie, texture des dépôts, exhaussement, inondabilité...).

1.1) La problématique du développement végétal dans le chenal de l'Isère en amont de Grenoble

1.1.1) Le cadre institutionnel de la recherche

Les études engagées sur l'Isère depuis 1990 nous ont conduit à développer des recherches interdisciplinaires sur la végétalisation du lit fluvial à l'intérieur du système d'endiguement édifié au XIX^e siècle (Rousset, 1993) (fig. 2.1). Depuis 1993, ces recherches sont développées dans le cadre de deux programmes européens, en collaboration avec le Département de Géographie de l'Université de Cambridge (Prof. K.S. Richards) et le Laboratoire de Biologie Alpine de l'Université Joseph Fourier (Prof. G. Pautou). Intitulé "Abiotic controls of the germination establishment and species distribution of woody riparian vegetation" (1993-95) (Research Grant EV5V-CT93-0261, DG XII FZPA), l'objectif du premier programme était d'analyser les modalités de la

régénération des ligneux au bord des cours d'eau, compte-tenu de la variabilité inter-annuelle des flux, de la grande hétérogénéité de l'espace alluvial et des effets cumulés des actions anthropiques. Afin de mieux cerner la diversité des conditions de régénération, l'étude a été conduite sur trois cours d'eau alpins aux conditions écologiques et au degré d'anthropisation très différents (tab. 2.1) : l'Isère dans la vallée du Grésivaudan, le Drac dans la plaine de Grenoble et la Drôme inférieure, dans la réserve naturelle des Ramières du Val de Drôme.

Depuis l'automne 1996, la recherche sur la végétalisation des lits fluviaux est entrée dans une deuxième phase avec l'obtention d'un second contrat européen intitulé "Floodplain biodiversity and restoration ; hydrological and geomorphological mechanisms influencing floodplain diversity and their application to the restoration of european floodplains" (1996-1999) (Research Grant ENV4-CT96-0317, DG XII FZPA). Le groupe de recherche initial a été élargi à une équipe d'écologues suédois (Dr. C. Nielsson, Umea) et une équipe d'éco-



Figure 2.1 - L'Isère en amont de Grenoble ;
localisation des sites de mesure dans la vallée du Grésivaudan

Tableau 2.1 - Quelques caractéristiques des rivières sur lesquelles les processus de régénération végétale ont été étudiés.

Rivière	Caractéristiques bioclimatiques	Débit moyen	Nature du substrat	Pente	Style fluvial	Aménagements
Isère	Alpin	200	Graviers et fines	0.0011	Tressage et méandrage Endiguement (XIX ^e S.)	Endiguement, extractions, hydroélectricité
Drac	Alpin	100	Galets, graviers	0.0035	Tressage Endiguement (XVIII ^e S.)	Endiguement, extractions, hydroélectricité
Drôme	Subméditerranéen	50	Galets, graviers	0.0026	Tressage actif	Extractions, pompages

logues toulousains (H. Descamps, D.R. CNRS). Par ailleurs, les espaces étudiés ont partiellement changé et leur nombre a été accru, chaque équipe disposant aujourd'hui d'un site d'étude dans son aire géographique. L'objectif est de réaliser une étude comparative des modalités de régénération végétale, en prenant en compte des rivières localisées sur un axe nord-sud recoupant une grande partie de l'Europe occidentale (tab. 2.2). De manière à gagner en efficacité, l'équipe grenobloise a décidé de concentrer ses efforts sur l'Isère, cours d'eau sur lequel l'investissement en temps et moyens de recherches avait été le plus fort lors du premier programme.

1.1.2) Le constat initial d'un chenal en voie de végétalisation

L'étude développée sur l'Isère part d'un constat initial : depuis 1975 environ, on assiste à une végétalisation progressive des espaces terrestres intra-digues. Le changement est marqué : en 1993, la surface végétalisée entre le pont de la Gâche et Grenoble distants d'environ 50 km avoisinait 110 ha (EPTEAU S.A., 1996). Sur un chenal large de 112 m à l'issue de l'endiguement général du XIX^e siècle, cela représente une réduction moyenne d'environ 20 % de la largeur du chenal entre digues. L'augmentation

* R. Öre (Nord de la Suède)

Climat subarctique

Hydrologie : $Q_{moy} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{min} = 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_{max} = 550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

Sédimentologie : sable et limons

Végétation : forêt de saules et d'aulnes ;

Aménagement : libre d'aménagement.

* R. Great-Ouse (Angleterre)

Climat atlantique maritime

Hydrologie : $Q_{moy} = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{min} = 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_{max} = 150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

Sédimentologie : limons et argiles

Végétation : prairie et forêt de saules ;

Aménagement : rivière chenalisée.

* R. Isère (France)

Climat alpin humide

Hydrologie : $Q_{moy} = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{min} = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

Sédimentologie : gravier à sable et limon

Végétation : saule, aulne et forêt de bois durs ;

Aménagement : rivière chenalisée ; débits influencés par des aménagements hydroélectriques ; extractions de gravier.

* R. Garonne (France)

Climat atlantique pyrénéen

Hydrologie : $Q_{moy} = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{min} = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_{max} = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

Sédimentologie : gravier et galet

Végétation : forêt de saules et de peupliers ;

Aménagement : rivière chenalisée ; débits régulés (hydroélectricité, irrigation)

Tableau 2.2 - Principales caractéristiques des rivières faisant l'objet d'un étude dans le cadre du second contrat européen.

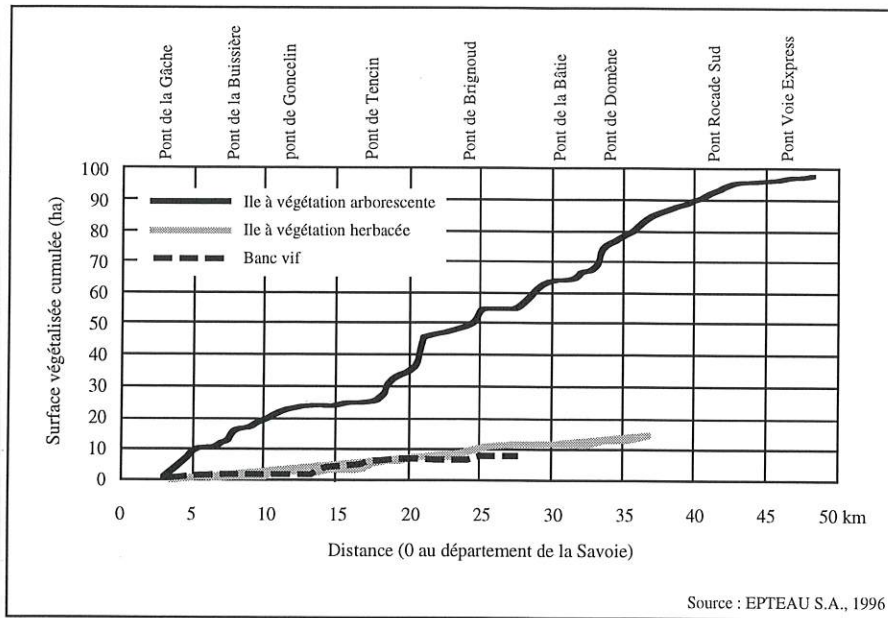


Figure 2.2 - Evolution amont-aval de la végétalisation de l'Isère entre le pont de la Gâche (entrée du département de l'Isère) et Grenoble ; les courbes représentent le cumul amont-aval des surfaces intra-digues couvertes de végétation (Source : EPTEAU S.A., 1996).

amont-aval des surfaces terrestres à l'intérieur du système d'endiguement permet de localiser les principaux secteurs où la végétation s'est implantée (fig. 2.2) :

a) Les îles à formations arborescentes sont celles qui se sont le plus fortement développées (97 ha) : la progression de la surface boisée est relativement constante (env. 2 ha.km⁻¹), à l'exception d'une section d'environ 4 km entre les ponts de Tencin et de Brignoud (env. 5 ha.km⁻¹) et d'une très courte zone en amont du Pont de Domène.

b) Les îles à formations herbacées dominantes occu-

pent une douzaine d'hectares. Elles sont préférentiellement localisées entre les ponts de Goncelin et de Tencin (env. 1 ha.km⁻¹), zone où de forts remaniements des fonds sont observés depuis une dizaine d'années : après la phase d'incision généralisée des années 1970 liée aux extractions de gravier (Peiry ; Salvador *et al.*, 1994), la tendance, depuis 1980, est au basculement du profil en long, suite à la mise en service de la dérivation Arc-Isère (restitution du Cheylas) (fig. 2.3, tab. 2.3 et fig. 3.19). On enregistre également une progression des surfaces occupées par des communautés pionnières en aval du pont de Brignoud (+4 ha).

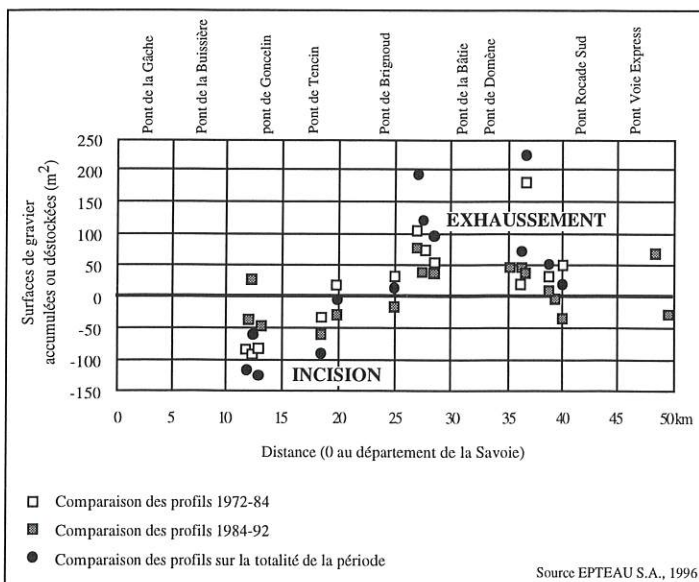


Figure 2.3 - Basculement du profil en long de l'Isère depuis la mise en service de la dérivation Arc-Isère (1980) montré par le suivi de profils en travers ; le point de rotation du profil se trouve approximativement au pont de Brignoud (Source : EPTEAU S.A., 1996).

Tableau 2.3 - Basculement du profil en long de l'Isère au cours des décennies quatre-vingt et quatre-vingt dix
(Source : A.D. Isère-Drac-Romanche, 1993, modifié).

Tronçon	Avant 1984	1984-90
Pont de la Gâche-Pont de Tencin Km 2,7 à 17,1	Abaissement moyen de 0,70 m entre 1977 et 1984	Incision : * Tendance à l'abaissement en amont du pont de la Gâche (-0,20 m) * Exhaussement en amont du pont de la Buisnière (effet du seuil) * Incision du lit en aval du pont de la Buisnière : -0,25 à -0,40 en amont du Cheylas -0,50 m au Cheylas - 0,35 m au pont de Tencin Abaissement du lit décroissant de l'amont (-0,30 m) à l'aval (-0,10 m) Poursuite de l'exhaussement (+0,20 à +0,30 m)
Pont de Tencin-Pont de Brignoud Km 17,1 à 24,3	Fonds stables de 1972 à 1984	Abaissement du lit décroissant de l'amont (-0,30 m) à l'aval (-0,10 m) Poursuite de l'exhaussement (+0,20 à +0,30 m)
Pont de Brignoud-Pont de la Bâtie Km 24,3 à 30,0	*Abaissement avant 1973 *Tendance à l'exhaussement depuis 1973	Poursuite de l'exhaussement (+0,20 à 0,30 m vers la coupure du Bois Français)
Pont de la Bâtie-Pont de la Rocade Sud (aval boucle de la Taillat) Km 30,0 à 41,8	*Forte incision due aux extractions (environ -4 m en 1973) * Exhaussement de 1973 à 1984 (+0,4 m à Domène)	Tendance à l'exhaussement (+0,10 à +0,20 m)
Pont de la Rocade Sud-Île d'Amour Km 41,8 à 43,4	* Incision de -0,80 à -0,90m entre 1964 et 1968 * Stabilisation des fonds entre 1968 et 1984 Stabilité des fonds	Tendance à l'exhaussement (+0,10 à +0,20 m) poursuite de l'abaissement (-0,30 m)
Île d'Amour-Pont de la Citadelle Km 43,3-49,1	Abaissement de -0,60 m entre 1968 et 1983	
Pont Marius Gontard Km 49,5		

(Kilomètre 0 à l'entrée du Département de l'Isère)

c) Sur environ 50 kilomètres de cours d'eau, la surface des bancs vifs ne dépasse pas 8 hectares. Cette surface est très certainement sous-représentée, le travail de quantification ayant été fait à partir de la mission IGN du 27/07/1993. Or, le débit de ce jour était de $211 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un peu plus élevé que le module de l'Isère à Grenoble ($200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Une autre imprécision provient de la difficulté de distinguer les boisements anciens des fourrés de bois tendre sur les photographies : cela a conduit à quantifier sous une même dénomination des boisements représentant plusieurs phases de colonisation végétale. La thèse en cours de F. Vautier devrait permettre de lever ces incertitudes et d'avoir une vision dynamique de la progression végétale par l'exploitation des photographies aériennes anciennes.

1.1.3) Les étapes et les mécanismes de la végétalisation

Les étapes de la végétalisation du chenal de l'Isère sont encore aujourd'hui incertaines. Avant 1970, les formes terrestres (ou temporairement exondées) situées à l'intérieur du chenal endigué étaient majoritairement constituées d'une alternance de bancs latéraux vifs dépourvus de végétation ou colonisés par des herbacées ; une végétation arborée se développait uniquement sur le flanc

interne des digues longitudinales. Se fondant sur une étude diachronique des photographies aériennes, Didier (1992) notait une nette diminution du nombre de bancs vifs entre 1948 et 1981, tandis que la migration des formes fluviales, apparente jusque dans les années 1970, semblait stoppée après 1980. La stabilisation et la disparition d'une grande partie des formes de dépôt coïncident sans conteste avec le spectaculaire déstockage de la charge alluviale dû aux extractions de gravier, entre 1950 et 1980 (voir P3, § 3.3.4).

Après 1970, la végétation a gagné en surface. Les études préliminaires de terrain ont permis d'établir que le phénomène de végétalisation du lit est complexe. Une étude approfondie étant en cours, on a provisoirement distingué deux grandes étapes de colonisation végétale (tab. 2.4 et 2.5) :

a) Une réduction significative de la largeur du chenal a accompagné l'enfoncement du lit lié aux extractions de gravier des années 1970, les écoulements se concentrant dans un lit plus étroit que la largeur donnée aux digues dans la seconde moitié du XIX^e siècle. La contraction des écoulements est à l'origine de la mise en place d'un niveau d'inondation secondaire, interne au système d'endiguement. Il s'agit d'une bande terrestre de largeur variable (quelques mètres à quelques dizaines de mètres), les zones les plus développées correspondant à

Tableau 2.4 - Les unités terrestres internes au système d'endiguement datant de la phase d'incision des années 1970

(d'après les données figurant dans Didier, 1994a ; Didier, 1994b ; Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel et al., 1996).

Localisation	Altitude approximative de la forme (/ niveau moyen de l'eau)	Nature de la couverture végétale	Âge approximatif de la végétation
Flanc et sommet de la digue	3 mètres et plus	<u>Forêt de transition</u> riche en essences collinéennes (<i>Acer campestre</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Tilia parvifolia</i> , <i>Robinia pseudacacia</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>)	50 ans et plus
Base de la digue et partie supérieure des anciens bancs	2-3 mètres	<u>Forêt de bois dur</u> (<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Ulmus minor</i>)	30 ans
Bordure latérale des anciens bancs		<u>Forêt de bois mixtes</u> (<i>Alnus incana</i> dominant, infiltré par <i>Acer pseudoplatanus</i> et <i>Fraxinus excelsior</i>)	20-25 ans

Tableau 2.5 - Les unités terrestres des îles récentes colonisées par la végétation pionnière et en cours d'exhaussement rapide

(d'après les données figurant dans Didier, 1994a ; Didier, 1994b ; Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel et al., 1996).

Localisation	Altitude approximative de la forme (/ niveau moyen de l'eau)	Nature de la couverture végétale	Âge approximatif de la végétation
Banc récent végétalisé	0,2 à 1 mètre	<u>Fourrés de bois tendre et dense couverture d'herbacées</u> Saussaie à <i>Salix alba</i> dominante ; communauté pionnière d'herbacées à <i>Phalaris arundinacea</i> et <i>Calamagrostis littorea</i>	moins de 15 ans
Banc vif mobile	Immersion pour des débits inférieurs à 200 m ³ .s ⁻¹ ; lente migration de la forme vers l'aval	<u>Banc nu</u> présence ponctuelle de quelques touffes d' <i>Agrostis stolonifera</i>	-

d'anciens bancs latéraux déconnectés du chenal lors de la phase d'incision. Ces espaces dominent le chenal de 2 à 4 mètres, à la fois parce que le lit s'est approfondi, mais aussi parce qu'ils se sont exhausés par dépôts de limons de débordement.

Ces nouveaux espaces terrestres sont actuellement occupés par deux types de formations arborées : a) les zones les plus proches du cours d'eau et dominant le chenal d'environ 1,50-2,00 mètres sont couvertes d'une forêt de bois tendre où dominant l'aulne blanc (*Alnus incana*) et le saule blanc (*Salix alba*) ; b) les zones topographiquement les plus élevées (+3 m, parfois +4 m) sont couvertes d'une frênaie à *Quercus robur*. En raison de la rapidité de l'incision et de l'abaissement de la nappe phréatique qui en est résulté, les stades de végétation se sont suivis de manière accélérée sur ces espaces gagnés par la rivière. Aux communautés pionnières essentiellement composées de fourrés de saules (*Salix alba*, *S. Triandra*) ont rapidement succédé des formations arborées dominées par le saule blanc (*Salix alba*) et l'aulne blanc (*Alnus incana*). L'approfondissement rapide du

chenal et la réduction des fréquences de submersion des espaces terrestres ont artificiellement accéléré le passage des bois tendres à la forêt de bois dur, dont les principales espèces représentées sont le frêne (*Fraxinus excelsior*) et le chêne rouvre (*Quercus robur*). Sur le flanc interne et le sommet des digues, on note la présence de communautés qui assurent la transition avec les peuplements de l'étage collinéen avec *Acer Campestris*, *Acer pseudoplatanus*, *Tilia parvifolia*, *Robinia pseudacacia*, *Fraxinus excelsior* (Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel et al., 1996) .

b) Depuis le début de la décennie 1980, on assiste à la fixation des bancs vifs qui fonctionnaient dans le chenal pendant la période d'incision. De ce fait, les bancs de graviers latéraux alternés tendent à se transformer en îles, les dernières formes vives qui subsistent, concentrées entre les ponts de Goncelin et de Tencin, étant largement déconnectées de la berge. Une deuxième vague de végétalisation a conduit à la fixation des bancs latéraux alternés, d'abord par la végétation herbacée, puis, depuis environ 10 ans, par des fourrés de bois tendres. Cette

nouvelle génération d'îles est soumise à une évolution particulièrement rapide. La sédimentation y est très forte (plusieurs décimètres par an), le plus souvent après seulement quelques heures d'inondation annuelle (voir P2, § 3.3 et 3.4). C'est pourquoi il n'est pas rare d'observer des îles perchées d'environ 2 mètres au dessus des lignes d'eau courantes et pourtant séparées de la berge par un chenal permanent.

Les dépôts de sédiments fins, dont l'Isère est un très gros pourvoyeur, jouent un rôle fondamental dans le développement végétal. La sédimentation sur les bancs de gravier à fleur d'eau amorce la phytostabilisation en maintenant des conditions d'humidité favorables à la germination des graines, puis au développement des plantules. Une fois installées, les communautés pionnières très denses ralentissent les flux hydriques et peignent les sédiments fins. Les processus de sédimentation et de végétalisation constituent alors une boucle de rétroaction positive où les facteurs abiotiques (sédimentation) et biotiques (colonisation végétale) conduisent en quelques années à l'exhaussement de la forme et à la mise en place d'une forêt de saule blanc et d'aulne blanc, dans le lit lui-même. L'approfondissement de la nappe phréatique, la diminution des contraintes de submersion et le voisinage de semenciers sur les digues favorisent ensuite la germination d'espèces de bois dur (frêne, érable, robinier...) en des lieux où on ne les trouvait pas jusqu'alors. En quelques années, des arbres atteignant plusieurs décimètres de diamètre se développent dans le lit de la rivière et opposent une résistance considérable à l'écoulement.

1.1.4) Les causes et les enjeux du développement végétal

Les causes de la végétalisation du lit mineur sont complexes, car elles agissent de manière combinée. Nous avons essayé de les classer par ordre d'importance décroissante. Certaines d'entre-elles sont formulées à simple titre d'hypothèse et des études sont en cours pour tenter de les vérifier :

a) La réduction des mouvements de charge de fond enregistrée depuis le début de la décennie 1980 est très certainement la cause principale de la végétalisation du chenal, les autres éléments n'étant au mieux que des facteurs aggravants. Celle-ci est à mettre en relation avec la diminution drastique de la fourniture sédimentaire au moment où les conditions hydrauliques sont réunies pour que le transport des sédiments se produise. S'appuyant sur des expérimentations de laboratoire réalisées en *flume*, Dietrich, Kirchner *et al.* (1989) ont montré que la granulométrie du lit devient progressivement plus grossière lorsque la fourniture locale de charge de fond provenant de l'amont est moindre que la capacité de l'écoulement à transporter cette charge : ce phénomène est étu-

dié sous la dénomination de pavage par les spécialistes des transports solides (Richards & Clifford, 1991). Comme l'indiquent Dietrich, Kirchner *et al.*, (1989), cette réduction de la fourniture cause une modification des formes du chenal : elle induit également le confinement progressif du transport actif à une étroite bande de granulométrie plus fine, localisée en milieu de chenal : de part et d'autre de cette étroite bande centrale, le lit est plus grossier et nettement moins actif (fig. 2.4).

Dans le cas de l'Isère, l'engorgement du lit en matériaux grossiers au cours de la première moitié du XX^e siècle conduisait à une situation de fort transport dès que les conditions de mise en mouvement de la charge étaient réunies (voir P3, § 2.3). Le lit, sur toute sa largeur, participait à la fourniture de charge et les bancs alternés migraient lentement vers l'aval au rythme des mouvements de particules. La mobilité de la charge et la fréquence de sa mise en mouvement constituaient alors des conditions écologiques très défavorables pour l'installation d'une végétation permanente. Les extractions de la période 1949-1972 ont profondément altéré les conditions de recharge. La fixation des bancs latéraux alternés qui s'est produite au cours des années 1980, si l'on se réfère au modèle de Dietrich, Kirchner *et al.* (1989), traduit le pavage des bords du chenal, les transports solides étant confinés en milieu de lit. Le fait qu'actuellement les derniers bancs vifs soient très nettement déconnectés des rives est un sérieux argument en faveur de ce type de fonctionnement. La fixation des formes latérales, et la diminution des contraintes mécaniques qui en ont résulté, ont rendu possible l'installation de communautés végétales pionnières sur les bancs, puis l'exhaussement conduisant à la formation d'îles.

b) Il est possible que l'hydrologie de crue des dernières décennies ait été un facteur aggravant. Les travaux de Pupier (1996) ont montré que les aménagements hydroélectriques étaient sans effet sur l'occurrence des crues. Cependant, EPTEAU S.A. (1996), reprenant la liste des crues du XIX^e et du XX^e siècle, indique que la dernière crue de fréquence de retour supérieure à 50 ans ($Q_{50} = 1150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) date de 1859. Il est possible que l'absence de fortes crues sur l'Isère depuis plusieurs décennies limite les processus de destruction des îles et prolonge leur durée de vie. Au cours de la période 1991-1996, les observations de terrain ont montré que les processus d'érosion affectant les îles de l'Isère demeuraient très limités, y compris pour un événement supérieur à la crue décennale ($813 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en novembre 1992).

La végétation, elle-même, joue un rôle majeur pour la préservation des formes fluviales vis-à-vis des crues courantes (Smith, 1976 ; Hickin, 1984 ; Bergeron & Roy, 1985). Le dense tapis d'*Agrostis stolonifera* et de *Phalaris arundinacea* implanté sur les berges des îles

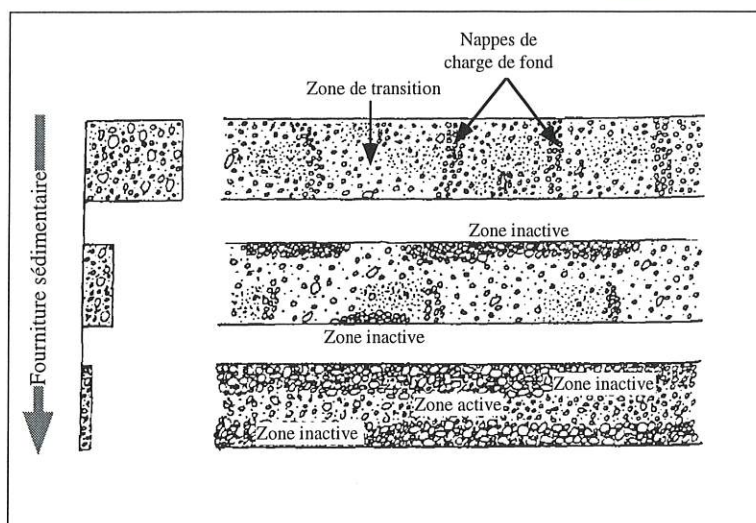


Figure 2.4 : Evolution de l'activité des fonds avec la diminution de la fourniture sédimentaire du chenal lors de phases de transport solide
(Source : Dietrich, Kirchner et al., 1989, modifié).

(voir fig. 2.38, bas) oppose, *via* son appareil racinaire, une résistance particulièrement efficace aux processus érosifs et assure la pérennité de la géoforme. Les mesures effectuées par Petit (1988) sur une petite rivière à charge caillouteuse ont permis d'établir que l'érosion des limons compactés de la plaine alluviale se produisait dès la vitesse de $0,70 \text{ m.s}^{-1}$, alors qu'il fallait qu'elle soit près du double ($1,3 \text{ m.s}^{-1}$) pour parvenir à éroder une surface couverte d'un dense tapis herbacé. Actuellement, nous sommes dans l'incapacité de prévoir comment les îles fortement exhausées et végétalisées occupant le lit de l'Isère résisteraient à une forte crue.

c) Depuis 1980, les marnages quotidiens de 0,50 à 1,00 mètre résultant du fonctionnement de l'usine hydroélectrique du Cheylas (dérivation Arc-Isère) pourraient avoir facilité le processus de germination de la végétation. Se produisant au printemps et en début d'été, ils correspondent à une période où les eaux sont fortement chargées en matière en suspension. L'alternance répétée de phases d'immersion et d'émersion des bancs de gravier pourraient avoir accru la fréquence des événements pour lesquels les conditions de vitesses sont favorables à la sédimentation des limons, améliorant ainsi les conditions de germination des graines. Cette hypothèse est confortée par une série d'observations faites sur le terrain : les sondages à la tarière révèlent de manière fréquente que les 2-3 premiers centimètres de dépôts surmontant la structure caillouteuse du banc sont constitués de limons ; ils sont fréquemment surmontés de sables qui traduisent des conditions hydrodynamiques plus fortes, indépendantes du fonctionnement de l'usine. Des observations complémentaires sont en cours pour tenter de vérifier le bien fondé de cette hypothèse. Quoi qu'il en soit, une telle cause, si elle s'avère significative, apparaît comme mineure ; en effet, les bancs localisés dans la Combe de Savoie, en amont de la restitution du Cheylas, connaissent eux-aussi une végétalisation intense, alors que les marnages liés aux fonctionnements des équipements hydroélectriques sont nettement moins prononcés.

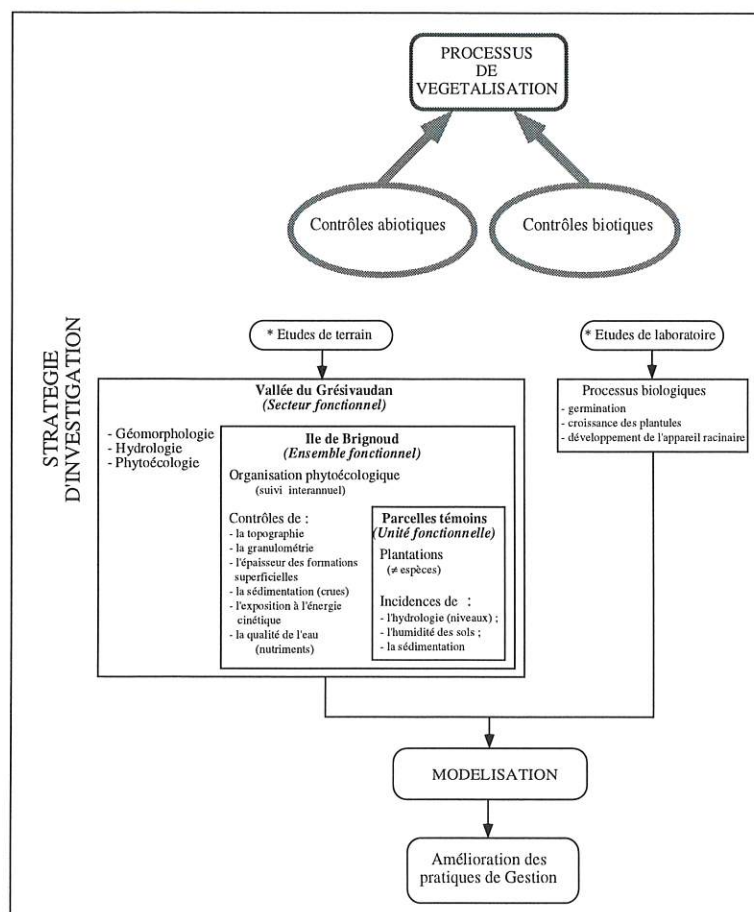
Le développement de la végétation alluviale dans le lit de l'Isère n'est pas un événement anecdotique ; de notre point de vue, il s'agit même de l'un des enjeux majeurs de la gestion des cours d'eau pour la prochaine décennie. Les récentes études réalisées sur le Drac et l'Ouvèze (Piégay, 1995 ; Peiry & Nouguié, 1994 ; Peiry & Vivian, 1994) et les événements qui se sont produits sur les rivières du sud de la France depuis 1993 (Durance, Arc d'Aix-en-Provence...) ont montré quel pouvait être l'effet de fortes crues sur la végétation colonisant le lit mineur des cours d'eau. Les grands arbres interviennent de trois façons : 1) en place, ils augmentent la rugosité du chenal et exhausent les lignes d'eau. La hauteur atteinte par les crues peut alors largement dépasser les niveaux calculés par la modélisation hydraulique pour un lit libre et causer des submersions de digues non prévues ; 2) en phase de déchaussement, ils sont à l'origine de violents tourbillons qui surcreusent profondément les fonds ou les berges ; ils peuvent ainsi fragiliser les systèmes de protection contre l'inondation ; 3) arrachés et massivement emportés, ils sont susceptibles de constituer de volumineux embâcles que les ponts peuvent bloquer, avec de forts risques de dégâts pour les villes situées en aval. L'étude des processus de végétalisation du chenal constitue donc une nécessité, non seulement vis-à-vis de la protection contre les crues, mais du point de vue des perspectives de gestion que son développement va inévitablement générer dans les prochaines années.

1.2) Les stratégies de recherche développées sur l'Isère

1.2.1) L'approche interdisciplinaire

Le constat de la végétalisation du chenal de l'Isère a conduit l'équipe interdisciplinaire grenobloise à se questionner sur les modalités spatio-temporelles de la végétalisation et les facteurs biotiques et abiotiques qui la

Figure 2.5 - Schématisation des stratégies interdisciplinaires de recherche mises en œuvre sur l'Isère.



contrôlent. La compréhension des mécanismes du développement végétal a imposé que l'on travaille sur un emboîtement d'échelles spatio-temporelles ; il en est résulté un schéma de recherche complexe en interaction avec les autres disciplines concernées (géomorphologie et écologie de terrain, écologie de laboratoire) et faisant fortement appel à l'analyse des processus et à la quantification (fig. 2.5). Les études ont été programmées à trois niveaux spatio-temporels : a) l'échelle de la zone d'étude (le *secteur fonctionnel* décrit par Amoros & Petts, 1993) que représente ici l'ensemble de la vallée du Grésivaudan et le temps séculaire ; b) l'échelle du site d'étude (*ensemble fonctionnel*), une île de l'Isère d'environ 7500 m² étant instrumentée depuis 1994 ; c) l'échelle de la station d'étude (*unité fonctionnelle*), l'étude consistant en des mesures ponctuelles et un suivi inter-annuel. Des relais de méthodes, fondés essentiellement sur des techniques de mesure et d'analyse de terrain, ont été mis en place :

a) à l'échelle de la zone d'étude, les approches géomorphologiques et phytoécologiques historiques, que l'équipe grenobloise a développées depuis plusieurs années, sont très largement utilisées ; elles visent à déterminer ce qu'était la dynamique de référence bio-géomorphologique de la vallée du Grésivaudan et à analyser les mécanismes de l'impact ayant conduit à la modification du fonctionnement de l'hydrosystème. Les investi-

gations consistent également à réaliser une étude approfondie du terrain, basée sur des techniques rapides de collecte des données et de traitement statistique multivarié (à l'image de ce que nous avons présenté dans la Partie 1, § 3.3) ;

b) à l'échelle du site d'étude, les méthodes consistent à étudier l'organisation de la végétation et la dynamique de la régénération végétale (suivi inter-annuel) et à suivre par la mesure un certain nombre de paramètres abiotiques, à différents pas de temps (voir tab. 2.17) : topographie, granulométrie, sédimentation, humidité des sols, hydrométrie et inondation, teneur de l'eau en nutriments...

c) à l'échelle de la parcelle, l'étude consiste à réaliser des plantations de différentes espèces et à mesurer en continu un certain nombre de paramètres hydrologiques et sédimentologiques. De manière à compléter les études de terrain, des expérimentations en laboratoire et sous serre sont également mises en œuvre, notamment sur la germination et la croissance des plantules (développement foliaire et de l'appareil racinaire). La quantification sur le terrain et en laboratoire a pour objectif d'identifier et de modéliser les conditions favorables à l'établissement et à la croissance des espèces ripariales.

La finalité de l'étude est de fournir des résultats permet-

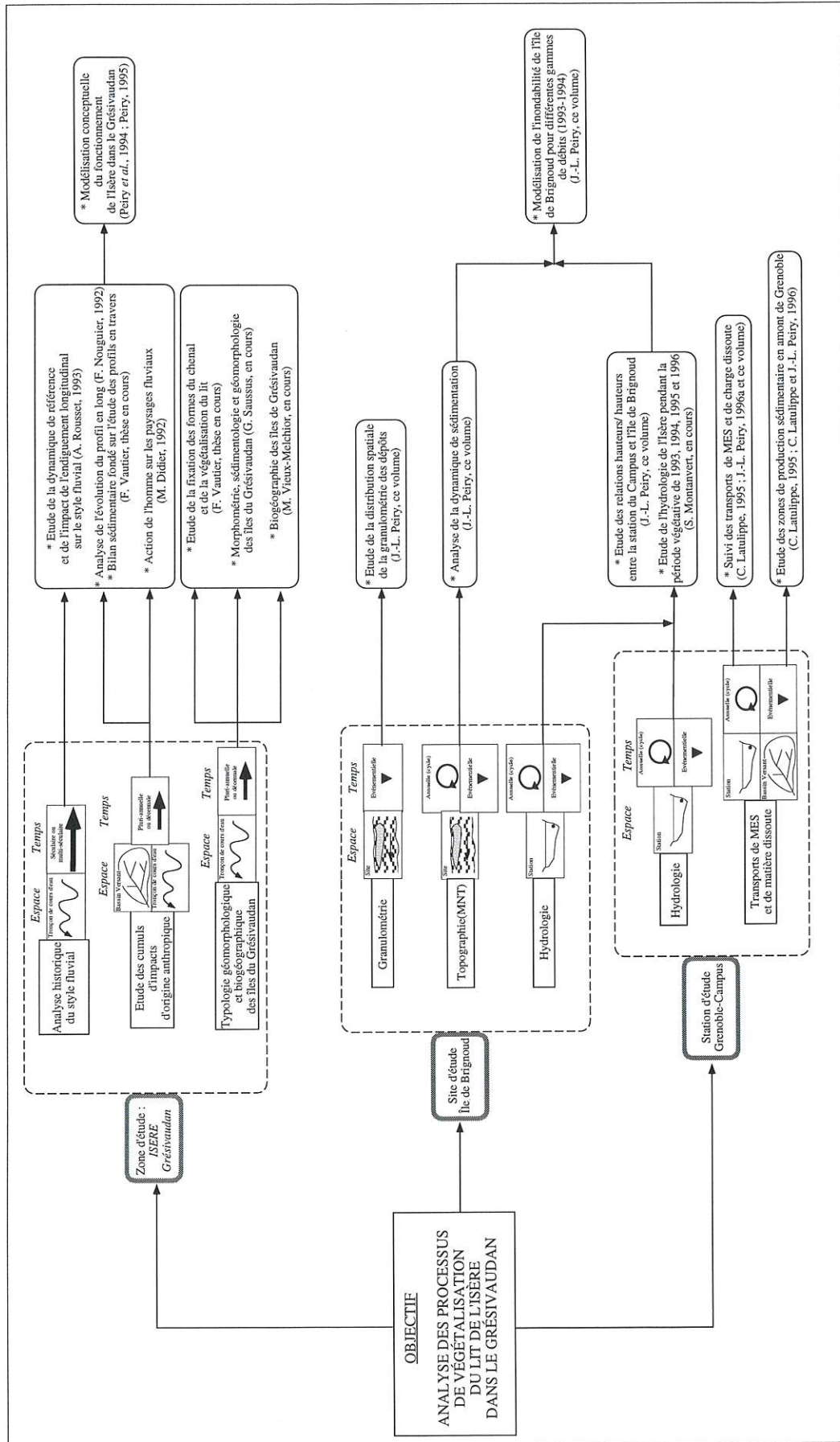


Figure 2.6 - Diagramme de l'organisation de la recherche en géomorphologie fluviale sur l'Isère en amont de Grenoble (1er janvier 1997)

tant l'amélioration de la gestion de la végétation alluviale. L'objectif est de mieux maîtriser les effets des techniques d'essartage sur les processus d'évolution de la végétation, mais aussi de voir s'il n'est pas possible de mettre en place des procédés palliatifs permettant d'en réduire la fréquence en jouant sur les paramètres abiotiques de contrôle (hydrologie, transports solides...).

1.2.2) Les stratégies de recherche propres à l'hydrologie et la géomorphologie fluviale

Les stratégies de recherche développées en hydrologie et géomorphologie sont synthétisées sur la figure 2.6 ; les pictogrammes figurant au droit de chaque thématique de recherche permettent de situer le niveau d'emboîtement spatio-temporel de chacune des études entreprises. Depuis 1991, les travaux d'étudiants que nous avons pour la plupart dirigés¹ ont été préférentiellement orientés vers la problématique de la végétalisation du chenal (fig. 2.7). Trois niveaux spatio-temporels sont en cours d'analyse :

1) La première échelle correspond à l'ensemble de la vallée du Grésivaudan (zone d'étude ou secteur fonctionnel). Les recherches ont pour objectif : a) d'étudier au pas de temps séculaire quelle était la dynamique géomorphologique de l'Isère et comment les aménagements anciens ont contribué à la modifier (Rousset, 1993 ; Caussin, 1995) ; b) d'analyser, au pas de temps décennal, les mécanismes des cumuls d'impacts d'origine anthropique, sous l'effet des multiples changements ayant affecté le chenal (endiguement, extractions etc.) (Didier, 1992 ; Nouguié, 1992 ; Didier, 1994a ; Didier, 1994b). Ces études ont une importance majeure, car elles ont pour finalité de réaliser une modélisation conceptuelle du fonctionnement de l'Isère (Peiry, Salvador *et al.*, 1994 ; Peiry, 1995) dont l'objectif est de déterminer quel

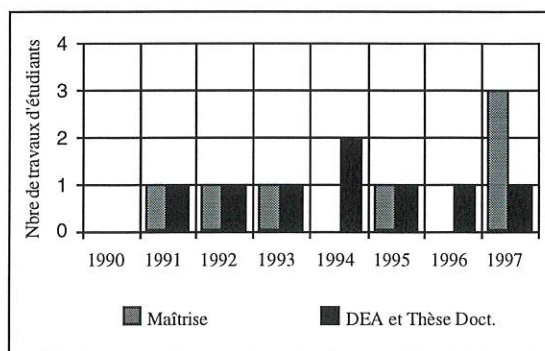


Figure 2.7 - Distribution annuelle des travaux d'étudiants géographes portant sur la dynamique fluviale et la biogéographie des îles de l'Isère dans le Grésivaudan.

fut l'enchaînement des processus conduisant à la végétalisation et quel est le poids des héritages morphodynamiques sur la dynamique fluviale contemporaine (voir P3, § 6.2) ; c) de dresser une typologie géomorphologique et biogéographique des îles du Grésivaudan, fondée sur l'analyse diachronique des photographies aériennes et une analyse approfondie du terrain (Saussus, 1997 ; Vieux-Melchior, 1997 ; Vautier, thèse de Doctorat en cours).

2) Avec la deuxième échelle (site d'étude), on entre dans le domaine du suiti géomorphologique et hydrologique quantitatif fin d'une île de l'Isère en voie de végétalisation (voir P2, § 3.1 et suiv.). L'objectif est ici la mise en place d'une base de données spatialisée suivie sur plusieurs années, afin d'établir les relations existant entre le processus de régénération végétale et les variables abiotiques qui la contrôlent (topographie, sédimentation et exhaussement de la forme, distribution spatiale de la granulométrie des dépôts...). Le réseau de capteurs installé sur l'île alimente en continu la base de données en mesures de hauteur d'eau et d'humidité des sols, pendant les périodes où il est mis en service (essentiellement pendant la durée de la période végétative). Ces données sont fondamentales pour la modélisation spatiale des déplacements d'eau dans le sol (Richards, Hughes *et al.*, 1996), de l'inondabilité (voir P2, § 3.3), de la sédimentation et de l'exhaussement de la forme (voir P2, § 3.4) et celle des liens entre ces variables et la régénération des ligneux (paliers de régénération, survie ou mortalité des plantules selon l'hydrologie et l'enfouissement de la période végétative...).

3) La station hydrométrique de Grenoble-Campus constitue la dernière échelle spatio-temporelle. L'enregistrement des mesures de hauteur d'eau et du débit fournit une référence de très bonne qualité pour caler les mesures hydrométriques de terrain, et étudier les relations liant la distribution de la hauteur d'eau pendant la période végétative et la plus ou moins bonne réussite des processus de régénération des ligneux (Montanvert, 1997). La station est aussi équipée pour suivre certains paramètres de la qualité physico-chimique de l'eau de l'Isère (température, conductivité, concentration en MES) ; il devient ainsi possible de quantifier les transits de matière dissoute et de matière en suspension. L'intérêt de la quantification de ces flux est indéniable vis-à-vis du processus de végétalisation, à la fois parce qu'ils constituent des sources de nutriments pour les végétaux, mais aussi parce qu'ils permettent d'expliquer certains échecs de la colonisation végétale (facteurs limitants) que l'on observe sur l'île témoin de Brignoud. L'analyse de la dynamique des flux de matière dissoute et en suspension constitue également une problématique de recherche en soi, parce qu'ils sont intégrateurs des processus de fourniture sédimentaire se produisant à l'échelle du bassin

¹ A l'exception du DEA et de la thèse de Doctorat de M. Didier (1994) dont les directeurs étaient H. Vivian et G. Pautou.

versant de l'Isère. Ils posent aussi le problème de la localisation spatiale des principales zones de production de la matière dissoute et de la matière en suspension (Latulippe, 1995 ; Latulippe & Peiry, 1996 ; Peiry, 1996, Peiry, ce volume, P2, § 2.2 et 2.3).

Ce sont les résultats des mesures effectuées à l'échelle de la station et du site d'étude qui sont développés dans les deux chapitres suivants. Les objectifs des mesures sont : 1) d'acquérir des données physiques pour alimenter une base de données environnementale que l'on pourra confronter aux résultats des études biologiques sur la régénération végétale (chap. 2) ; 2) de construire un modèle spatial d'inondabilité sur l'île de l'Isère que l'on a instrumentée, celui-ci étant réactualisé chaque année pour prendre en compte l'exhaussement de la forme fluviale (chap. 3). Ce modèle sera utilisé ultérieurement pour analyser la dynamique annuelle de la régénération végétale suivie par les collègues écologues.

CHAPITRE 2

L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES FLUX DE MATIÈRE DISSOLTE ET DE MATIÈRE EN SUSPENSION

- 2.1) Les techniques et protocoles de mesure
- 2.2) La dynamique de la matière dissoute totale (MDT)
- 2.3) La dynamique de la matière en suspension (MES)
- 2.4) Discussion des résultats et perspectives

Résumé du chapitre 2

Depuis le 23 mars 1994, la mise en place progressive d'un échantillonneur automatique, d'une sonde mesurant la température et la conductivité électrique de l'eau, et de turbidimètres à infrarouge permet d'étudier, au pas de temps de la demi-heure, la dynamique des flux de matière dissoute totale (MDT) et de matière en suspension (MES) transitant sur l'Isère à Grenoble. Plus de trois ans de fonctionnement, pour les mesures les plus anciennes, ont révélé toute la difficulté de suivre en continu la qualité physico-chimiques d'un cours d'eau. L'encrassement rapide du capteur de conductivité impose une maintenance particulièrement rigoureuse et a nécessité l'établissement d'un protocole de correction des données. Pour la MES, la confrontation des résultats issus des prélèvements et de la mesure optique a révélé une corrélation relativement satisfaisante ($r^2 = 0,87$). Un problème plus difficile à régler et celui de la représentativité de l'unique point de mesure par rapport à l'ensemble de la section d'écoulement, les transports de MES étant soumis à des phénomènes de ségrégation verticale. Des profils en travers de concentration devront être dressés pour évaluer cette représentativité.

L'étude de la variation annuelle de la conductivité indique que la MDT suit un cycle saisonnier, la période hivernale étant celle où les écoulements sont les plus minéralisés. Les chroniques horaires de conductivité révèlent également l'existence de phénomènes particuliers. Il semble par exemple, que la baisse de production d'énergie de pointe pendant les week-ends régularise non seulement les débits, mais aussi les flux de matière dissoute ; de très fortes variations accidentelles de la conductivité (valeurs instantanées dépassant $1100 \mu\text{S.cm}^{-1}$) se produisent au cours de l'été, probablement à l'occasion d'orages touchant des bassins-versants où la dissolution des gypses est intense, comme le laisse supposer la forte teneur en sulfates des écoulements. La quantification de la charge spécifique en MDT permet d'établir qu'ils se situent dans une fourchette de 180 à $450 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, ce qui fait de l'Isère en amont de Grenoble une rivière relativement chargée en sels dissous.

Le suivi de la MES a fait l'objet de soins particuliers. Les chroniques journalières de la concentration ont révélé sa forte variabilité, une douzaine d'événements ayant dépassé 10 g.l^{-1} , les plus forts avoisinant 20 g.l^{-1} . La quantification des transports de MES indique le rôle fondamental de la fusion nivale, puisque chaque année une grande partie du volume annuel transite au cours du printemps. Le rôle des crues est également mis évidence, les quantités transportées pouvant être considérables (300 à 500.000 t.j^{-1}). Sur la base des trois premières années de mesure, au cours desquelles les débits ont été très contrastés, le transport annuel s'inscrit dans une fourchette de $1,2$ à $6,5 \text{ Mt}$ (215 à $1200 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), ce qui fait de l'Isère un cours d'eau fortement chargé en MES. La corrélation entre la concentration et le débit est de très médiocre qualité ; il semble qu'une analyse prenant en compte les conditions météorologiques à l'origine des flux de MES permette d'améliorer la qualité de la relation. L'étude des transports solides est complétée par des travaux visant à déterminer l'origine de la MES. Ils ont été conduits sur 43 sous-bassins de l'Isère en amont de Grenoble. Se fondant sur des critères géologiques, biogéographiques et morphométriques, ils ont permis de localiser quelles pourraient être les principales zones susceptibles de produire des MES. Cette première discrimination, menée par des méthodes indirectes, devra être validée par des études de terrain complémentaires.

La finalité de ces études sur la qualité physico-chimique des écoulements fluviaux est d'alimenter en mesures de terrain une base de données environnementales. Celle-ci devrait permettre de dégager quels sont les principaux facteurs abiotiques qui contrôlent la germination des ligneux dans le lits fluviaux, et peut-être d'envisager des modalités de gestion qui les intègrent.

Le flux d'eau, de matière dissoute et de matière en suspension sont des facteurs abiotiques qui jouent un rôle fondamental sur le développement de la végétation. Les variations du niveau de l'eau pendant la période végétative, et en particulier de la profondeur de la nappe phréatique, conditionnent la mise en place des communautés végétales (Pautou, 1984) ; les sels dissous dans les écoulements fluviaux et circulant dans les bancs alimentent en nutriments la végétation alluviale qui s'y développe (Foussadier & Joud, 1996) ; les dépôts de matières en suspension jouent le double rôle de facteur aggravant, en permettant le maintien de conditions d'humidité favorables pour la germination lorsqu'ils se mettent en place sur des substrats très filtrants (graviers et galets), et de facteur limitant, lorsqu'une crue enfouie sous plusieurs centimètres les plantules de l'année. Les mesures qui ont été faites à la station de Grenoble-Campus depuis plus de trois ans visent à évaluer le rôle de chacun de ces facteurs sur les processus de germination et de développement des plantules, le long des rives de l'Isère. Ayant de les confronter aux données phyto-écologiques, il convient d'examiner quelle est leur signification propre, puisqu'ils sont intégrateurs de processus englobant l'ensemble du bassin-versant de l'Isère situé en amont de Grenoble.

2.1) Les techniques et protocoles de mesure

2.1.1) La mesure et ses difficultés

A) La mesure du débit

Depuis le mois de mars 1993, une station hydrométrique fonctionne sur le site du Campus à Grenoble. Gérée par l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble (ENSHMG), des capteurs fournissent toutes les demi-heures les valeurs de hauteur et de température de l'eau. Plusieurs dizaines de jaugeages ont été effectués depuis la mise en service de la station, notamment dans le cadre des travaux pratiques des étudiants de l'école d'hydraulique. De ce fait, la relation hauteur-débit pour une large gamme de situations hydrologiques a pu être établie avec une grande finesse ; par ailleurs, les fréquents jaugeages permettent de suivre l'évolution des fonds, élément essentiel pour déterminer avec une bonne précision les débits à partir des hauteurs. Les données nous sont transmises à la fin de chaque mois par le Pr. Ph. Bois qui a en charge la gestion de la station, sous la forme de deux fichiers ; sur le premier figurent les données au pas de temps d'une demi-heure et sur le second les valeurs moyennes journalières.

B) La mesure de la charge dissoute et de la matière en suspension

Nous avons pris en charge l'équipement de la station du Campus pour l'étude des flux de matière dissoute totale (MDT) et de matière en suspension (MES) (fig. 2.8). L'installation des appareillages a été très progressive :

a) Depuis le 23 mars 1994, l'installation d'un préleveur automatique ISCO 2900 permet de faire deux prélèvements d'eau quotidiens de 1/2 litre, à 0h00 et 12h00 TU², à partir d'un point dont l'altitude est fixe (voir fig. 2.8). L'échantillonneur est équipé d'un panier de 24 flacons de 500 ml, ce qui autorise une autonomie de 12 jours. Le mélange d'eau et de sédiments est aspiré à travers un tuyau de 1/4" (0,64 cm) de diamètre intérieur et de 18 mètres de longueur, la vitesse d'aspiration étant d'environ 0,80 m.s⁻¹. Avant et après chaque cycle de prélèvement, le préleveur ISCO assure la purge du tuyau par refoulement. Les mesures de concentration en MES sont effectuées au laboratoire de géomorphologie de l'Institut de Géographie Alpine ; on procède par filtration-pesée sur des membranes de 0,45 µm. A partir de novembre 1994, la concentration en MDT a été indirectement obtenue par une mesure de la conductivité sur ces mêmes échantillons biquotidiens ;

b) Depuis le mois de mai 1995, l'installation d'un conductivimètre Campbell 247 immergé à proximité de la crépine de pompage permet une mesure de la MDT et de la température de l'eau en continu. Positionné de manière fixe dans le chenal au bout d'un tube métallique de 50 mm de diamètre, le capteur est amovible et directement accessible pour toutes conditions de débit à partir d'un regard (voir fig. 2.8) ; cela facilite la maintenance de la sonde par brossage à l'eau savonneuse, une forte fréquence d'intervention étant l'élément clé d'un suivi de qualité. La mesure est effectuée avec un pas de temps beaucoup plus fin que précédemment (toutes les 5 mn), la moyenne de 6 mesures consécutives étant mémorisée chaque 1/2 heure sur une centrale d'acquisition Campbell CR10. D'une capacité de 30.000 valeurs, celle-ci corrige automatiquement la conductivité de l'effet de température et d'ionisation ; elle est actuellement programmée pour stocker la conductivité brute, la température de l'eau et la conductivité corrigée de l'effet de température à 25°C.

c) Depuis le début de mai 1996, un capteur infrarouge de turbidité Partech IR40C, mesure en continu la concentration en MES des écoulements lorsque celle-ci demeure inférieure à 2 g.l⁻¹³. Celui-ci a été calibré en laboratoire, sur les sédiments en suspension provenant de plusieurs crues de l'Isère. Comme pour la sonde de conductivité, le turbidimètre est positionné à l'extrémité

² Le choix des heures de mesure est purement arbitraire, la seule contrainte étant de les séparer de 12 heures.

³ Sur l'Isère à Grenoble, une concentration de 2000 mg.l⁻¹ n'a été dépassée que pour environ 15 % des mesures de concentration effectuées en 1994.

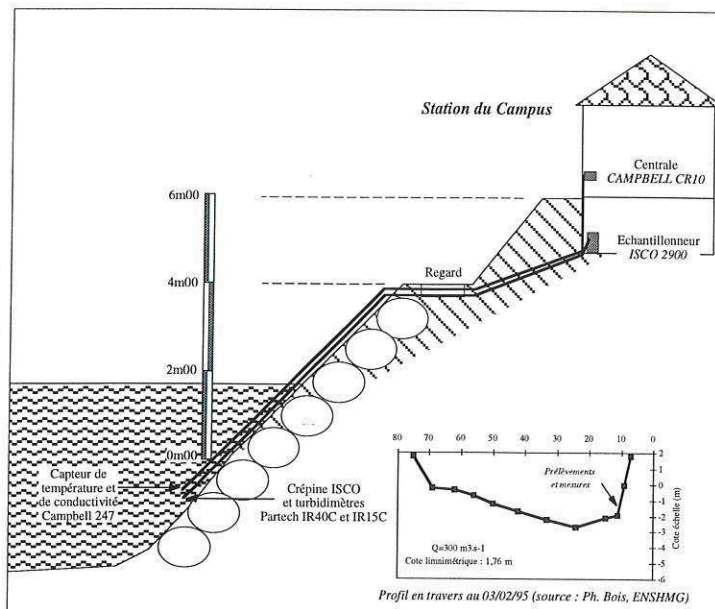


Figure 2.8 - Station de Grenoble-Campus ; localisation des appareillages de mesure et des capteurs
(Source : Peiry, 1996, modifié)

d'un tube PVC de gros diamètre, en un point dont l'altitude est indépendante du débit, sa position étant toute proche de celle de la crépine du préleveur automatique. Son accessibilité par le haut quelle que soit la hauteur d'eau autorise ici encore une maintenance aisée ; celle-ci est de fréquence hebdomadaire. De manière à mieux cerner ce qui se passe pour des concentrations plus fortes, épisodes majeurs du transport des MES, un second turbidimètre Partech IR15C pouvant mesurer des concentrations de l'ordre de 10 à 15 g.l⁻¹ a été installé au cours du printemps 1997. Il devrait permettre de mesurer en continu la presque totalité du spectre des concentrations de l'Isère. Après une phase de test, le couplage des deux turbidimètres devrait rendre possible la diminution de la fréquence des prélèvements. Des pompes seront cependant maintenues avec une fréquence moindre pour contrôler les valeurs fournies par les turbidimètres. Par ailleurs, le préleveur automatique pouvant être piloté par la centrale d'acquisition Campbell, des études beaucoup plus fines (pompes horaires) portant sur des épisodes de forte concentration pourront être entreprises.

C) Les difficultés de la mesure

La mesure en continu de variables physico-chimiques, sur l'Isère comme d'ailleurs sur d'autres cours d'eau, pose de sérieuses difficultés méthodologiques et techniques (A.I.H.S., 1981 ; EDF/DEPT/DTG, 1993). De très nombreux protocoles et méthodes de mesure sont mis en œuvre et peuvent être recensés dans la littérature spécialisée (Horowitz, Elrick *et al.*, 1992 ; Olive & Rieger, 1992 ; Vivian & Quinton, 1993 ; Gurnell, Brown *et al.*, 1994 ; Moody & Meade, 1994 ; O'Riordan, Maldiney *et al.*, 1996...) Si on exclut les problèmes spécifiques de l'évaluation des transports par charriage qui sont en dehors des préoccupations de ce mémoire, la mesure en continu de la charge dissoute et de la charge en suspension présente deux principaux types de problèmes (Amin, Chorley *et al.*, 1993) :

1) Il est difficile de réaliser des mesures absolues précises, en raison de l'encrassement rapide des capteurs. L'expérience acquise sur l'Isère montre que le développement phytoplanctonique constitue la principale source de dérive des sondes ; plus surprenant encore, il s'avère que celles-ci constituent un abri pour la faune benthique à certaines périodes de l'année. Sur le conductivimètre, le phytoplancton perturbe la mesure en s'installant sur les électrodes ; sur les turbidimètres, il constitue un gel sur les cellules d'émission et de réception de la lumière infrarouge et fixe les particules transisant en suspension. Cette difficulté peut être en grande partie levée par une maintenance rigoureuse (et de ce fait forcément contraignante !) du matériel et la mise en place de procédures de correction des données (voir P2, § 2.1.2).

2) Il est difficile d'évaluer la représentativité des échantillons prélevés par rapport à ce qui transite réellement. Pour les prélèvements d'eau, par exemple, les conditions de pompage sont imposées par les spécificités techniques du matériel et, de ce fait, ne sont pas maîtrisées. En particulier, les tests réalisés par EDF (EDF/DEPT/DTG, 1993) indiquent que les meilleures conditions de prélèvement sont réalisées lorsqu'on dispose une tubulure de faible diamètre parallèlement à l'écoulement et que la vitesse de pompage est identique à celle du courant ; ce n'est pas le cas à la station du Campus de Grenoble. A ces difficultés purement métrologiques viennent s'ajouter les problèmes de représentativité d'un point de mesure unique alors que les transits se produisent dans une section d'écoulement de plusieurs centaines de m². Ils peuvent probablement être négligés pour la MDT, les circulations secondaires assurant un brassage correct de l'écoulement. En revanche, l'évaluation de la représentativité du point de mesure est essentielle pour les transports de MES, puisqu'il est bien connu aujourd'hui que la concentration varie fortement dans les différentes tranches de l'écoulement, en particulier lors des épisodes de fort transport solide. A cause de

la distribution non-uniforme des MES, Eisma (1993) conseille d'associer la réalisation de profils en travers de concentration à la mesure ponctuelle, de manière à déterminer le degré de représentativité du point de mesure. Sur l'Isère, des tests sur le terrain sont en préparation et devraient être mis en œuvre au cours de l'année 1997. En l'absence de ces éléments, les chiffres des transports de MES proposés dans les paragraphes suivants devront être considérés comme étant entachés d'une erreur possible de 20 %. Deux arguments fondent l'hypothèse d'une tendance à la surestimation des concentrations de la MES sur l'Isère : a) le point de prélèvement est localisé dans une légère concavité du chenal, si bien que la turbulence est forte et assure un brassage efficace de l'écoulement ; b) en hautes-eaux, le point de prélèvement, dont l'altitude est indépendante du niveau de l'eau, est localisé dans le tiers inférieur de l'écoulement où circulent des sédiments transportés en suspension graduée ou saltation (Doeglas, 1946 ; Inman, 1949 ; Passega, 1957) ; les concentrations y sont donc très probablement plus fortes qu'en surface. Toutefois, la forte turbulence de l'Isère en période de fort débit et la très faible granulométrie des éléments transportés (argiles et limons issus de l'altération des schistes) assurent une bonne homogénéisation de l'écoulement et doivent limiter la ségrégation latérale et verticale. En tout état de cause, l'analyse de la distribution des concentrations sur un profil en travers pour différentes conditions de débit devrait permettre de lever ces incertitudes.

2.1.2) La correction et la validation des données de conductivité et de concentration en MES

Du fait de l'encrassement, les capteurs de conductivité et de turbidité dérivent toujours dans le même sens : a) la conductivité tend progressivement à diminuer par rapport à la valeur réelle ; b) la turbidité subit l'évolution inverse avec l'opacification de l'optique ; sauf quelques rares événements, la dérive de cette dernière peut être négligée si l'on assure un nettoyage hebdomadaire des turbidimètres.

A) La correction de la dérive de la conductivité

Une période d'environ un an de test du capteur de conductivité a permis de mettre en place un protocole de maintenance et de correction des données : sauf événement exceptionnel, un *brossage hebdomadaire des électrodes* permet de limiter la dérive à moins de 2,5 %. La valeur de la dérive est systématiquement suivie par une double mesure avant et après le nettoyage du capteur (tab. 2.6). Les mesures ayant montré que la diminution de la conductivité en fonction de la durée d'immersion suit une loi sensiblement linéaire sur une période de 10 à 12 jours, on applique une simple correction linéaire aux données (Peiry, 1996). Par ailleurs, le prélèvement fréquent d'échantillons d'eau et la mesure de leur conductivité en laboratoire permet de régulièrement vérifier que la constante de calibration du capteur placé dans l'Isère n'a pas subi de modification sensible depuis sa mise en service.

B) Confrontation des mesures de concentration en MES par prélèvement et par mesure optique

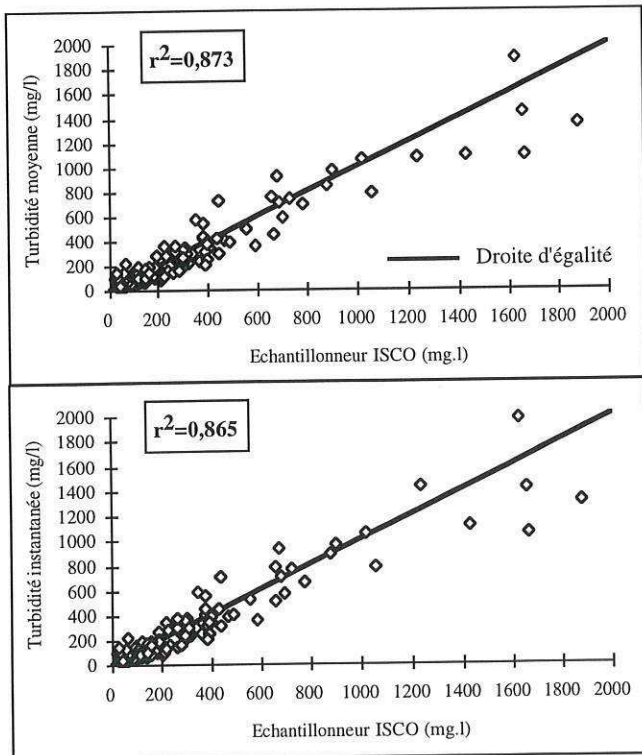
De manière à déterminer si les valeurs fournies par les deux techniques de mesures de la MES sont satisfaisantes, nous avons réalisé une corrélation entre les prélèvements et les mesures optiques (fig. 2.9/A et B). Les résultats du traitement de données montrent un coefficient de détermination relativement satisfaisant de l'ordre de 0,87. Il est difficile de conclure, en raison d'un nombre limité de points pour les fortes valeurs de concentration. L'allure des nuages de points suggère cependant qu'il faudra surveiller attentivement la relation entre les deux techniques de mesure pour les fortes valeurs de concentration, les points ayant tendance à être plus nombreux en dessous de la droite d'égalité. En l'état actuel, nous ne sommes pas capable de déterminer si cela est dû au nombre trop réduit d'observations ou s'il s'agit d'un effet de mesure. S'il s'agit d'un effet de mesure, nous ne sommes pas non plus capable de déterminer s'il s'agit d'une sous-évaluation lors du prélèvement ou d'une surestimation par la mesu-

Tableau 2.6 - Dérive du capteur pour des durées de 6 à 8 jours entre deux nettoyages et facteur de correction appliqué aux données de conductivité.

		Avant nettoyage	Après nettoyage			Temps écoulé depuis le dernier nettoyage		Facteur de correction
Date	Heure (TU)	C (25°C)	C (25°C)	ΔC	$\Delta C/C$ (%)	ΔT (h)	ΔT (j)	Fcorr. ($\mu S/h$)
9/01/96	11h00	533	543	10	1,9	145	6	0,069
15/01/96	13h00	599	614	14,7	2,5	146	6,1	0,101
17/06/96	9h00	433	439	6,1	1,4	147	6,1	0,041
24/06/04	6h30	455	464	9,5	2,1	165	6,9	0,058
20/05/96	7h30	396	399	3,5	0,9	167	7	0,021
4/06/96	7h30	382	390	8	2,1	167	7	0,048
16/02/96	8h00	594	607	13,6	2,3	168	7	0,081
9/11/95	10h15	518	545	27	5,2	170	7,1	0,159
11/06/96	12h00	486	491	5,4	1,1	172,5	7,2	0,031
3/04/66	8h30	582	600	18	3,1	193	8	0,093
11/04/96	9h15	586	595	8,7	1,5	193	8	0,045
28/05/96	8h30	340	343	3,6	1,1	193	8	0,019

MES sur le capteur

re optique. On peut cependant exclure qu'il s'agisse d'un effet de la ségrégation verticale de la MES, les mesures étant faites à la même altitude. Nous ne maîtrisons pas la manière dont les pompages sont exécutés, la procédure étant entièrement sous la dépendance des caractéristiques du matériel utilisé. Par contre, nous pouvons fournir quelques éléments d'explication sur la dispersion du nuage par une analyse critique de la mesure de turbidité. La calibration du capteur a été faite en utilisant les sédiments schisteux très noirs fournis par la Maurienne lors des hautes-eaux et des crues de printemps ; ces dépôts constituent la plus grosse partie des tonnages annuels transportés (Latulippe & Peiry, 1996). La relation liant la tension fournie par la cellule IR et la concentration est presque parfaite ($r^2=0,994$). Cependant, cette relation est probablement légèrement différente lorsque l'origine de la MES diffère. En effet, les mesures optiques sont fortement dépendantes du spectre granulométrique des sédiments transportés et de leur couleur. L'observation des galettes de sédiments déposées sur les membranes filtrantes indique très clairement que certaines crues de l'Isère (en particulier en hiver où lors d'épisodes orageux particuliers) transportent des MES de granulométrie et de couleur différentes de celles ayant servi à calibrer le capteur. Cela engendre inévitablement des inexactitudes dans l'estimation des concentrations par la méthode optique. Ces événements ne constituent cependant pas des conditions fréquentes d'écoulement, ce qui nous a conduit à préférer une calibration se fondant sur les sédiments les plus couramment transportés.



2.2) La dynamique de la matière dissoute totale (MDT)

2.2.1) Chronique de la charge dissoute entre le 24 mai 1995 et le 30 juin 1996.

A) Les variations annuelles de la charge dissoute

Les variations saisonnières ont été étudiées sur la première année de fonctionnement de la mesure en continu à partir de l'analyse de la conductivité moyenne journalière (CJmoy) à la température de référence de 25°C. Avant le mois de juin 1995, CJmoy était la moyenne de deux mesures journalières de conductivité ; depuis la mise en service du conductivimètre dans l'Isère, CJmoy est établie sur la base des 288 mesures de conductivité chaque jour. Les études ont montré que la conductivité peut être directement reliée à la minéralisation totale par un coefficient multiplicateur de valeur 0.688 (Foussadier, comm. person.).

L'analyse de la conductivité journalière depuis le 24 mai 1995 montre une variation saisonnière de la teneur en matière dissoute (fig. 2.10). Deux courbes ont été tracées : a) la courbe de la conductivité moyenne journalière (CJmoy) ; b) l'étendue journalière (CJmax-CJmin), représentant l'écart entre le maximum et le minimum observés chaque jour. Afin de lisser ces courbes, on a calculé et représenté les moyennes mobiles sur un pas de temps d'une semaine (MM7j). L'analyse des courbes permet les observations suivantes :

a) La conductivité journalière CJmoy suit un cycle saisonnier. Les valeurs minimales coïncident avec la fin

Figure 2.9 - Relation liant la concentration des prélèvements par pompages avec : A) la turbidité moyenne de la demi-heure précédant le prélèvement ; B) la turbidité instantanée au moment du prélèvement.

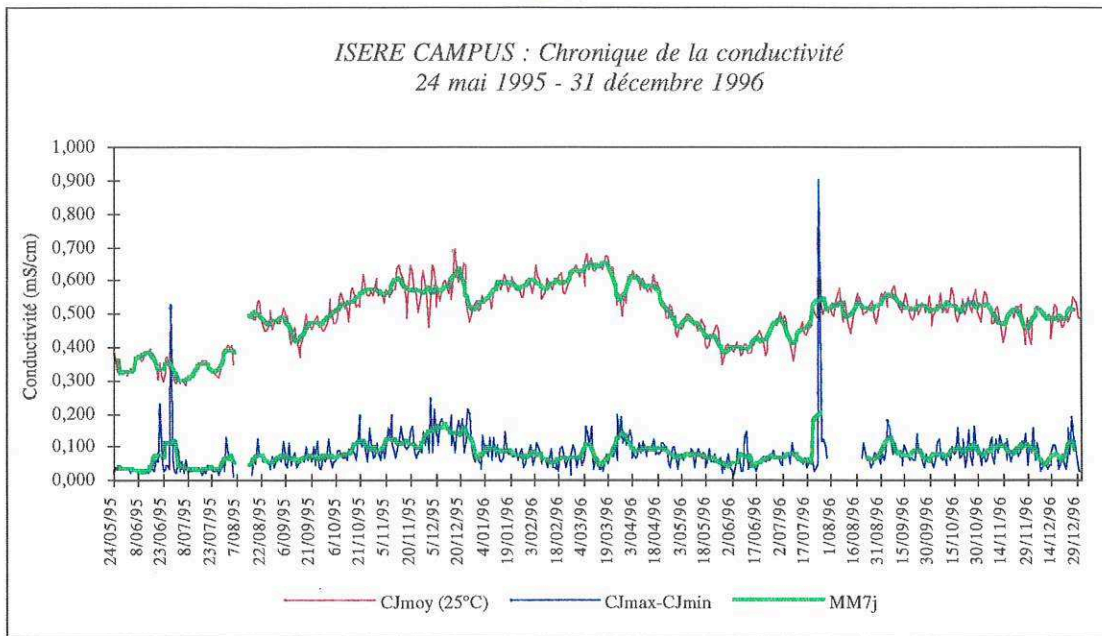


Figure 2.10 - Chronique de la conductivité moyenne journalière (C_{Jmoy}) et de l'étendue journalière ($C_{Jmax}-C_{Jmin}$) à la station de Grenoble-Campus entre le 24 mai 1995 et le 31 décembre 1996.

de printemps, période où la fusion nivale est en pleine activité et où les débits sont les plus forts de l'année (moins de $400 \mu S \cdot cm^{-1}$). La conductivité augmente dès la fin de la fusion avec l'accroissement de la part d'apports souterrains dans les écoulements, pour atteindre des valeurs comprises entre 500 et $600 \mu S \cdot cm^{-1}$ vers la fin de l'automne et pendant l'hiver, au moment où les écoulements de surface provenant des parties supérieures du bassin-versant sont très fortement limités par la rétention nivale.

b) La courbe des écarts entre le maximum et le minimum quotidien ($C_{Jmax}-C_{Jmin}$) semble également suivre un cycle saisonnier : la variabilité journalière de la conductivité est minimale pendant la période de fusion nivale et augmente progressivement pour atteindre un maximum au cours de la période hivernale ; ce phénomène, très net lors de la phase de fusion de 1995 au cours de laquelle les écoulements de fonte furent exceptionnellement abondants, a été beaucoup moins marqué au cours du printemps 1996, le stock nival étant très peu volumineux cette année là. Deux causes peuvent être avancées pour expliquer cette variation saisonnière des amplitudes journalières : 1) les forts débits de la période de fusion diluent les flux de matière dissoute et masquent leur variabilité quotidienne au cours de cette période de l'année ; 2) en hiver, il est possible également, mais cette question reste à approfondir, que la gestion des réservoirs hydroélectriques et les lâchers d'eau lors des turbinages accroissent la variabilité journalière de la conductivité en provoquant des dilutions artificielles.

La mise en relation des moyennes mensuelles de débit et de minéralisation entre novembre 1994 et mai 1996 confirme l'existence d'un cycle saisonnier des transports de matière dissoute (Walling & Webb, 1986 ; Webb &

Walling, 1992) (fig. 2.11). La période de fusion des mois de mai, juin et juillet 1995 fut caractérisée par une forte hydraulicité et une faible minéralisation. L'été et l'automne, en dépit de la diminution de débit, la remontée ne fut pas très sensible avant le mois de novembre. L'hiver 1996 fut caractérisé par une forte minéralisation et un faible débit. Le faible stock neigeux de l'hiver 1996 n'a pas permis la mise en place d'une réelle saison de fusion, si bien que, contrairement à l'année précédente, des conditions de minéralisation que l'on peut qualifier d'estivales se sont mises en place dès le mois de mai, venant interrompre le cycle naturel.

B) Les variations quotidiennes et événementielles

Une analyse succincte des chroniques de débits et de conductivité permet de soupçonner que la gestion des barrages hydroélectriques influence notablement la conductivité instantanée de l'Isère. Deux phénomènes apparaissent à la lecture des chroniques mensuelles :

a) Le dimanche et la matinée du lundi (parfois même le samedi après-midi) sont fréquemment des journées singulières pour les débits, principalement en dehors des périodes de fusion nivale. Au cours de ces deux jours, les écoulements sont notablement plus faibles et leur variabilité est fréquemment moindre. Ceci est à mettre en relation avec la réduction des éclusées des ouvrages hydroélectriques qu'impose une moindre consommation d'énergie de pointe. Dans beaucoup de cas, pendant ces mêmes jours, la chronique de la conductivité au pas de temps de la 1/2 heure apparaît elle-aussi comme lissée, démontrant ainsi l'influence des éclusées sur la charge dissoute (fig. 2.12). L'impact des retenues se comprend aisément : chaque lâcher représente l'injection d'un volume d'eau considérable en très peu de temps, des

Figure 2.11 - Mise en relation de la concentration moyenne mensuelle en charge dissoute et du débit moyen mensuel faisant apparaître le cycle annuel de la minéralisation des écoulements.

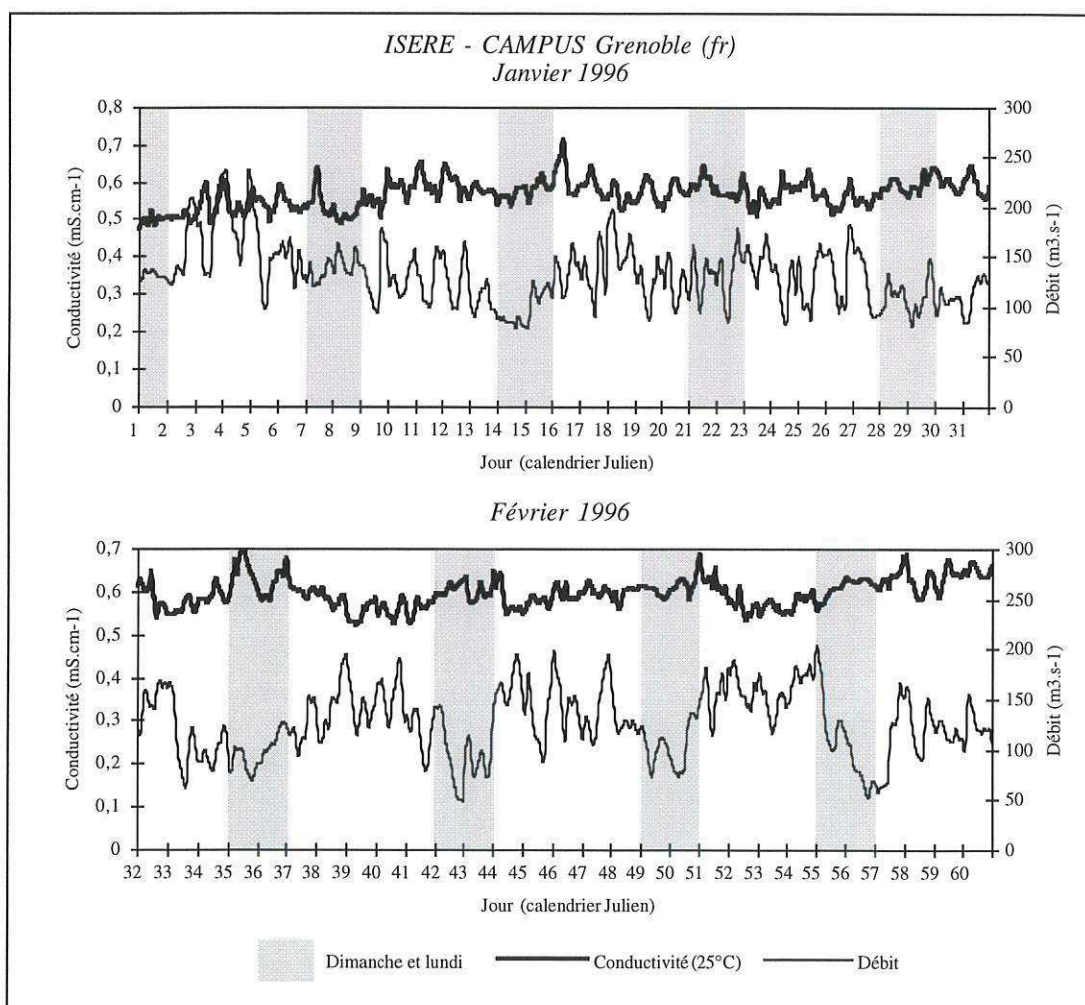
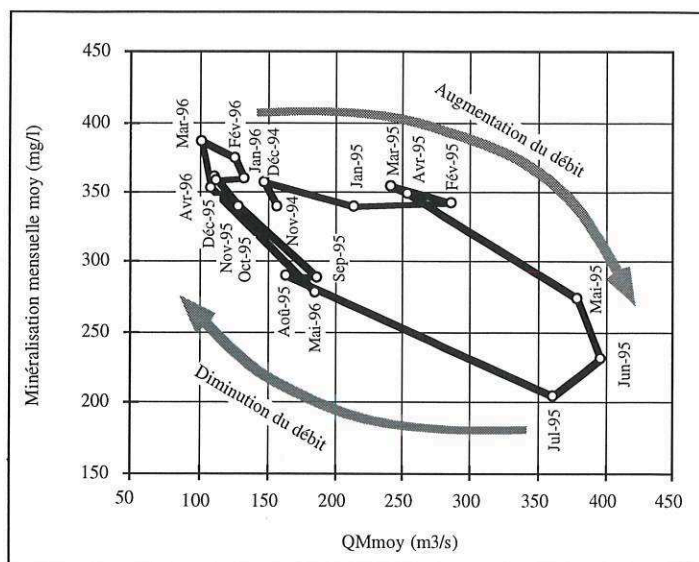


Figure 2.12 - Chroniques horaires de la conductivité et du débit mettant en évidence l'effet de la baisse de production hydroélectrique des week-ends sur l'hydrologie et les flux dissous.

accroissements du débit de $32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 30 mn et de $115 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 3 heures ayant été observés à Grenoble (Bois, 1993). Ce volume d'eau supplémentaire présente les caractéristiques chimiques du bassin-versant localisé en amont du réservoir ; son injection brutale dans l'hydrosystème est susceptible de créer des dérégulations temporaires des flux de matière dissoute.

b) Au cours des mois de juin et d'août 1995, et de juillet 1996, des accroissements brutaux et très brefs de la conductivité ont pu être observés, sa valeur passant de $300\text{-}350 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à $700, 850$ voire plus de $1200 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (fig. 2.13). En 1995, en phase de test du capteur, nous avons d'abord cru que ces pics étaient le fait d'un dysfonctionnement. Des analyses chimiques succinctes réalisées sur des échantillons prélevés lors de ces épisodes ont montré de très fortes concentrations en sulfates, dont l'origine est très probablement la dissolution des gypses. On les trouve en abondance dans le haut bassin de l'Isère et dans celui de l'Arc, son principal affluent en amont de Grenoble. Les trois événements observés coïncident avec des hausses du débit ; ces pics de matière dissoute peuvent ainsi témoigner de la crue de petits bassins-ver-

sants dont les formations géologiques sont riches en gypse. Le rôle de certains ouvrages hydroélectriques, tels ceux situés dans la vallée de l'Arc, dans la concentration de MDT ne doit cependant pas être négligé : équipés de bassins de taille réduite, ces ouvrages ont pu stocker et concentrer temporairement des eaux fortement chargées en sulfates et les réinjecter brutalement dans l'hydrosystème lors d'une éclusée, augmentant ainsi artificiellement l'effet d'une crue fortement chargée ; il semble également que d'intenses phénomènes de dissolution se produisent, au détriment des formations gypseuses, dans les conduites souterraines court-circuitant le chenal de l'Arc (M. Chardon, comm. perso). Ces hypothèses montrent que des investigations supplémentaires sont indispensables pour mieux cerner le rôle des ouvrages sur les fluctuations accidentelles de la conductivité.

2.2.2) Quantification des transports de matière dissoute

La mesure conjointe du débit et de la conductivité à la station du campus a permis de quantifier les tonnages de MDT transitant à Grenoble. Sur la période nov-94-déc-96, le transport journalier a connu d'importantes fluctuations saisonnières, variant selon l'hydrologie et la minéralisation de 2.000 à près de $14.000 \text{ t} \cdot \text{j}^{-1}$ (fig. 2.14). D'un jour à l'autre, la variabilité est également forte (de l'ordre de $2000 \text{ t} \cdot \text{j}^{-1}$) ; elle reflète la variabilité journalière des débits.

L'analyse des transports de matière dissoute au pas de temps mensuel montre qu'ils varient de 70.000 à $280.000 \text{ t} \cdot \text{mois}^{-1}$ sur la période nov-94-oct-96 (fig. 2.15). Deux périodes se distinguent très clairement sur le graphique : 1) entre novembre 1994 et juillet 1995, les transports de MDT ont atteint environ $1,850 \text{ Mt}$ ($2,200 \text{ Mt}$ au cours de la première année de mesure) ; 2) à partir d'août 1995, les transports de MDT ont connu un très net ralentissement, la quantité transportée au cours de cette deuxième période, pourtant plus longue, ne dépassant pas $1,500 \text{ Mt}$ ($1,300 \text{ Mt}$ sur la deuxième année de mesure). Ces différences tiennent essentiellement au fait que l'on a mesuré des années à l'hydrologie très contrastée : les débits ont été très nettement excédentaires entre février et juillet 1995 en raison d'une fusion nivale exceptionnellement longue et abondante (les cumuls de neige ont très fréquemment dépassé 5 m de hauteur au dessus de 2500 m d'altitude) ; les écoulements ont par contre été très déficitaires au cours du printemps 1996 (en raison de la faible couverture nivale de l'hiver 1995-96). Les mesures effectuées à la station de Grenoble-Campus, dans des conditions hydrologiques contrastées, permettent de fournir une fourchette de valeurs basse et haute des transports annuels de MDT de l'ordre de $1,0$ à $3 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$, soit 180 à $450 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

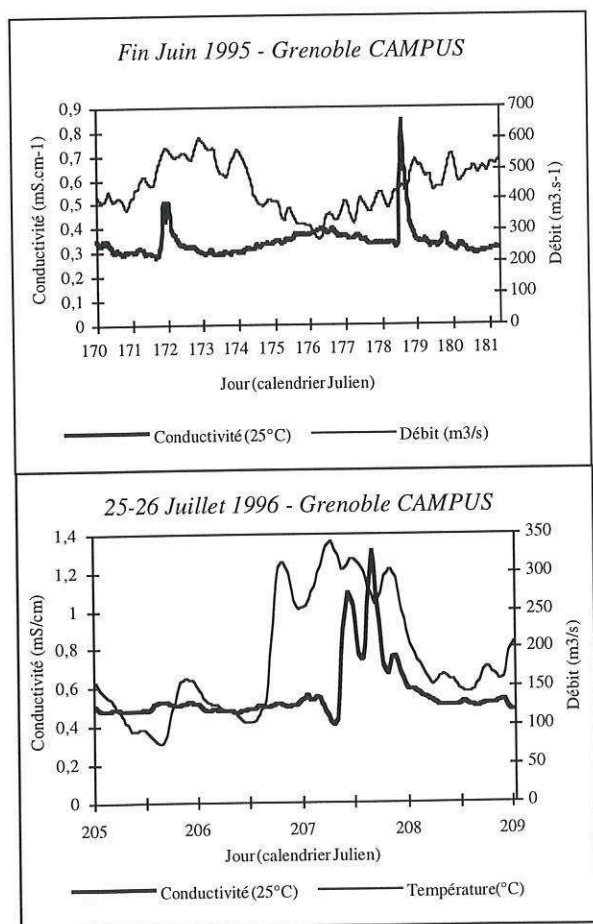


Figure 2.13 - Fluctuations accidentelles de la conductivité de l'Isère à la station de Grenoble-Campus.

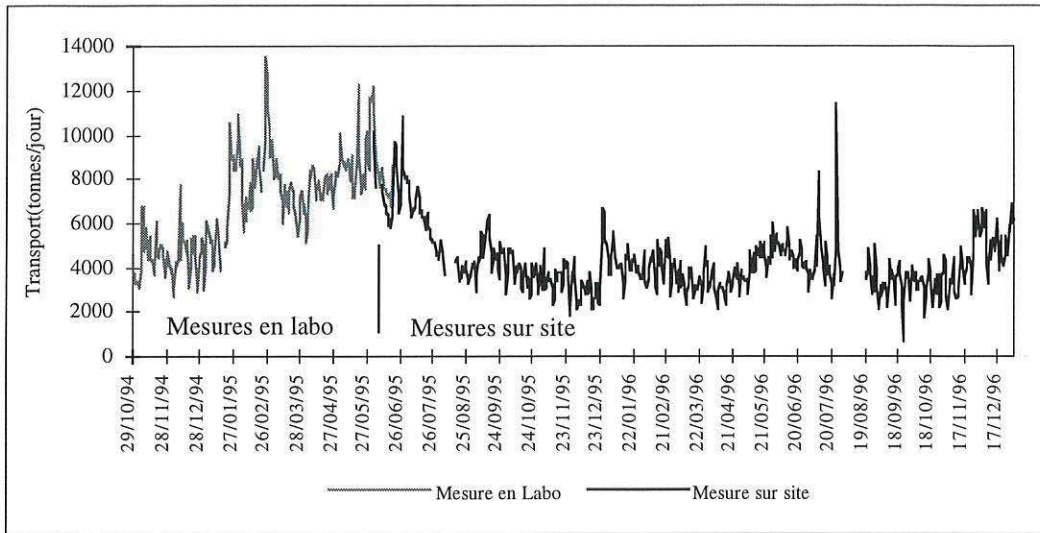


Figure 2.14 - Chronique journalière des transports de matière dissoute totale entre novembre 1994 et juin 1996.

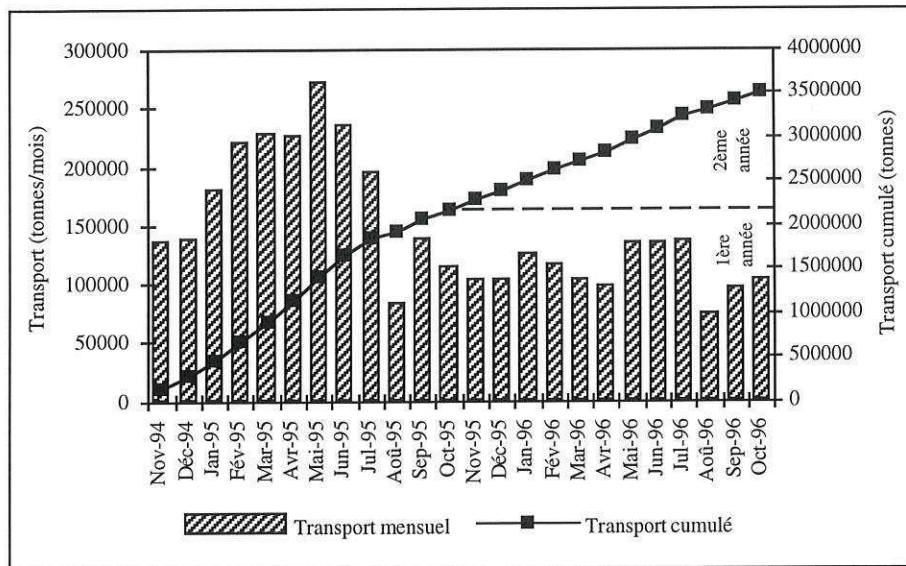


Figure 2.15 - Transport mensuel et transport cumulé de matière dissoute totale sur l'Isère à la station de Grenoble-Campus entre le 1^{er} novembre 1994 et 30 octobre 1996.

2.2.3) La relation concentration / débit

La représentation graphique de la relation conductivité/débit (période 06/95-05/96) permet de pressentir un lien statistique fort entre les deux variables (fig. 2.16), après linéarisation du nuage par la transformation logarithmique des variables C_{Jmoy} et Q_{Jmoy} . Dans la littérature spécialisée (Walling & Webb, 1986 ; Walling & Webb, 1992), la relation habituellement décrite entre charge dissoute et débit prend la forme d'une fonction puissance de type $CD=aQ^b$, après la transformation loga-

rihétique des deux variables. Dans le cas de l'Isère, la liaison statistique entre la conductivité et le débit s'écrit :

$$C_{Jmoy} = 3,707.Q_{Jmoy}^{-0,399}$$

avec un coefficient de détermination $r^2=0,834$

Comme le montre le tableau 2.7, des régressions multiples permettent de sensiblement améliorer la modélisation statistique : l'association du débit et de la température de l'eau comme variables explicatives permet de gagner 5 % sur le coefficient de détermination ; l'ajout au

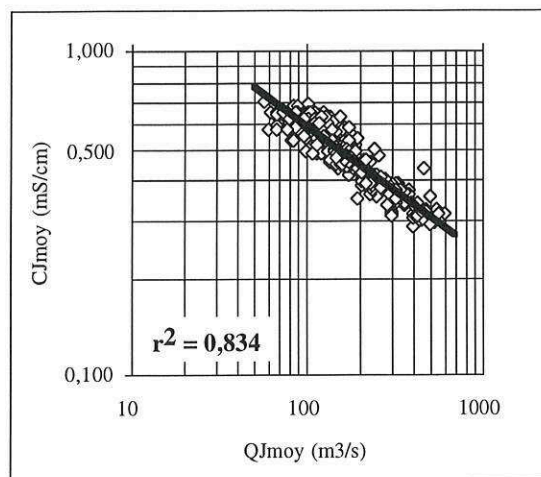


Figure 2.16 : Relation conductivité journalière/débit journalier à la station Grenoble-Campus pour la période du 24/05/95 au 31/06/96.

modèle de l'étendue journalière de la conductivité permet un gain de 1 % supplémentaire. La minéralisation est d'autant plus basse que la température de l'eau est forte, ce qui traduit la prééminence de fortes concentrations en matière dissoute pendant la saison froide. L'écart entre le maximum et le minimum journalier de conductivité apporte un correctif supplémentaire ; nous avons vu précédemment que sa valeur augmente au cours de la saison froide, probablement en relation avec les éclusées générées par les réservoirs hydroélectriques (voir fig. 2.10). Des essais de modélisation statistique ont été faits avec d'autres variables ($Q_{Jmax}-Q_{Jmin}$, $T_{Jmax}-T_{Jmin}$...) ; ils n'ont pas donné de résultats significatifs, les coefficients de corrélation partielle dépassant systématiquement le seuil de probabilité de 1%.

2.3) La dynamique de la matière en suspension (MES)

2.3.1) Chronique de la concentration en MES

A) Les données biquotidiennes issues des prélèvements automatiques

La chronique présentée s'échelonne sur une période de 33 mois depuis la mise en place du système de prélèvement automatique. Pour des commodités de représentation, elle a été découpée en séries annuelles (fig. 2.17). On remarque immédiatement l'extrême variabilité de la concentration en MES qui couvre une gamme de 10 mg.l^{-1} à 20 g.l^{-1} (soit un facteur multiplicatif de 2000). On constate également que pendant la plus grande partie de l'année, les valeurs de la concentration sont faibles. Des calculs de fréquence ont été réalisés sur les deux premières années de mesure ; elles ne présentent guère de différence d'une année à l'autre (fig. 2.18) : la concentration n'a été supérieure à 500 mg.l^{-1} que pour 20 % des prélèvements ; si l'on se réfère à la concentration supérieure à 5 g.l^{-1} , cette fréquence tombe à moins de 1 % pour 1994-95 et 2 % pour 1995-96.

Comme le montre le tableau 2.8, des concentrations supérieures à 10 g.l^{-1} ne sont pas rares puisqu'elles ont pu être mesurées à douze reprises au cours des deux premières années d'observation. Les chroniques indiquent que deux types de phénomènes génèrent de fortes concentrations : 1) la fusion nivale, s'échelonnant généralement du début avril au milieu du mois de juillet, donne naissance de manière cyclique à de fortes valeurs de concentration en MES ; 2) les crues, phénomènes aléatoires se produisant aussi bien en période de fusion nivale qu'en automne, sont à l'origine des valeurs de concentration les plus fortes que l'on ait pu mesurer sur l'Isère.

Un D.E.A récemment réalisé à l'Ecole d'Hydraulique de Grenoble à partir des données recueillies à la station de Grenoble-Campus a montré qu'il existe une relation statistique de bonne qualité entre les concentrations à Grenoble-Campus et la température moyenne des 5 jours précédents à Bonneval-sur Arc (Haute-Maurienne)

Tableau 2.7 - Différents modèles statistiques reliant la charge dissoute à diverses variables explicatives

Équation de régression	r^2
$\text{Ln}(C_{Jmoy}) = -0,399 \cdot \text{Ln}(Q_{Jmoy}) + 8,218$	0,834
$\text{Ln}(C_{Jmoy}) = -1,552E-3 \cdot Q_{Jmoy} - 0,022 \cdot T_{Jmoy} + 6,675$	0,884
$\text{Ln}(C_{Jmoy}) = -1,507E-3 \cdot Q_{Jmoy} - 0,021 \cdot T_{Jmoy} + 4,7496E-4 \cdot (C_{Jmax} - C_{Jmin}) + 6,616$	0,894

avec : C_{Jmoy} : Conductivité journalière

Q_{Jmoy} : Débit journalier

T_{Jmoy} : Température moyenne de l'eau

$(C_{Jmax} - C_{Jmin})$: étendue journalière

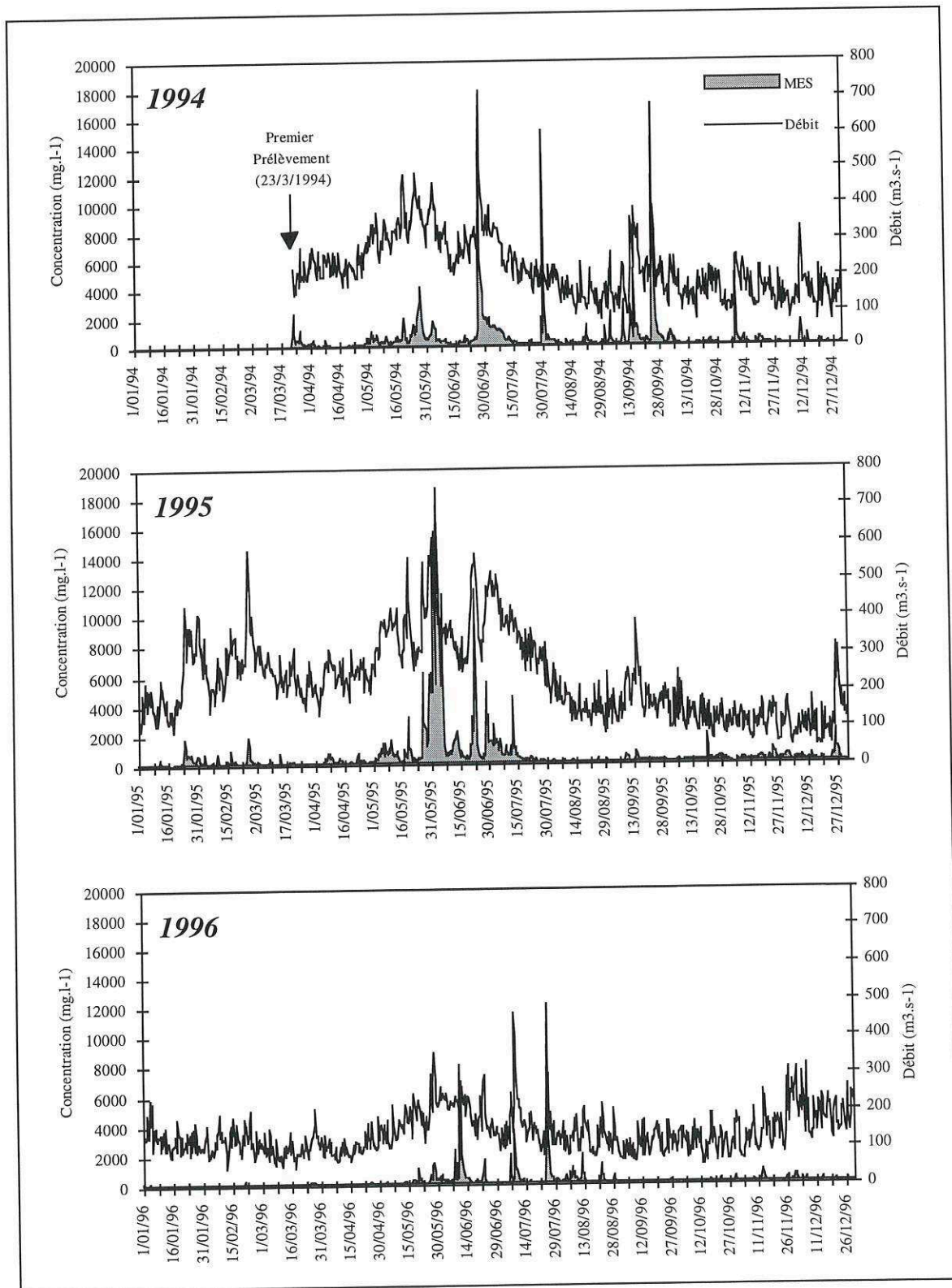


Figure 2.17 - Chroniques de la concentration en MES au cours des 3 premières années de mesure.

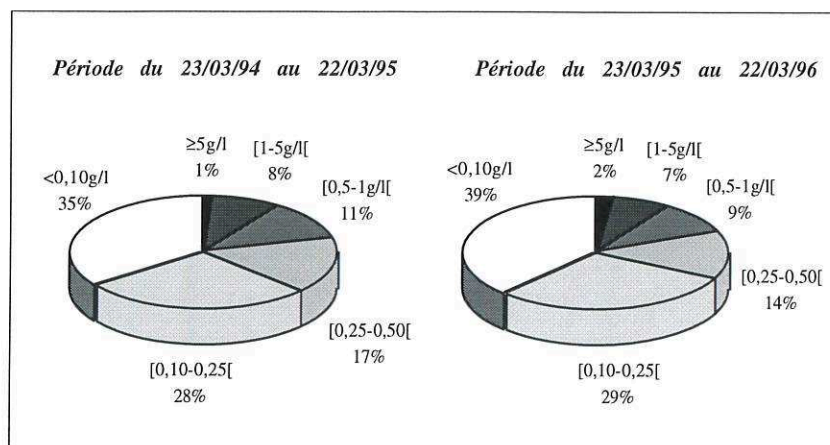


Figure 2.18 - Distribution annuelle des concentrations au cours des deux premières années de mesure.

Tableau 2.8 - Valeurs classées des concentrations supérieures en MES à 5 g.l⁻¹ mesurées sur l'Isère entre le 23 mars 1994 et le 22 mars 1996.

Date	Heure	Concentration (mg/l)	Date	Heure	Concentration (mg/l)
3/06/95	12	18650	25/09/94	12	6982
4/06/95	0	17016	27/05/95	0	6211
24/09/94	12	16915	31/05/95	12	6166
30/07/94	12	15119	28/06/94	0	6126
2/06/95	0	14104	6/06/95	12	6086
1/06/95	12	13363	30/05/95	12	6067
22/06/95	12	11758	28/06/95	12	5550
4/06/95	12	11506	5/06/95	0	5532
6/06/95	0	11446	2/06/95	12	5456
27/06/94	12	11260	15/09/94	0	5356
3/06/95	0	10559	5/06/95	12	5302
25/09/94	0	10295	26/09/94	0	5066
23/06/95	0	9471	6/11/94	12	5008
27/06/94	0	7777			

(Gautheron, 1995) : la fusion nivale est donc bien l'un des paramètres expliquant la production sédimentaire. Ces premiers éléments encourageants ne doivent cependant pas masquer qu'il reste beaucoup de travail pour analyser de manière fine le rôle de la fonte nivale, tant du point de vue de la recherche d'indices de fusion que de l'analyse de la distribution spatiale du phénomène.

Gautheron (1995) a également étudié les situations météorologiques des épisodes ayant donné des concentrations supérieures à 5 g.l⁻¹ au cours de l'année 1994 (27-28 juin, 30 juillet et 24-25 septembre). Pour deux d'entre-eux (juin et septembre), il apparaît qu'ils sont liés à des phénomènes de "retour d'Est" ou "Lombarde" ayant donné d'abondantes précipitations sur les crêtes du haut bassin de l'Arc (Haute-Maurienne). L'épisode du mois de juillet est dû à des orages situés sur la Moyenne Maurienne. Leur caractère local n'a que peu influencé le niveau de l'Isère à Grenoble, puisqu'au cours de cet épisode la rivière n'a pas dépassé un débit maximum instantané de 266 m³.s⁻¹ ; cependant, les précipitations, de

forte intensité sur des bassins versants dénudés et très affouillables, ont été très érosives, induisant de très fortes concentrations à Grenoble sans véritable onde de crue.

B) L'évolution en continu de la MES : résultats préliminaires

La turbidimétrie infrarouge mise en place à la station de Grenoble-Campus permet de collecter en continu des données sur les concentrations en MES (le pas de temps de mémorisation des mesures est ici la 1/2 heure, une mesure étant faite toutes les 5 mn). En fonctionnement sur l'Isère depuis le mois de juin 1996, le premier turbidimètre que l'on a installé mesure des concentrations inférieures ou égales à 2 g.l⁻¹. Dans la série de données dont nous disposons, nous avons ainsi sélectionné les principales crues de MES qui sont restées dans la gamme de mesure du capteur, entre les mois de juin 1996 et de février 1997 (11 événements) (fig. 2.19). Il est à noter que nous ne disposons que d'un recul de quelques mois depuis la mise en service du capteur et que l'analyse des

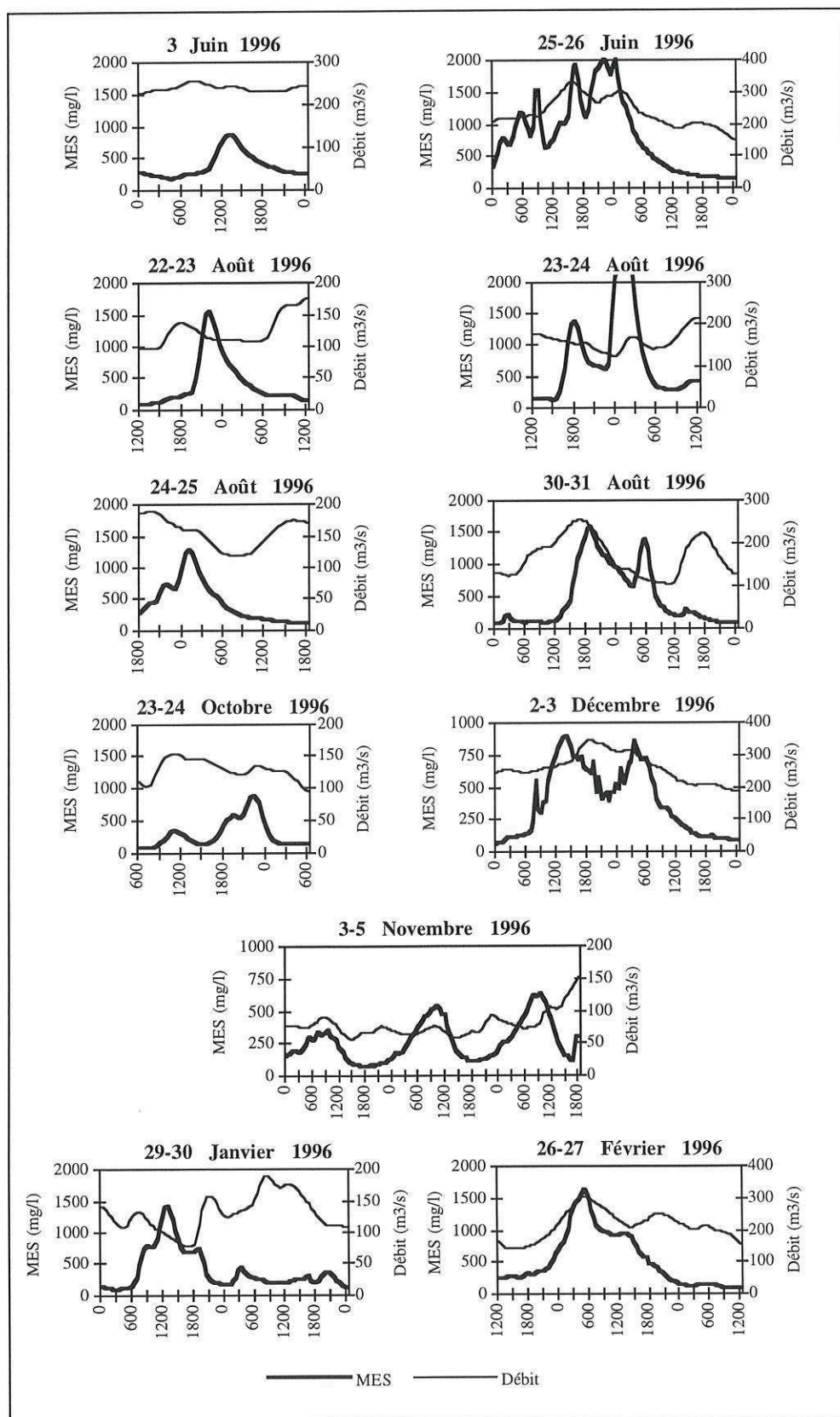


Figure 2.19 - Diagramme des concentrations et des débits des 11 crues de MES observées par turbidimétrie à la station de Grenoble-Campus.

courbes de concentration qui va suivre est donc forcément de portée limitée.

Les crues de MES étudiées témoignent d'un grand nombre de situations hydro-météorologiques (fusion nivale, orages estivaux, précipitations d'automne...). Elles constituent des événements souvent simples (1 seul pic bien marqué) ; elles témoignent parfois de situations plus complexes (plusieurs pics successifs). Dans deux cas, les courbes de concentration mettent en évidence des fluctuations rapides de teneur en MES, chaque pic témoignant d'une brève onde de passage du flux en suspension. L'examen des courbes de concentration montre que dans la plupart des cas, la phase de concentration est plus rapide que la phase de décrue de la MES, à l'image de ce que l'on observe sur un hydrogramme de crue simple. Par ailleurs, toutes les augmentations de la MES ne sont pas associées à des variations hydrologiques sensibles.

La mise en relation de la concentration et du débit révèle l'existence du classique hystérésis entre les flux de sédiments et les flux d'eau (fig. 2.20). Là encore, il est difficile d'aller très loin dans l'analyse, du fait d'un évi-

dent manque de recul. Il convient cependant de dire que l'étude de 10 événements permet de relever un grand nombre de situations différentes (Rieger, Olive *et al.*, 1988 ; Williams, 1989) : concentration en retard sur le débit dans 4 cas sur 10 ; combinaisons complexes de mouvement d'avance ou de retard (ou l'inverse) de la concentration sur le débit dans 5 autres cas sur 10 ; 1 cas enfin, où concentration et débit sont relativement en phase. Cette diversité des types d'hystérésis permet de comprendre pourquoi la relation liant la concentration au débit est de très médiocre qualité (voir P2, § 2.3.3). Ce type d'observation n'a rien de surprenant sur un bassin-versant de la taille de celui de l'Isère en amont de Grenoble. Cela confirme en tout cas la prépondérance des phénomènes locaux sur la fourniture des matières en suspension, les crues de MES de petits affluents pouvant évoluer de manière totalement indépendante du débit de l'Isère à Grenoble.

Ces résultats préliminaires montrent très clairement que la mesure des flux de MES en continu constitue un axe de recherche intéressant. Les études à venir pourront peut être aider à mieux cerner d'éventuels phénomènes sai-

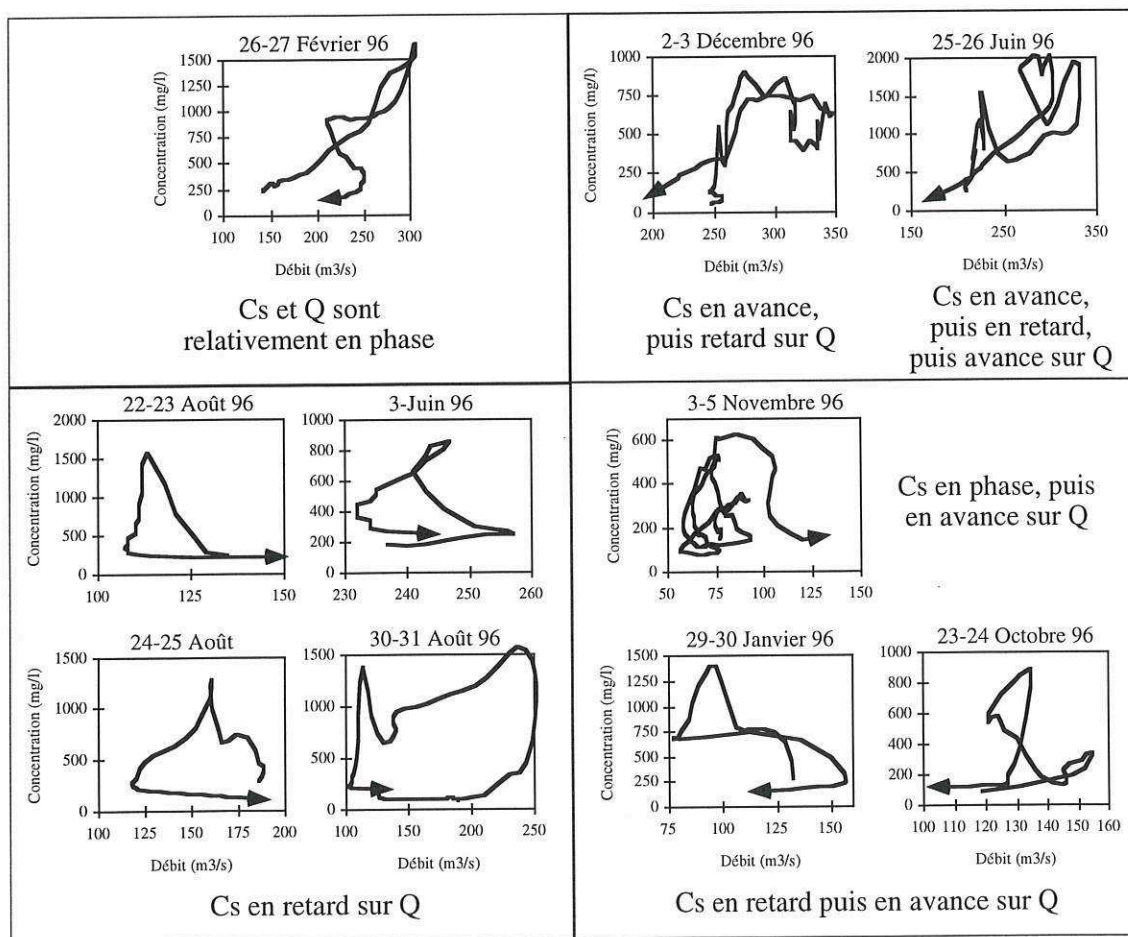


Figure 2.20 - Typologie provisoire des hystérésis entre la concentration en MES et le débit à la station de Grenoble-Campus.

sonniers ou liés à des événements météorologiques spécifiques. En tout cas, une réflexion approfondie reste à mener sur la signification des événements décrits vis-à-vis de la dynamique de la fourniture sédimentaire. Sur l'Isère, la turbidimétrie est également un outil qui pourrait s'avérer très efficace pour suivre et analyser les conséquences de l'artificialisation du régime hydrologique sur les transports de MES (vidanges de réservoirs ; effets éventuels des marnages quotidiens sur les transits de sédiments fins...). Elle présente indéniablement un grand intérêt pour les gestionnaires des réservoirs hydro-électriques qui disposent par la mesure en continu d'un moyen d'anticiper les flux de MES arrivant dans leurs réservoirs et, éventuellement, de mettre en place des procédures de gestion du plan d'eau visant à faciliter le transit des sédiments vers l'aval.

2.3.2) Quantification des transports de MES

Les transports de MES ont fait l'objet d'un essai de quantification. La figure 2.21 présente les transports solides cumulés sur des périodes d'un an depuis le début des mesures. Les trois diagrammes proposés permettent d'observer des situations très contrastées tant du point de vue des volumes transportés que de la chronologie des phénomènes :

* Les transports solides de l'année 1994-95 ont atteint un total d'environ 4.700.000 tonnes (fig. 2.21/A). Pour leur plus grande part, ils se sont produits entre le 15 mai et le 30 septembre 1994. L'allure en marches d'escalier de la courbe cumulative indique que les transports de MES sur l'Isère ont fonctionné sous la forme de pulsations :

1) Au cours du printemps et du début de l'été, les transports solides ont été rythmés par la conjonction de la fonte nivale et de précipitations engendrant des crues de fusion : a) entre le 15 mai et le 5 juin, une premier passage de MES a pu être enregistré. Il est dû à la conjon-

tion de fortes concentrations (1 à 2,5 g.l⁻¹) et de débits soutenus, sans que ceux-ci dépassent pourtant le niveau des hautes-eaux annuelles ($Q_{inst. \text{ maxi}} : 480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ; b) les 26 et 27 juin, ce sont environ 740.000 tonnes qui ont transité à Grenoble lors d'une crue dont le débit maximum instantané fut de $730 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; au cours de cet épisode, les transports solides ont dépassé le 1/5^e du total annuel, si l'on inclut dans le calcul la semaine qui a suivi l'événement.

2) La crue du 30 juillet liée à des orages localisés sur la Moyenne Maurienne n'a que fort peu compté dans le bilan annuel, même si les concentrations étaient parmi les plus fortes mesurées, en raison de faible volume d'eau écoulé au cours de cet épisode (environ $20 \text{ Mm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$).

3) L'épisode des 24-25 septembre a fourni environ 620.000 tonnes en dépit d'un débit modeste ($Q_{inst. \text{ maxi}} : 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

4) D'autres événements hydrologiques nettement plus forts que l'épisode de juillet sont intervenus en fin de période d'étude (janvier et mars 1995). Les concentrations en MES sont cependant restées en dessous de 1 g.l⁻¹ et de ce fait, ces événements n'interviennent que fort peu dans le bilan des transports solides de l'année.

* Au cours de l'année 1995-96, les transports solides ont très largement dépassé ceux de la période précédente avec une masse totale d'environ 6.500.000 tonnes (fig. 2.21/B). On ne peut qu'être frappé par l'exceptionnelle brièveté de la période au cours de laquelle cette énorme quantité de MES a transité, puisqu'entre le 5 mai et le 15 juillet, ce sont approximativement 5.800.000 tonnes qui ont circulé dans l'Isère à Grenoble (près de 90% du bilan annuel !). Des transports solides de 400 à 500.000 t.j⁻¹ ont été mesurés à 4 reprises en 1995, soit le transit d'environ 2 Mt de MES (30 % du volume annuel en 1 % du

Tableau 2.10 - Classement des plus forts tonnages journaliers supérieurs à 100.000 t.j⁻¹ au cours des 3 années de mesure.

Date	1994 Transport MES (t/j)	Date	1995 Transport MES (t/j)	Date	1996 Transport MES (t/j)
27/06/94	523056	3/06/95	532307	25/07/96	190951
24/09/94	290081	2/06/95	510746	11/06/96	97257
25/09/94	271697	4/06/95	472492		
28/06/94	216039	1/06/95	439285		
30/07/94	148377	22/06/95	326078		
15/09/94	115947	23/06/95	277113		
28/05/94	104155	6/06/95	270780		
27/05/94	101461	31/05/95	260634		
		30/05/95	206861		
		27/05/95	202626		
		5/06/95	164694		
		29/06/95	118516		
		28/06/95	114457		

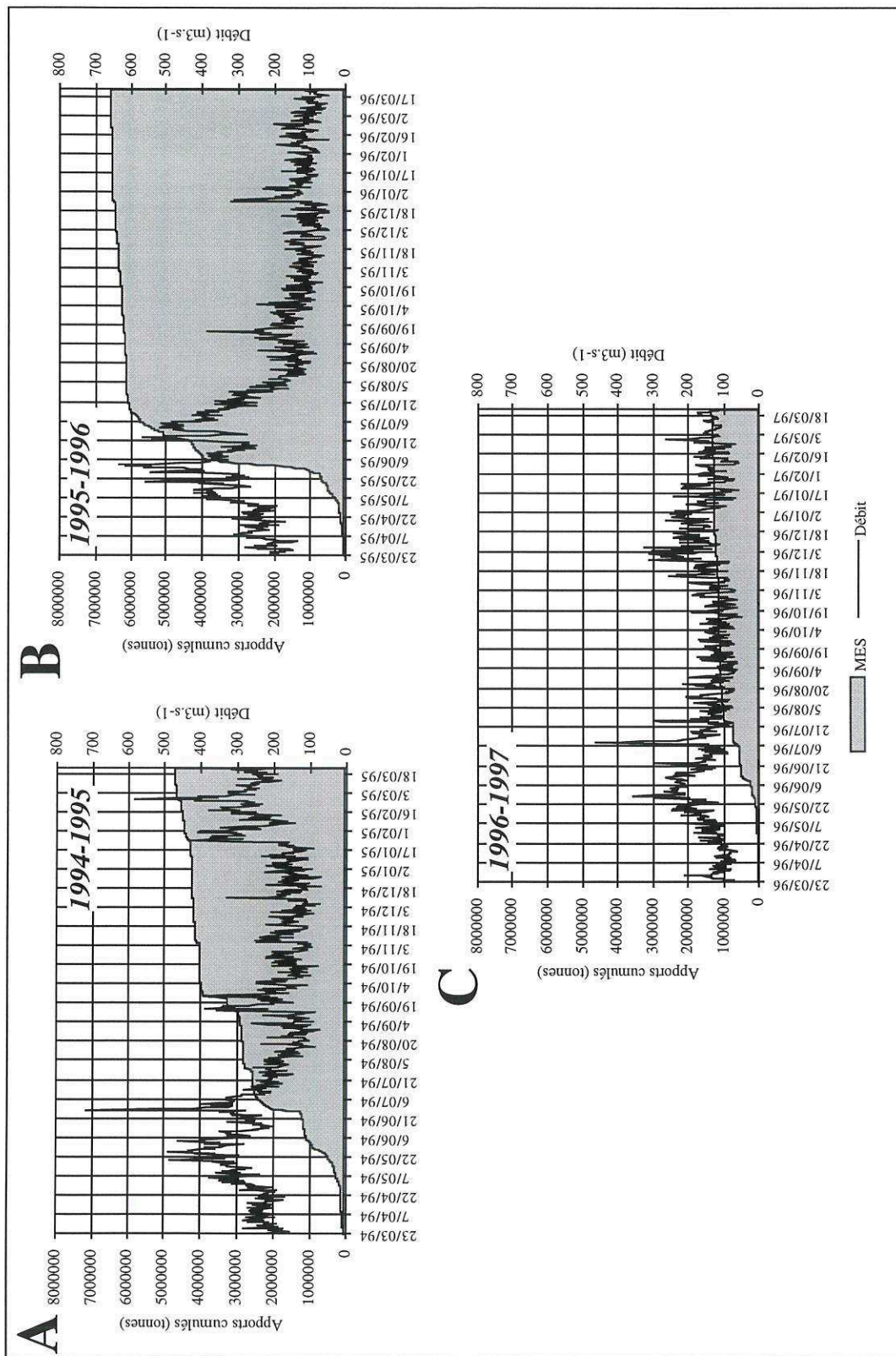


Figure 2.21 :- Transports solides cumulés de MIES au cours des trois premières années de mesure.

temps) (tableau 2.10). Cette concentration du flux sur une si courte période est due à la conjonction de deux facteurs :

a) les écoulements du printemps 1995 ont été très abondants en relation avec des accumulations neigeuses exceptionnelles sur l'ensemble du bassin de l'Isère : le classement des débits moyens journaliers supérieurs à $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a révélé 64 jours d'écoulements supérieurs à ce débit-seuil contre 28 en 1994 et seulement 1 journée en 1996 (fig. 2.22) ;

b) les crues ont été absentes de tout le reste de la période, les débits étant la plupart du temps inférieurs au module ($200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

* Les transports solides de l'année 1996-97 ont été encore plus faibles, les tonnages cumulés enregistrés restant inférieurs à 1.400.000 tonnes (fig. 2.21/C). Si l'on compare cette situation aux deux années précédentes, il apparaît très clairement que la faible fusion nivale du printemps 1996, en raison d'un enneigement resté modeste, porte une lourde responsabilité dans la faiblesse des transports annuels de MES. Par ailleurs, le retard pris au printemps n'a jamais pu être rattrapé, l'année hydrologique s'étant écoulée sans réelle crue (1 seul épisode dépassant $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les 25-26 juillet). En raison de ces particularités, une seule journée a excédé un transport de 100.000 tonnes (190.000 tonnes le 25/07/96), valeur au demeurant modeste si on la compare aux événements de l'année 1995, et ce en dépit d'une concentration dépassant $12 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

Ces trois années d'observation montrent le rôle prépondérant de l'hydraulicité du printemps sur les transports de MES de l'Isère. Un fort pourcentage du tonnage annuel s'écoule de manière régulière entre le 15 avril et le 15 juillet. Si l'hydrologie de cette période est déficitaire, l'année de transport reste modeste, les crues, phénomènes aléatoires, ne parvenant généralement pas à rat-

traper le déficit acquis lors de la fusion nivale. Les trois années de mesure présentant des situations très contrastées et dont deux sont probablement relativement exceptionnelles (1995 et 1996), il apparaît que les transports de MES de l'Isère à Grenoble s'inscrivent dans une fourchette de valeurs de 1.200.000 à 6.500.000 tonnes (soit la fourniture de 215 à $1.200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) ; il est à noter que Pardé (1925) estimait à $800 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ l'apport annuel de MES sur l'Isère à Grenoble. Le début de l'année 1997, qui présente à la fois un enneigement peu important et un déficit pluviométrique de printemps marqué, s'annonce comme fortement déficitaire, en tout cas pour la phase de transport provenant de la fusion nivale.

2.3.3 Les difficultés de la modélisation des transports solides

A) La modélisation statistique : la relation concentration en MES-débit

Les relations concentration-débit de l'Isère à Grenoble ont été étudiées d'une manière distincte pour chacune des années de mesure. Comme pour la matière dissoute, les relations statistiques les plus utilisées dans la bibliographie spécialisée sont des fonctions puissance du type $\text{MES} = aQ^b$, utilisant les logarithmes de la concentration et du débit (Walling & Webb, 1992 ; Eisma, 1993).

Comme le montrent les graphiques de la figure 2.23, la dispersion des nuages de points est forte pour les trois années de mesure ; le calcul des équations de régression confirme les informations données par les graphiques, les coefficients de détermination du modèle statistique ne dépassant que de fort peu, dans le meilleur des cas, 50 % de la variance totale (tab. 2.11). Gautheron (1995) s'est interrogé sur le rôle des débits de l'Arc dans les apports de MES à Grenoble. Il a essayé de corrélérer les concentrations de Grenoble-Campus avec les hauteurs d'eau

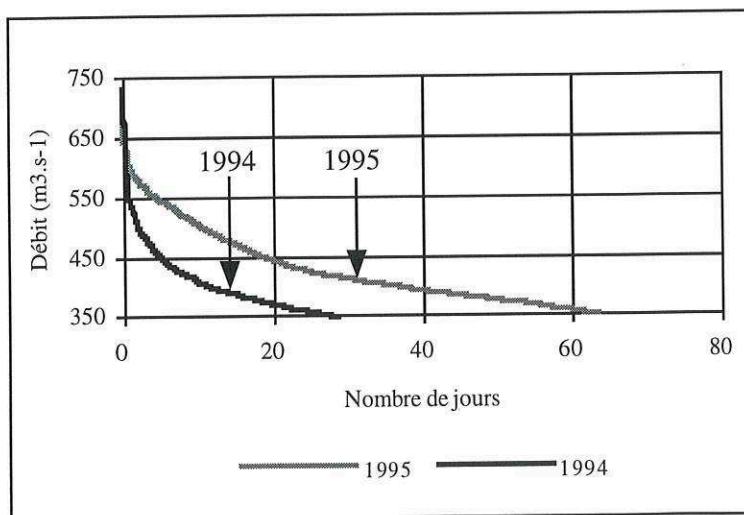


Figure 2.22 - Débits classés supérieurs à $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la station de Grenoble Campus en 1994, 1995

(d'après les données hydrologiques fournies par Ph. Bois).

mesurées sur l'Arc à Pont-Saint-Rémi : les résultats qu'il obtient ne proposent pas une amélioration sensible du coefficient de détermination. On ne peut que le suivre lorsqu'il conclut que "la concentration en MES étant liée à des phénomènes complexes sur plusieurs bassins versant, il semble illusoire de pouvoir quantifier tous les processus qui engendrent les sédiments transportés" (op. cit., p. 52).

La figure 2.23/1995 montre des groupements de points qui pourraient laisser penser qu'existe un mélange de plusieurs sous-populations. Cette observation nous a incité à effectuer une analyse saisonnière de la relation concentration-débit : cinq sous-populations ont été distinguées (fig 2.24) et traitées de manière séparée ; les résultats de l'analyse statistique figurent dans le tableau 2.12 et montrent une nette amélioration des coefficients de détermination de certaines périodes par rapport au coefficient annuel. La séparation en sous-populations a été faite ici de manière intuitive après un examen rapide des données. L'amélioration de trois coefficients de détermination sur cinq laisse penser que des facteurs saisonniers sont à prendre en compte pour expliquer les apports de MES en provenance des versants :

a) La qualité de la relation concentration/débit a été la meilleure au cours de l'hiver (période 1) et de l'été 1995 (période 3). Pour la période hivernale, l'explication réside dans le fait que la relation concentration/débit est très peu tributaire de facteurs météorologiques locaux. En effet, la couverture neigeuse fige les bassins versants d'altitude et bloque la fourniture sédimentaire. Ce n'est pas le cas après la fusion de la neige, le ruissellement occasionné par des épisodes pluvieux très localisés (orages) provoquant des écoulements dont la concentration en MES est très forte ($> 30 \text{ g.l}^{-1}$), mais dont le volume n'est pas toujours suffisant pour accroître sensiblement le débit de l'Isère à Grenoble. Il en résulte que de fortes concentrations en MES peuvent être observées

pour une large gamme de débits, ce qui bien évidemment nuit très fortement à la qualité de la liaison statistique entre ces deux variables. La bonne relation concentration/débit au cours de l'été 1995 tient justement au fait que cette année, la variabilité de la concentration en MES est restée faible (voir fig. 2.17 et 2.21) en raison d'une activité orageuse estivale modérée.

b) Les coefficients de détermination ont été plus faibles au printemps (période 2), au moment de la libération progressive des bassins-versants de leur couverture nivale et de la reprise des transports de MES. L'automne 1995 (période 4) n'a montré aucune relation entre la concentration des écoulements en MES et le débit. Il est possible que ceci témoigne de l'influence des travaux de rectification du chenal de l'Arc réalisés à l'occasion de l'aménagement autoroutier de la Maurienne. Pendant une grande partie de l'année 1995, les travaux dans le chenal ont été à l'origine d'intenses brassages des fonds qui ont remis en suspension des quantités non négligeables de sédiments fins. Au cours de l'automne 1995, les teneurs en MES ont été presque constamment au-dessus de 100 mg.l^{-1} , alors que dans le même temps les débits étaient particulièrement faibles (moins de $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Les prélèvements réalisés au cours de l'automne semblent atypiques puisque, lorsqu'on la retire des calculs de régression, la relation concentration-débit est très fortement améliorée (coefficient de détermination r^2 passant de 0,515 à 0,846).

Une étude identique a été également tentée pour la période 1994-95. Des débits très contrastés en toutes saisons (crues d'automne et d'hiver, en particulier) n'a pas permis de mettre en évidence des particularismes saisonniers aussi marqués qu'en 1995-96. Dans les mois à venir, il est prévu de procéder à une nouvelle étude, où le tri des données sera effectué plus finement sur la base d'éléments météorologiques. Le test effectué sur l'année 1995-96 paraît indiquer que des corrélations bien

Tableau 2.11 - Relation Concentration-Débit à Grenoble-Campus pour les trois premières années de mesure.

Période de mesure	Relation Concentration/Débit	r^2
1994 (depuis le 23/03)	$\text{Ln}(C_{94-95}) = 2,242.\text{Ln}(Q_{94-95}) - 6,798$	0,459
1995	$\text{Ln}(C_{95-96}) = 1,863.\text{Ln}(Q_{95-96}) - 4,591$	0,515
1996	$\text{Ln}(C_{96-97}) = 2,127.\text{Ln}(Q_{96-97}) - 6,064$	0,491

avec C : Concentration (mg/l)
Q : Débit (m^3/s)

Tableau 2.12 - Relation concentration-débit par périodes à Grenoble Campus pour l'année 1995-96.

Date	Période	N	r^2	Relation Concentration-Débit
23/03/95 au 30/04/95	1	77	0,661	$\text{Ln}(C) = 0,175.\text{Ln}(Q) + 4,75$
1/05/95 au 15/07/95	2	151	0,475	$\text{Ln}(C) = 3,539.\text{Ln}(Q) - 14,064$
16/07/95 au 16/09/95	3	125	0,679	$\text{Ln}(C) = 1,954.\text{Ln}(Q) - 5,669$
17/09/95 au 31/12/95	4	221	0,127	$\text{Ln}(C) = 0,604.\text{Ln}(Q) + 2,36$
1/01/96 au 22/03/96	5	163	0,522	$\text{Ln}(C) = 1,614.\text{Ln}(Q) - 4,349$
Année 95-96 sans période 4	6	516	0,846	$\text{Ln}(C) = 2,803.\text{Ln}(Q) - 9,967$

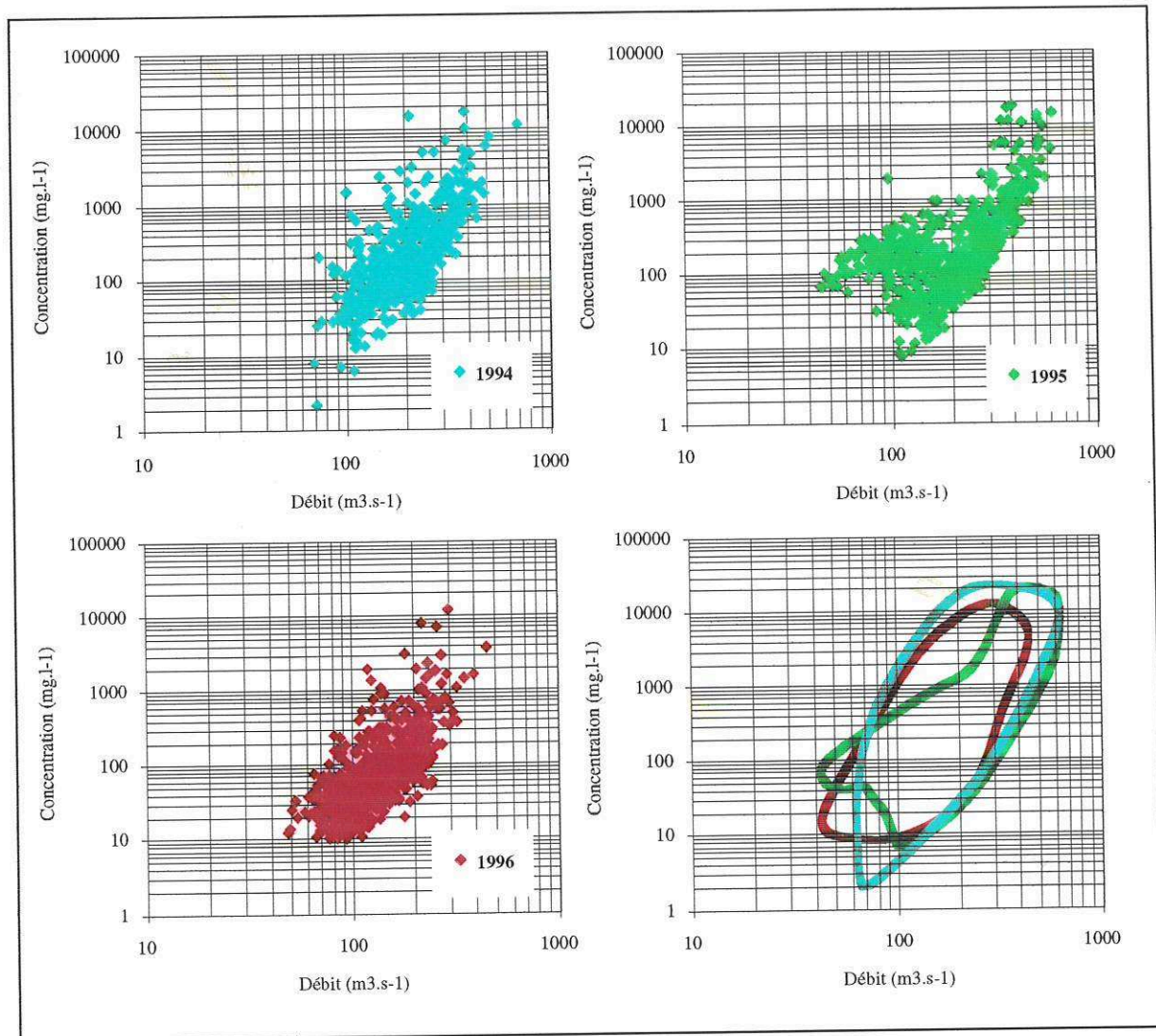


Figure 2.23 - Relations concentration/débit à la station de Grenoble-Campus depuis le début des mesures.

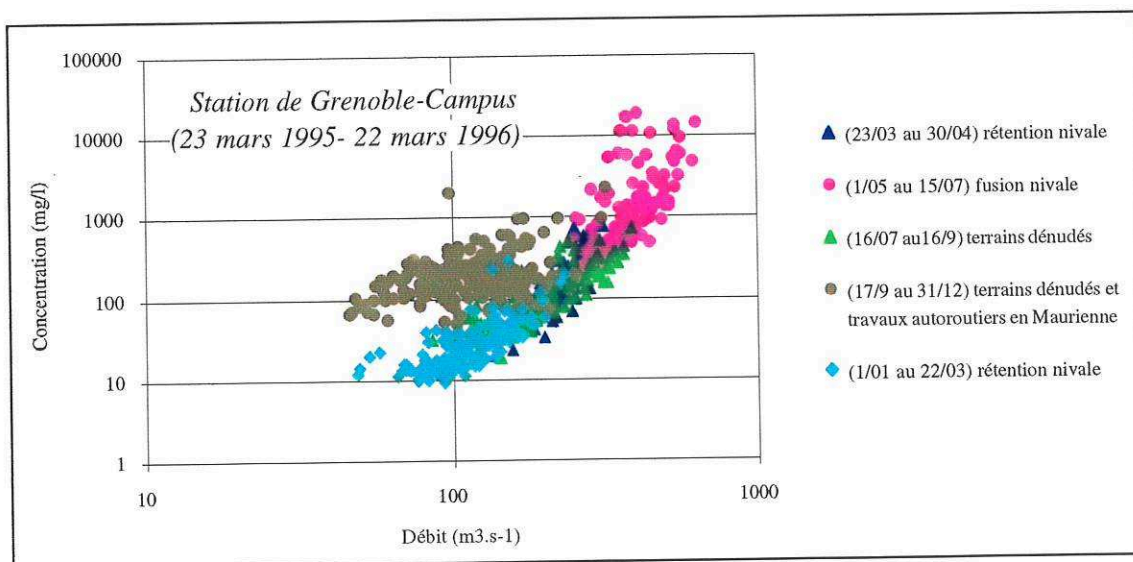


Figure 2.24 - Evolution saisonnière de la relation concentration/débit au cours de l'année 1995-96

meilleures pourraient alors émerger si l'on intègre les types de temps aux calculs.

B) La modélisation conceptuelle

En se fondant sur des données recueillies dans le bassin-versant de l'Arc, Gautheron (1995) a élaboré un *modèle conceptuel à réservoir* permettant, sur la base des mesures d'une partie de l'année 1994, de reconstituer les concentrations des transits de MES à Grenoble-Campus. Le modèle est construit autour de 3 modules : a) un module de production fondé sur les précipitations et la fusion du stock neigeux ; b) un module de stockage (réservoir fictif) permettant la prise en compte des phénomènes d'hystérésis du transport solide en suspension (ce réservoir correspond, en fait, au phénomène de préparation et de stockage de la MES dans les têtes de bassins-versants entre deux épisodes de transport) ; c) un module de transport vers l'exutoire correspondant à la vidange partielle ou totale du réservoir par un débit d'entraînement. La grosse difficulté de ce type de modélisation réside dans les difficultés de calage qu'il présente : 11 variables d'entrées constituaient le modèle et 10 paramètres étaient à caler de manière empirique. Les résultats ont été globalement positifs puisque le modèle est relativement bien parvenu à reconstituer les principaux événements à l'origine de fortes concentrations en MES. Comme le souligne cependant Gautheron (1995), le calage a été fait *a posteriori* sur une série d'événements que l'on a cherché à reconstituer au mieux ; rien ne permet actuellement d'être sûr que les paramètres de calage soient identiques pour une autre série de données. Les tests réalisés sur les concentrations de 1995, avec le même modèle calé de manière identique, n'ont pas permis d'obtenir des résultats aussi satisfaisants, en particulier parce que la fusion nivale a été l'élément prépondérant de l'année 1995, alors que plusieurs crues s'étaient produites en 1994 (Poirel, EDF-DTG, comm. perso). Par ailleurs, le modèle ne prend pas en compte les chasses artificielles des réservoirs, ni non plus les comportements très différents des sous-bassins de l'Isère amont vis-à-vis de la fourniture en matériaux fins. Ici encore d'importantes recherches sont à mener pour parvenir à une modélisation prévisionnelle. La prévision des apports de MES est bien évidemment un élément important de la gestion des réservoirs hydroélectriques de la basse-Isère, en raison de l'envasement des retenues qu'ils engendrent.

2.3.4) La recherche des origines de la MES

A) Objectifs et méthode

Le suivi de la charge en suspension de l'Isère à Grenoble pose la question de la détermination de son origine. L'analyse des conditions climatiques engendrant les fortes concentrations de l'année 1994, faite par Gautheron (1995), semble indiquer que les sédiments

proviennent majoritairement de la Maurienne. Afin de fonder cette hypothèse sur des critères plus objectifs, nous avons demandé à un étudiant de maîtrise de mettre en place une base de données cartographiques géoréférencées ayant pour but la localisation des principales zones susceptibles de produire des MES (Latulippe, 1995). On ne développera pas ici le détail de la méthode mise en œuvre à l'occasion de cette étude, récemment publiée (Latulippe & Peiry, 1996) ; on se contentera seulement d'en rappeler le principe général⁴.

L'analyse n'a pas porté sur la totalité du bassin-versant mais exclusivement sur les cours d'eau de rang 4, de manière à disposer d'un échantillon composé d'individus liés à une entité géographique clairement identifiée (le bassin-versant). Quarante-trois bassins-versants (B.V.) ont été étudiés individuellement ; ils couvrent environ 50 % de la superficie du bassin de l'Isère en amont de Grenoble (fig. 2.25/A). Trois types de variables ont été retenues pour caractériser les potentialités des B.V. à produire des sédiments fins : a) des critères morphométriques (densité de drainage et pente du BV) ; b) des critères géologiques, les formations étant classées en fonction de leur potentialité à libérer des fines (tab. 2.13) ; c) l'absence de couverture végétale protégeant les sols, élément fondamental des processus d'érosion diffuse et concentrée. Des cartes analytiques ont pu être réalisées à partir de la base de données géoréférencées pour les deux derniers types de variables (fig. 2.25, B et C).

La hiérarchisation des zones de forte production sédimentaire a été faite sur la base d'un indice de sensibilité globale à l'érosion (SG_i) déterminé pour chaque bassin-versant i . Cet indice a été calculé en deux étapes consécutives : a) le croisement cartographique de la géologie et de la couverture végétale a permis d'identifier 6 types de croisements auxquels on a affecté des coefficients de sensibilité (tab. 2.14) ; un indice de sensibilité (S_i) quantifiant l'importance relative des principaux types de croisements entre géologie et sol nu a ensuite été calculé par une méthode additive ; b) les critères morphométriques ont été intégrés par la suite sous la forme de coefficients multiplicateurs venant pondérer la variable S_i (voir tab. 2.15 et 2.16). Une fois la sensibilité globale à l'érosion (SG_i) calculée, on a étudié sa distribution statistique, ce qui a conduit à établir 5 classes de sensibilité à l'érosion (érodibilité très faible, faible, moyenne, forte, très forte) (fig. 2.26).

B) Résultats de l'étude

Les résultats de la hiérarchisation ont finalement été restitués sur une carte (fig. 2.27) qui discrimine des ensembles géographiques pour lesquels les conditions de sensibilité à l'érosion diffèrent :

⁴ Le lecteur peut prendre connaissance du développement de la méthode dans la publication figurant dans le volume 2 de ce mémoire de DHDR.

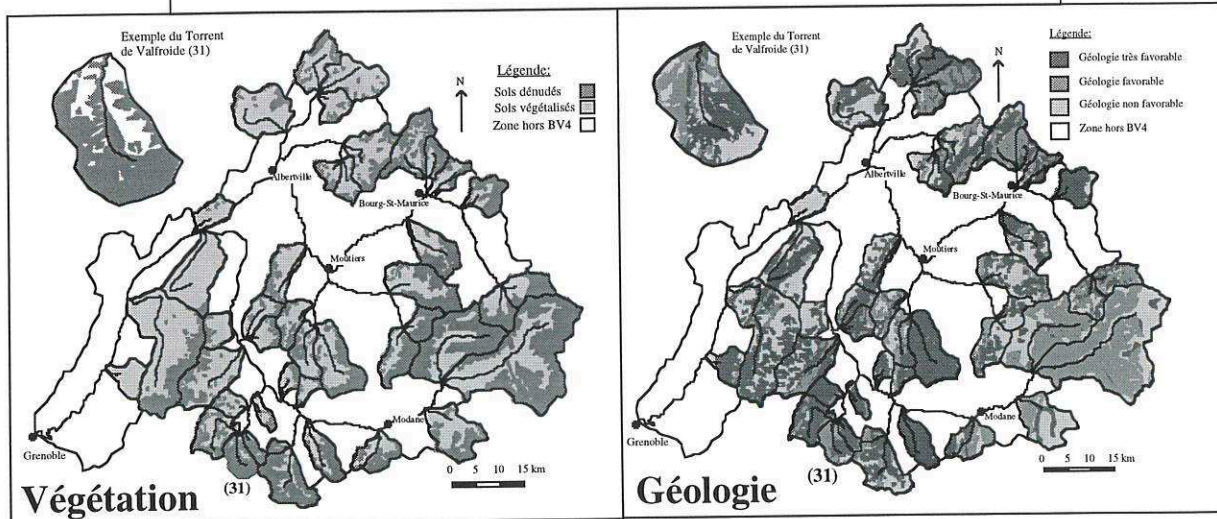
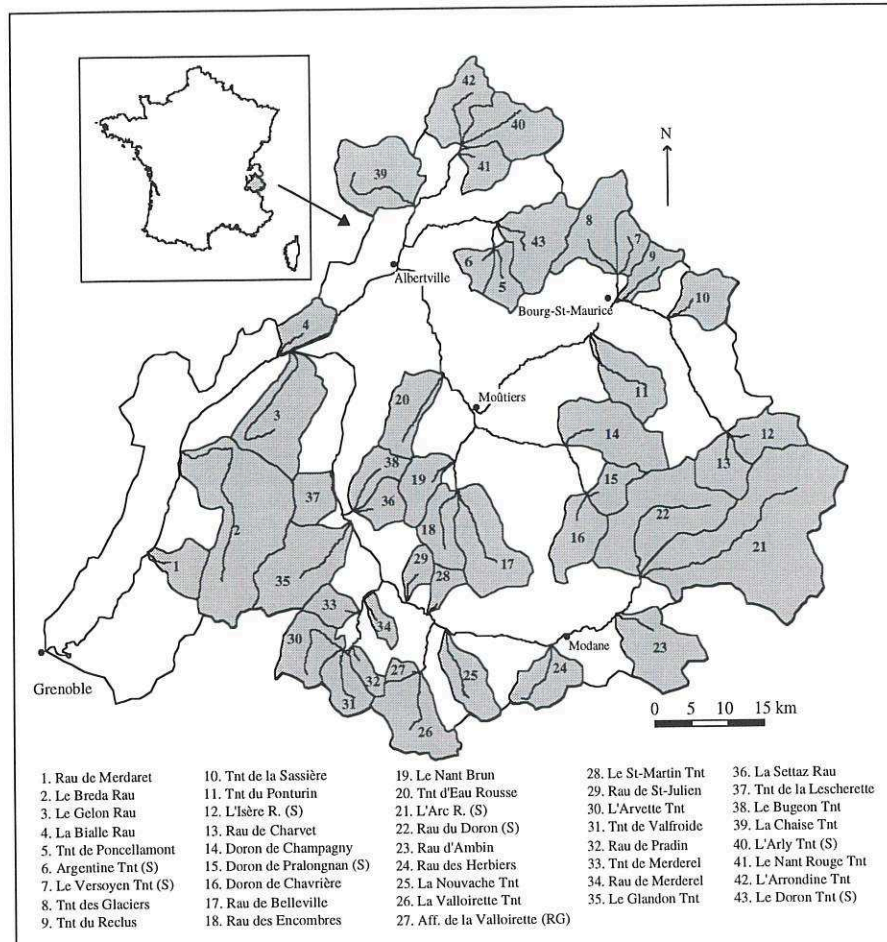


Figure 2.25 - Cartographie thématique des sols nus et de la géologie favorable à l'érosion sur les bassins-versants de rang 4 de l'Isère
 (Source : Latulippe & Peiry, 1996 modifié)

1) Les B.V. localisés dans les massifs cristallins externes s'étendant de la chaîne de Belledonne jusqu'à l'extrémité supérieure du bassin de l'Arly sont identifiés comme les zones les moins favorables pour la recharge de MES. Il faut voir là l'effet conjoint de la bonne tenue à l'érosion des formations cristallines et de la bonne protection

des sols par la végétation.
 2) Dans la partie septentrionale de la zone d'étude, la bordure orientale du massif préalpin des Bauges semble présenter des B.V. peu sensibles à l'érosion. La lithologie favorable à l'érosion (prédominance de marnes et de calcaires marneux) est compensée par une couverture végé-

Tableau 2.13 - Caractéristiques des formations géologiques les plus érodibles sur le bassin-versant de l'Isère
(Source : Latulippe & Peiry, 1996).

<i>Formations géologiques</i>	<i>Roches ou séries stratigraphiques retenues</i>	<i>Caractéristiques d'érodibilité</i>	<i>Classe d'érodibilité</i>
Formations Quaternaires	Dépôts morainiques, dépôts fluvio-glaciaires, zones de glissement de terrain et anciennes coulées boueuses.	Par leur caractère non-consolidé, les formations quaternaires ont un potentiel de production sédimentaire très élevé.	TF
Schistes Lustrés	Calcaires et marnes (SLci), "black shales" (SLcm) et schistes lustrés non différenciés (SL).	Si le degré de fissuration est élevé, on peut avoir d'important flux sédimentaire (exemple du torrent d'Envers sur la rive gauche de l'Arc).	F
Flysch Tertiaire	Séries schisteuses et calcaires.	Ces roches sont souvent disloquées et régulièrement glissées, ce qui, comme sur le torrent de la Ravoire en Maurienne, est un facteur de déclenchement et de prolifération des laves torrentielles.	F
Terres Noires du Jurassique	Marnes noires de l'Oxfordien	Le degré d'érodibilité des marnes noires ou "Terres Noires" est bien connu. C'est un lieu de prédilection des glissements de terrain et du ravinement intense.	TF
Lias schisteux	Schistes noirs très fissiles des étages du Domérien, du Toarcien et de l'Aalénien.	Le Lias schisteux est sûrement une des formations géologiques les plus érodibles du bassin-versant de l'Isère, surtout l'étage Aalénien (composé à plus de 80% de marnes). En voyant ces schistes, on peut imaginer facilement qu'une simple précipitation sur le B.V. influence la production sédimentaire.	TF
Lias calcaires	Calcaires séparés d'interlits marneux de l'étage Héttangien, Sinémurien et Carixien.	Si cette formation est bien fissurée et selon l'épaisseur des lits marneux, les possibilités de glissement de terrain sont relativement grandes (exemple le torrent de Valfroide).	F
Gypses et Cargneules du Trias	Gypses et Cargneules.	Bien que le gypse soit une roche tendre, celui-ci fournit en lui-même peu de sédiments. Cependant, à cause de ses propriétés (densité et solubilité), le gypse peut devenir un facteur majeur de l'ablation d'un versant.	F
Houiller briannonnais	Schistes noirs et versicolores, grès et conglomérat (toutes les séries du houiller).	Les vieux versants du Houiller sont constitués d'amas de roches disloquées et glissées propices à la production sédimentaire (nombreux exemples sur les rives de l'Arc).	TF

Classes d'érodibilité - TF : Très favorable ; F : Favorable

Tableau 2.14 - Les 8 caractères retenus dans la base de données, leur coefficient de sensibilité à l'érosion et le B.V. auquel ce coefficient a été attribué.

<i>Type de superposition</i>	<i>Code caractère</i>	<i>Sensibilité maxi (Smaxj)</i>	<i>Bassin-versant</i>	<i>Code B.V.</i>
Géologie très favorable et sol nu	TFN	50	La Nouvache Tnt	25
Géologie favorable et sol nu	FN	25	Rau de Doron (S)	22
Géologie très favorable et sol végétalisé	TFV	10	Rau de Belleville	17
Géologie non favorable et sol nu	NFN	10	Doron de Pralognan (S)	15
Géologie favorable et sol végétalisé	FV	5	L'Arc Rau (S)	21
Géologie non favorable et sol végétalisé	NFV	0	La Bialle Rau	4
Densité de drainage	Dd	Coefficient multiplicateur	Tnt de Valfroide	31
Ratio de relief	RR	Coefficient mutliplicateur	Doron de Pralognan (S)	15

Tableau 2.15 - Base de données initiale sur laquelle les calculs d'indices de sensibilité ont porté. Les combinaisons géologie/couverture végétale sont exprimées en pourcentage de la surface du bassin-versant considéré
(Source : Latulippe & Peiry, 1996).

Code	Bassins-versants d'ordre 4	Aire (km ²)	Dd (km-1)	RR	%TFN	%FN	%NFN	%TFV	%FV	%NFV
1	Rau de Merdaret	38,882	1,08	0,23	0,60	0,00	0,00	52,17	0,00	47,23
2	Le Breda Rau	235,081	0,96	0,09	2,98	0,00	18,45	16,15	1,29	61,14
3	Le Gelon Rau	112,395	1,10	0,08	0,00	0,00	3,52	19,23	0,62	76,63
4	La Bialle Rau	34,063	1,28	0,21	0,00	0,00	4,76	1,36	0,00	93,87
5	Tnt de Poncellamont	29,023	1,57	0,17	0,80	0,00	10,38	13,57	1,60	73,66
6	Argentine Tnt (S)	22,274	1,26	0,25	0,00	0,00	31,20	6,24	4,16	58,40
7	Le Versoyen Tnt (S)	28,103	1,81	0,21	22,24	10,71	10,71	25,54	9,89	20,91
8	Tnt des Glaciers	78,537	1,32	0,18	9,72	4,42	21,22	14,73	15,63	34,28
9	Tnt du Reclus	31,647	1,62	0,20	10,25	3,66	12,44	23,42	5,86	44,37
10	Tnt de la Sassièrè	48,200	1,25	0,26	30,78	0,00	30,30	22,12	0,00	16,79
11	Tnt du Ponturin	67,671	1,32	0,18	9,95	0,34	30,55	13,38	2,06	43,71
12	L'Isère R, (S)	47,357	1,10	0,17	9,82	8,84	33,39	17,18	3,44	27,33
13	Rau de Charvet	46,273	1,07	0,19	3,02	2,52	39,23	10,05	8,54	36,63
14	Doron de Champagny	99,213	0,97	0,20	6,80	1,87	31,88	16,64	1,87	40,94
15	Doron de Pralognan (S)	32,893	0,68	0,38	7,78	0,00	53,79	6,37	0,00	32,06
16	Doron de Chavrière	57,818	1,01	0,17	10,48	0,81	40,30	12,90	4,03	31,48
17	Rau de Belleville	96,234	1,45	0,15	24,71	0,00	8,48	58,60	0,00	8,21
18	Rau des Encombres	48,810	1,59	0,15	3,82	0,95	16,23	33,42	12,88	32,69
19	Le Nant Brun	42,846	1,46	0,16	3,26	1,63	16,84	15,75	6,52	56,00
20	Tnt d'Eau Rousse	57,734	1,43	0,17	3,62	0,00	14,09	13,69	2,82	65,78
21	L'Arc R, (S)	339,247	1,04	0,08	2,40	21,71	26,03	3,16	30,71	15,99
22	Rau du Doron (S)	160,530	1,10	0,12	5,37	26,40	26,99	4,50	15,96	20,78
23	Rau d'Ambin	86,216	1,04	0,14	3,25	4,34	23,31	9,37	17,33	42,40
24	Rau des Herbiers	51,175	1,43	0,19	6,85	11,42	22,39	21,01	11,87	26,46
25	La Nouvache Tnt	50,749	1,23	0,18	31,33	0,00	10,13	50,66	0,00	7,88
26	La Valloirette Tnt	84,714	1,22	0,16	16,84	1,66	40,60	14,63	1,38	24,89
27	Aff, de la Valloirette (RG)	9,852	2,08	0,29	30,82	14,23	7,15	4,77	2,38	40,66
28	Le St-Martin Tnt	18,652	1,80	0,30	10,00	0,00	5,00	50,02	10,00	24,97
29	Rau de St-Julien	20,826	1,77	0,28	2,24	2,24	16,79	39,19	7,84	31,70
30	L'Arvette Tnt	60,271	1,53	0,13	13,95	1,55	14,34	27,12	1,94	41,09
31	Tnt de Valfroide	39,994	2,15	0,10	26,89	15,20	14,62	18,12	9,35	15,83
32	Rau de Pradin	16,879	2,14	0,29	6,93	8,31	51,23	1,38	1,38	30,77
33	Tnt de Merderel	26,669	1,48	0,20	4,38	0,00	3,50	17,50	6,13	68,50
34	Rau de Merderel	16,765	1,66	0,23	2,79	6,96	12,54	5,57	8,36	63,79
35	Le Glandon Tnt	107,861	1,10	0,14	1,08	0,22	20,54	14,06	4,33	59,78
36	La Settaz Rau	28,882	1,59	0,32	0,00	4,84	9,67	6,45	2,42	76,62
37	Tnt de la Lescherette	37,174	1,20	0,24	0,00	0,00	13,15	0,00	0,00	86,85
38	Le Bugeon Tnt	36,426	1,60	0,22	1,92	1,28	13,41	17,25	0,00	66,14
39	La Chaise Tnt	98,169	1,19	0,09	0,71	0,00	8,00	5,65	0,00	85,64
40	L'Arly Tnt (S)	80,283	1,80	0,10	0,00	0,29	3,45	27,90	13,24	55,12
41	Le Nant Rouge Tnt	33,754	1,29	0,14	2,05	1,37	1,37	20,54	22,60	52,06
42	L'Arrondine Tnt	62,859	1,52	0,13	8,81	0,00	19,46	28,28	0,00	43,46
43	Le Doron Tnt (S)	84,861	1,15	0,16	1,36	3,00	15,01	9,55	5,18	65,90

tale dense qui joue le rôle de frein pour la production sédimentaire fine. Certains cours d'eau, comme l'Arrondine, peuvent cependant présenter une fragilité plus forte que les B.V. voisins.

3) Les B.V. de la Tarentaise figurent dans la classe d'érodibilité moyenne. La lithologie est très favorable à la fourniture de sédiments fins, les schistes du Houiller soumis à une altération intense affleurant fréquemment sous

1500 m d'altitude. Comme dans les Bauges, c'est à la présence d'une dense couverture végétale protectrice des formations les plus affouillables que l'on doit le classement de la haute vallée de l'Isère en position moyenne dans cette classification. Les Périmètres de Restauration des Terrains de Montagnes (R.T.M.) sont nombreux dans cette zone ; il apparaît probable que l'amélioration de la couverture végétale liée aux aménagements des fores-

Tableau 2.16 - Calcul de l'indice de sensibilité globale à l'érosion SGI
(Source : Latulippe & Peiry, 1996).

Code	Bassins-versants d'ordre 4 Coeff. de sensibilité	%TFN 50	%FN 25	%NFN 10	%TFV 10	%FV 5	Si (Σ)	Cm Dd	Cm RR	Sensibilité globale (SGi)
1	Rau de Merdaret	0,96	0,00	0,00	8,90	0,00	9,86	0,93	1,04	9,62
2	Le Breda Rau	4,76	0,00	3,43	2,76	0,21	11,15	0,90	0,81	8,09
3	Le Gelon Rau	0,00	0,00	0,65	3,28	0,10	4,04	0,94	0,80	3,05
4	La Bialle Rau	0,00	0,00	0,88	0,23	0,00	1,12	1,00	1,02	1,15
5	Tnt de Poncellamont	1,28	0,00	1,93	2,32	0,26	5,78	1,10	0,95	6,06
6	Argentine Tnt (S)	0,00	0,00	5,80	1,06	0,68	7,54	1,00	1,08	8,14
7	Le Versoyen Tnt (S)	35,49	10,14	1,99	4,36	1,61	53,59	1,18	1,02	64,89
8	Tnt des Glaciers	15,51	4,19	3,94	2,51	2,54	28,70	1,02	0,96	28,00
9	Tnt du Reclus	16,36	3,47	2,31	4,00	0,95	27,09	1,12	1,01	30,53
10	Tnt de la Sassièr	49,12	0,00	5,63	3,77	0,00	58,53	0,99	1,09	63,56
11	Tnt du Ponturin	15,88	0,32	5,68	2,28	0,34	24,50	1,02	0,96	23,95
12	L'Isère R, (S)	15,67	8,37	6,21	2,93	0,56	33,74	0,94	0,95	30,30
13	Rau de Charvet	4,82	2,39	7,29	1,72	1,39	17,60	0,93	0,99	16,23
14	Doron de Champagny	10,85	1,77	5,93	2,84	0,30	21,69	0,90	1,01	19,61
15	Doron de Pralognan (S)	12,42	0,00	10,00	1,09	0,00	23,50	0,80	1,30	24,49
16	Doron de Chavrière	16,73	0,77	7,49	2,20	0,66	27,84	0,91	0,95	24,07
17	Rau de Belleville	39,44	0,00	1,58	10,00	0,00	51,01	1,06	0,92	49,60
18	Rau des Encombres	6,10	0,90	3,02	5,70	2,10	17,81	1,11	0,92	18,20
19	Le Nant Brun	5,20	1,54	3,13	2,69	1,06	13,63	1,07	0,94	13,65
20	Tnt d'Eau Rousse	5,78	0,00	2,62	2,34	0,46	11,19	1,06	0,94	11,15
21	L'Arc R, (S)	3,83	20,56	4,84	0,54	5,00	34,77	0,92	0,80	25,59
22	Rau du Doron (S)	8,57	25,00	5,02	0,77	2,60	41,95	0,94	0,87	34,20
23	Rau d'Ambin	5,19	4,11	4,33	1,60	2,82	18,05	0,92	0,90	14,90
24	Rau des Herbiers	10,93	10,81	4,16	3,59	1,93	31,43	1,05	0,98	32,44
25	La Nouvache Tnt	50,00	0,00	1,88	8,65	0,00	60,53	0,99	0,97	58,08
26	La Valloirette Tnt	26,88	1,57	7,55	2,50	0,22	38,72	0,99	0,93	35,42
27	Aff, de la Valloirette (RG)	49,19	13,48	1,33	0,81	0,39	65,19	1,28	1,15	95,69
28	Le St-Martin Tnt	15,96	0,00	0,93	8,54	1,63	27,05	1,18	1,17	37,33
29	Rau de St-Julien	3,57	2,12	3,12	6,69	1,28	16,78	1,17	1,14	22,32
30	L'Arvette Tnt	22,26	1,47	2,67	4,63	0,32	31,34	1,09	0,89	30,21
31	Tnt de Valfroide	42,91	14,39	2,72	3,09	1,52	64,64	1,30	0,83	69,92
32	Rau de Pradin	11,06	7,87	9,52	0,24	0,22	28,91	1,30	1,15	42,94
33	Tnt de Merderel	6,99	0,00	0,65	2,99	1,00	11,63	1,07	1,01	12,53
34	Rau de Merderel	4,45	6,59	2,33	0,95	1,36	15,69	1,13	1,05	18,65
35	Le Glandon Tnt	1,72	0,21	3,82	2,40	0,70	8,85	0,94	0,90	7,47
36	La Settaz Rau	0,00	4,58	1,80	1,10	0,39	7,88	1,11	1,20	10,46
37	Tnt de la Lescherette	0,00	0,00	2,44	0,00	0,00	2,44	0,98	1,06	2,54
38	Le Bugeon Tnt	3,06	1,21	2,49	2,94	0,00	9,71	1,11	1,04	11,20
39	La Chaise Tnt	1,13	0,00	1,49	0,96	0,00	3,58	0,97	0,82	2,87
40	L'Arly Tnt (S)	0,00	0,27	0,64	4,76	2,16	7,83	1,18	0,83	7,63
41	Le Nant Rouge Tnt	3,27	1,30	0,25	3,51	3,68	12,01	1,01	0,91	10,98
42	L'Arrondine Tnt	14,06	0,00	3,62	4,83	0,00	22,50	1,09	0,88	21,46
43	Le Doron Tnt (S)	2,17	2,84	2,79	1,63	0,84	10,27	0,96	0,94	9,28

tiers du Service R.T.M., à la fin du XIX^e siècle, a largement contribué à réduire les érosions et à diminuer la fourniture de sédiments fins.

4) La zone la plus favorable à la recharge sédimentaire fine est sans conteste la moyenne et haute vallée de la Maurienne. Les formations géologiques les plus sensibles sont les schistes du Lias localisés sur les versants en rive gauche de l'Arc et les vastes formations de schistes lustrés de la Haute-Maurienne. Bien que des

périmètres R.T.M existent, les processus géomorphologiques demeurent intenses dans des formations très affouillables et la végétation éprouve d'énormes difficultés pour s'implanter. Sur ces tributaires de l'Arc, des concentrations en MES de 30 g.l⁻¹ sont des phénomènes courant en période de fusion nivale.

Figure 2.26 - Classement des bassins-versants en fonction de leur indice de sensibilité globale à l'érosion
(Source : Latulippe & Peiry, 1996).

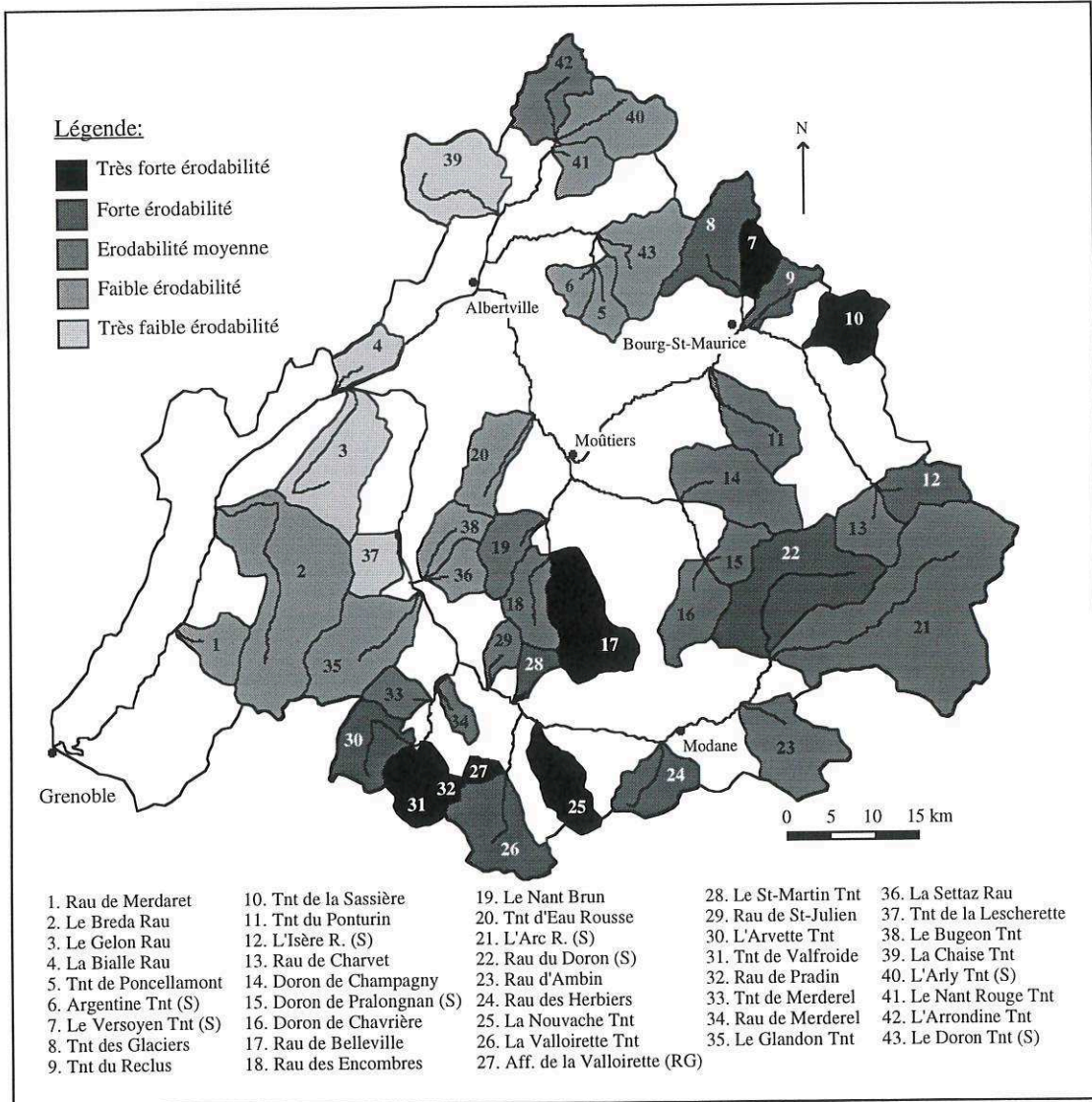
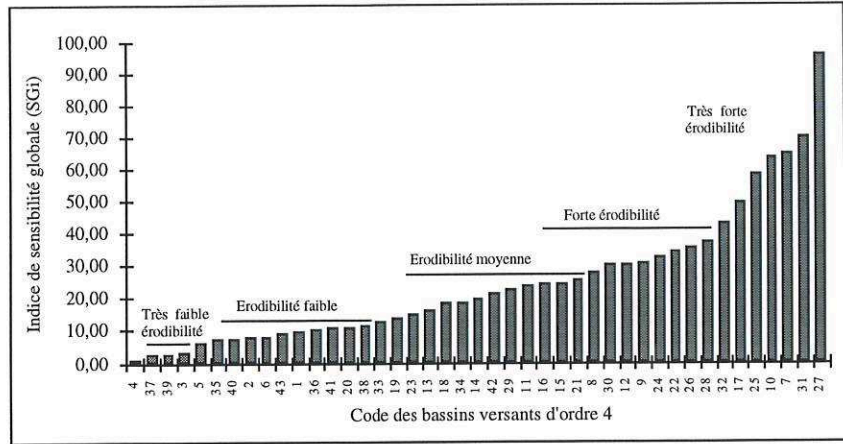


Figure 2.27 - Hiérarchisation cartographique des bassins-versants de rang 4 en fonction de leur sensibilité à l'érosion
(Source : Latulippe et Peiry, 1996)

2.4) Discussion des résultats et perspectives

L'instrumentation de la station de Grenoble-Campus pour la mesure de la matière dissoute totale et de la matière en suspension, et le suivi inter-annuel des transports de charge dissoute et solide depuis 1994 ont permis d'acquiescer des données qui, en France, sont rarement obtenues sur un pas de temps aussi long. Il est à noter que la base de données est sans lacune depuis mars 1994 pour la MES et ne présente que 3 semaines d'interruption pour la MDT⁵ depuis juin 1995, suite à une déprogrammation accidentelle de la centrale d'acquisition. L'équipement de la station a progressé petit à petit et permet désormais de suivre pratiquement en temps réel les transits de charge, les données étant stockées au même pas de temps que celui des données hydrologiques. Cela a nécessité que nous nous formions à des techniques de mesure relativement sophistiquées, rarement utilisées en France par des géographes, faisant appel à des compétences en micro-électronique et en programmation informatique, de manière à pouvoir mettre en œuvre et dépanner les capteurs utilisés. La qualité des mesures passe avant tout par une maintenance très rigoureuse et particulièrement suivie, ainsi que par la mise en place de protocoles de correction des dérives provenant de l'encrassement des capteurs (Peiry, 1996). Elle a nécessité et impose toujours un lourd travail de laboratoire : calibration des capteurs ; filtration-pesée de 24 prélèvements tous les 12 jours...

De notre point de vue, l'intérêt des résultats obtenus après 3 ans de mesure justifie pleinement cet investissement. Ceux-ci montrent en particulier le volume considérable des transports, tant de matière dissoute que de MES :

a) Le tonnage de MDT semble compris dans une fourchette de 1,0 à 2,5 M t.an⁻¹ (180 à 450 t.km⁻².an⁻¹, soit une ablation de 0,08 à 0,2 mm.an⁻¹) selon l'hydraulicité annuelle. D'après Webb & Walling (1992), à l'échelle mondiale, la charge dissoute des rivières varierait de 1 t.km⁻².an⁻¹, dans les bassins composés de roches résistantes à l'attaque chimique, à des valeurs de 6.000 t.km⁻².an⁻¹, dans les bassins les plus sensibles à la dissolution, la moyenne mondiale étant de 8,8 t.km⁻².an⁻¹ (Meybeck, 1984). Sur la *Garonne amont* (station de Portet), les exportations de MDT entre 1971 et 1983 auraient été de 100 t.km⁻².an⁻¹, 60 à 80 t.km⁻².an⁻¹ sur la période 1989-1992 (Semhi, 1996). Sur l'*Ebre*, des mesures de conductivité ont permis d'évaluer à 35 t.km⁻².an⁻¹ (43 % de la salinité totale) les transports de gypse au cours de la période 1970-85 (Navas, 1991). Sur l'*Isère* en amont de Grenoble, la géologie du bassin-versant et en particulier le rôle des formations gypseuses sur la disso-

lution, en dépit de leur surface restreinte, semble être l'un des facteurs fondamentaux du transit des MDT mesuré à la station de Grenoble-Campus, comme en témoigne la forte proportion de sulfates dans les écoulements. A titre de comparaison et bien qu'il faille très fortement relativiser la signification de la valeur moyenne du décapage par érosion chimique sur un grand bassin-versant tel que celui de l'*Isère* en amont de Grenoble (5670 km²), Chardon (1996) cite des chiffres de 0,005 mm.an⁻¹ sur des versants couverts de moyenne montagne à 0,5 à 0,7 mm.an⁻¹ sur des crêtes découvertes et des affleurements nus, voire de 1,5 mm.an⁻¹ dans le domaine périglaciaire d'altitude.

b) Le tonnage de MES transitant à Grenoble est encore plus impressionnant, tant par sa valeur absolue que par sa variabilité inter-annuelle, puisque les trois années de mesure présentant des situations très contrastées indiquent une fourchette de 1,2 à 6,5 Mt.an⁻¹, soit 215 à 1.200 t.km⁻².an⁻¹ (0,1 à 0,6 mm.an⁻¹). Sur le *Rhône inférieur*, le suivi de la MES a permis une première estimation des transports à environ 8 Mt.an⁻¹ (690 t.km⁻².an⁻¹), avec très probablement une forte variabilité inter-annuelle, le rôle des crues s'étant avéré prépondérant sur les transits (Roditis & Pont, 1993 ; Pont & Bombled, 1995) ; il est à noter que la procédure d'échantillonnage sur ponton flottant utilisée près d'Arles conduit vraisemblablement à une sous-estimation des transports solides. A titre de comparaison, Semhi (1996), reprenant les chiffres de différents auteurs, indique que les transports en suspension de la *Garonne amont* sont de 20 à 100 t.km⁻².an⁻¹, soit très inférieurs à ceux de l'*Isère* et du *Rhône*. Il en est de même sur la *Meuse* où Close-Lecocq *et al.* (1982) ont évalué à 24 t.km⁻².an⁻¹ le transport de MES au cours de 20 années de mesure. Walling & Webb (1992) évaluent à 50-100 t.km⁻².an⁻¹ les transports de MES sur les *rivières britanniques*, dans un contexte géographique beaucoup moins érosif que ne l'est celui de la montagne alpine ; ils indiquent également qu'au niveau mondial, dans les bassins-versants de taille réduite (env. 100 km²), la fourchette des tonnages annuels transportés varie de moins de 2 à 10.000 t.km⁻².an⁻¹. Il est clair sur l'*Isère* que la plus grande partie des apports de MES est fournie par des zones d'extension réduite. Si l'on émet l'hypothèse que la totalité des sédiments provient de seulement 10% des 5670 km² de la surface du bassin-versant de l'*Isère* à Grenoble (avec ce chiffre, on est probablement encore très au dessus de la réalité), on dépasse très largement la valeur haute fournie par Walling & Webb (1992).

Les travaux sur les transits de matière dissoute et de matière en suspension offrent de très nombreuses et intéressantes perspectives :

⁵ Pendant cette période d'interruption accidentelle, des mesures de conductivité ont été faites sur les échantillons d'eau prélevés automatiquement deux fois par jour, permettant ainsi de tout de même réaliser le bilan des transports de MDT.

1) des études sont à réaliser pour mieux connaître la représentativité du point de mesure de la station de Grenoble-Campus (profils de concentration pour différentes situations hydrologiques) et éventuellement améliorer la qualité des bilans sédimentaires ;

2) les analyses de la composition chimique des eaux de l'Isère régulièrement faites dans le cadre des travaux de l'équipe grenobloise restent à exploiter ; la mise en relation de certains éléments chimiques tels les sulfates ou le calcium avec la conductivité pourrait permettre d'affiner les bilans de matière dissoute ;

3) un gros travail est à faire sur l'origine spatiale de la MES et les facteurs de sa variabilité saisonnière, afin de vérifier les hypothèses résultant du calcul des indices globaux de sensibilité à l'érosion des bassins-versants d'ordre 4. La difficulté est alors de mener conjointement des suivis sur plusieurs bassins-versants éloignés les uns des autres. Si une telle étude peut aboutir, il est très probable qu'il sera préférable de concentrer les observations sur la période de fusion nivale, dont les 3 années de suivi ont montré le rôle fondamental sur l'Isère ;

4) la mise en œuvre d'un bilan sédimentaire (Reid & Dunne, 1996) à l'échelle de la vallée du Grésivaudan est en cours et devrait aboutir prochainement, notamment par l'étude de la capacité de stockage en fines des îles et des rives de l'Isère ;

5) les données fournies par la station de Grenoble-Campus doivent également servir de référence pour les travaux sur la végétalisation des îles de l'Isère dans le Grésivaudan. La masse considérable de données obtenue au cours de ces trois dernières années a, jusqu'à aujourd'hui, été insuffisamment exploitée dans un cadre interdisciplinaire, essentiellement par manque de temps. C'est le principal objectif de recherche des prochains mois ; son préalable est une étude fine des variations de niveau pendant la période végétative, en passe d'aboutir (Montanvert, 1997). Afin de ne pas seulement les envisager en terme d'altitude, mais de réaliser une analyse tridimensionnelle des relations liant la régénération végétale aux variables abiotiques qui la contrôlent, nous avons mis en place un modèle décrivant la situation d'inondation d'une île de l'Isère (île de Brignoud). Le troisième chapitre présente la démarche mise en œuvre pour développer cet outil et montre comment il peut être utilisé pour analyser les processus d'exhaussement des îles de l'Isère et la régénération végétale.

CHAPITRE 3

MODALITÉS D'INONDATION ET D'EXHAUSSEMENT DES ÎLES DE L'ISÈRE : L'EXEMPLE DE L'ÎLE DE BRIGNOUD

- 3.1) Problématique et choix de la zone d'étude
- 3.2) Les données et les méthodes de recueil de l'information
- 3.3) Modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement de l'île de Brignoud
- 3.4) Discussion des résultats et perspectives

Résumé du chapitre 3

Dans ce troisième chapitre, l'accent est mis sur deux études spécifiques réalisées sur le site expérimental de l'île de Brignoud, afin de pouvoir corrélérer spatialement certaines variables abiotiques et la régénération végétale : il s'agit de la modélisation de l'inondabilité pour différentes valeurs de débit, et du suivi de l'exhaussement inter-annuel du site, conséquence de la sédimentation fine se produisant lors des phases de submersion.

La nature des données, les méthodes de recueil de l'information topographique, sédimentologique et hydrologique sur le site de Brignoud sont abordées dans un premier temps. Suivent les étapes de la modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement qui reprennent successivement les principes de réalisation d'un modèle numérique de terrain, la mise en place d'une relation liant les hauteurs d'eau entre la station de Grenoble-Campus et le site de Brignoud, la détermination expérimentale de la pente de la ligne en période d'inondation, et la phase de test du modèle en reproduisant une situation d'inondation et en la comparant aux observations réalisées sur le terrain. La réduction de l'inondabilité de l'île de Brignoud est ensuite modélisée et quantifiée pour différentes valeurs de débit dans la gamme de 400 à 650 m³.s⁻¹. Il apparaît très clairement que l'île de Brignoud s'est considérablement exhaussée au cours des deux premières années de mesures, gagnant en volume plus de 2200 m³ en 1994, et 1270 m³ en 1995.

L'analyse conjointe de l'organisation spatiale de l'exhaussement, des durées de submersion totale ou partielle de l'île et des concentrations en MES lors de ces épisodes montre très clairement la grande vitesse d'évolution de la topographie. L'exhaussement de l'île de Brignoud a atteint plusieurs décimètres en quelques heures, ce qui a nécessité des taux de sédimentation de 2 à 5 cm.h⁻¹. Le rôle de la couverture végétale sur les rythmes d'incision et la distribution spatiale de la granulométrie des formations superficielles est discuté.

3.1) Problématique et choix de la zone d'étude

Le suivi par la mesure de la charge dissoute et de la charge en suspension, dont nous avons présenté les principaux résultats dans le chapitre précédent, constitue un moyen de comprendre la relation liant la dynamique des flux de nutriments et de matière minérale à la croissance ou à la mortalité des plantules pendant la période végétative. Il n'est utile qu'à partir du moment où il alimente en données une étude fine de terrain portant sur la germination et la croissance des plantules d'arbres, et sur les principales variables susceptibles de l'expliquer (topographie, hydrométrie, sédimentologie, sédimentation, humidité des sols, échanges de matière organique et de nutriments...). C'est dans cet objectif que nous avons instrumenté une île située en rive droite de l'Isère à une vingtaine de kilomètres en amont de Grenoble, 300 mètres en aval du pont de Brignoud (voir fig. 2.1 pour localisation). Dans l'étude qui va suivre, nous n'allons pas présenter la totalité des résultats acquis, d'abord parce que cela demanderait des développements interdisciplinaires dépassant largement le cadre de ce diplôme d'HDR, ensuite parce qu'une grosse partie des données est encore en cours de traitement. Nous avons choisi de nous limiter aux résultats de deux études spécifiques :

1) la modélisation de l'inondabilité de l'île de Brignoud, dont l'objectif est de fournir une image spatio-temporelle des espaces soumis à l'inondation pour différentes valeurs de débit. Elle trouve son application lorsque l'on souhaite corrélérer le modèle de la régénération annuelle des plantules avec les processus résultant de l'hydrologie (niveaux, fréquences et durées d'inondation, hauteur de sédimentation minérale...). En outre, on verra que la modélisation est le fruit d'une démarche relativement complexe, nécessitant de faire le lien entre un grand nombre de mesures effectuées sur le site de Brignoud, mais également à la station hydrométrique de Grenoble-Campus ;

2) le suivi de l'exhaussement de l'île lors des phases d'inondation : d'abord parce que les dépôts de MES sont un facteur limitant lorsqu'ils affectent sur des plantules trop jeunes et trop fragiles pour supporter l'enfouisse-

ment ; ensuite parce que les dépôts fins entrent dans une boucle de rétroaction positive avec la végétation alluviale, le dépôt de sédiments fins favorisant la végétalisation, elle-même à l'origine d'une accélération de la sédimentation fine...

L'île de Brignoud est une forme alluviale récente dans la hiérarchie des biotopes terrestres liés au chenal de l'Isère, puisqu'elle s'est développée au tout début de la décennie 1990 (fig. 2.28). A cette date, elle a subi quelques perturbations d'origine humaine dans son tiers supérieur, lors de travaux de génie-civil destinés à protéger un gazoduc qui franchit la rivière (Didier, 1994). Ce site d'étude a été choisi :

a) pour sa localisation dans une zone où le profil en long de l'Isère est actuellement stable, en dépit des forts ajustements de la pente qu'a connu le chenal au cours des 40 dernières années (Nouguier, 1992 ; Peiry, Salvador *et al.*, 1994) (voir fig. 2.3). Rappelons que les différents profils en travers levés entre 1980 et 1993 ont montré que l'île de Brignoud est localisée au point pivot du basculement du profil en long consécutif à la mise en service de l'usine hydroélectrique du Cheylas (A.D. Isère-Drac-Romanche, 1993) ;

b) pour son accessibilité depuis la rive pour des conditions de débit inférieure à 400 m³.s⁻¹. La plupart des autres îles de la même génération sont séparées de la berge par un chenal de chute large et inondé pour des débits très faibles ; de ce fait, elles ne peuvent être visitées facilement qu'en période de basses-eaux, ce qui n'est pas le cas de l'île de Brignoud.

3.2) Les données et les méthodes de recueil de l'information

L'île de Brignoud a fait l'objet d'un important recueil de données pluridisciplinaires depuis le mois de décembre 1993. Les données portent sur la topographie, la sédimentologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la qualité des eaux de la rivière et de la nappe, la phytoécologie. Les

Tableau 2.17 - Nature des enregistrements de données sur l'île de Brignoud depuis décembre 1993.

Nature des enregistrements	Responsable	Période de mesure	Périodicité
Topographie	J.-L.P	Déc-93, Déc-94, Mar-96, Mar-97...	Annuelle (hiver)
Sédimentologie	J.-L.P	1 état au début de l'étude (Déc.93)	-
Hydrologie (hauteur d'eau)	T. H et J.-L.P	Déc-93 à Mars-95	toutes les 1/2 heures
Humidité des sols (tensiomètres)	T. H et J.-L.P	Déc-93 à Mars-95	toutes les 1/2 heures
Piézométrie et qualité de l'eau	R.F.	depuis Déc.94	toutes les 2 semaines
Régénération végétale	G.P. et R.F.	Période végétative 1994-95-96	toutes les semaines
Formations végétales	G.P et J.G.	Été 1994...	Annuelle (printemps)

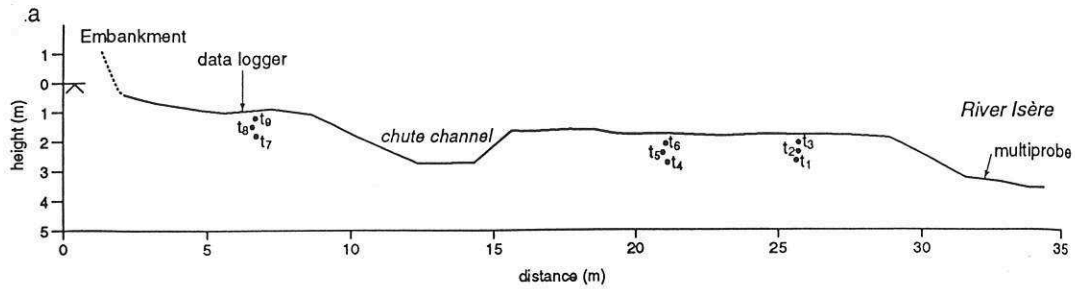
J.-L.P : Jean-Luc PEIRY (Institut de Géographie Alpine-UJF)

G.P. : Guy PAUTOU (Labo de Biologie Alpine-UJF)

T.H. : Tim HARRIS (Department of Geography, Univ. of Cambridge)

R.F. : Rémi FOUSSADIER (Labo de Biologie Alpine-UJF)

J.G. : Jacky GIREL (Labo de Biologie Alpine-UJF)



location of tensiometers

$t_1 = 90$ cms depth	$t_4 = 90$ cms depth	$t_7 = 90$ cms depth
$t_2 = 60$ cms depth	$t_5 = 60$ cms depth	$t_8 = 60$ cms depth
$t_3 = 30$ cms depth	$t_6 = 30$ cms depth	$t_9 = 30$ cms depth

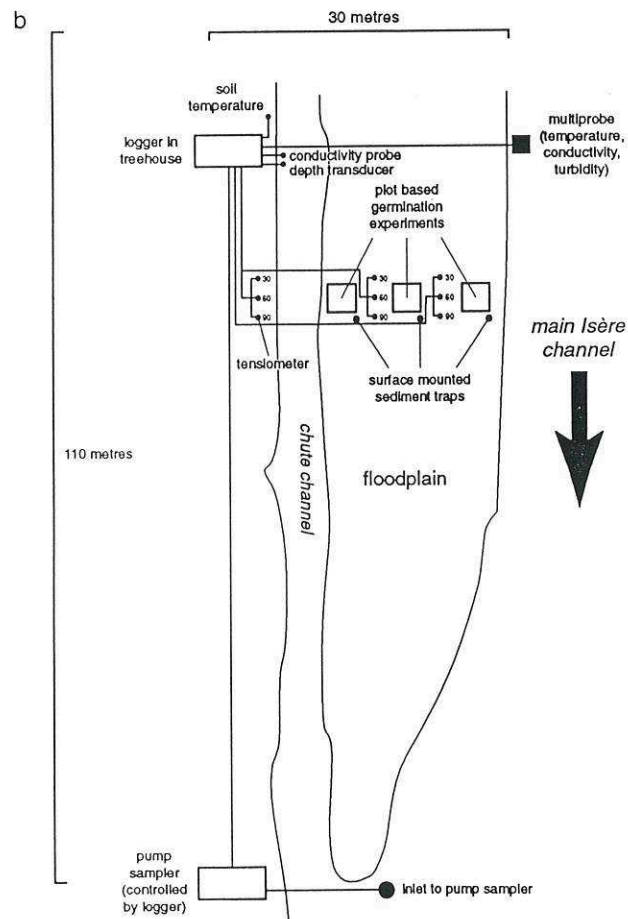


Figure 2.28 - Instrumentation de l'île de Brignoud
a/ vue en coupe ; b/ vue en plan.

(Source : Richards, Hughes et al., 1996)

enregistrements sont effectués à des pas de temps variables qui figurent dans le tableau 2.17.

On ne développera ci-dessous que le recueil des données provenant des investigations de terrain que nous avons menées ou auxquelles nous avons collaboré.

3.2.1) Les données topographiques

La topographie est levée au théodolite, les altitudes relatives étant calées en cotes NGF sur la borne du pont de

Brignoud, distante de quelques centaines de mètres. La date du suivi et sa fréquence sont soumises à deux contraintes : a) une couverture végétale qui se densifie chaque année un peu plus et empêche tout travail de topographie avant la chute des feuilles ; b) la nécessité d'intervenir en basses-eaux pour suivre l'évolution du corps du banc de galets constituant la fondation de l'île. Depuis 1996, la densification de la couverture végétale nous a contraint de différer la campagne topographique à la fin de l'hiver ; en décembre, les feuilles de saules cou-

vrent encore les arbres et les difficultés de mesure sont, de ce fait, considérablement accrues.

Les conditions d'échantillonnage sont les suivantes : dans un premier temps, on a mis en place un maillage topographique rectangulaire piqué d'une résolution de 10 m x 1 m afin de pouvoir assurer la reproductibilité de la mesure dans le temps. Pour réaliser les levés topographiques, on procède par profils successifs disposés transversalement à l'écoulement. Une mesure est faite, tous les mètres, le long de 34 transects équidistants de 10 mètres, ce qui correspond à l'enregistrement de près de 700 valeurs d'altitude lors de chaque campagne de terrain. Lors de la campagne de décembre 1993, des sondages à la tarière de pédologue ont permis d'atteindre le toit du banc de galet et de le coter en altitude absolue. Pour ne pas trop alourdir l'étude de terrain, on a augmenté les dimensions du maillage (maille de 10 m x 5 m), la précision demeurant cependant suffisante pour avoir une image correcte de l'allure du toit de galet.

Le suivi topographique annuel est ponctuellement complété par une topographie des laisses de crues : cela fut le cas en mars 1995, après une crue d'hiver ($Q_t=585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le 25-26 février). Ces observations complémentaires ont un triple objectif : a) mesurer la pente de la ligne d'eau en période de submersion de l'île ; b) observer les axes de circulation des flux en période de submersion (le dense tapis d'herbacées se couche dans le sens des flux ; c) recueillir des données permettant de vérifier la validité du modèle de submersion (voir P2 § 3.3.1, D) en se référant à des observations de terrain.

3.2.2) Les données sédimentologiques

Lors de la première campagne de mesure, les sondages à la tarière ont non seulement permis de topographier le toit du banc de galet, mais aussi d'échantillonner dans les formations superficielles à différentes profondeurs. Sur la maille de 10 m x 5 m, les échantillons ont été prélevés de manière systématique tous les 20 cm de profondeur et ensachés afin d'être soumis ultérieurement à une analyse granulométrique. En surface, la densité de l'échantillonnage a été augmentée et des prélèvements ont été effectués tous les 2 mètres le long des profils transversaux.

Les sables ont été tamisés à sec au laboratoire de géomorphologie de l'Institut de Géographie Alpine ; les limons et argiles ont été traités au compteur Coulter au laboratoire de géographie physique de l'Université Lyon 3. Des courbes granulométriques, on a tiré des indices sédimentologiques classiques, tels que médiane, centiles, et indices de tri.

3.2.3) Les données hydrologiques

Les hauteurs d'eau sont mesurées grâce à des capteurs de pression disposés sur une transversale localisée

approximativement aux 2/3 inférieurs de l'île (voir fig. 2.28) : le premier est positionné dans le chenal principal ; le second est placé le long de la berge, dans le chenal secondaire. Des mesures instantanées sont effectuées toutes les 5 mn, leur moyenne étant calculée et enregistrée toutes les demi-heures par une centrale d'acquisition Campbell CR10.

Vingt kilomètres en aval, la station de Grenoble-Campus enregistre les mêmes données à un pas de temps identique. Aucun affluent important ne venant sensiblement augmenter les débits entre les deux stations, nous avons donc pu directement établir une relation hauteur/débit sur l'île de Brignoud en nous fondant sur la courbe de tarage de la station de Grenoble-Campus.

3.3) Modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement de l'île de Brignoud

3.3.1) Principes et méthodologie de la modélisation de l'inondabilité et de l'exhaussement

Le principe de la modélisation de l'inondabilité, pour différentes valeurs du débit, et de l'exhaussement annuel de l'île de Brignoud est synthétisé sur la figure 2.29. Utilisant les données topographiques et hydrologiques recueillies sur le terrain, il a fallu successivement :

1) traiter les données d'altitude et reconstituer la topographie de l'île sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT). La soustraction de matrices topographiques permet ensuite aisément de calculer la variation annuelle d'altitude ;

2) établir la relation hauteur/hauteur liant le site de Brignoud et la station hydrométrique du Campus afin de pouvoir calculer les hauteurs d'eau correspondant à des valeurs précises du débit ;

3) étendre à l'ensemble de l'île de Brignoud la valeur de hauteur d'eau calculée ponctuellement, en prenant en compte la pente de la ligne d'eau en période de crue et en créant une matrice reproduisant l'altitude du plan d'eau ;

4) produire une matrice d'inondabilité en calculant les différences d'altitude entre la topographie de l'île et la topographie du plan d'eau pour une valeur du débit fixée (tab. 2.18) ; cette matrice a ensuite été représentée graphiquement par le module cartographique du logiciel SURFER® ;

5) tester la validité du modèle en reproduisant la carte d'une inondation récente (25-26 février 1995) et en la comparant aux levés des laisses de crue réalisés sur le terrain.

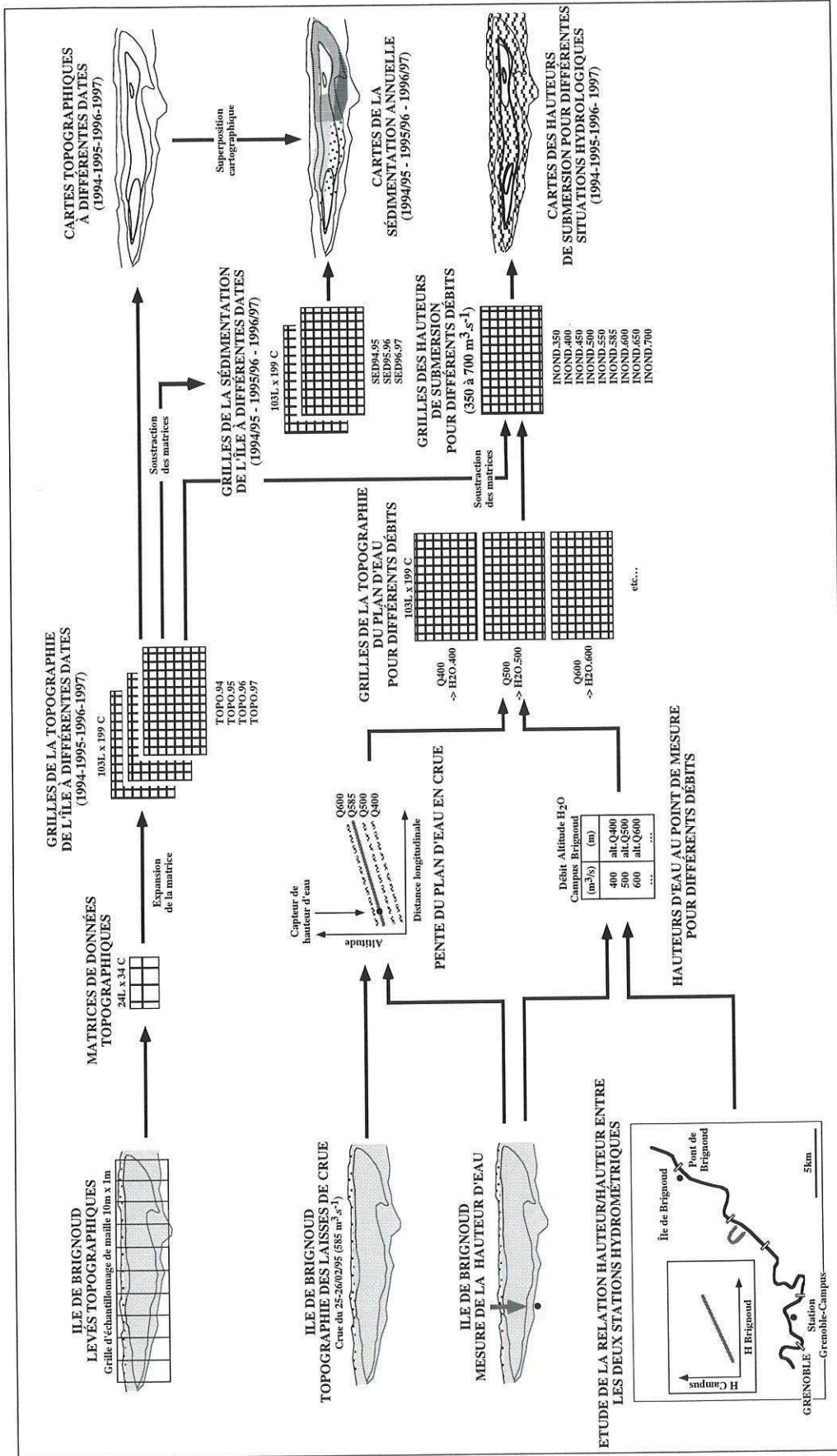


Figure 2.29 - Principe de la modélisation de l'inondabilité et de la sédimentation sur l'île de Brignoud.

Tableau 2.18 - Grilles de données actuellement disponibles pour l'analyse de l'évolution de l'île de Brignoud.

Topographie	Formations superficielles	Sédimentation	Plan d'eau pour ≠ débits	Inondation	Granulométrie
TOPO.BANC			H2O.350	INOND.350	GRANU.94
TOPO.94	EPFSUP.94		H2O.400	INOND.400	
TOPO.95	EPFSUP.95	SED94.95	H2O.450	INOND.450	
TOPO.96	EPFSUP.96	SED95.96	H2O.500	INOND.500	
TOPO.97	EPFSUP.97	SED96.97	HSO.550	INOND.550	
			H2O.585	INOND.585	
			H2O.600	INOND.600	
			H2O.650	INOND.650	

A) La restitution de la topographie sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT)

Dans un premier temps, les valeurs d'altitude ont été saisies sur un tableur sous la forme de matrices de données de 35 lignes x 34 colonnes. Les données ont ensuite été exportées sur le logiciel SURFER®, afin d'être traitées puis représentées graphiquement. Les matrices de données de 35 lignes x 34 colonnes issues de l'échantillonnage ont d'abord été étendues à une grille de 103 lignes x 199 colonnes, en utilisant un algorithme de lissage du logiciel. L'expansion a consisté à insérer des noeuds supplémentaires entre les noeuds de la matrice initiale, les valeurs des noeuds de la grille originale étant ainsi préservées dans la grille lissée. Utilisant les fichiers lissés (TOPO.94 ; TOPO.95 ; TOPO.96...), les modules graphiques du logiciel ont ensuite été mis en œuvre pour dessiner des cartes topographiques en courbes de niveau équidistantes de 20 cm (voir fig. 2.29).

B) La relation hauteur-hauteur entre le site de Brignoud et la station du Campus

L'absence de gros affluent entre l'île de Brignoud et la station du Campus nous a permis de corrélérer les mesures de hauteur d'eau effectuées sur les deux sites de manière très satisfaisante ($R^2=0,98$) (fig. 2.30). Plusieurs épisodes hydrologiques de l'année 1994 couvrant une

gamme de débits de 250 à 740 $m^3 \cdot s^{-1}$ ont été utilisés pour corrélérer les deux stations. Les pics de débits correspondant très fréquemment au déplacement d'ondes artificiellement créées par les lâchers du barrage du Cheylas ont permis de calculer la vitesse de propagation des écoulements. La meilleure relation a été recherchée visuellement en décalant manuellement les données par pas d'une demi heure. L'étude a montré que les pics de débit parviennent à la station hydrométrique de Grenoble-Campus avec un décalage d'environ 1h30 à 2h00 sur ceux mesurés à la station de Brignoud. La vitesse de propagation de l'onde serait donc d'environ 2,5 à 3,5 $m \cdot s^{-1}$. Un point de comparaison est fourni par l'étude de Pupier (1996) : sur la base de deux épisodes datant de mars 1985 et septembre 1987, l'auteur indique que l'onde des lâchers de l'usine du Cheylas, somme de la vitesse de l'écoulement et de la vitesse de propagation de l'onde, se déplace à une vitesse de 1,6 à 2 $m \cdot s^{-1}$. Ayant principalement travaillé sur des épisodes de crue, il n'est pas très surprenant que les vitesses que nous avons calculées dépassent sensiblement ces valeurs.

La figure 2.30 montre que la relation liant les deux stations est de moindre qualité pour les faibles valeurs de débit (incertitude sur les niveaux de l'ordre de ± 20 cm, soit $\pm 25 m^3 \cdot s^{-1}$). La dispersion des mesures nous semble avoir trois origines présentées ici par ordre décroissant d'influence : a) une certaine imprécision des valeurs

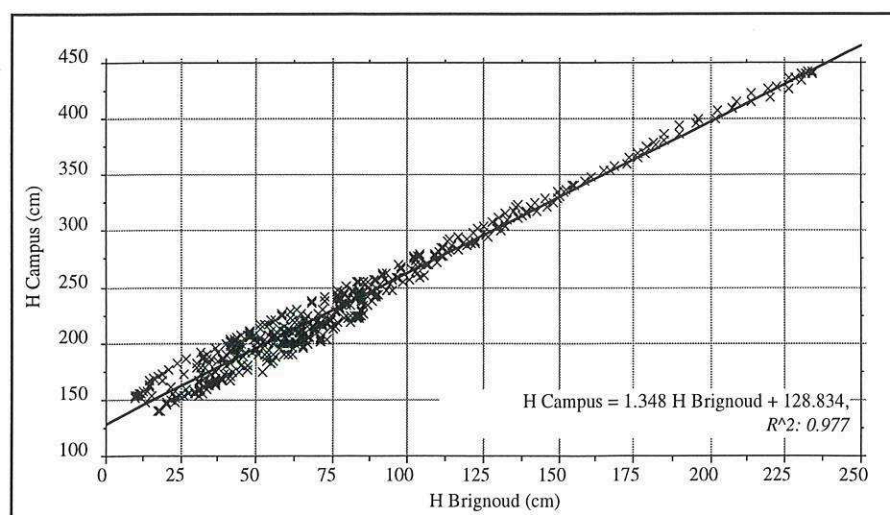


Figure 2.30 - ISÈRE - Relation hauteurs d'eau Campus/île de Brignoud

obtenues à Brignoud est liée aux difficultés que l'on a rencontrées lors de la correction du capteur de hauteur d'eau des variations temporelles de la température de l'eau et de la pression atmosphérique ; b) aux deux stations, les mesures sont collectées toutes les 30 minutes ; ce pas de temps est trop long pour que l'on repère avec une grande finesse le passage des pics de débit ; c) l'influence des affluents localisés entre les deux stations est proportionnellement plus forte lorsque les débits de l'Isère sont modérés que pendant les crues. Ces quelques réserves sur les faibles débits sont sans grande influence sur les résultats de la modélisation de l'inondabilité, puisque la submersion de l'île ne débute effectivement que pour des valeurs supérieures à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($H_{\text{eau}}=1,60 \text{ m}$ à l'échelle de Grenoble-Campus).

C) La détermination de la pente de la ligne d'eau en période d'inondation sur le site de Brignoud.

La pente de la ligne d'eau en période de crue a été déterminée sur la base d'un levé topographique des hautes d'une crue de $585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ datant du 25-26 février 1995. Cet épisode, qui a engendré une submersion incomplète de l'île, s'est avéré riche d'enseignements. Le tapis de matière organique déposé après la chute des feuilles, au début de l'hiver 1994-95, a été partiellement remanié par la crue et ainsi a permis de clairement délimiter les zones épargnées par l'inondation.

Une cartographie sommaire des zones exondées a été dressée sur le fond topographique de décembre 1994 (voir fig. 2.32), des cotes d'altitude étant relevées au théodolite le long d'un axe amont-aval positionné avec précision par rapport au maillage rectangulaire initialement mis en place. Comme le montre la figure 2.31, la pente de la ligne d'eau lors de l'épisode de février 1995 est peu inférieure à $0,001 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$. Cette valeur de la pente a été utilisée pour déterminer la cote de la ligne d'eau lors de débits variant de 400 à $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en tous points de l'île. Deux hypothèses ont été faites : a) que la hauteur d'eau est constante selon un axe perpendiculaire à

l'écoulement. En fait, des différences d'altitude limitées existent en basse-eaux, en relation avec les modalités particulières de fonctionnement du chenal secondaire ; elles disparaissent rapidement lorsque le débit dépasse $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et que l'inondation se généralise ; b) qu'en crue, la pente de la ligne d'eau est approximativement constante quelle que soit la valeur du débit.

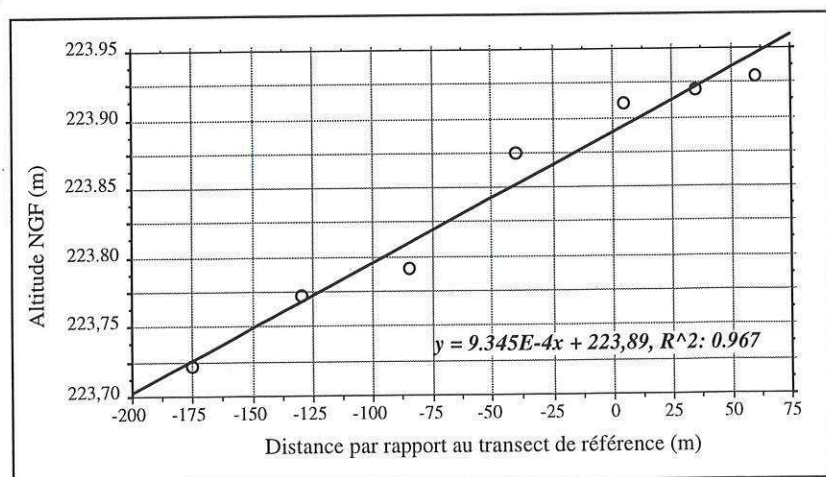
Des matrices d'altitude absolue des lignes d'eau ont été calculées pour la gamme des débits de 400 à $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La soustraction des matrices topographiques et des matrices des lignes d'eau a permis de produire une dernière série de matrices dont les valeurs indiquent les hauteurs de submersion. Ce sont finalement ces grilles de données qui ont été cartographiées par le logiciel SURFER®.

D) L'inondation du 25-26 février 1995 : situation prédite et situation réelle.

Nous avons utilisé l'épisode du 25-26 février 1995 pour vérifier la validité du modèle. Le pic de la crue a atteint une cote mesurée de $3,66 \text{ m}$ à l'échelle de la station du Campus de Grenoble et une cote calculée de $1,76 \text{ m}$ à Brignoud. Reprenant la valeur de la pente de la ligne d'eau et appliquant les hypothèses énoncées plus haut, une matrice de l'altitude du plan d'eau pour un débit de $585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a été calculée (H2O.585). La matrice de la topographie de décembre 1994 (TOPO.94) a été soustraite à celle de l'altitude du cours d'eau en crue, ce qui a permis de produire une matrice d'inondation (INOND.585). La matrice d'inondation (INOND.585) a finalement été dessinée à l'aide du module cartographique de SURFER®, sous la forme d'une carte représentant la zone immergée par un dégradé de bleu (fig. 2.32).

Le traitement cartographique des données révèle l'existence de deux plates-formes demeurées exondées lors de la crue et séparées par une mince zone totalement inondée. Les hauteurs d'eau recouvrant l'île sont restées généralement inférieures à 40 cm . La comparaison de l'extension de cette inondation reconstituée avec les rele-

Figure 2.31 - ISÈRE - Île de Brignoud ; pente de la ligne d'eau lors de la crue du 25-26 février 1995 ($585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)



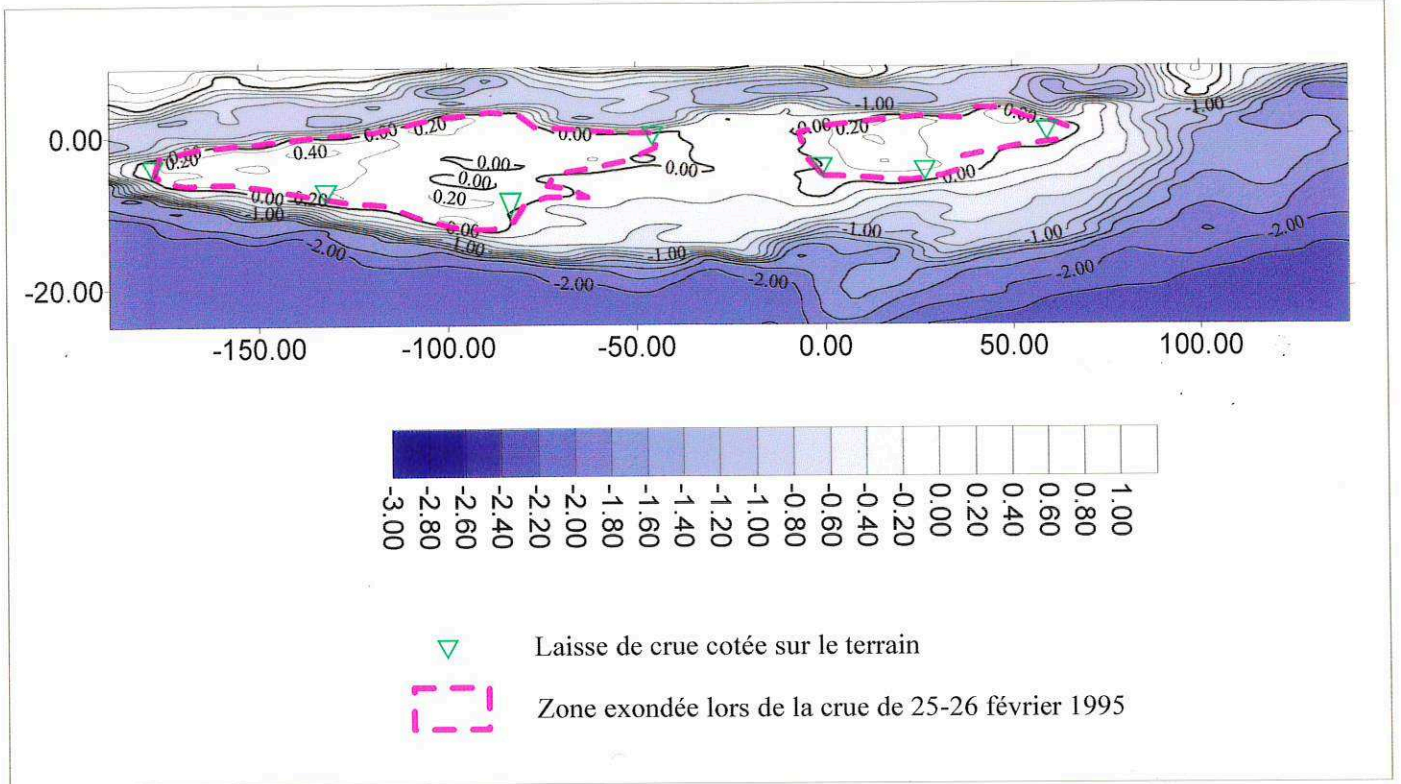


Figure 2.32 - Confrontation entre la modélisation et la réalité lors de la crue du 25-26 février 1995.

vés de terrain de mars 1995 confirme la bonne validité du modèle (voir fig. 2.32) : la position des laisses de crue cartographiées et topographiées à cette occasion coïncident de manière très satisfaisante avec les limites d'extension de l'inondation du modèle, démontrant ainsi la qualité des résultats qu'il fournit. Quelques différences sont cependant à relever dans la zone séparant les deux plates-formes exondées, dans un secteur où la topographie est très plate et où toute incertitude de quelques centimètres sur les niveaux se traduit par un fort écart sur les surfaces de submersion.

La valeur du débit à partir de laquelle se produit la mise en eau par l'amont du chenal de chute a constitué un second moyen de valider la bonne qualité du modèle. Des observations de terrain, au cours de l'automne 1994, avaient permis de noter qu'une circulation amont-aval s'établissait dans le chenal secondaire pour un débit de $425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la station du Campus. La modélisation de l'inondation sur la base de la topographie de l'hiver 1995 a permis d'observer que l'extrémité amont du chenal secondaire était effectivement très faiblement exondée pour un débit de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (voir fig. 2.34, situation à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), confirmant ainsi la qualité du modèle d'inondabilité.

3.3.2) La réduction de l'inondabilité de l'île de Brignoud entre 1994 et 1995

La cartographie de l'inondabilité de l'île de Brignoud a été représentée pour des débits croissants avec un pas régulier de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 400 et $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Deux situations topographiques correspondant à deux états de l'exhaussement de l'île ont été cartographiées : l'inondabilité au début de 1994 et l'inondabilité au cours de l'hiver 1995 (fig. 2.33 et 2.34). L'examen conjoint des deux séries de documents indique une nette diminution de la submersion entre les deux états, et ce, dès $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans la partie amont de l'île proche du chenal principal. A $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, l'île qui était coupée en deux par l'inondation au début de 1994, est à peine touchée par l'eau sur ses marges au cours de l'hiver 1995, ce qui témoigne d'un fort exhaussement de cette zone au cours de l'année hydrologique 1994. La progression des espaces exondés pour des débits supérieurs à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est tout aussi spectaculaire, puisque l'île était presque totalement submergée à $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en janvier 1994, alors qu'un an plus tard, deux vastes zones demeurent hors d'eau à l'amont et à l'aval de l'île, pour un même débit.

Le module de calcul du logiciel SURFER® a permis de

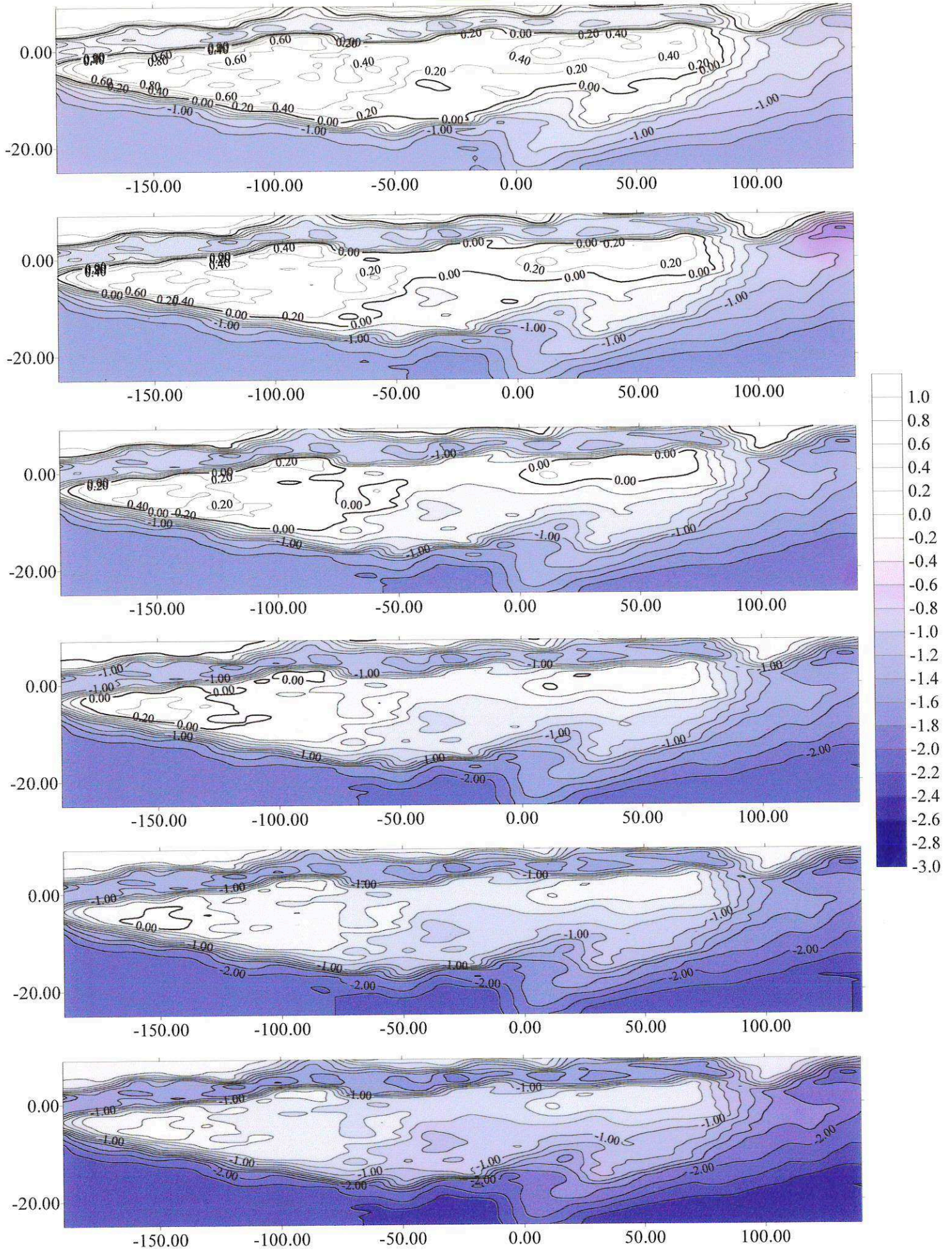


Figure 2.33 - ISÈRE - Île de Brignoud - Hiver 1994. Inondabilité pour des débits de 400 à 650 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

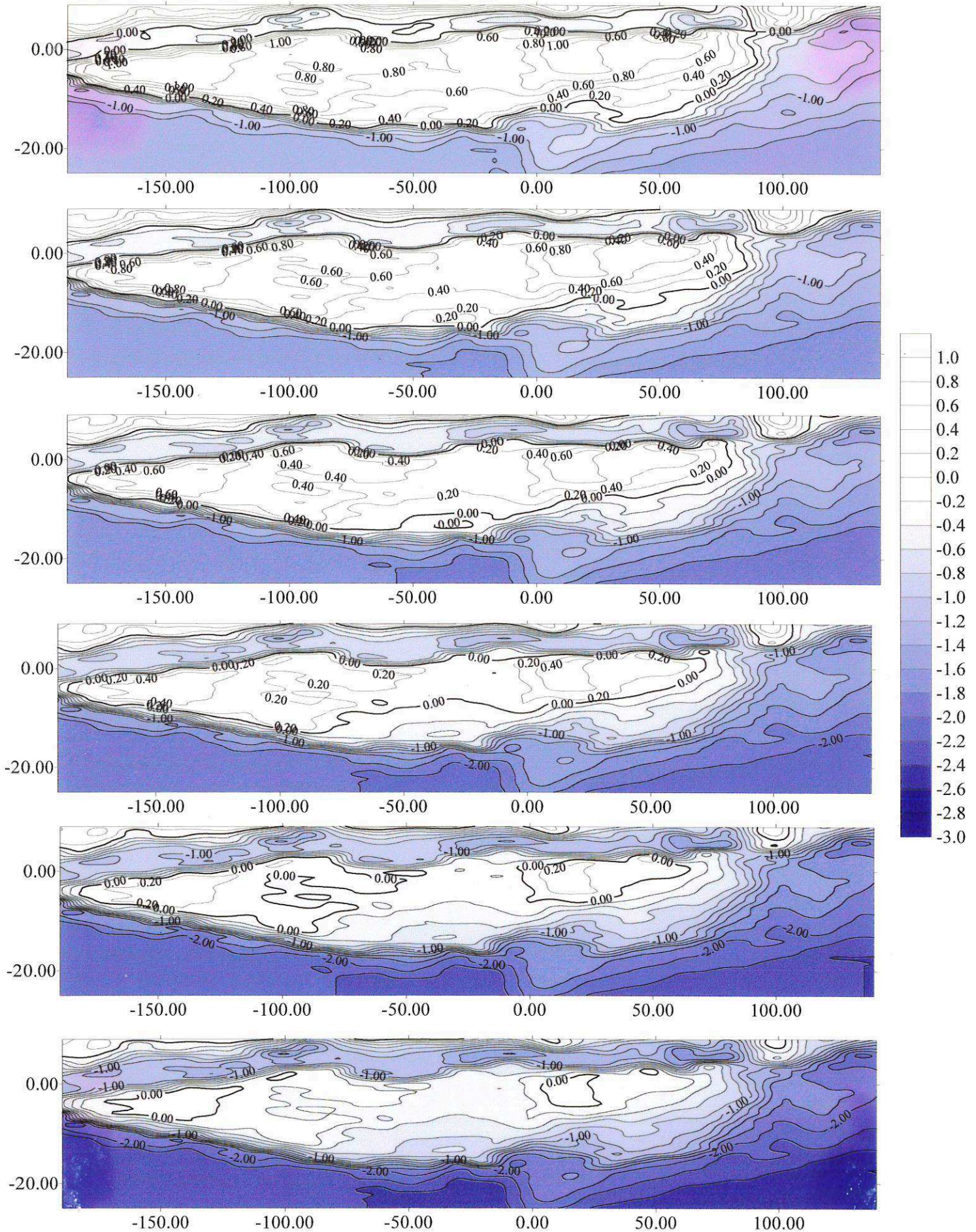
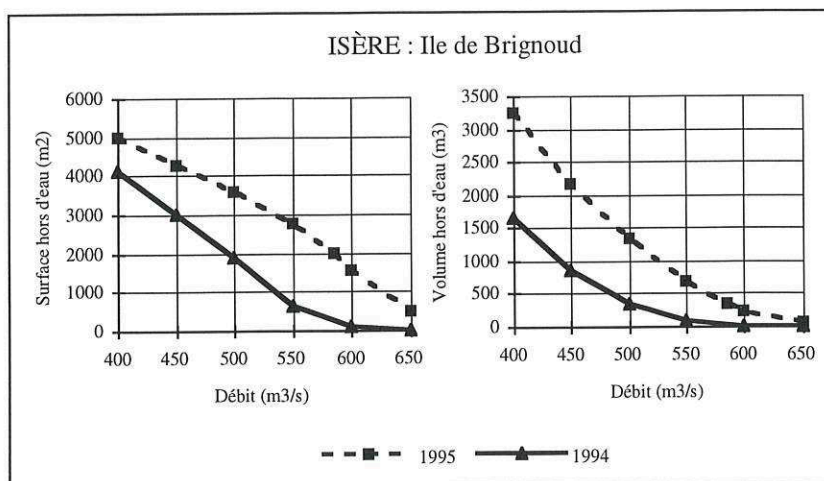


Figure 2.34 - ISÈRE - Île de Brignoud - Hiver 1995. Inondabilité pour des débits de 400 à 650 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Figure 2.35 - Variation de la surface et du volume hors d'eau de l'île de Brignoud pour différentes situations d'inondation en 1994 et 1995.



calculer les surfaces et volumes exondés pour différentes situations de débit dans la gamme de 400 à 650 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (fig. 2.35). La progression des surfaces et volumes émergés pour des mêmes valeurs de débit apparaît très clairement. C'est pour un débit de 550 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que la progression des surfaces émergées est la plus forte (env. 2000 m^2) ; cela coïncide avec la mise hors d'eau d'une grande partie amont de l'île. Le volume des formations superficielles hors d'eau progresse également de plus de 1000 m^3 pour les débits inférieurs à 450 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3.3) Distribution spatiale de l'exhaussement de l'île de Brignoud

Au début de 1994, lorsque l'étude de l'île de Brignoud a débuté, l'étude des formations superficielles révélait une forte variabilité spatiale des dépôts (fig. 2.36/haut). Deux "flots" d'épais dépôts (épaisseur $\geq 1,50$ m) localisés en queue de l'île et à son extrémité amont, côté chenal secondaire, étaient séparés d'une zone de dépôts moins épais ($0,20 \leq e \leq 0,60$ m). Cette accumulation de sables et de limons représentait un volume d'environ 3800 m^3 (tab. 2.19). Au cours des années hydrologiques 1994 et 1995, les hautes-eaux et les crues ont engendré d'importants changements de l'épaisseur des formations superficielles :

a) L'année 1994 a été marquée par un très fort exhaussement aussi bien de l'île que du chenal secondaire (fig. 2.36, centre). En moyenne, l'île s'est exhaussée d'environ 40 cm, ce qui représente l'accumulation d'un volume de 2210 m^3 de sédiments fins (fig. 2.37). Outre sa forte épaisseur moyenne, la sédimentation de 1994 a été marquée par d'importantes variations spatiales : c'est dans la partie topographiquement déprimée, où les formations superficielles étaient les moins épaisses que la variation topographique fut la plus sensible, plusieurs centaines de m^2 s'exhaussant de 45 à 85 cm. On observe donc que la partie la plus basse de l'île a subi un phénomène de "rattrapage topographique accéléré". Les érosions sont restées un phénomène marginal (-110 m^3), si

l'on excepte quelques retouches mineures en bordure du chenal principal ou la formation d'une anse d'érosion liée au mouvement tourbillonnaire occasionné par un arbre, à l'extrémité amont du chenal de chute. Des changements topographiques d'ampleur limitée ont également affecté la tête du banc de galets qui constitue la fondation de l'île.

b) En 1995, l'accumulation a été moins forte que pendant l'année précédente, le dépôt moyen n'excédant pas 20 cm (env. 1270 m^3) (fig. 2.36, bas et fig. 2.37). Il n'en demeure pas moins que le mouvement d'exhaussement et d'extension en direction du chenal principal de la partie amont et médiane de l'île de Brignoud s'est poursuivi. Des dépôts de plusieurs décimètres se sont à nou-

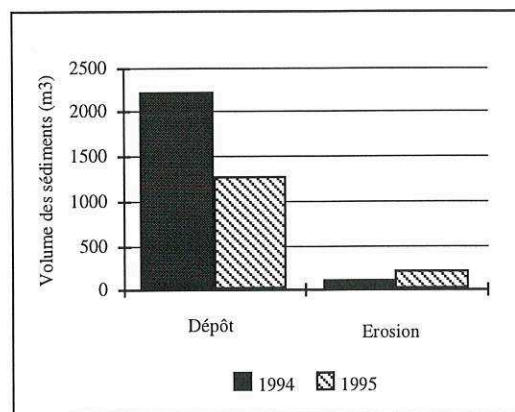
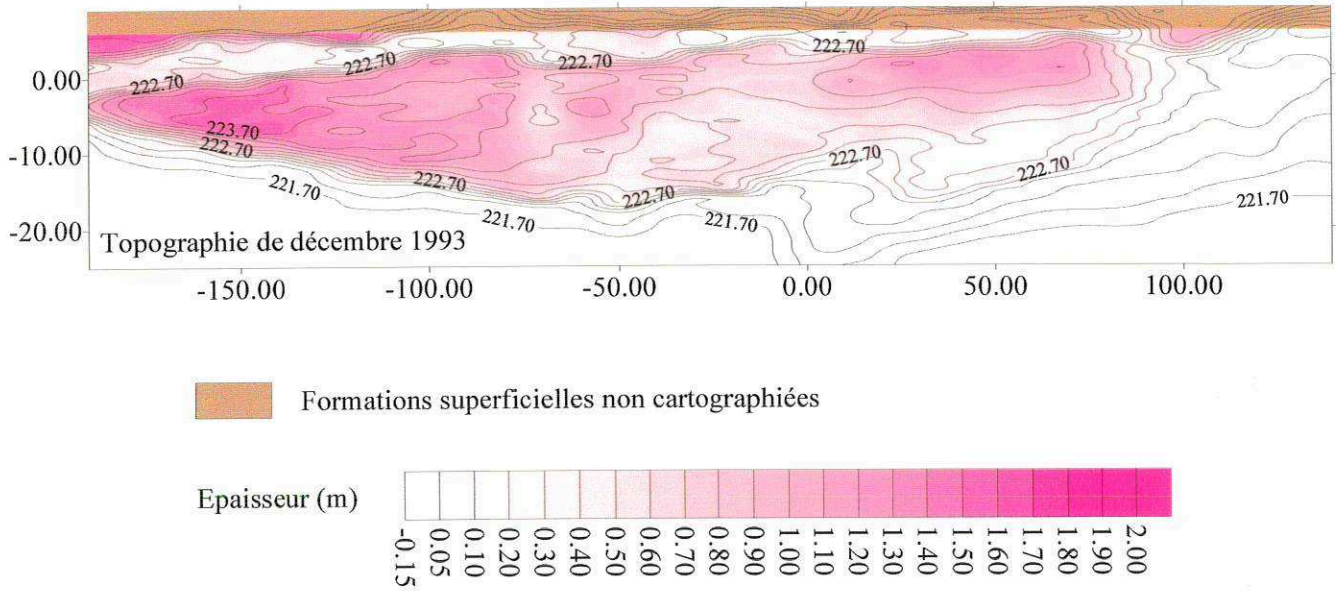


Figure 2.37 - Variation du volume des dépôts et des érosions de l'île de Brignoud en 1994 et 1995.

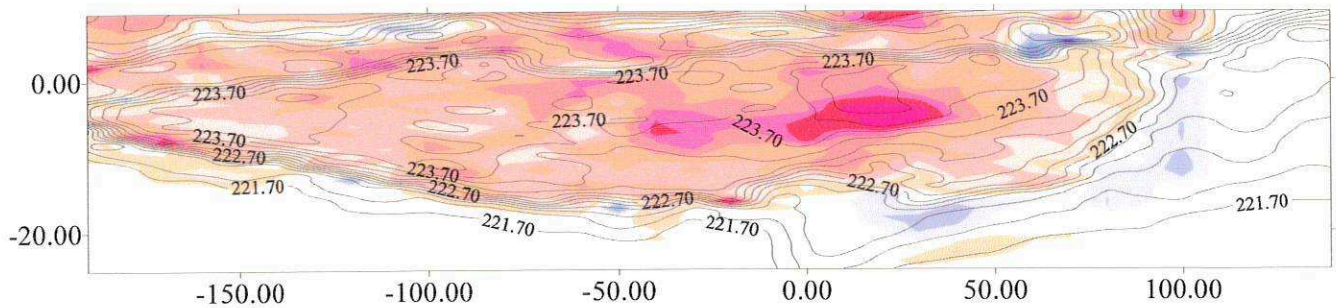
Tableau 2.19 - Evolution des volumes et surfaces des formations superficielles sur l'île de Brignoud entre l'hiver 1994 et l'hiver 1996.

	Volume (m^3)		Surface (m^2)	
	+	-	+	-
1994	3797,44	-31,1839	7777,07	-2452,93
1995	5715,92	-80,28	7903,55	-2326,45
1996	6708,2	-76,93	8047,63	-2182,37

Hiver 1994



Hiver 1995



Hiver 1996

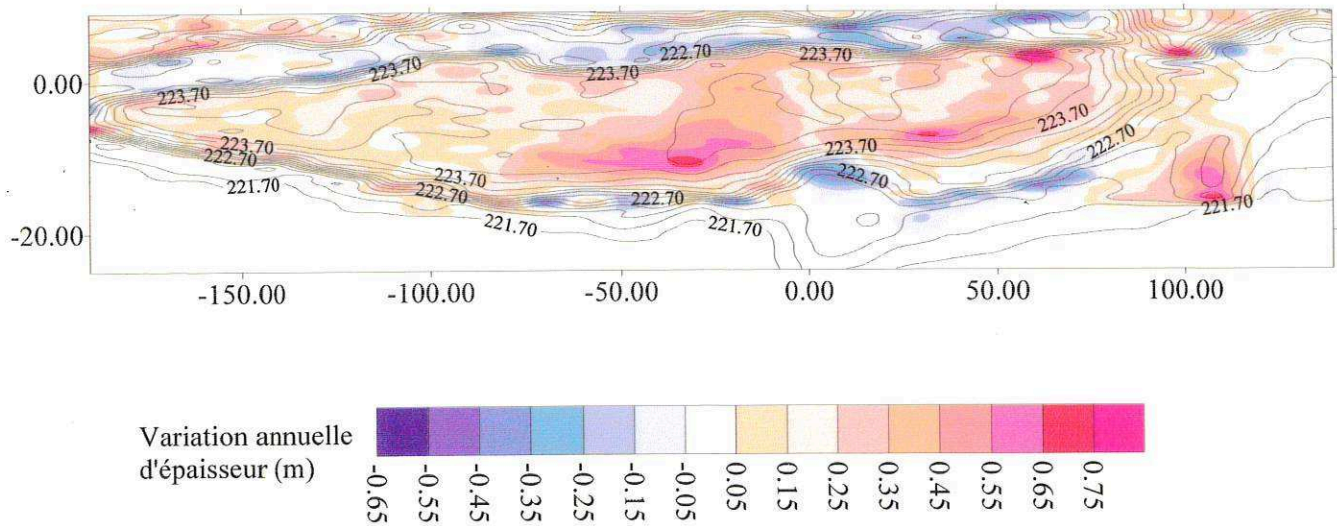


Figure 2.36 - ISÈRE - Île de Brignoud - Epaisseur des formations superficielles fin 1993 et variation annuelle des dépôts en 1994 et 1995.

veau produits (45 à 65 cm) sur une surface toutefois moindre que l'année précédente. En 1995, les érosions ont été plus marquées qu'en 1994, sans pour autant qu'elles traduisent l'émergence de processus destructifs susceptibles de mettre en péril la forme fluviale : des retouches de la berge, côté chenal principal, apparaissent très clairement dans la partie amont de l'île, zone la plus exposée au courant ; les érosions sont beaucoup moins nettes dans le tiers aval de l'île, là où le chenal principal est plus large. C'est dans le chenal secondaire que les érosions ont été les plus fortes. Elles n'ont cependant pas affecté la stabilité des berges, mais uniquement celle du fond du chenal qui a subi un processus d'autocurage. Localement, l'abaissement du chenal de chute atteint 25 à 45 cm de profondeur. Par contre, le seuil amont connectant le chenal secondaire au chenal principal, dont l'altitude s'était déjà relevée en 1994 (15 à 25 cm), a poursuivi son exhaussement en 1995 (moins de 15 cm), ce qui doit se traduire par une nouvelle réduction de la fréquence de mise en eau par l'amont.

3.4) Discussion des résultats et perspectives

L'exhaussement de l'île de Brignoud et la réduction rapide de son inondabilité pour différentes valeurs de débit sont à replacer dans le contexte hydrologique des deux années pour lesquelles l'étude a été faite. Le classement des données hydrologiques instantanées de 1994 et 1995 a permis d'établir quelles ont été les durées de submersion correspondant à des situations d'inondation définies par le modèle (tab. 2.20). Comme on l'a déjà signalé plus haut, les années 1994 et 1995 présentent des situations hydrologiques contrastées : 1994 a été une année d'hydraulicité normale avec plusieurs crues, notamment en mai et en juin ; 1995 a été une année d'hydraulicité très supérieure à la normale en raison d'une fusion nivale exceptionnelle, mais sans véritable crue.

En 1994, les résultats du tableau 2.20 indiquent que l'île de Brignoud a été en situation de submersion à peu près totale pendant une vingtaine d'heures ($Q_i \geq 550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La durée d'inondation d'une grande partie de la zone amont de l'île, côté chenal principal (voir fig. 2.33), a atteint une centaine d'heures en 1994. En 1995, l'île s'étant notablement exhaussée au cours de l'année hydrologique 1994, la situation de submersion totale n'a été atteinte que lorsque le débit excédait $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit une durée d'environ 7,5 heures. Comme en 1994, c'est la partie centrale de l'île et la partie amont côté chenal principal, plus basses, qui ont subi l'inondation la plus durable (environ 26 heures d'inondation). Le chenal de chute, mis en eau par l'amont pour un débit supérieur ou égal à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, dont on a vu qu'il avait subi un important exhaussement en 1994, a présenté en 1995 un très net autocurage ; celui-ci s'explique par le fort nombre de jours où le chenal a été alimenté par l'amont (36 à 37

Tableau 2.20 - Durée de submersion de l'île de Brignoud pour différents débits

(d'après les données hydrométriques de la station de Grenoble-Campus).

Débit inst. (m^3/s)	1994		1995	
	Durée (h)	Durée cum. (h)	Durée (h)	Durée cum. (h)
≥ 700	5,5	5,5	0	0
[650-700[	3,5	9	7,5	7,5
[600-650[	4,5	13,5	18,5	26
[550-600[	8,5	22	82,5	108,5
[500-550[	28,5	50,5	143	251,5
[450-500[	68,5	119	196,5	448

jours d'écoulement amont-aval en 1995, contre approximativement 16 jours en 1994).

L'examen du tableau 2.21 montre également que les épisodes de submersion de l'île de Brignoud ont coïncidé avec le transit de flux fortement concentrés en MES. Il apparaît donc très clairement que les rythmes de la sédimentation sont non seulement dépendants de la durée de submersion, mais aussi de la concentration en MES, l'inondation devenant alors particulièrement efficace du point de vue de l'accumulation des dépôts fins. En 1994, des dépôts de 25 à 45 cm de limons se sont produits en moins de 10 heures sur les parties les plus hautes de l'île ($3 \text{ à } 5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, avec des concentrations dépassant $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) ; dans les zones où l'exhaussement a été le plus fort (+ de 80 cm de dépôts en un an), l'inondation a bien évidemment été plus longue et a dépassé une centaine d'heures ; les rythmes d'exhaussement sont tout de même rapides et peuvent être estimés à $0,7 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ dans certaines zones, les concentrations en MES étant généralement beaucoup plus faibles ($< 2 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour environ la moitié du temps de submersion). En 1995, la sédimentation annuelle n'a pas excédé 20 cm dans les parties les plus exhaussées de l'île de Brignoud. La faible durée de submersion de ces zones conduit tout de même à des rythmes d'exhaussement de $2,5 \text{ à } 3 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, les concentrations en MES étant toute aussi fortes que l'année précédente (voir tab. 2.21). La zone ayant subi l'exhaussement annuel le plus fort ($> 65 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$) a été inondée plus de 250 heures pendant l'année ($0,3 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$), dont une soixantaine d'heures avec des concentrations en MES variant de $2 \text{ à } 14 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. On peut légitimement supposer que c'est pendant cette période que la sédimentation a été la plus forte, ce qui conduit à des rythmes de sédimentation de l'ordre de $0,8 \text{ à } 1 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Il est indéniable que la végétation exerce un puissant contrôle sur les rythmes de sédimentation en période de submersion, comme d'ailleurs sur les érosions. On comprend également à l'énoncé de ces rythmes que la submersion par des eaux très fortement chargées en MES

Tableau 2.21 - Durées de submersion de l'île de Brignoud en 1994 et 1995 pour différents épisodes hydrologiques et concentration de MES associées à ces épisodes

(d'après les mesures hydrométriques et de transport de MES faites à Grenoble-Campus).

Débit inst. (m ³ /s)	Episode 1 (date)	Durée (h)	MES (g/l)	Episode 2 (date)	MES (g/l)	Durée (h)	Episode 3 (date)	Durée (h)	MES (g/l)
≥ 700	27/06/94	5,5	7,8-11,3						
[650-700[	27/06/94	3,5	7,8-11,3						
[600-650[	27/06/94	4,5	7,8-11,3						
[550-600[	27/06/94	5	7,8-11,3	20-21/12/93	NM	3,5			
[500-550[	27/06/94	7,5	7,8-11,3	20-21/12/93	NM	19	19/05/94	2	0,7-2

Débit inst. (m ³ /s)	Episode 1 (date)	Durée (h)	MES (g/l)	Episode 2 (date)	MES (g/l)	Durée (h)	Episode 3 (date)	Durée (h)
≥ 700								
[650-700[	1/06/95	7,5	4,8-14,1					
[600-650[	30/05-2/06/96	16,5	3,0-14,1	22/06/95	2,2-11,8	2		
[550-600[	30/05-2/06/96	32	3,0-14,1	21-23/06/95	1,4-11,8	25,5	Autres	25

puisse, certaines années, être un frein tout aussi puissant pour la régénération végétale, les jeunes plantules ne pouvant résister à l'enfouissement sous les dépôts de limon. L'examen de la carte de végétation établie en 1994 par G. Pautou et mise au net par nos soins (fig. 2.38, bas) montre que l'île de Brignoud est entourée d'une ceinture d'herbacées composées essentiellement de *Phalaris arundinacea* plus ou moins épaisse, par endroits associée avec une fruticée de saules. Sur la zone centrale et amont côté chenal de l'île, zone qui a subit l'exhaussement avec le plus d'intensité en 1994, la végétation est également dominée par une communauté à strate herbacée dense de *Phalaris*, *Calamagrostis*, *Phragmites*, *Festuca* et *Molinia*, ainsi que par des *Carex*. Cette dense strate herbacée joue un rôle considérable sur les rythmes des dépôts, en ralentissant brutalement les écoulements d'inondation et en forçant la sédimentation à se produire. Par ailleurs, l'appareil racinaire très dense des communautés pionnières à *Agrostis stolonifera* et surtout de *Phalaris arundinacea* assure une très efficace protection des berges de l'île contre l'érosion latérale, y compris une année d'hydraulicité exceptionnelle, comme le fut 1995, ce qui a été mis en évidence par de nombreuses études (Smith, 1976 ; Bergeron & Roy, 1985).

L'examen de la carte de la granulométrie des dépôts de surface (fig. 2.38, haut) révèle très clairement un ralentissement brutal des écoulements lié à la végétation : alors que le chenal principal est composé de galets de médiane supérieure à 0,05 m, la plus grande partie de l'île de Brignoud est couverte de dépôts de limons (médiane inférieure à 80 µm). Le passage des galets aux limons est extrêmement brutal : dans la partie amont de l'île, la formation dense à *Phalaris arundinacea* joue très clairement le rôle de peigne, en filtrant totalement, en quelques mètres, les sables de médiane supérieure ou égale à 100 µm. Dans la partie aval de l'île, où le recouvrement d'herbacées est plus ouvert, le ralentissement

des courants de débordement s'opère moins efficacement et les dépôts de surface sont nettement plus grossiers que sous la végétation dense (sables de médiane ≥ 125 µm). Le chenal secondaire, dépourvu de végétation, est, quant à lui, composé de dépôts sableux moyens à grossiers dont la médiane est généralement supérieure à 200 µm). La confrontation des résultats granulométriques avec les courbes critiques d'érosion et de sédimentation (Sundborg, 1967) indique que pour les fractions granulométriques considérées, le dépôt nécessite que les vitesses de l'écoulement soient inférieures à 25 cm.s⁻¹. Le suivi topographique de l'île de Brignoud montre que la sédimentation se produit en tous points, y compris aux extrémités amont et aval de l'île, parties les plus exposées au courant ; cela confirme le rôle hydraulique majeur des strates végétale basses, qui forcent la sédimentation en provoquant le ralentissement accéléré des écoulements.

Les études réalisées sur l'île de Brignoud offrent d'intéressantes perspectives. Bien des points sont encore à étudier : par exemple, faute de temps, nous avons, jusqu'à aujourd'hui, insuffisamment développé l'analyse des relations spatiales entre les variables abiotiques étudiées, l'approche restant pour l'instant intuitive. De la même manière, au cours des prochains mois, une partie des recherches sera consacrée à l'analyse des relations entre les zones préférentielles de la régénération végétale et les facteurs abiotiques qui la contrôlent : une étude hydrologique des niveaux d'eau pendant la période végétative est en cours. Le modèle de submersion permettra de reconstituer spatialement les conditions d'inondation et de sédimentation et, nous l'espérons, de déterminer avec précision quels sont les facteurs favorables ou au contraire limitants de la régénération des ligneux sur les îles de l'Isère. Par ailleurs, la collecte des données se poursuit : au cours du printemps 1997 est prévue l'installation et le suivi de parcelles-témoins, dans le cadre du nouveau programme européen ; la croissance de différentes espèces

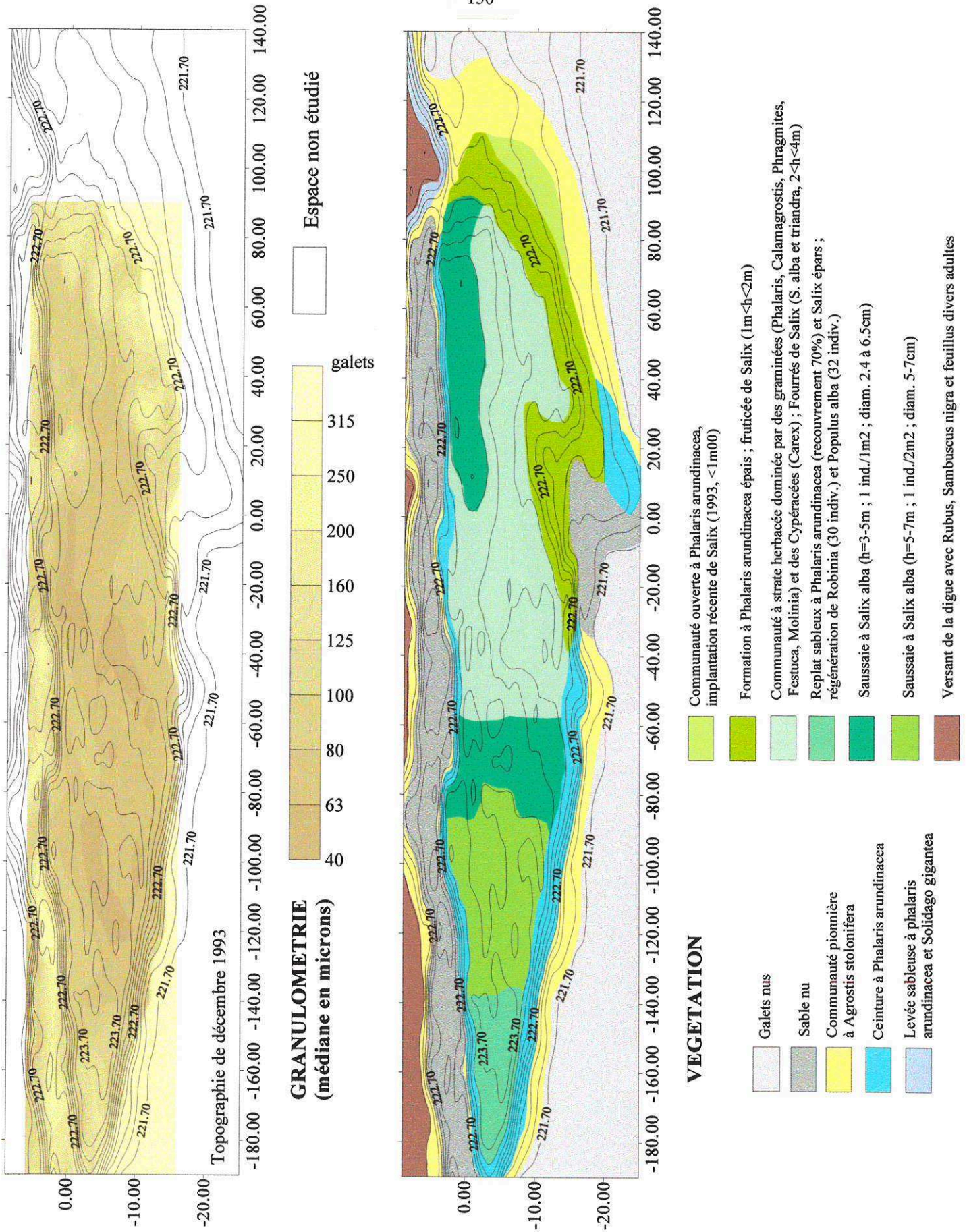


Figure 2.38 - ISÈRE - île de Brignoud - Haut : granulométrie ; variation spatiale de la médiane (microns)
Bas : végétation, printemps 1994

alluviales et des contrôles abiotiques majeurs (hydrologie, humidité des sols, sédimentation) sera suivie pendant deux ans de manière approfondie et donnera lieu à de nouveaux enregistrements de terrain.

Conclusion

La deuxième partie de ce DHDR a été l'occasion de présenter la manière dont je conçois mes recherches en hydrologie et géomorphologie fluviale et intègre à ces études les étudiants qui travaillent sous ma direction. L'exemple d'une étude interdisciplinaire engagée depuis 1994 sur la végétalisation du lit de l'Isère et les processus abiotiques qui la contrôlent a servi à illustrer ces propos. La démarche utilisée repose sur le concept d'hydrosystème (Amoros & Petts, 1993), procède d'un emboîtement d'échelles spatio-temporelles et met l'accent sur l'acquisition et l'exploitation géostatistiques de données quantitatives. Trois niveaux emboîtés, la zone, le site et la station d'étude, font l'objet d'investigations (voir fig. 2.6) ; les deux derniers sont ici l'objet d'une présentation commune, car intimement liés :

a) L'échelle de la zone d'étude et du temps séculaire permet de caler les observations contemporaines par rapport aux changements ayant affecté la dynamique fluviale. Cet élément est particulièrement important sur les rivières ayant subi une *métamorphose géomorphologique et biogéographique*, sous l'influence des activités humaines visant à contrôler l'instabilité latérale et verticale du chenal ; l'Isère est dans ce cas. En effet, comme on le verra dans la troisième partie de ce DHDR, la compréhension de la structuration du paysage fluvial contemporain (nature et organisation spatiale des formes, processus actuels) repose en grande partie sur l'analyse de la dynamique fluviale ancienne. Expliquer le fonctionnement actuel nécessite donc de reconstruire les enchaînements d'impacts et les grandes étapes de la transformation de l'hydrosystème (Rousset, 1993 ; Peiry, Salvador *et al.*, 1994). Cet également à l'échelle de la zone d'étude que sont conduites les études visant à analyser l'organisation spatiale des géoformes (Saussus, 1997 ; Vieux-Melchior, 1997 ; Vautier, thèse en cours) et à la rapprocher des variables qui constituent le moteur de la dynamique fluviale (pente, géométrie du chenal, capacité de transport...) (Schumm, 1977, Starkel, 1983).

b) L'échelle du site et/ou de la station, et du suivi inter-annuel répond à un second objectif, complémentaire du premier. La quantification et la modélisation n'ont plus pour objet de montrer comment s'organisent spatialement les formes ou de les discriminer entre-elles, mais ont pour finalité d'analyser les processus physiques et les mécanismes qui conduisent à leur mise en place, et sur lesquels repose leur évolution. Dans la problématique de la végétalisation des îles de l'Isère, par exemple, le suivi de la matière en suspension a permis de démontrer l'influence d'épisodes particulièrement brefs sur l'évolution

topographique des îles. Au cours de ceux-ci, la concentration en MES a atteint de valeurs excédant largement 10 g.l⁻¹. Le suivi relativement lourd de la topographie de l'île de Brignoud ne pouvait être réalisé qu'une fois par an ; l'étude conjointe de l'inondabilité de la géoforme, l'analyse des niveaux classés mesurés sur le site de Brignoud et des concentrations en MES provenant de la station de Grenoble-Campus a permis de démontrer les rythmes extraordinairement élevés de l'exhaussement (3 à 5 cm.h⁻¹) en période de submersion totale. Du point de vue géomorphologique, cela permet de mieux comprendre pourquoi certaines îles récentes de l'Isère présentent une forte dénivellation par rapport à la ligne d'eau moyenne et sont couvertes d'épaisses formations superficielles. Du point de vue phytoécologique, cela montre à quel point la végétation qui colonise les îles influe sur les processus d'exhaussement ; cela révèle également qu'une seule crue peut compromettre la régénération annuelle en enfouissant profondément de jeunes plants incapables de s'adapter à de telles contraintes.

En présentant l'organisation des recherches et les premiers résultats sur les processus de végétalisation de l'Isère, j'espère avoir démontré tout l'intérêt d'une approche incluant des études menées simultanément à différentes échelles spatio-temporelles. Il est bien évident qu'un tel travail peut difficilement être réalisé par un individu isolé. La mise en place d'une équipe permet de multiplier les investigations de terrain, toujours très lourdes dès qu'il s'agit de collecter des données quantitatives. Les multiples travaux engagés, sont envisagés comme autant de pièces d'un puzzle patiemment reconstitué. L'essai de synthèse des impacts anthropiques touchant les hydrosystèmes fluviaux nord-alpins, qui j'ai choisi de présenter en troisième partie de ce DHDR, constitue l'illustration de ce souci permanent de maintenir une cohérence d'ensemble à mes activités de recherche.

PARTIE III



IMPACTS ET GESTION DES HYDROSYSTÈMES FLUVIAUX : L'EXEMPLE DES RIVIÈRES DES ALPES DU NORD

Introduction

Si l'on se réfère au concept de système fluvial (Schumm, 1977) ou de "système bassin" (Petts & Bravard, 1993, p. 23 et suiv.), les "unités structurelles" (ou formes de terrain) constituant le paysage fluvial sont des systèmes ouverts sous la dépendance "des entrées, transferts et sorties de matière et d'énergie". Les processus relient les unités structurelles par l'intermédiaire des flux. Toute modification des flux affecte les processus et engendre une réponse du système ; on parle alors de système à processus-réponse (Schumm, 1977). Dans cette troisième partie, nous mettrons plus particulièrement l'accent sur la réponse des hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord aux perturbations anthropiques de la dynamique des flux de matière et d'énergie.

Depuis une dizaine d'années, la multiplication des recherches en géomorphologie fluviale a montré que les rivières des Alpes du Nord enregistrent un impact profond et systématique des interventions de l'homme, à tel point que l'on parle de métamorphose pour traduire l'intensité des changements qui les affectent. Le terme impact est de plus en plus utilisé dans les études traitant des milieux physiques. On le trouve très régulièrement dans la littérature géomorphologique spécialisée, utilisé indifféremment à propos des dégâts occasionnés par des processus géomorphologiques spécifiques (glissements de terrain, avalanche, crue...) ou à propos des effets des interventions de l'homme sur le milieu ; on parle alors d'impact anthropique ou anthropogénique.

Le terme impact est ici employé dans le sens de la réponse du système aux modifications d'origine humaine de la dynamique des flux. Dans le concept de système fluvial (Schumm, 1977), ces flux sont la charge alluviale (Qs) et les écoulements (Ql). Il s'agira d'analyser plus particulièrement les changements affectant les flux, de déterminer comment les processus en sont affectés et d'étudier l'adaptation des unités structurelles de l'hydrosystème à ces modifications. Dans la continuité des travaux menés dans notre thèse de Doctorat (Peiry, 1988), une attention particulière sera accordée à la dynamique spatio-temporelle des flux sédimentaires, surtout de la charge de fond transportée par charriage, dont le rôle est fondamental sur les rivières à fond mobile disposant d'une forte énergie cinétique.

L'analyse des impacts de l'homme sur les rivières des Alpes du Nord est organisée en 7 chapitres. Le chapitre 1 a pour objectif de déterminer quelle était la dynamique de référence des cours d'eau drainant les grandes vallées des Alpes du Nord, à la fin du XVIII^e siècle ; celle-ci constitue l'indispensable référentiel permettant par la suite d'évaluer les impacts des activités de l'homme sur la géomorphologie fluviale. Les trois chapitres suivants examinent successivement les étapes de la métamorphose des rivières alpines, sous l'effet combiné des multiples aménagements des bassins-versants : généralisation des

endiguements et leurs conséquences sur le fonctionnement des lits fluviaux et des plaines alluviales, depuis 1850 environ (chap. 2) ; chenalisation et incision des lits fluviaux depuis le milieu du XX^e siècle sous l'influence d'un changement profond de la dynamique des charriages et d'altérations hydrologiques (chap. 3) ; phase récente de phytostabilisation des lits fluviaux dont on a supprimé la plupart des degrés de liberté (chap. 4). Le chapitre 5 tente de faire le point sur l'effet de la phytostabilisation des versants, sur la recharge et les transits sédimentaires dans les rivières des têtes de bassins-versants. Une synthèse sur la métamorphose des rivières des Alpes du Nord, les mécanismes de l'impact et les concepts s'y référant constitue le chapitre 6 de cette étude. Le dernier chapitre est consacré à définir les principes généraux d'une gestion durable des rivières à fond mobile des Alpes du Nord (chap. 7).

CHAPITRE 1

LES RIVIÈRES DES ALPES DU NORD À L'AUBE DE L'ÈRE INDUSTRIELLE : LA DYNAMIQUE DE RÉFÉRENCE PERMETTANT L'ÉVALUATION ULTÉRIEURE DE L'IMPACT ANTHROPIQUE

- 1.1) Un style fluvial en tresses omniprésent
- 1.2) Un accroissement progressif de l'instabilité des lits fluviaux sous l'effet de la crise climato-anthropique du Petit-Age-Glaciaire
- 1.3) L'existence de trois courts tronçons où le méandrage remplaçait le tressage

Résumé du chapitre 1

La synthèse des principales études le long des cours d'eau des Alpes du Nord indique qu'à l'aube des premiers grands travaux de protection la situation était la suivante : les rivières adoptaient un style tressé, dont la physiologie était sous le contrôle du rapport flux liquide sur flux solides (Ql/Qs) et des contraintes imposées par la structure (largeur et encombrement des vallées par les cônes de déjection). Le XVIII^e et le XIX^e siècle furent marqués par un accroissement de l'instabilité des lits fluviaux tressés, le chenal ayant tendance à s'élargir et à s'exhausser par l'accumulation d'une charge de fond surabondante. Ce changement géomorphologique majeur contribua à rendre les crues plus dévastatrices, dans un contexte où les épisodes hydrologiques extrêmes furent à la fois plus nombreux et probablement d'ampleur plus forte.

1.1) Un style fluvial en tresses omniprésent

Les multiples études de cas traitées à ce jour dans les Alpes ou à leur périphérie ont mis en avant que les rivières à chenal se développant librement, c'est-à-dire dont les caractéristiques morphométriques ne sont pas contraintes par le cadre structural¹, avaient à la fin du XVIII^e siècle pour caractéristique commune d'être tressées (Bravard & Peiry, 1993) (fig. 3.1). Le tressage se développait d'une manière presque continue sur l'ensemble du cours du Rhône ; les affluents alpins présentaient également un style fluvial en tresses, dès qu'existait une plaine alluviale. Ces lits tressés étaient liés à des conditions environnementales spécifiques, notamment à l'existence de régimes hydrologiques marqués par de forts contrastes saisonniers (rétention et fusion nivale) et l'abondance de la fourniture et du transport de charge de fond grossière (galets et graviers).

Les caractéristiques géomorphologiques des lits tressés du Rhône et de ses affluents alpins ont été étudiées par de multiples auteurs (Juramy & Montfort, 1986 ; Bravard, 1987 ; Peiry, 1988 ; Salvador, 1991 ; Gautier, 1992 ; Piégay, 1995...). Une synthèse alpine reprenant en détail tous les éléments connus reste à faire. La difficulté de ce travail repose sur le fait que la connaissance que l'on peut avoir du tressage alpin repose presque exclusivement sur l'exploitation de données d'archives antérieures au XX^e siècle. Les données sont donc à la fois longues et difficiles à acquérir et de telles reconstitutions demandent de lourdes investigations. Les études de cas font clairement apparaître l'existence non pas d'un tressage à physionomie unique, mais de multiples types de lits tressés alpins organisés au sein du désormais classique gradient de styles fluviaux (Schumm, 1977 ; Schumm, 1985). Une typologie fonctionnelle provisoire peut être élaborée en se fondant sur la bibliographie existante (tab. 3.1) :

1- Dans les zones où les vallées étaient étroites et les contraintes structurales fortes², le tressage pouvait très

difficilement se développer. En rétrécissant la largeur de la vallée et exerçant un contrôle aval des pentes du cours d'eau principal, les cônes de déjection jouaient un rôle fondamental sur le style fluvial. Ils engendraient notamment le blocage des transits sédimentaires, ayant pour conséquence l'exhaussement progressif du chenal et l'accentuation du tressage. Ce type de *tressage confiné* a notamment été décrit dans la *chuse de l'Arve* (Peiry, 1988), sur le *Petit Buëch dans le Dévoluy* (Gautier, 1992) et dans plusieurs sections de *l'Ubaye* (Piégay, 1995).

2- Dans les têtes de bassin-versant aux vallées moins encaissées, où pentes, fourniture sédimentaire, contrastes hydrologiques et énergie cinétique présentaient des caractères exacerbés par le relief, le tressage des lits fluviaux était caractérisé par une bande d'activité fluviale large de plusieurs centaines de mètres, généralement très rectiligne. De nombreux bras en eau au tracé peu sinueux témoignaient d'un *tressage épanoui*, à la dynamique extrêmement active. Morphologie en plan et morphométrie du chenal évacuaient avec efficacité l'abondante charge alluviale grossière fournie par la montagne toute proche. Actuellement dans les Alpes du Nord, ce type de tressage, que l'on trouvait dans les vallées fluviales intra-alpines en forte pente, subsiste sur les cours d'eau de tête de bassin versant, le plus souvent émissaires glaciaires : *Plan des Bossons* dans la vallée de Chamonix (Maizels, 1979) ; sources du *Giffre* (Piégay & Peiry, sous presse), de la *Romanche*, du *Drac Blanc* (Peiry & Pupier, 1993)...

3- Dans les grandes vallées fluviales, la dernière glaciation a causé de profonds surcreusements, dans un premier temps remblayés par des dépôts fins témoignant d'une phase lacustre, puis généralement surmontés de graviers et galets fluviaux. Au XVIII^e siècle, un style fluvial intermédiaire entre tressage et méandrage s'y développait, conséquence d'une moindre pente et de l'éloignement des sources sédimentaires. Caractérisé par une bande d'activité fluviale à la sinuosité plus forte ($1,10 < SI < 1,20$) et un indice de tressage moyen élevé

Tableau 3.1 - Typologie fonctionnelle des tressages alpins à la fin du XVIII^e siècle

Style fluvial	Influence de la structure	BANDE ACTIVE			BRAS		FLUX	
		Largeur	Pente	Sinuosité	Tressage	Sinuosité	Ql	Qs
Tressage confiné	TF	f	Var à F	F (contrôlée)	Var à F	f	F	TF
Tressage épanoui	f	TF	F à TF	f	TF	f	F	TF
Tressage à bras divagants	f	Var à F	F	F	F	F	TF	F

TF : très fort

f : faible

Ql : abondance des débits

F : fort

Var : variable

Qs : abondance de la fourniture sédimentaire grossière

¹ Vallée étroite et gorges, vallée rétrécie par des cônes de déjection torrentiels, encaissement du chenal dans des terrasses anciennes...

² Encombrement de la vallée par les cônes de déjection de torrents affluents, en particulier.

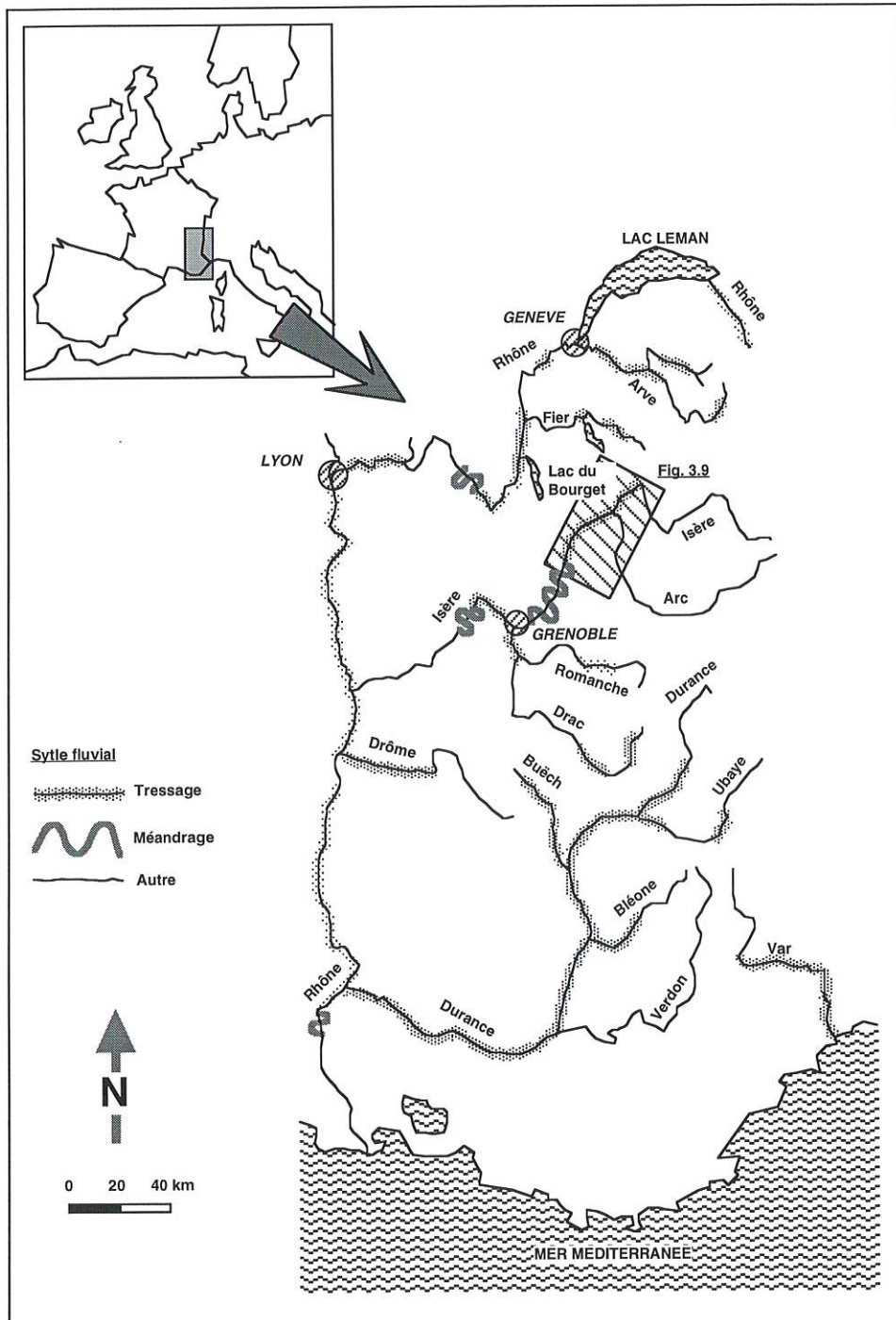


Figure 3.1 - Localisation du tressage alpin à la fin du XVIII^e siècle

(Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié)

($1,70 < T < 2,00$), ce style fluvial s'apparente beaucoup au tressage à bras divagants ("wandering channel") décrit par différents auteurs en Colombie Britannique (Church & Jones, 1982 ; Church, 1983 ; Brierley, 1989). Contrairement au tressage de tête de bassin où le banc longitudinal est la forme la plus fréquente, le tressage à bras divagants présente une morphologie dominée par des bancs latéraux (Gautier, 1992). Sur le *Buëch*, cet auteur rencontre ce style fluvial à l'aval d'affluents four-

nissant peu de matériaux grossiers, mais beaucoup de sédiments fins (produit de l'altération des marnes) ; sur *l'Arve*, un tressage à bras divagants se développait en aval du confluent du Giffre, affluent caractérisé par une forte abondance hydrologique (fig. 3.2) (Peiry, 1988 ; 1989). Il semble donc que le passage du tressage épanoui au tressage à bras divagants soit causé par une augmentation du rapport abondance hydrologique sur abondance de la charge de fond (OI/Os).

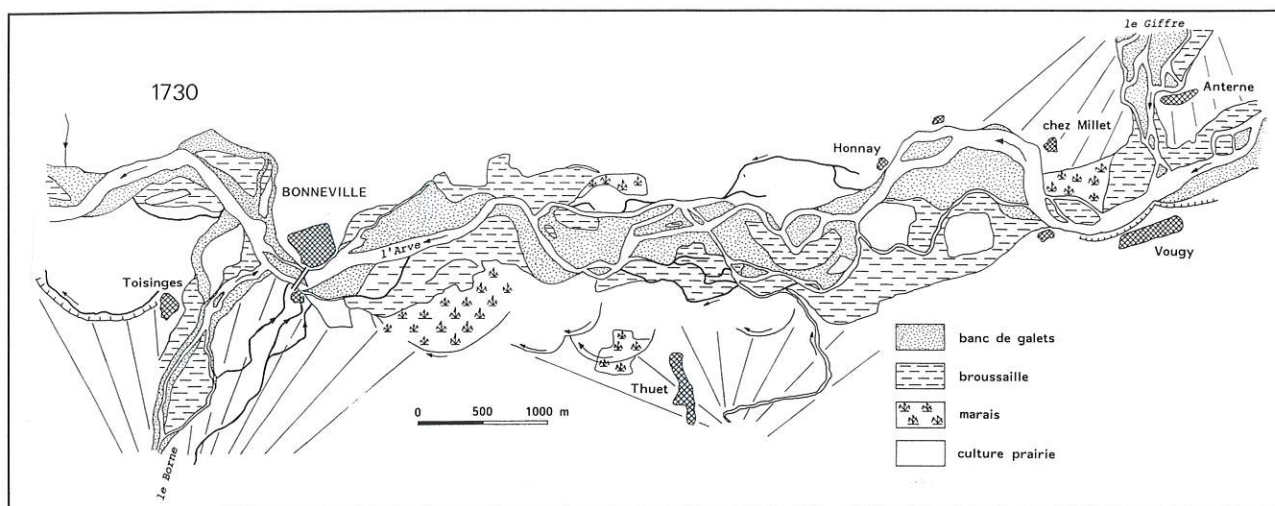


Figure 3.2 - Reconstitution du tressage à bras divagants de l'Arve entre le confluent du Giffre et Bonneville, d'après la Mappede Sarde de 1730 (Source : Peiry, 1989).

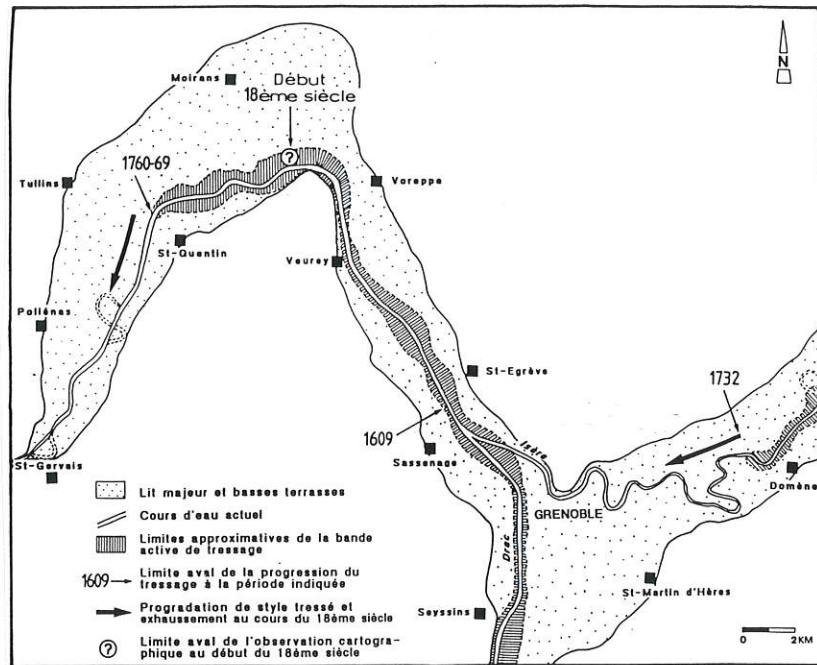
1.2) Un accroissement progressif de l'instabilité des lits fluviaux sous l'effet de la crise climato-anthropique du Petit-Age-Glaciaire

L'étude de la dynamique fluviale des rivières alpines révèle qu'à l'orée du XIX^e siècle, le tressage alpin atteignait l'apogée de son extension spatiale, en touchant en particulier des zones très éloignées des sources sédimentaires grossières. Sur le *Haut-Rhône en Chautagne*, Bravard (1987) montre que l'instabilité du fleuve s'est accrue dès le début du XVIII^e siècle, au détriment de l'extension latérale du marais tourbeux. Sur *l'Arve dans le bassin de Cluses*, Peiry (1987 ; 1988) observe un fort élargissement de la bande de tressage qui érode les terres cultivées, tandis que les bancs de stockage de la charge de fond, deviennent progressivement plus nombreux et plus étendus ; le lit s'exhausse et le tressage s'épanouit vers l'aval par progradation de la charge de fond. Vers 1730, sur *l'Isère en amont de Grenoble*, Bravard (1989) montre qu'une bande de tressage progresse par progradation des formes de chenal et vient progressivement fossiliser le lit méandrique, provoquant plusieurs recoupements de sinuosité. Sur le *Drac dans la plaine de Grenoble et l'Isère aval* dans la cluse de Voreppe et l'ombilic de Moirans, Salvador (1991a ; 1991b) explique la métamorphose du style fluvial par l'arrivée massive de charge de fond en provenance de la montagne. L'accentuation de l'instabilité latérale et l'élargissement du chenal accompagnés d'un exhaussement se produisent dès le XVI^e et XVII^e siècle sur le *Drac* ; vingt kilomètres en aval, sur *l'Isère à Saint-Quentin*, la métamorphose fluviale est enregistrée avec un retard d'environ 160 ans, ce qui indique un rythme moyen de progradation du tressage de 120 m.an⁻¹ (fig. 3.3).

Plusieurs causes généralement combinées ont été avancées pour expliquer l'accroissement de l'activité fluviale des rivières alpines à l'Époque Moderne. Dans le cas du

Drac, Bravard (1989) remarque qu'il paraît d'abord s'être manifesté sous la forme d'une augmentation de la fréquence des crues, probablement dès le XIV^e et le XV^e siècle ; il a été suivi d'une considérable augmentation de la fourniture de charge de fond, puis des transits par charriage à l'intérieur des lits fluviaux. Dans la vallée de *Chamonix* au XVII^e siècle, Blanchard (1913) a relevé une succession inhabituelle de vidanges de poches d'eau intra-glaciaires qu'il relie à la crue des glaciers du Mont-Blanc ; ces événements furent à l'origine de l'apport de plusieurs centaines de milliers de m³ de sédiments de toute taille à l'Arve. Gautier (1992) indique que la crise morphodynamique du *Buëch* de la fin du XVIII^e siècle et au XIX^e siècle serait liée à des abats d'eau exceptionnels sur un milieu fortement fragilisé par les défrichements. Piégay (1995) abonde dans ce sens, observant sur le *Giffre* une nette augmentation du nombre de crues au XVIII^e et plus encore au XIX^e siècle. La recrudescence d'activité du *Borne* pendant la première moitié du XVIII^e siècle, coïncide également avec une succession de fortes crues échelonnées sur quelques années (Peiry, 1988). Cette période a également été propice à la réactivation des processus géomorphologiques sur les versants, en particulier ceux sous la dépendance de l'eau tels les glissements de terrain et les avalanches (Grove, 1972, 1987) ; cela a entraîné une augmentation des entrées sédimentaires et des transits dans l'hydrosystème fluvial. Ballandras, (1997) montre clairement que le Petit Age Glaciaire (1545-1850) s'est traduit par l'augmentation des stocks sédimentaires sur les bassins torrentiels (éboulisation et mouvements de masse), l'accroissement d'activité des processus de transfert de ces stocks vers les talwegs (coulées de débris, avalanches, ravinement), et l'augmentation du nombre des laves et des charriages généralisés dans les lits des torrents. L'intense déforestation, qui a sévi dans les Alpes pendant tout le XVIII^e siècle et une grande partie du XIX^e siècle, est très claire-

Figure 3.3 - Progradation de la bande de tressage sur le Drac et l'Isère à Grenoble au cours de l'Époque Moderne
(Source : Salvador, 1991a).



ment venue augmenter l'effet de la péjoration climatique, venant ainsi renforcer un bilan hydrologique favorable à la mobilisation des particules de sol. L'absence de synchronisme entre les inondations des cours d'eau, tel le décalage entre les grandes crues du Drac (XVII^e-XVIII^e siècle) et les crues d'inondation de l'Isère (XIX^e siècle), tiendrait davantage à des facteurs géomorphologiques³ qu'à des facteurs hydrologiques.

1.3) L'existence de trois courts tronçons où le méandrage remplaçait le tressage

Sur trois courts tronçons de rivières, à la fin du XVIII^e siècle, le tressage laissait place au méandrage (voir fig. 3.1). Tous ont pour point commun d'être éloignés des sources sédimentaires et placés à l'aval de grandes plaines alluviales : a) sur le *Haut-Rhône*, le chenal adoptait un tracé méandrique dans les Basses Terres dauphinoises ; b) sur l'*Isère*, le chenal décrivait de grands méandres à l'amont immédiat de Grenoble et dans la partie aval de l'ombilic de Moirans, à l'extrémité Nord du massif du Vercors. Dans tous les cas de figure, la diminution de la pente, engendrant une diminution de l'énergie cinétique disponible dans le système fluvial, était à l'origine du passage du tressage au méandrage. Les causes de ce changement différaient d'une situation à une autre :

1) Pour Bravard (1994), le maintien d'un lit à méandres sur le *Haut-Rhône* dans les Basses Terres est

une "particularité s'expliquant par l'héritage glaciaire", la série d'ombilics qui constituent la plaine alluviale du fleuve s'étant en plusieurs millénaires remblayée de graviers, de l'amont vers l'aval. Alors que l'exhaussement se poursuivait encore au début du XX^e siècle en Chautagne, "dans un tronçon au remplissage inachevé et soumis à une forte injection sédimentaire pendant les siècles du Petit-Age-Glaciaire", la charge de fond n'a jamais franchi le secteur du défilé de Sault-Brénaz à l'Holocène, "comme en témoigne le fait que la partie aval de l'ancien ombilic des Basses Terres n'est remblayée que par du sable".

2) Sur l'*Isère* en aval de Grenoble, Salvador (1991b, p. 253 et suiv.) fournit des arguments plaçant en faveur de l'arrivée des cailloutis fluviaux dans la cluse de Voreppe au début de l'Holocène, par progradation de la charge du Drac sur des dépôts fluviaux sableux. La propagation de la nappe alluviale grossière se serait étendue jusqu'à l'ombilic de Moirans, l'exhaussement de la plaine alluviale par le dépôt de charge de fond cessant à l'époque gallo-romaine. A l'issue de l'optimum climatique médiéval, les lits du Drac dans la plaine de Grenoble et de l'Isère en aval de la ville étaient concentrés dans un chenal unique, celui-ci étant méandrique sur la basse Isère dont la pente était faible (0,00105 en aval de St-Quentin). La période Moderne marque une reprise de la progradation que les cartes anciennes permettent de bien suivre, d'abord sur le Drac, ensuite sur la basse Isère (Salvador, 1991b, p. 302 et suiv.). Il en résulte un redressement de la pente conduisant à la fossilisation progressive du tracé méandrique par le tressage. A

³ Précocité de la métamorphose fluviale (élargissement et surtout exhaussement du chenal) sous l'effet de la progradation de la bande de tressage en relation avec l'éloignement des zones de forte fourniture sédimentaire.

la fin du XVIII^e siècle, la métamorphose du style fluvial demeurait incomplète dans la partie aval de l'ombilic de Moirans, la chenalisation du lit de l'Isère par les travaux d'endiguement ne permettant pas d'observer la poursuite du processus. Cependant, on sait que les ingénieurs chargés de l'endiguement eurent très rapidement (et jusqu'au milieu du XX^e siècle) à combattre l'exhaussement du chenal entre les digues, ce qui atteste du maintien de forts apports de charge de fond jusqu'à une date récente (Peiry, Salvador *et al.*, 1994).

3) Le cas de l'Isère en amont de Grenoble est différent des deux précédents (voir fig. 3.3). Le méandrage tenait au contrôle aval de la pente exercé par le cône alluvial du Drac, celui-ci faisant barrage et repoussant le cours de l'Isère contre l'extrémité méridionale du massif de la Chartreuse. La chute de l'énergie disponible était à l'origine d'un gradient granulométrique amont-aval de la charge de fond, comme l'atteste la prédominance de dépôts de faible granulométrie dans la partie supérieure du remplissage sédimentaire, à l'amont immédiat de Grenoble (Fourneaux, 1976 ; Chardon, Marnezy *et al.*, 1980 ; Hanns, 1984). Le processus de contrôle aval a probablement existé avec plus ou moins d'intensité pendant tout l'Holocène, mais à probablement été renforcé par la crise climato-anthropique du Petit-Age-Glaciaire et l'exhaussement accéléré du Drac au cours de cette période.

En conclusion, les études montrent que pendant le Petit-Age-Glaciaire, la dynamique fluviale des rivières alpines était caractérisée par une forte activité géomorphologique, dont témoignait le style tressé du chenal. La confrontation des résultats obtenus sur plusieurs cours d'eau indique clairement que les rivières alpines connaissaient une crise morphodynamique qui s'est accentuée au cours du XVIII^e siècle ; le chenal avait tendance à s'élargir et à s'exhausser au détriment des terrains agricoles, conséquence d'une charge alluviale surabondante. Comme on va l'exposer dans le chapitre suivant, c'est dans ce contexte de forte instabilité fluviale que les premières tentatives d'endiguement général se développèrent, durant le dernier quart du XVIII^e siècle dans le cas des projets les plus précoces, et de manière généralisée au cours de la première moitié du XIX^e siècle.

CHAPITRE 2

LA PREMIÈRE ÉTAPE DU CONTRÔLE DES RIVIÈRES DES ALPES DU NORD : L'ENDIGUEMENT ET SES IMPACTS

- 2.1) Les rivières alpines, des laboratoires “grandeur nature” pour l'ingénierie fluviale
- 2.2) Des impacts difficilement maîtrisables
- 2.3) Une évidente nécessité : corriger l'impact

Résumé du chapitre 2

L'endiguement général constitue la première atteinte majeure au fonctionnement des cours d'eau alpins induite par l'homme. C'est surtout dans la première moitié du XIX^e siècle que les travaux de rectification du chenal furent conduits, avec de grosses difficultés tant le fort dynamisme des rivières les rendait difficilement maîtrisable, et en dépit de l'amélioration progressive des techniques de correction. Ils entraînaient de profonds ajustements de la dynamique fluviale, affectant aussi bien le chenal que la plaine d'inondation. Les travaux furent à l'origine d'un lent exhaussement des chenaux entre les digues, exhaussement qui se prolongea sur beaucoup de rivières des Alpes du Nord jusqu'au milieu du XX^e siècle ; dans la plaine d'inondation, le relèvement des nappes fut à l'origine d'une dégradation des conditions de salubrité, révélée par la multiplication des cas de paludisme. Une grande partie des travaux entrepris pendant le dernier quart du XIX^e siècle consista à tenter de réduire l'effet négatif de impacts de l'endiguement. En moins de 20 ans, le colmatage et le drainage des zones humides permirent de très fortement améliorer la salubrité et de faire disparaître les cas de paludisme. Les actions entreprises pour tenter de maîtriser l'exhaussement des lits fluviaux furent, par contre, presque systématiquement un échec. Il fallut attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour que le développement des extractions de gravier à une échelle industrielle permette de régler les problèmes de débordement, en provoquant la rapide et profonde incision des lits fluviaux.

2.1) Les rivières alpines, des laboratoires "grandeur nature" pour l'ingénierie fluviale

De la même manière que "l'extinction des torrents" fut le cheval de bataille du corps des Ingénieurs des Eaux et Forêts après 1860 (Demontzey, 1894 ; Mougin, 1914 ; Mougin, 1931), la chenalisation des rivières alpines, dès le premier quart du XIX^e siècle, est l'une des œuvres maîtresses des Ingénieurs des Ponts et Chaussées, qu'ils fussent piémontais dans les départements savoyards ou français dans les autres vallées alpines. Sans faire preuve d'un déterminisme excessif, il apparaît que l'expansion spatiale du style en tresse, à une époque où les besoins en terres arables allaient croissant, fut l'une des causes principales de la correction du chenal. En effet, l'élargissement du lit pendant la crise du Petit-Age-Glaciaire s'est bien souvent produit au détriment des biens des riverains, comme en témoignent les fréquents "sablages" et les érosions de terres à l'occasion des grandes crues du XVIII^e siècle : *en Chautagne*, au moyen de la Mappede Sarde, Bravard (1981) a cartographié l'action érosive de la grande crue de septembre 1732 sur les terres de la rive savoyarde du Rhône ; *sur l'Arve* dans le bassin de Cluses, l'accroissement de la largeur du chenal, associée au renforcement du tressage, provoqua la perte de près de 700 ha de terrains agricoles (Peiry, 1987) ; dans le Val du Bourget, l'étude des archives sur *la Leysse* révèle un accroissement sensible des débordements et des inondations dans les dernières décennies du XVIII^e siècle (Girel, 1992). Une inévitable compétition entre les cours d'eau et les riverains pour l'occupation de l'espace devait se produire, compétition qui, sur beaucoup de rivières, fut une époque pleine de rebondissements.

Les premières interventions visant à endiguer les rivières sont très antérieures au XVIII^e siècle. A l'exception de la protection partielle d'agglomérations, les travaux de défense demeurèrent très ponctuels, relevant pour l'essentiel d'initiatives privées. Dans la plaine de Grenoble, le *Drac* semble être une exception à cette règle. Des travaux furent très précocement engagés vers 1525 (Bouchayer, 1925) ; ils seront poursuivis et terminés entre 1683 et 1732, un système de digues insubmersibles étant construit pour protéger la ville des incursions de la rivière. Comme le font remarquer Bravard & Peiry (1993), cette précocité tient essentiellement à la position de place forte de Grenoble face à la puissance savoyarde qui occupe la haute vallée de l'Isère, les autres villes se contentant d'ouvrages de défense plus réduits.

Au XVIII^e siècle s'esquisse une volonté de correction générale. Ce siècle restera une période de projets plus que de réalisations. En effet, sur plusieurs cours d'eau, des projets de correction générale apparurent très précocement ; mais les réalisations furent presque partout nettement moins ambitieuses (fig. 3.4) : dans la *moyenne vallée du Giffre* par exemple, l'Architecte Cheneval

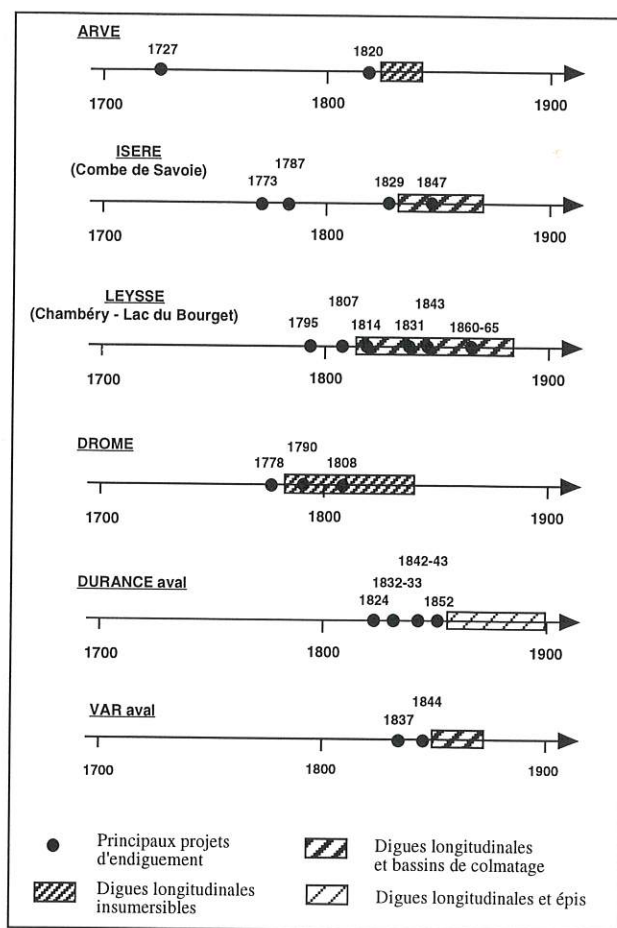


Figure 3.4 - Chronologie des projets et réalisations de l'endiguement sur quelques rivières alpines

(Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié).

signait en 1727 un projet de correction générale de la rivière dans sa moyenne vallée (Rousset-Mestrallet, 1986) ; en fait, les travaux effectivement réalisés furent rares, la lutte contre une rivière aussi difficilement domptable que le Giffre s'avérant particulièrement âpre. Sur *l'Arve*, à la même date, le projet était d'endiguer 100 km de cours d'eau ; on se contenta de protéger les abords des villes et les ouvrages de franchissement à Bonneville, Cluses et Sallanches et de contenir les principaux affluents sur leur cône de déjection. Dans la traversée du village de Marignier, on corrigea ainsi le *Giffre sur la partie amont de son cône*. Un effort énorme fut également fait sur le *Borne*, de la sortie des gorges jusqu'à la confluence avec l'Arve, d'incessants balayages inondant dramatiquement les cultures et hameaux édifiés sur le cône, la rivière ayant en 1733, 1737 et 1738 changé de lit par avulsion (Peiry, 1988). Sur *l'Isère dans la Combe de Savoie*, plusieurs projets d'endiguement partiel furent proposés en 1766, 1773 et 1787. Les réalisations demeurèrent plus limitées que les ambitions affichées (Gex, 1940 ; Girel, 1991 ; Girel, 1992). Sur *l'Isère dans le Grésivaudan*, les premières velléités de correction générale datent de 1778 avec le projet de l'ingénieur Marmillot. L'endiguement, dont il existe des traces depuis le XVII^e siècle, resta discontinu jusqu'au milieu

du XIX^e siècle (Agard, 1942). Sur la *Drôme inférieure*, une correction longitudinale insubmersible fut entreprise dès 1780 sous l'impulsion de Martin Rigaud de l'Isle, propriétaire agronome. Les travaux se prolongèrent jusque vers 1840, la rivière étant endiguée sur deux tronçons successifs séparés par des zones de divagation, les "ramières" (Gemaehling & Chabert, 1962 ; Bravard & Peiry, 1993).

Le XIX^e siècle, et plus particulièrement la période 1820-1890, fut celui de la réalisation effective de la correction de la plupart des rivières alpines (voir fig. 3.4). *L'Arve* fut aménagée par sections entre 1820 et 1838. Sur *l'Arc inférieure*, les premiers "diguements continus" furent d'abord l'œuvre de particuliers à partir de 1815, le système de protection étant par la suite complété et renforcé lors de la construction de la nouvelle route (Baud, 1995). *L'Isère savoyarde* fut endiguée entre 1829 et 1845 à l'initiative de Charles-Félix de Savoie. A Chambéry et dans le Val du Bourget, sur *la Leysse* et ses affluents, des travaux de correction prenant la forme de 700 gabions furent réalisés en 1808 ; un endiguement partiel jusqu'au Bourget fut édifié en 1847. Cependant, la correction générale n'interviendra qu'après l'annexion de la Savoie, entre 1866 et 1887 (Girel, 1991). *L'Isère dans la vallée du Grésivaudan* fut endiguée entre 1852 et 1870, les digues étant exhausées et consolidées entre 1870 et 1890. L'endiguement *du cours aval de la Durance* fut l'un des plus tardifs puisqu'il fallut attendre l'organisation des riverains en syndicats pour que débutent les travaux (1852 à fin du XIX^e siècle) (Juramy & Montfort, 1986). *Le Var*, en territoire sarde pour sa rive gauche, fit l'objet d'un projet en 1837 et d'un endiguement général entre 1844 et 1869 (Bravard & Peiry, 1993). Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, le style fluvial des rivières alpines de plaine alluviale contrastait très fortement avec celui du XVIII^e siècle : le tressage omniprésent jusqu'alors avait presque disparu des grandes vallées (fig. 3.5) ; il subsistait cependant dans les sections non endiguées de plaine alluviale et avait trouvé refuge dans les parties supérieures des vallées où les travaux d'endiguement étaient moins avancés.

L'analyse du système d'endiguement préconisé dans la plupart des projets, et bien souvent réalisé par la suite, est riche d'enseignements. L'usage était de ne pas suivre les sinuosités de la bande d'activité fluviale, mais de donner au nouveau lit un tracé rectiligne, en arasant des îlots, rectifiant les berges, voire en déplaçant le chenal. Sur *l'Arve*, le tracé donné aux digues entre le confluent du Giffre et Bonneville dans la moyenne vallée fut parfaitement rectiligne, alors que la bande active présentait en 1730 un taux de sinuosité compris entre 1,2 et 1,4 (Peiry, 1989). Le cas de la *Drôme inférieure* est strictement identique puisque les digues sont caractérisées par leur grande rectitude. *Dans la vallée du Grésivaudan*, les légères ondulations de la bande active n'ont pas non plus été respectées par les ingénieurs français et l'endiguement

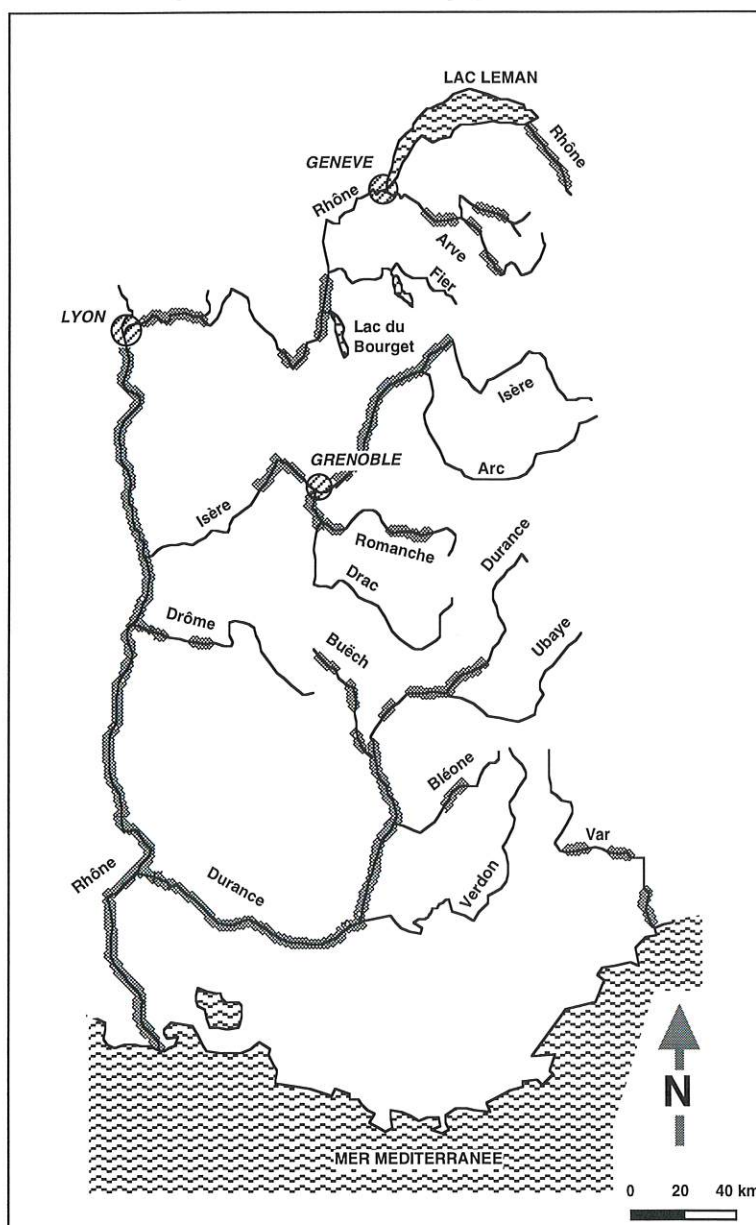
a conduit à une diminution sensible de la sinuosité (voir tab. 1.2) ; seule exception, l'amont de Grenoble, où les méandres furent conservés de peur d'aggraver les crues d'une Isère trop rapide. *Au droit du confluent Arc-Isère*, dans la Combe de Savoie, l'option des ingénieurs sardes fut même d'abandonner l'ancien lit repoussé par l'Arc au pied du massif des Bauges et de creuser un nouveau chenal dans le cône alluvial de l'affluent. D'une manière générale, sur toutes ces rivières, le non respect des sinuosités naturelles par les aménageurs fut l'une des causes principales des impacts liés aux travaux d'endiguement, par la modification des pentes et des forces tractrices qui en ont découlé (voir P3, § 2.2.1). La largeur donnée aux lits endigués était déterminée de manière empirique, faute d'une connaissance suffisante des débits de crue. Sur *l'Isère dans la Combe de Savoie*, le chenal était large de 112 m en amont du confluent de l'Arc, de 132 m en aval en territoire savoyard, puis se réduisait à nouveau à 112 m dans le Grésivaudan. La largeur donnée au lit était en moyenne de 92 m sur *l'Arve en amont de Bonneville*, mais par contre de 300 mètres sur le *Var*... Sur le *Buëch*, Gautier (1993) insiste sur la forte variabilité des largeurs du chenal d'un tronçon corrigé à un autre.

Les grandes crises historiques de la fin du XVIII^e siècle (Révolution française, Empire avec occupation de la Savoie) ont indiscutablement ralenti le processus de correction des rivières alpines. La difficulté de réaliser les projets au cours du XVIII^e siècle, en dépit d'une volonté politique clairement affichée, tient très probablement aussi aux difficultés techniques d'endiguer des rivières extrêmement instables. Ces techniques vont d'ailleurs connaître une profonde évolution entre 1750 et 1840 environ. Cette évolution apparaît clairement à travers la succession des travaux exécutés sur *l'Arve* (Peiry, 1994) : pendant la seconde moitié du XVIII^e siècle, les digues "coffres", à "arches" ou à "pilots" étaient faites de parements en bois, remplies de fascines et de galets. Faiblement fondées et de faible solidité, elles étaient presque immédiatement détruites par les crues ; celles que les riverains réussissaient à maintenir subissaient un vieillissement accéléré par pourrissement des éléments en bois. Après 1820, on adopta des digues "murs" soigneusement maçonnées. Dans les années qui suivirent, on renforça leurs fondations par des pieux de bois profondément fichés dans la masse alluviale. Vers 1835, les murs maçonnés étaient abandonnés au profit d'une simple jetée faite d'enrochements "rangés en glaciés" prenant appui sur deux rangées de pieux de bois et un remblai de terre et gravier, techniquement plus simple à mettre en œuvre. Des réserves de blocs étaient constituées sur la chaussée chapeautant la digue ; les jours de crue, des brigades de riverains étaient chargées de les basculer "à fonds perdus" dans le chenal, de manière à bloquer les affouillements du pied de digue.

Les architectes et ingénieurs ont progressivement amélioré leurs techniques de correction, cette amélioration

Figure 3.5 - Extension de l'endiguement longitudinal sur les rivières alpines à la fin du XIX^e siècle

(Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié).



étant incontestablement le fruit d'un aller-retour permanent entre le terrain et la planche à dessin. La rivière était pour eux un laboratoire "grandeur-nature" où les connaissances naissantes en hydraulique fluviale subissaient l'épreuve de... l'eau ! Ils procédaient par transposition de techniques, essayant, par exemple, sur les rivières savoyardes, des techniques de levée en terre et d'engazonnement éprouvées sur certains cours d'eau piémontais moins fougues ; ils innovaient également, testaient, corrigeaient les procédés d'endiguement, comme le montre l'exemple de la correction de l'Arve. En fait, les plaintes des riverains dont regorgent les archives témoignent plus souvent de l'échec des ingénieurs que de leur succès. L'endiguement des rivières des Alpes du nord fut à l'origine d'un véritable ballet d'ingénieurs : celui dont les travaux étaient jugés inefficaces et qui subissait les foudres de riverains mécontents, le

malchanceux dont le système de protection nouvellement bâti subissait les assauts d'une crue d'occurrence exceptionnelle, celui enfin qui ne parvenait pas à maîtriser l'impact des premières corrections était discrédité sous la pression des riverains et rapidement remplacé. Ainsi sur l'Arve, l'ingénieur Bard, principal artisan de l'endiguement dès 1820, était vingt ans plus tard violemment pris à partie par les populations locales, les travaux d'endiguement étant jugés inefficaces, voire renforçant les inondations : *"quand nous étions sans digues, nous étions protégés ; aujourd'hui que l'Arve est encaissée, nous sommes inondés"*. Les plaignants concluaient sur *"la nécessité de réparer le mal que l'endiguement nous a fait et continue à faire dans une proportion effrayante"* (Lettre à l'Intendant Général, 23/04/1845, ADHS (Archives Départementales de Haute-Savoie) 10FS ; 1840-49). Devant ce type de plainte, dès 1838, l'ingé-

nieur Bard se voyait retirer la conduite de tout nouveau projet par son administration de tutelle. Jusqu'en 1845, date de son remplacement par un ingénieur ayant fait ses preuves à l'occasion des travaux d'endiguement de l'Isère dans la Combe de Savoie, il fut cantonné à entretenir les ouvrages existants (Peiry, 1994). Cet exemple, que l'on pourrait reproduire sur beaucoup d'autres rivières des Alpes du Nord, témoigne de l'incapacité des ingénieurs non pas à chenaliser la rivière, mais plus exactement à maîtriser les impacts directs et indirects de cette chenalisation.

2.2) Des impacts difficilement maîtrisables

2.2.1) Les réponses du chenal

Dresser une liste exhaustive des impacts de l'endiguement n'est pas une mince affaire, car ils sont intervenus à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Cependant, la synthèse des recherches réalisées depuis dix ans révèle que l'impact a fréquemment pris des formes voisines, voire communes sur les rivières des Alpes du Nord.

• Le premier élément commun est la rapidité avec laquelle la réponse du chenal s'est manifestée, ce qui n'est pas étonnant lorsque l'on connaît le fort dynamisme de ces systèmes à pente forte. Sur le *Buëch*, Gautier (1993) indique l'apparition d'importants affouillements en pied de digue, dès la construction des premières digues, avec parfois une destruction complète de l'ouvrage. Sur l'*Arve*, les ajustements de la géométrie du chenal se produisirent dès les premiers travaux (Peiry, 1994) :

a) De profonds affouillements déstabilisaient le pied des ouvrages : *"lorsque la rivière se trouve placée dans son nouveau lit, elle s'enfoncé ordinairement de trois mètres et creuse même jusqu'à six mètres de profondeur lorsque le moindre obstacle d'une rive la dirige vers le bord opposé, et quoique le courant de l'eau ne s'établisse pas toujours à cette profondeur, il n'y enfonce pas moins les digues commencées qui disparaissent quelquefois entièrement dans une seule crue"* (Ing. Bard, 24/08/1833, ADHS 10FS 34, 1830-39). Ce processus de concentration des écoulements en pied de digue est aujourd'hui bien connu des hydrauliciens et les conduit à profondément fonder les ouvrages sur les rivières à fond mobile. Comme nous l'avons exposé plus haut, les progrès des techniques d'endiguement enregistrés sur l'*Arve* entre 1820 et 1845 allèrent dans le sens d'un renforcement des fondations par des systèmes de pieux profondément fichés dans l'*alluvium* et leur protection par des enrochements que l'on rechargeait régulièrement lors des hautes eaux de printemps et des crues. Par ce moyen, les affouillements furent progressivement maîtrisés, mais au prix d'un dépassement considérable des devis initiaux.

b) Au débouché des digues, le brusque ralentissement du

courant provoquait le dépôt en vrac de la charge de fond : *"l'Arve, comme les autres rivières qui charrient beaucoup de gravier, dépose et exhausse son lit là où elle cesse d'être diguée, pour se jeter avec force par une pente double et même triple presque à angle droit sur les propriétés latérales qu'elle emporte et corrode plus fortement qu'avant la construction des digues (...); cela arrive à chaque nouveau prolongement"* (Ing. Bard, 24/08/1833, ADHS 10FS 34, 1830-39). Même s'il engendrait des dégâts aux terrains, ce processus de transfert de charge de fond de la section nouvellement endiguée vers le débouché des digues était temporaire, la poursuite vers l'aval de l'endiguement y remédiant. Par contre, il est devenu permanent dans le cas des cours d'eau endigués par sections, de véritables cônes de déjection se construisant progressivement au sortir des digues. Le seul remède était d'étendre le système de protection vers l'aval, ce qui fut fait sur l'*Arve* à *Sallanches* et à *Bonneville*, jusqu'à atteindre des zones où les enjeux étaient moindres. Sur l'*Isère* à la *frontière franco-savoie*, la correction de la Combe de Savoie fut plus précoce que celle du Grésivaudan. Elle débuta en territoire français lorsque qu'une recrudescence du tressage, se manifestant par un très fort élargissement de la bande active, fut observée au débouché des digues (voir fig. 1.16). Sur la *Drôme* endiguée par sections, les transferts de charge dans les tronçons endigués occasionnèrent un vigoureux tressage dans les ramières intermédiaires. Sur le *Buëch* également endigué par tronçons, Gautier (1993) rend l'endiguement responsable d'un rapide exhaussement du lit au débouché des digues, lui-même à l'origine d'une recrudescence des inondations et de fortes érosions latérales.

• Quelques décennies après l'achèvement des travaux, les tronçons endigués ont systématiquement manifesté une tendance au basculement du profil en long, c'est-à-dire un approfondissement du lit à l'amont et un exhaussement à l'aval. Sur la *Drôme*, le processus a été décrit par Gemaehling et Chabert (1962). Sur le *Rhône en amont de Lyon*, le basculement du canal de Miribel creusé à partir de 1848 est également très bien documenté (Winghart & Chabert, 1965 ; Bravard, 1987 ; Poinart, 1992). Sur l'*Arve* à *Bonneville*, le dépouillement des archives a été le moyen de décrire avec précision la mise en place de l'impact (Peiry, 1994) :

a) Dans la partie amont de la section corrigée, la pente établie à 0,0027 après recoupement des sinuosités naturelles tendait progressivement à retrouver sa raideur naturelle. En 1856, elle n'était déjà plus que de 0,00089 (Mortillet, 1856). L'incision dépassait 2,40 m à l'extrémité amont de la section corrigée, les recharges en enrochement étant malgré tout parvenues à stopper l'abaissement.

b) Au débouché des digues, les graviers s'amoncelèrent provoquant l'exhaussement du lit et la formation d'un

cône de déjection qui tendait "toujours à étendre sa base par les nouveaux graviers charriés" (Ing. Impératori, 19/2/1854, ADHS 10FS 35, 1850-59). En 1847, le Conseil de Bonneville observait "une élévation du lit de l'Arve aux environs de Bonneville où les graviers se sont accumulés à tel point que, sans pluie par le seul effet de la fonte des neiges des montagnes, les eaux de la rivière se sont élevées au-dessus des digues et ont fait refluer sur les terres les torrents et ruisseaux qui y aboutissent" (Registre des Délibérations de Bonneville, 22/5/1847, ADHS 10FS 34, 1840-49). Les riverains estimaient à 4 mètres l'épaisseur des graviers accumulés sous le pont de Bonneville. Dans ce secteur, la pente n'était plus que de 0,0013 ; dès le sommet de cône alluvial, elle passait brutalement à 0,0026.

L'étude statistique des niveaux atteints par les crues à l'échelle limnimétrique du pont de Bonneville confirme les témoignages des riverains (fig. 3.6). En dépit d'une forte dispersion liée aux variations d'amplitude des crues, la chronique montre une tendance continue à l'élévation des niveaux d'eau entre 1850 et 1940. Cet exhaussement entraîna une augmentation de la fréquence d'inondation, sans pour autant que les débits soient à chaque fois exceptionnels : Pardé (1931, 1941) faisait remarquer qu'une hauteur de 2,40 m représentait au milieu du XIX^e siècle une forte crue ; en octobre 1930, une petite crue atteignait la cote de 2,82 m l'échelle du pont de Bonneville, alors que le pic de débit mesuré à Genève par le Service Hydrographique Suisse ne dépassa pas $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ¹.

Sur des rivières totalement endiguées comme l'Isère et le Drac à Grenoble, l'endiguement fut à l'origine d'un exhaussement du chenal sur l'ensemble de leur cours, plus que d'un basculement de profil. Les profils en long du fond moyen dressés sur l'Isère en aval de Grenoble témoignent de la continuité de cet exhaussement entre 1854 et 1943 (Salvador, 1991 ; Peiry, Salvador *et al.*,

1994). Comme le montre la figure 3.7, l'exhaussement était faible en 1888, il s'est accentué ensuite atteignant localement 3 mètres en 1943 (Nouguier, 1992). Blancic & Verdet (1975) indiquent que l'accumulation de la charge de fond favorisée par des transports solides abondants, dans un lit étroitement endigué, se produisait à un rythme de 1 à 2 $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$ un peu avant la seconde guerre mondiale. Dans le Grésivaudan, les riverains décrivaient certaines sections de l'Isère comme "suspendues" au-dessus de la plaine. Les dépôts de graviers se produisaient préférentiellement aux changements de pente : en 1851 alors que l'endiguement était encore très partiel, l'ingénieur Cunit faisait déjà état d'un exhaussement de 0,864 m au bac de la Bâtie, de 0,493 m à la digue de Lumbin, de 0,427 m à la Tronche. Un siècle plus tard, les nouveaux profils en long révélèrent que la section située entre le Cheylas et le pont de la Bâtie était le tronçon où l'accumulation avait été la plus sensible, au cours de la période 1848/54 et 1932/43 (Nouguier, 1992) ; la capacité du lit entre digues était limitée à l'écoulement d'un débit d'environ $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, au droit du méandre de Bois Français ($Q_{5\text{ans}} = 725 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). De ce fait, la crue décennale de 1948, qui écoula un débit de $840 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Grenoble, occasionna d'énormes dégâts par submersion des digues et inondation des terres cultivées (Armand, 1950). Sur le Drac dans l'agglomération de Grenoble, les profils en long du fond moyen (1896-1975) et de la ligne d'eau (1913-1969) montrent aussi la nette tendance à l'exhaussement du lit entre les digues, avant 1955. Cela indique que les contraintes critiques d'entraînement de la charge de fond étaient insuffisantes pour l'évacuer, en dépit de la contraction des écoulements par les digues. La tendance s'inversa à la suite des extractions de matériaux alluvionnaires (fig. 3.8).

2.2.2) Les réponses de la plaine d'inondation

Les endiguements du XIX^e siècle eurent un impact sur le chenal, mais aussi sur la plaine d'inondation. Les infil-

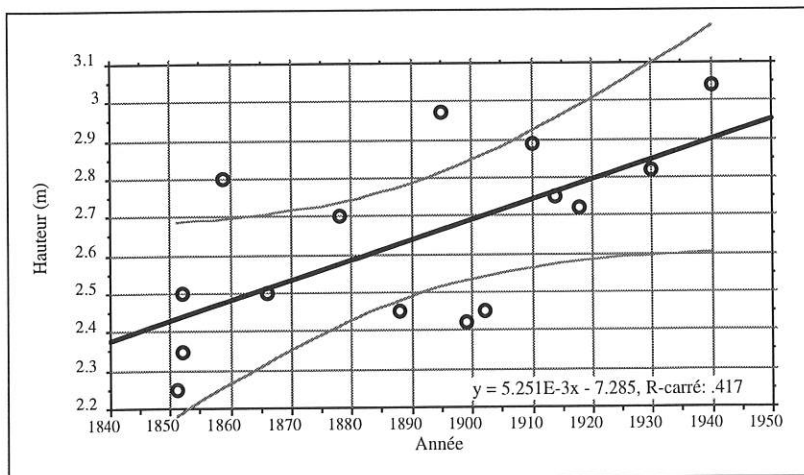
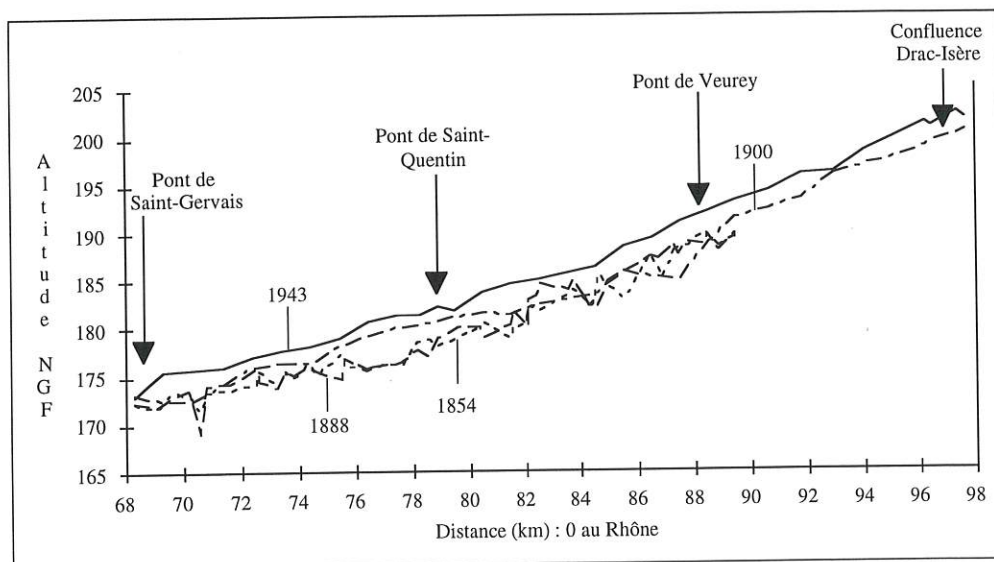


Figure 3.6 - Élévation progressive des niveaux atteints par les crues de l'Arve au pont de Bonneville entre 1850 et 1940
(d'après les données de Pardé, 1931 et 1941).

¹ La crue centennale de l'Arve à Genève est de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

**Figure 3.7 -
Exhaussement du fond
moyen de l'Isère entre
1854 et 1943**

(Salvador, 1991 ; Peiry,
Salvador et al., 1994).



trations au travers des digues dans un premier temps, puis l'exhaussement des lits endigués favorisèrent les remontées d'eau phréatique et eurent rapidement pour effet de transformer une grande partie des lits d'inondation en vastes marécages. Sur l'Arve, les archives révèlent très clairement un problème d'insalubrité à proximité de Bonneville : "le lit de l'Arve est plus élevé que les plaines sur le derrière des digues ; il en résulte que lors des grandes crues, toutes les eaux font irruption, soit par des brèches, soit par submersion sur les digues dont le couronnement est trop bas, restent dans ces plaines et ne rentrent dans la rivière que par infiltration lorsque l'Arve est très basse. Il en résulte sur toute l'étendue de la plaine et à la porte même de la ville des dépôts d'eau stagnante dont les miasmes répandent une odeur infecte durant les chaleurs et produisent des fièvres et autres maladies". Cette description très imagée que l'on doit à l'adjudant du Génie Dompmartin (4/6/1849, ADHS 10 FS 34, 1840-49) met très clairement en évidence l'étendue du problème. Sur l'Isère dans le Grésivaudan, Roy (1927) estimait à 2070 ha l'étendue des terres fertiles transformées de manière permanente en mauvais maré-

cage. Agard (1942), dans un texte tout aussi imagé que le précédent décrivait la nouvelle physionomie de la plaine : "des hauteurs avoisinantes, on aperçoit l'Isère accompagnée sur ses bords immédiats d'un cortège de grands arbres, et à quelque distance par des étendues fauves de blache ou de plantes marécageuses, tandis que par endroits brillent des flaques d'eau stagnantes". Sur l'Isère dans la Combe de Savoie, Girel (1991) indique que les réajustements du chenal consécutifs à l'endiguement entraînaient des variations significatives des niveaux moyens des aquifères et, par conséquent, des changements importants dans les groupements végétaux ou les potentialités agricoles. En dépit des travaux de colmatage qui suivirent l'endiguement, travaux destinés à gagner des terrains sur la rivière, de vastes zones humides conservèrent un caractère impropre à l'agriculture moderne. Initialement exploitée pour la blache ou les bois de four, elles ont été progressivement abandonnées et se sont embroussaillées. Elles constituent aujourd'hui une mosaïque très riche du point de vue écologique par la juxtaposition de groupements diversifiés : tourbières à *Drosera*, aulnaies blanches à *Carex*, aulnaies-

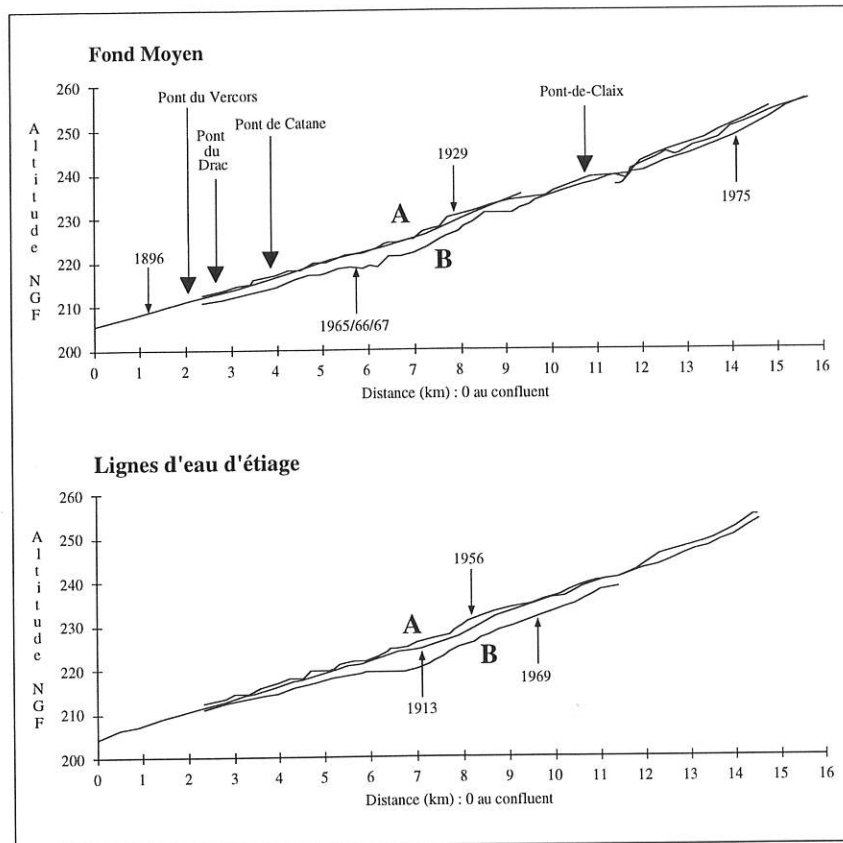


Figure 3.8 - Evolution de l'altitude du lit du Drac entre 1896 et 1975. A) Exhaussement du chenal pendant la première moitié du XX^e siècle ; B) Rapide et profonde incision après 1950.
(Source : Peiry & Nouguié, 1994).

frênaies, groupements de bois durs à orme, charme et chêne pédonculé, prairies humides (Girel, 1993).

L'extension des zones humides consécutivement à l'exhaussement du chenal ne fut pas sans conséquence néfaste sur la santé des populations locales. La stagnation de l'eau causait de graves problèmes de salubrité dans la plaine et les fièvres paludéennes sévissaient de manière endémique : dans un récent article portant sur le Rhône supérieur, le Val du Bourget et l'Isère savoyarde, Pautou, Girel *et al.* (1995) indiquent que, signalée en 1736, la maladie connut une véritable explosion entre 1803 et 1870. Leur étude montre clairement l'influence de la recrudescence du tressage au cours du XVIII^e siècle, puis la responsabilité de l'aménagement :

a) Dans les zones tressées, l'instabilité latérale des cours d'eau et l'exhaussement de leur lit créaient des zones basses, des arrières-marais et des marécages qui étaient autant de foyers du paludisme ; les cas de fièvre coïncidaient avec les basses-eaux de fin d'été et d'automne, lorsque les écoulements cessaient dans certains bras de tressage. Cette période correspond au développement du cycle larvaire de l'espèce vectrice, *Anopheles maculipennis*.

b) Les travaux d'aménagement des lits fluviaux et de

leur plaine d'inondation eurent également une responsabilité dans l'accroissement des cas de paludisme, les ouvriers des chantiers étant fortement touchés. On voyait exploser les cas de maladie pendant l'été, période au cours de laquelle on construisait les digues devant barrer les chenaux secondaires. Sur l'Isère savoyarde et la Leysse, les travaux de colmatage des anciens bras gagnés par l'endiguement générèrent une forte augmentation des décès. Girel (1994) montre que dans les Alpes et la périphérie alpine, le colmatage fut une technique communément utilisée pour rendre fertiles des espaces gagnés sur les rivières. Même si les archives de chaque site n'ont pas systématiquement été analysées, on peut légitimement supposer que les bassins de colmatage furent responsables d'un accroissement du nombre de foyers de paludisme.

c) Les infiltrations à travers les digues, les submersions fréquentes en relation avec l'exhaussement des lits fluviaux, ainsi que la stagnation de l'eau dans les dépressions pendant plusieurs mois lors de la période de hautes eaux ont joué un rôle évident sur la propagation de la maladie. Le très grand nombre de sites où de tels processus ont été observés montre que ce problème fut loin d'être anecdotique.

2.3) Une évidente nécessité : corriger l'impact

Face aux problèmes rencontrés, tant dans le chenal que dans la plaine d'inondation, les ingénieurs prirent rapidement conscience de l'impérieuse nécessité d'ajuster ou de modifier les aménagements. Leur objectif était de limiter les impacts négatifs produits par la première phase de travaux.

2.3.1) L'impossible maîtrise de l'exhaussement des lits fluviaux

La très grande difficulté de maîtriser le basculement des lits endigués et plus particulièrement de la zone aval exhaussée est illustrée par l'exemple de *l'Arve moyenne à Bonneville*. La lecture des archives indique quelles furent les principales options retenues par les ingénieurs pour tenter de corriger l'impact (Peiry, 1994) :

1- Dès 1842, on pensa rectifier le tracé du chenal en vue de d'adoucir la courbe brusque que celui-ci faisait au droit du cône alluvial du Borne (voir fig. 3.2). Ces travaux ne furent pas exécutés en raison du coût excessif des déblaiements qu'ils nécessitaient.

2- On entreprit de réduire la largeur du chenal sous le pont de Bonneville. Construit entre 1675 et 1683, puis restauré en 1753, le pont était composé de cinq arches, d'une largeur totale de 122 mètres. En 1843, on ferma l'arche de rive droite afin d'accélérer le courant. En 1849, l'Ingénieur Marsano proposait de conserver uniquement les trois arches centrales, réduisant le lit à 88 mètres de largeur. Le pont de pierre actuel à quatre arches fut inauguré en 1863 : trois arches d'une largeur totale de 71 mètres permettaient d'écouler les crues ordinaires ; une quatrième, en rive gauche, évacuait les crues débordantes.

3- On tenta de diminuer la largeur entre les digues longitudinales dans la traversée de Bonneville. L'Ingénieur Mosca, qui avait travaillé à l'aménagement de la Combe de Savoie, fit édifier une succession d'éperons submersibles entre les digues longitudinales, ramenant le lit ordinaire à une largeur de 85 m au lieu de 112 m. A la suite des très fortes crues de 1852, les éperons furent détruits. Il fut décidé de ne pas les reconstruire, car lors des fortes crues, la largeur donnée au lit ne paraissait pas excessive (Rapport Ing. Impératori, 11/06/1853, ADHS 6S 283). Par la suite, on procéda à plusieurs reprises à la surélévation des digues longitudinales ; leur hauteur dans Bonneville dépassait de 3,40 mètres le niveau d'étiage.

4- On prolongea les digues vers l'aval et aménagea le confluent du Borne de manière à le faire se jeter dans l'Arve tangentiellement. L'objectif était d'éloigner la

zone de confluence de la ville afin de faciliter l'évacuation de la charge apportée par les deux rivières. Ces travaux, dont on espérait un abaissement de 3 mètres dans la ville, ne furent réalisés qu'après l'annexion de la Savoie.

L'exemple de l'Arve illustre la grande diversité des solutions techniques avancées pour tenter d'enrayer l'exhaussement. Il montre à quel point les ingénieurs de l'époque avaient du mal à maîtriser l'impact et procédaient par essais successifs. Certaines solutions décrites sont purement conjoncturelles et liées à des particularités locales ; par contre, d'autres furent régulièrement utilisées sur des cours d'eau connaissant des problèmes similaires. Sur le *Drac à Grenoble*, la *Gresse*, la *Drôme* et très probablement bien d'autres cours d'eau, le rehaussement des digues fut la solution technique la plus couramment utilisée ; les matériaux étaient pris dans le chenal à l'occasion d'opérations de curage et mis en dépôt sur les digues. Sur *l'Isère en amont de Grenoble*, le rectification du tracé par recouplement des méandres fut la solution technique préconisée par les ingénieurs. Pendant le dernier quart du XIX^e siècle, elle ne fut pas mise en œuvre faute de moyens financiers, mais aussi parce que la ville de Grenoble craignait que les crues soient aggravées. Les projets Schneider (1929) et Schneider "bis" (1947), dressés pour contrecarrer l'exhaussement et limiter l'inondation, reprirent l'idée du recouplement des trois grandes boucles situées en amont de Grenoble, afin de provoquer l'auto-curage par accroissement des pentes et des forces tractrices ; s'y ajoutait l'augmentation de la hauteur des digues et le dragage du lit. En fait, seuls quelques essais de dragage dans l'ombilic de Moirans ont été effectués en 1933-34 (Salvador, 1991). Les inondations liées à la crue de 1948 accélérèrent la procédure de maîtrise de l'exhaussement du chenal. En 1949, un projet simple et rapide était proposé : effectuer des dragages massifs pendant 5 ans avec mise en dépôt des granulats sur les digues pour les exhausser. Des trois recouplements de boucles préconisés dans le projet Schneider, seul le recouplement du méandre de Bois Français fut réalisé en 1967 (Chamboredon & Belli-Riz, 1968).

En dépit d'un formidable déploiement d'efforts, les lits fluviaux de beaucoup de rivières alluviales alpines restèrent engorgés de sédiments grossiers jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale. Les extractions industrielles de granulats dans le chenal, lors de la grande phase d'urbanisation des années cinquante et soixante, permirent de définitivement régler le problème de l'exhaussement des lits fluviaux alpins.

2.3.2) L'amélioration de la salubrité des plaines par le colmatage et le drainage

Le développement de techniques de lutte contre les remontées phréatiques dans les plaines d'inondation est

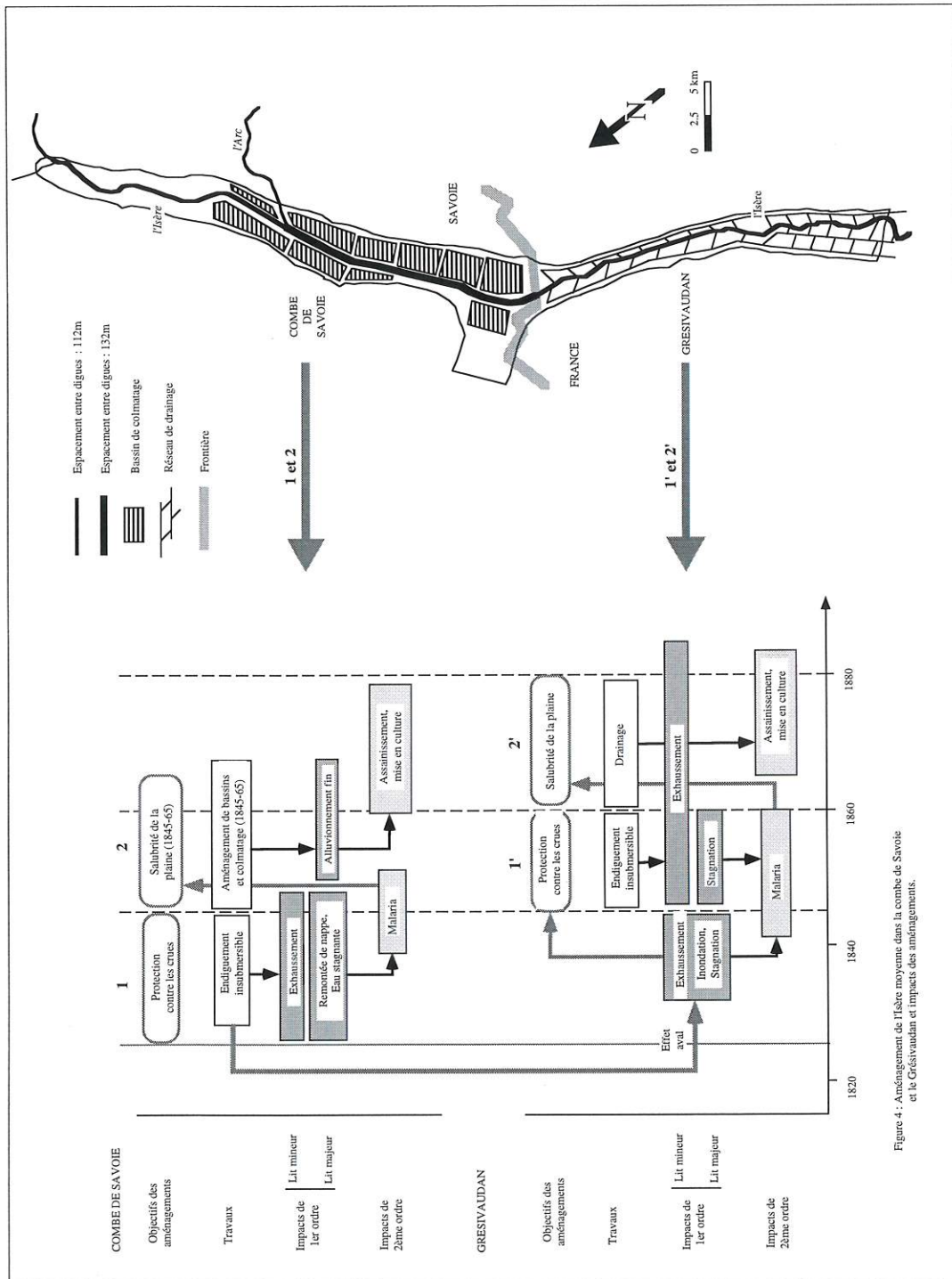


Figure 4 : Aménagement de l'Isère moyenne dans la combe de Savoie et le Gresivaudan et impacts des aménagements.

Figure 3.9 - Mécanismes immédiats et différés de l'impact ; l'exemple de l'endiguement de l'Isère dans la Combe de Savoie et le Gresivaudan au XIX^e siècle (Source : Bravard & Peiry, 1993).

la conséquence indirecte de l'exhaussement des lits fluviaux (fig. 3.9). Selon que les terres étaient déjà fertiles ou pas, les solutions adoptées difféèrent :

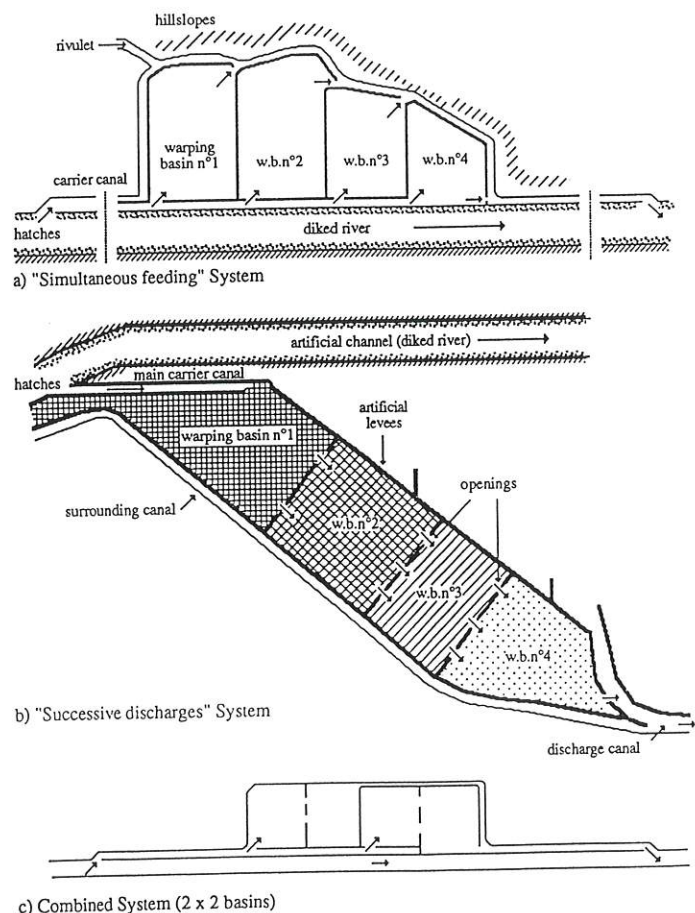
1) Les anciens bras et bancs caillouteux furent progressivement rehaussés de sédiments fins par des colmatages, permettant au passage d'accroître la surface agricole. Ces techniques étaient fort utilisées depuis le XVI^e siècle dans toute l'Europe : en France, Bravard & Peiry (1993) signalent, dès cette époque, des travaux de colmatage de la Crau par les eaux de la Durance, *via* le canal de la Crau écoulant un débit de 12 à 15 m³.s⁻¹ ; Girel (1993) indique qu'en Italie, les Lombards et les Florentins étaient passés maîtres dans ce type de technique. Avec les surfaces considérables que l'endiguement avait fait gagner sur les lits de tressage, le XIX^e siècle redécouvrit l'intérêt de provoquer le dépôt artificiel de limons de crue. Les ingénieurs piémontais appliquèrent leurs techniques sur la *Leyss*e et la plaine du Bourget à la fin du XVIII^e siècle, puis sur l'*Arc inférieur* à Aiguebelle au début du XIX^e siècle. Dès 1845, ils les développèrent sur l'*Isère dans la Combe de Savoie*. Sur l'*Arve*, l'analyse des archives a également révélé l'existence de projets de colmatage dans la plaine du Fayet, sans pourtant que l'on puisse certifier qu'ils ont été réalisés. En France, de tels travaux ont existé sur la plupart des grands cours d'eau alpins. Ils sont décrits sur la *Romanche* à Bourg d'Oisans (Allix, 1928), le *Drac inférieur* et la *Gresse* (Bouchayer, 1925 ; Blanc, 1996), la

Durance et le *Buëch* (Bravard & Peiry, 1993 ; Gautier, 1993).

Le principe du colmatage consistait à faire circuler lentement des eaux chargées de limons dans les anciennes "*brassières*" pour que les matières en suspension puissent se déposer. La plaine alluviale était ainsi subdivisée en bassins qu'alimentaient des canaux et des prises d'eau établies dans les digues (fig. 3.10) ; à l'aval, les eaux claires étaient restituées au chenal (Girel, 1992 ; Girel, 1993 ; Girel, 1994). Les bassins étaient remplis pendant la période des hautes-eaux estivales qui coïncide avec les pics de transport de MES, mais malheureusement aussi avec le cycle de développement larvaire ; cela ne fut pas sans conséquences sur le développement du paludisme pendant les premiers temps du colmatage. La rapidité avec laquelle les atterrissements se produisaient dépendait fortement de la concentration en MES des écoulements : sur le *Var* vers 1860, Bravard & Peiry (1993) indiquent que le colmatage d'un bassin de 30 ha sous une couche de limon épaisse de 30 cm ne prit que 6 ans ; il est vrai que des pics de concentration en MES compris en 10 et 31 g.l⁻¹ furent mesurés à l'époque. Dans la *Combe de Savoie* où des pics de concentration dépassant 10 à 15 g.l⁻¹ se produisent chaque année, Girel (1994) a montré que l'efficacité du colmatage dépendait largement du type de système utilisé ; il recense trois principaux types de modalités d'inondation : a) à déversements simultanés ; b) à déversements successifs ; c) à déverse-

Figure 3.10 - Système de colmatage Sarde établi dans la plaine d'inondation de l'Isère (Combe de Savoie) :

- a) système à déversements simultanés ;
b) système à déversements successifs
(Source : Girel, 1994).



ment combiné (voir fig. 3.10). Les études écologiques menées sur l'Isère montrent que les types de systèmes de colmatage établis à partir du milieu du XIX^e siècle ont très largement conditionné la distribution spatiale des dépôts fins, notamment leur épaisseur et leur composition granulométrique. Les communautés végétales actuellement établies sur les terrains colmatés reflètent cette géographie des dépôts de colmatage. Bien qu'elles soient pour beaucoup d'implantation spontanée, elles témoignent d'un milieu dont les variables d'état (épaisseur et granulométrie des formations superficielles) sont largement artificielles. Sur la *Durance*, cours d'eau sur lequel les concentrations en MES sont parmi les plus fortes de France, l'atterrissement a été très largement facilité dans les zones de ralentissement et de contre-courants, établies en aval des épis transversaux (Bravard & Peiry, 1993). Un système de colmatage par la construction d'épis internes au système d'endiguement longitudinal (golènes) a également été utilisé sur le *Fier* (Girel, 1994).

2) Dans les zones où les formations superficielles fines étaient largement développées, la meilleure solution pour combattre la stagnation des eaux fut de développer le drainage. Cette technique fut très largement appliquée sur l'Isère dans le *Grésivaudan* où, dès 1852, on se soucia d'assainir la plaine en creusant un vaste réseau de canaux (les "*chantournes*"). Les travaux débutèrent dans la partie aval de la plaine et se poursuivirent pendant toute la seconde moitié du XIX^e siècle (tab. 3.2). Malheureusement, les fréquents déversements des crues chargées de matière en suspension se produisaient au détriment de l'efficacité du système de drainage ; les limons de débordement venaient rapidement obstruer les "*chantournes*", ce qui nécessitait de fréquents travaux de curage. Dans la *Combe de Savoie*, le drainage des bassins de colmatage et leur mise en culture furent conduits à la fin du XIX^e siècle. Ces travaux suivirent la crise du phylloxera et la disparition d'une grande partie du vignoble ; ils témoignent de la réduction de la demande en blache qui était jusqu'alors utilisée pour fertiliser la vigne (Girel, 1993). Dans le *Val du Bourget*, la mise en place d'un système complexe de canaux de près de 70 km de longueur fut engagée dans le dernier quart du XVIII^e siècle : initialement prévus pour drainer et colmater les sols, il furent utilisés pendant une grande partie du XIX^e siècle pour augmenter la productivité des prairies humides (laïche, jonc et roseau) ; un savant mélange d'eau chargée en éléments minéraux, issue des cours

d'eau locaux (Leysse, Hyères et Albane), et d'eau chargée de nutriments et de matière organique provenant des égouts de Chambéry était déversé selon un calendrier précis. Cette gestion permit deux récoltes par an sur les sols les plus fertiles, une grande partie de la production servant d'engrais vert pour la vigne.

Les efforts d'assainissement des plaines d'inondation portèrent leur fruit, puisque les cas de paludisme diminuèrent rapidement dans le dernier quart du XIX^e siècle. En Savoie, plus aucun cas n'était recensé après 1883 (Pautou, Girel *et al.*, 1995).

En conclusion, l'étude des cours d'eau alpins montre que les ingénieurs du XVIII^e et du XIX^e siècle avaient très nettement sous-estimé la difficulté d'endiguer les rivières tressées et instables occupant les plaines alluviales des Alpes du Nord. Ils ont été très rapidement confrontés à l'impact de leurs travaux, celui-ci touchant non seulement le chenal (basculement du profil en long, exhaussement du lit entre les digues), mais aussi la plaine d'inondation (remontées des niveaux phréatiques accroissant la superficie des zones humides et favorisant l'insalubrité). Il leur a fallu tenter de corriger cet impact, ce qui a fortement ralenti le rythme des travaux, renchérit le coût des aménagements et ruiné l'espoir de bien des riverains. En quelques décennies, le colmatage et le drainage des terres du lit majeur a permis de régler les problèmes d'insalubrité. En dépit des travaux engagés pour tenter de contenir les hautes eaux de printemps et les crues dans les lits endigués, les réajustements complexes du profil en long, et, en particulier, la tendance continue à l'exhaussement et à la submersion des digues, perdurèrent jusqu'à la seconde seconde guerre mondiale. Au cours des années 1950, le développement à une échelle industrielle des extractions de gravier dans le chenal inversa la tendance.

<i>Date de construction</i>	<i>Chantourne</i>
1852-68	canal de Lancey à Domène
1869-73	canal Saint-Isimiers à Meylan
1878-80	canal du Touvet
1887	canal de Saint-Nazaire-les-Eymes
1891	drainage de la plaine du Touvet
1893	drainage de la plaine de Crolles

Tableau 3.2 - Le réseau de drainage mis en place dans la plaine du Grésivaudan, en réponse au développement de l'insalubrité et à l'exhaussement du chenal
(d'après Agard, 1942).

CHAPITRE 3

L'INCISION DES RIVIÈRES DANS LES ALPES DU NORD DEPUIS LA SECONDE GUERRE MONDIALE

3.1) La distribution spatiale de l'incision

3.2) Une incision impressionnante par son intensité, son extension longitudinale et ses rythmes

3.3) Les facteurs anthropiques de l'incision des rivières des Alpes du Nord

Résumé du chapitre 3

L'incision du chenal constitue le fait marquant de l'évolution des hydrosystèmes fluviaux nord-alpins depuis une cinquantaine d'années. Elle témoigne d'un tarissement de la fourniture sédimentaire et d'un changement des dynamiques de transit, sans précédent depuis le Moyen-Age. L'incision est impressionnante, tant par son ampleur révélée par les fortes valeurs mesurées, que par sa continuité, qu'indique sa quasi-généralisation à l'ensemble des rivières à fond mobile des grandes vallées alpines et du piémont. Les facteurs anthropiques de l'incision des rivières alpines sont nombreux et s'organisent de manière complexe. Ils se manifestent tous, à des degrés variables, par un changement de la dynamique des flux d'eau (QI) et des sédiments, en particulier des charriages (Qs). En empêchant la recharge latérale par les déplacements latéraux du chenal, l'endiguement constitue l'aménagement le plus ancien qui soit actuellement à l'origine d'un déficit de la recharge sédimentaire. "L'extinction" d'un grand nombre de torrents alpins par la Restauration des Terrains de Montagne en est une seconde cause. En interrompant les transits sédimentaires et en altérant l'hydrologie, l'équipement hydroélectrique des rivières des Alpes du Nord est à l'origine de fréquentes ruptures du *continuum* des transports solides. Les très volumineuses extractions de gravier qui, pendant plus de trente ans, ont saigné les rivières de leur charge grossière sont sans conteste la cause principale de la métamorphose des lits fluviaux. Plus récemment enfin, les seuils sous-fluviaux construits pour stabiliser les lits incisés ont encore accru la perturbation des rivières, en tronçonnant un peu plus l'hydrosystème fluvial en unités déconnectés les unes des autres, au moins temporairement. L'analyse des principaux changements de la dynamique fluviale au cours des cinquante dernières années révèle la tendance contemporaine à la stabilisation des rivières des Alpes du Nord. Elle se traduit par la fixation des formes du chenal et leur végétalisation accélérée.

3.1) La distribution spatiale de l'incision

Le long d'un grand nombre de rivières alpines, les endiguements édifiés au XIX^e siècle ne suffirent pas à régler les problèmes de submersion des digues. Les difficultés causées par l'exhaussement du chenal ne furent véritablement solutionnées qu'avec la multiplication des extractions de graviers. D'abord considérées comme bénéfiques car permettant le désengorgement des lits fluviaux, elles conduisirent, après quelques années, à de forts abaisssements des chenaux, dont les conséquences furent aussi spectaculaires que l'exhaussement d'avant 1950. Près de cinquante ans après le démarrage du processus d'incision, on en mesure aujourd'hui les effets négatifs, non seulement sur la stabilité des lits fluviaux, mais aussi sur les composantes écologiques de l'hydro-système fluvial.

Des études de synthèse sur l'intensité et l'extension contemporaine de l'incision ont été menées sur un grand nombre de cours d'eau alpins et d'affluents du Rhône, depuis le début de la décennie 1990 (Landon & Piégay, 1994 ; Peiry, Salvador *et al.*, 1994 ; Piégay, 1995 ; Landon, 1996). Toutes montrent à quel point l'incision est un phénomène généralisé qui touche une large majorité des rivières à fond mobile du bassin-versant du Rhône. Une analyse approfondie de la question sur les rivières des Alpes du Nord a révélé l'ampleur du phénomène (fig. 3.11). Même s'il n'a pas été possible de présenter un document exhaustif, toutes les rivières n'étant pas suivies de manière détaillée, la logique de la répartition spatiale de l'incision apparaît très clairement :

1) L'incision dans les Alpes du Nord est avant tout un phénomène de plaine alluviale, où les lits fluviaux coulent sur des nappes de graviers et galets qui se sont mises en place à l'Holocène. Toutes les plaines alluviales, grandes et petites, sont touchées, dès lors que les contrôles structuraux que constituent les affleurements de bedrock ne limitent pas les possibilités d'abaissement du chenal. C'est le cas des plaines alluviales de l'Arve (bassins de Sallanches, Cluses, Bonneville, Annemasse) ; de celles du *Fier supérieur* en aval de Thônes, mais aussi près d'Annecy ; de *l'ensemble du cours de l'Isère* dans la Combe de Savoie, le Grésivaudan, la cluse de Voreppe et l'ombilic de Moirans ; c'est aussi le cas sur le *Drac* dans la plaine de Grenoble ou sur *l'Arc inférieur*, en aval de la restitution hydroélectrique Isère-Arc (Randens).

2) L'incision affecte également les cours d'eau montagnards de tête de bassin-versant, aux plaines alluviales de dimension pourtant très réduite. L'exemple du *Giffre moyen* a récemment été décrit en détail (Piégay & Peiry, 1997) ; l'incision du *Drac supérieur* dans la vallée du Champsaur a également fait l'objet d'une publication spécifique (Peiry & Pupier, 1993). D'autres cours d'eau plus modestes, tels la *Romanche* dans le bassin de

Bourg-d'Oisans, *l'Arc* en haute-Maurienne, la *Menoge*, affluent de l'Arve, la *Filière*, affluent du Fier, les *Ussets* qui confluent avec le Rhône vers Seyssel sont également atteints. D'une manière générale, l'abaissement des rivières de tête de bassin est modéré en comparaison des valeurs observées dans les grandes plaines alluviales : une chute des lignes d'eau supérieure à deux mètres est plutôt rare.

3) Certains cours d'eau ou portions de cours d'eau semblent à l'abri de l'incision. C'est le cas des rivières encaissées de haute-montagne ou de tête de bassin-versant (vallées étroites, gorges). Sur ces cours d'eau, les affleurements de roches résistantes (bedrock) ou la présence de matériaux dépassant la capacité de transport de la rivière (blocs issus d'éroulements, apports torrentiels grossiers) rendent impossible tout encaissement du lit. La *Dranse* sur la presque totalité de son cours, *l'Isère* et la *Romanche* dans leur haute vallée, le *Fier supérieur* en amont de Thônes appartiennent à ce groupe. C'est aussi le cas des rivières encaissées dans les formations quaternaires ou la molasse tertiaire : l'exhumation de matériaux dépassant la compétence des écoulements (formations morainiques indurées ; blocs erratiques ; bancs molasiques, que l'abrasion érode lentement...) limite très fortement les possibilités d'incision. En raison de l'encaissement de leur vallée, ces cours d'eau offraient des conditions favorables pour la construction de réservoirs et barrages hydroélectriques ; ceux-ci ont transformé les profils en long en une succession de marches d'escalier (*Fier inférieur*, *Drac moyen*, *Basse Isère*).

3.2) Une incision impressionnante par son intensité, son extension longitudinale et ses rythmes

L'abaissement du chenal atteint sur certains cours d'eau des valeurs locales surprenantes (Peiry, 1987). Sur *l'Arve au Fayet*, la valeur de 12 mètres a été atteinte au début des années 1980, la chute de la ligne d'eau étant même récupérée pour la production hydroélectrique à l'issue de la construction d'une micro-centrale. Sur *l'Arve à Cluses*, l'incision atteignait 9 à 10 mètres en 1981 ; le lit aurait continué de s'abaisser sans des mesures de correction par la construction d'une série de seuils sous-fluviaux. Une incision de 8 mètres a été mesurée sur le *Fier supérieur* à l'aval de Thônes. Celle-ci atteint la valeur record de 14 mètres, près d'Annecy. Si l'on considère maintenant non plus l'amplitude verticale de l'incision mais son extension longitudinale, les chiffres sont tout aussi impressionnants. Les 15 derniers kilomètres du cours du *Drac* avant qu'il n'atteigne l'Isère font apparaître un abaissement de la ligne d'eau de plus de 3 mètres. *L'Isère* est incisée de manière continue sur une profondeur de 2 à 4 mètres entre Albertville et Saint-Gervais, soit sur environ 80 km de son cours. Sur *l'Arve*,

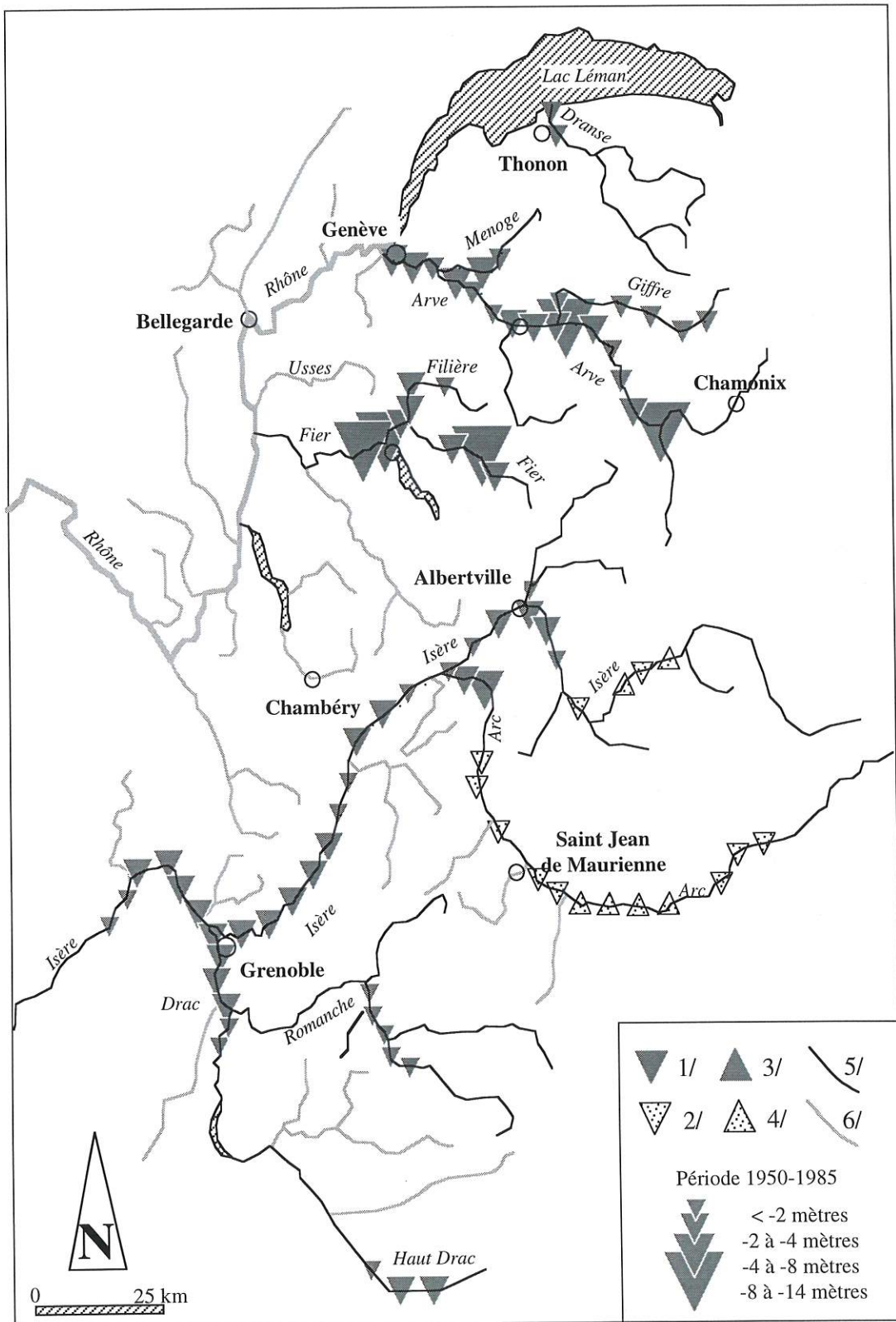


Figure 3.11 - Localisation des principales zones d'incision le long des rivières des Alpes du Nord

(Source : Peiry, Salvador et al., 1994).

Incision : 1/ continue ; 2/ ponctuelle ; **Exhaussement** : 3/ continu ; 4/ ponctuel ;
5/ Cours d'eau étudiés ; 6/ Cours d'eau sur lesquels les données ou les observations manquent

une telle incision est développée de manière continue sur près de 50 km, le territoire suisse n'échappant pas à la règle. Les rythmes de l'incision ont été particulièrement rapides : Blancic & Verdet (1975) ont mesuré des taux d'abaissement moyens de l'ordre de 20 à 30 cm.an⁻¹ sur l'*Isère* en amont de Grenoble, entre 1950 et 1970 ; il en fut de même sur le *Drac* à Grenoble (Blanchet & Brissaud, 1968). Sur l'*Arve* en aval de Cluses, le taux d'incision fut d'abord de 25 cm.an⁻¹ entre 1950 et 1973, puis augmenta pour atteindre 50 cm.an⁻¹ entre 1974 et 1981. Dans la plaine du Fayet, le rythme moyen de l'incision fut de 50 cm.an⁻¹ entre 1950 et 1972. A titre de comparaison, les taux d'exhaussement entre les digues au cours de la période précédente ne dépassaient pas 1 à 2 cm.an⁻¹, ce qui traduit bien le profond déséquilibre de ces rivières.

La nature du matériel affouillé a souvent joué un rôle fort. Sur plusieurs cours d'eau, l'exhumation de formations sédimentaires fines holocènes, jusqu'alors enfouies sous les galets, a très nettement accru les valeurs de l'incision par rapport à ce que l'on était en droit d'attendre (fig. 3.12) : a) sur l'*Arve* dans le bassin de Cluses, la rivière a exhumé des tourbes et argiles dont la mise en place finale date du début du Boréal (Peiry, 1988) ; b) il en est de même sur le *Fier en aval de Thônes*, les dépôts fins exclusivement minéraux demeurant non datés à ce jour. Dans ces deux cas, l'exhumation des formations fines a considérablement réduit la pente d'équilibre du chenal par rapport à ce qu'elle était sur un lit de galets : celle de l'*Arve* qui dépassait 0,0028 en 1912 n'était plus que de 0,0018 en 1981, le profil en long étant à cette date encore très loin d'être stabilisé. Dans d'autres situations, les chenaux ont dégagé des niveaux de résistance (nappes fluvio-glaciaires, blocs erratiques, apports torrentiels grossiers, substratum...) ; celles-ci jouent alors le rôle de points durs et limitent le processus d'abaissement par rapport à ce que les calculs prévoient sur des galets. De telles phénomènes ont été observés à de nombreuses reprises, notamment sur l'*Arve* en amont de Sallanches (Peiry, 1988), le *Giffre* (Piégay & Peiry,

1997), la *Drôme* (Landon & Piégay, 1994) ou l'*Ain* (Bravard, Franc *et al.*, 1990). Les quelques exemples cités révèlent l'importance des héritages paléoenvironnementaux sur les processus géomorphologiques contemporains. Ils montrent à quel point l'analyse de l'impact doit nécessairement s'inscrire dans une compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème à long terme, les investigations incluant l'échelle de temps multi-millénaire.

Le jeu des héritages paléoenvironnementaux n'est pas toujours nécessaire pour que des incisions extrêmes se produisent, comme en témoignent les exemples du *Fier* à Annecy (-14 m) ou de l'*Arve* au Fayet (-12 m). Les lois de l'hydraulique fluviale peuvent suffire à expliquer de tels abaissements. Elles définissent comme critère de mise en mouvement de la charge de fond la force tractrice critique τ_c (ou force critique du courant, en N.m⁻²), évaluée à partir de la pente de la ligne d'énergie et du rayon hydraulique (Petit, 1989a ; Petit, 1989b). L'équation mathématique de la force tractrice (1), qui correspond du point de vue mécanique à la tension tangentielle s'exerçant sur le fond (force de cisaillement), est la suivante :

$$\tau = \gamma RS \quad (1)$$

où γ est le poids volumique du fluide, R le rayon hydraulique et S la pente de la ligne d'eau. L'incision du chenal peut résulter d'une nette augmentation des forces tractrices τ^+ (2), conditionnée par une modification des variables de l'équation :

$$\tau^+ = \gamma.(A^+/P^-).S^+ \quad (2)$$

avec τ^+ : augmentation de la force tractrice critique (N.m⁻²) ;

γ : poids volumique de l'eau (N.m⁻³) ;

A^+ : augmentation de la section d'écoulement (m²) ;

P^- : diminution du périmètre mouillé (m) ;

S^+ : augmentation de la pente.

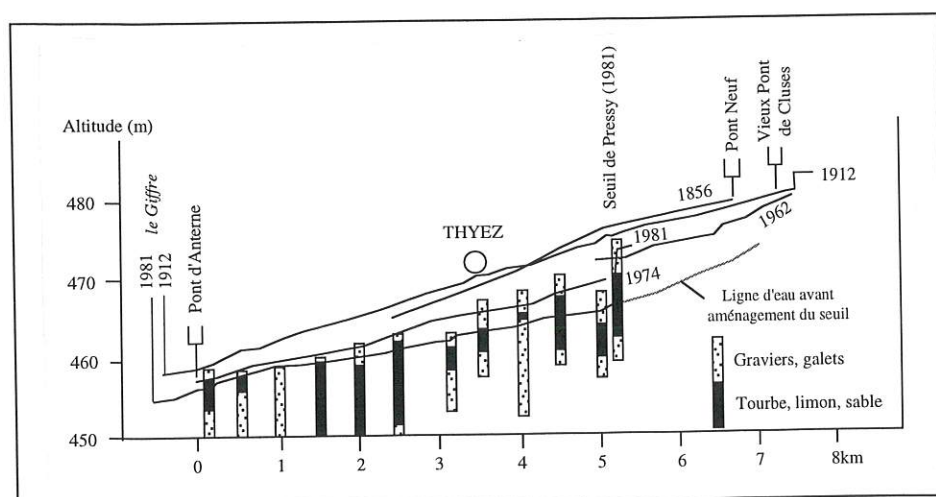


Figure 3.12 -
Abaissement des lignes d'eau de l'*Arve* entre la ville de Cluses et le confluent du Giffre. L'incision qui avoisinait 10 mètres avant l'aménagement du lit en 1983 a été accentuée par l'exhumation d'une épaisse formation fine holocène (Source : Peiry, 1988, modifié).

1) La diminution du périmètre mouillé (P^-) est consécutive à la concentration progressive des écoulements au cours de l'incision ; cela est particulièrement net sur les rivières tressées dont la largeur est forte : a) sur l'*Arve* entre 1950 et 1970, la chute de la ligne d'eau s'est accompagnée d'une réduction de la largeur du chenal d'un facteur de 8 à 10, faisant passer le lit de 500 m à 50 m de largeur ; b) sur l'*Isère* en amont de Grenoble, le chenal calibré par les digues a lui aussi connu un rétrécissement de l'ordre de 25 à 30 %, une plaine d'inondation boisée se développant progressivement à l'intérieur même du système d'endiguement ; c) sur le *Drac* dans la plaine de Grenoble, la réduction de largeur, très forte dans les zones larges (-70 %), a affecté depuis le XVII^e siècle la zone aval endiguée (-19 % entre 1956 et 1981) (Peiry & Nouguié, 1994). Ce phénomène de diminution du périmètre mouillé en relation avec l'incision semble être une règle générale, comme le montrent de très nombreux autres exemples alpins (Juramy & Montfort, 1986 ; Gautier, 1994 ; Landon & Piégay, 1994 ; Piégay, 1995).

2) L'augmentation des pentes locales (S^+) s'est principalement produite au cours de la phase d'extraction de graviers qui a conduit au développement de processus d'érosion régressive avec migration de zones en pente très forte ("knickzones"). Par exemple, sur le *Drac inférieur*, les profils en long dressés lors de la phase d'incision révèlent très clairement des pentes locales excédant 0,0050, alors que la pente du lit ne dépassait pas 0,0037 dans la zone tressée et 0,0030 dans la zone endiguée rectiligne (Peiry & Nouguié, 1994). Ce raidissement temporaire du profil en long avec le développement de vagues d'érosion régressive est un processus classique de l'incision des lits fluviaux (Schumm, Harvey *et al.*, 1984).

3) L'accroissement de la section mouillée (A^+) se manifeste beaucoup moins systématiquement que les variations des deux variables précédentes. Les causes de cette augmentation sont toujours d'origine anthropique. Cet accroissement peut être sensible sur les rivières dont l'hydrologie a été modifiée par l'exploitation des usines hydroélectriques, plus particulièrement sur celles enregistrant une augmentation de l'abondance des écoulements, dans le cadre de l'interconnexion de plusieurs bassins-versants. Par exemple, sur les 8 kilomètres localisés en amont du confluent du Giffre, le module de l'*Arve moyenne* est augmenté d'environ 50 % par l'aménagement hydroélectrique de Pressy (Peiry, 1988) : d'une capacité de stockage de 250.000 m³, l'ouvrage EDF a court-circuité le cours naturel du Giffre. La possibilité de fonctionner en écluses est un fait important vis à vis du phénomène d'incision : les lâchers quotidiens de l'usine de Pressy (22 m³.s⁻¹) dépassent les débits mensuels moyens de l'*Arve* à Cluses pendant 8 mois de l'année. D'une manière générale, l'introduction artificielle de pics dans le régime des écoulements peut avoir de

sérieuses conséquences sur la fréquence et l'ampleur des charriages et de ce fait, sur l'évolution de la morphométrie des sections d'écoulement. Les transports solides de graviers et galets sur le fond sont des phénomènes transitoires ne se produisant généralement que quelques jours par an. Les rivières ou tronçons de cours d'eau le long desquels on a artificiellement accru la fréquence des hautes-eaux (A^+) voient également augmenter le nombre d'épisodes où les charriages se déclenchent. C'est en grande partie à cette modification hydrologique que l'on a attribué l'ampleur de l'incision dans la moyenne vallée de l'*Arve*. En Maurienne, sur le cours inférieur de l'*Arc*, Edouard & Vivian (1982) ont montré que des modifications hydrologiques substantielles existaient à Randens, à l'aval de la restitution Isère-Arc. Sur l'*Isère* dans le Grésivaudan, la restitution d'eau claire à l'usine du Cheylas, provenant de l'*Arc* moyen, est l'une des causes de l'abaissement des fonds observé depuis 1980 (Didier, 1994 ; Pupier, 1996) ; équipée pour turbiner un débit maximum de 228 m³.s⁻¹, l'usine est capable de doubler le débit annuel moyen de l'*Isère* à Grenoble (200 m³.s⁻¹).

3.3) Les facteurs anthropiques de l'incision des rivières des Alpes du Nord

Dans un milieu où l'aménagement date de plus d'un siècle et sur lequel la pression de l'homme s'est exercée sous des formes multiples, relier de manière univoque un impact à une cause n'offre guère de correspondance avec la réalité. Le propre d'un système est de présenter des interactions complexes entre les éléments qui le constituent ; les liens de causalité qui les unissent sont la plupart du temps très indirects et relèvent de boucles qui suivent des cycles plus ou moins longs et compliqués (Durand, 1990). Face à cette spécificité d'un système, la démarche utilisée a été d'analyser la manière dont les aménagements réalisés par l'homme ont modifié les moteurs de la dynamique des hydrosystèmes, à savoir les flux d'eau (Q_l) et de sédiments (Q_s) et de les comparer à l'évolution enregistrée par les cours d'eau nord-alpins. L'objectif était alors de déterminer si les aménagements entrent dans des boucles de rétroaction positive et ont participé au changement, voire l'on renforcé, ou s'ils n'ont pas plutôt contrecarré l'évolution (rétroaction négative). Dans le cadre de ce travail, il a été impossible de fournir une information quantitative précise sur l'incidence de chaque type d'aménagement sur la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Nous nous sommes limités à déterminer une direction de changement (tendance au renforcement ou à la diminution des flux) pour chacune des causes inventoriées, qu'elle soit locale (interventions directes sur le chenal) ou lointaine (actions indirectes transmettant le changement au chenal par le biais de flux d'eau et de sédiments). Cette absence de quantification n'a pas permis de classer les causes en fonction

Tableau 3.3 - Principaux types d'aménagements et leurs incidences sur la dynamique contemporaine des flux solides (Qs) et liquides (Ql).

Type d'aménagement	1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975	2000	Qs	Ql
Endiguement longitudinal									-	na
Aménagement torrentiel									-	-
Barrage hydroélectrique									-	-
Extraction alluvionnaire									--	na
Seuil sous-fluvial									-	na

Qs : flux solide

(-) indique une réduction

Ql : flux liquide

(--) indique une forte réduction

(na) indique que le flux est non affecté

de l'intensité avec laquelle elles affectent la dynamique des flux. C'est pourquoi nous avons préféré adopter une logique chronologique pour les présenter (tab. 3.3).

3.3.1) Des endiguements longitudinaux qui empêchent la recharge latérale

Les études ont montré la généralisation de la chenalisation par les digues à l'ensemble des Alpes françaises au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle (voir fig. 3.5). Il peut paraître paradoxal que les digues longitudinales soient aujourd'hui l'un des facteurs indirects de l'incision des rivières alpines : on a vu précédemment qu'au moment de leur construction, elles avaient plutôt engendré un accroissement de la dynamique des charriages en relation avec des réajustements du chenal. Dans le contexte d'une fourniture sédimentaire et de transits surabondants au XIX^e siècle, les travaux d'endiguement furent à l'origine : a) d'une redistribution spatiale des sédiments stockés dans les lits fluviaux en relation avec les changements artificiels des puissances de transport ; b) de l'exhaussement accéléré des chenaux fluviaux ; celui-ci se produisait déjà avant l'endiguement, mais à un rythme moins soutenu, la rivière pouvant, par ses divagations latérales, librement étaler sa charge. Dans le contexte d'abaissement des fonds qui s'est mis en place après la seconde guerre mondiale, les digues longitudinales continues ont contribué à l'établissement d'un bilan sédimentaire largement déficitaire, en supprimant les possibilités de migration latérale des lits fluviaux. Sur des cours d'eau profondément déséquilibrés, la diminution drastique des possibilités de recharge par sapement latéral peut être considérée, à court et moyen terme, comme la suppression d'une boucle de rétroaction négative qui aurait pu modérer l'incision. Dans les Alpes du Nord, les rivières ont été corsetées entre des digues longitudinales insubmersibles qui sont aujourd'hui presque continues (fig. 3.13). Au cours des décennies 1970 et 1980, l'utilisation des plaines alluviales pour le passage des axes autoroutiers a très largement contribué à renforcer l'extension spatiale de l'endiguement, en supprimant les secteurs où des possibilités de divagation latérale existaient encore.

Du point de vue de la compréhension des mécanismes de l'impact, l'exemple des endiguements illustre de manière remarquable deux éléments fondamentaux que nous aurons l'occasion de rediscuter ultérieurement :

a) le fait que, selon le contexte morphodynamique, un même aménagement peut avoir des effets opposés vis-à-vis de la dynamique des flux. Avant 1950, les digues contribuaient à accélérer le processus d'exhaussement en limitant l'aire potentielle de dépôt de la charge alluviale ; après 1950, dans un contexte de pénurie de charge solide, les digues ont joué un rôle inverse en empêchant la rivière d'utiliser le stock de matériaux disponible dans les nappes alluviales de fond de vallée ;

b) la nécessité de se référer à des modalités de fonctionnement ou à des aménagements anciens, donc d'évaluer la dynamique du milieu sur le long terme, lorsque l'on cherche à établir quels sont les mécanismes intervenant dans un processus d'impact.

3.3.2) La réussite de la politique "d'extinction" des torrents par le service de Restauration des Terrain de Montagne

Au XVIII^e et XIX^e siècle, les torrents alpins jouaient un fort rôle dans l'alimentation des cours d'eau en charge solide. Pour s'en convaincre, il suffit de lire les chroniques de crues décrivant les ravages dont ils furent à l'origine (Mougin, 1914 ; Mougin, 1931). Les programmes de correction torrentielle engagés par les forestiers vers 1850 dans les Alpes du Sud et vers 1870 dans les Alpes du Nord avaient pour objectif "*d'éteindre*" les torrents, en modifiant les paramètres sur lesquels les ingénieurs avaient des possibilités d'action : a) le ruissellement afin de retarder la concentration des eaux de pluie, voire de retenir une partie des précipitations dans la montagne ; b) l'activité des processus géomorphologiques fournissant des débris au réseau hydrographique de versant. Toutes les composantes du système torrentiel furent progressivement traitées (Peiry, 1990) :

1) Dans la montagne, on protégea les versants dénudés et soumis au ravinement par le reboisement. On

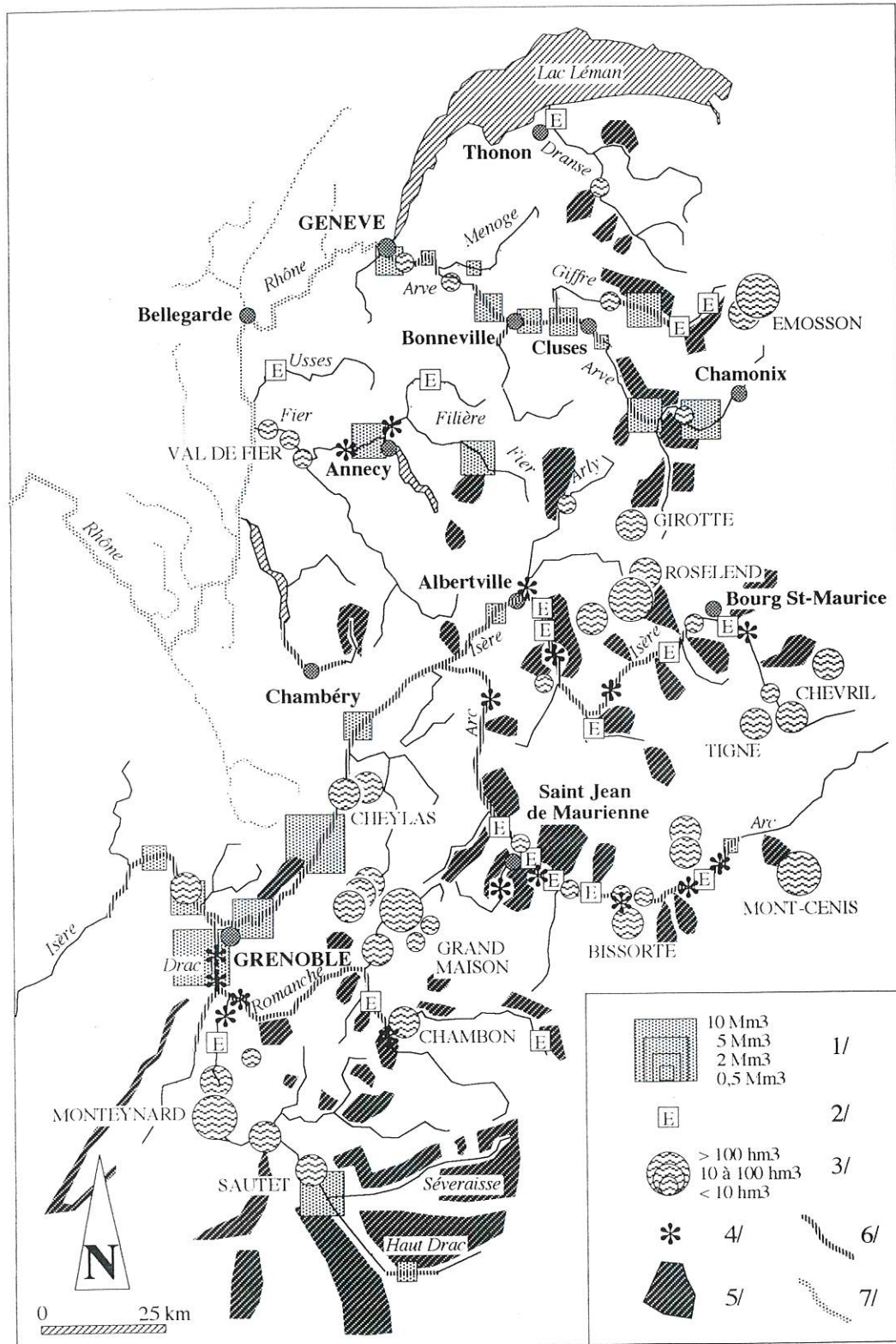


Figure 3.13 - Principales modifications engendrées par l'homme sur les rivières des Alpes du Nord depuis le milieu du XX^e siècle (Source : Peiry, Salvador *et al.*, 1994).

1/ Extractions de gravier de volume connu entre 1950 et 1985 ; 2/ Extractions de volume inconnu ; 3/ Réservoir hydroélectrique modifiant les flux d'eau et de sédiments (Rhône exclu) ; 4/ Usine hydroélectrique ; 5/ Principaux périmètres d'intervention du Service de Restauration des Torrents de Montagne (RTM) ; 6/ Principaux endiguements longitudinaux insubmersibles ; 7/ Cours d'eau hors étude.

réduisit l'activité des glissements de terrain par le drainage et les travaux de stabilisation. Ces aménagements ont été largement efficaces aux altitudes inférieures à 1800 mètres ; au-dessus, les conditions écologiques défavorables à l'établissement de la végétation ont souvent limité les possibilités d'action (Peiry, 1988). Ballandras (1997, p. 381) place vers 2200-2400 mètres la limite supérieure actuelle des terrains "naturellement asylvatiques".

2) Dans les chenaux d'écoulement, la correction a principalement porté sur les processus d'incision résultant de purges sédimentaires occasionnées par les crues. En effet, des affouillements atteignant communément 8 à 10 m étaient observés ; leur incidence sur la stabilité du lit torrentiel et des versants raccordés au chenal était très forte. Les profils en long furent progressivement stabilisés et les pentes réduites par des successions de seuils et barrages, transformant les profils en long en une succession de marches d'escalier. Ces ouvrages apparaissent aujourd'hui avoir pleinement joué leur rôle, car nombreux sont les torrents des Alpes du Nord où les seuils et barrages sont actuellement enfouis sous les sédiments, témoignant ainsi d'une forte capacité de stockage de ces espaces aménagés. Les gestionnaires cherchent aujourd'hui à restaurer l'efficacité des ouvrages, les possibilités de contournement et de déstabilisation des sédiments stockés en arrière des barrages engendrant un risque d'un type nouveau, en cas de crue exceptionnelle (Peiry, 1989 ; 1990).

3) Sur les cônes de déjection, l'édification de digues et d'aires de stockage des transports solides a été complétée par des opérations de curage, depuis une vingtaine d'années. Les volumes extraits varient de 10.000 à 100.000 m³ selon les torrents, la fréquence des interventions allant de 3 à 10 ans en fonction de l'occurrence des transports solides. Ces opérations de curage, apparemment ponctuelles dans l'espace et le temps, pourraient être comptabilisées comme négligeables au regard d'un bilan sédimentaire global. L'exemple *des torrents du haut-Giffre* montre qu'il n'en est rien : les volumes cumulés des curages exécutés sous la responsabilité du service RTM sont de l'ordre de 1000 à 5000 m³.an⁻¹ sur les principaux affluents du Giffre, et de 5000 à 10.000 m³.an⁻¹ sur le chenal du Giffre lui-même ; ces chiffres sont à rapprocher des transports solides calculés sur le Giffre à Samoëns qui seraient de 50.000 m³.an⁻¹. Le volume annuel des curages est compris dans une fourchette de 12 à 30 % des transports solides annuels par charriage (Piégay & Peiry, 1997).

Même s'il est impossible d'avancer des données chiffrées, il apparaît probable que la correction des bassins torrentiels les plus actifs est responsable d'une diminution considérable de la production sédimentaire, en l'es-

pace d'un siècle. Dans l'état actuel de l'aménagement, les débris fournis par des processus géomorphologiques artificiellement ralentis par l'action de l'homme sont soit retenus en altitude par les aménagements, soit prélevés sur les cônes de déjection. Le grand nombre de torrents traités dans les Alpes du Nord incite à penser que la correction torrentielle a largement contribué à diminuer l'entrée des flux de matière dans les cours d'eau intramontagnards et de piémont (voir fig. 3.13) ; il est aussi très vraisemblable qu'elle a changé la forme de certains hydrogrammes de crue, en modifiant les bilans hydrologiques. La réussite de la politique de restauration des terrains de montagne ne doit pas occulter le fait que les Alpes du Nord ont connu simultanément une nette amélioration des conditions climatiques, et une déprise rurale forte et continue pendant le dernier quart du XIX^e et une grande partie du XX^e siècle. Cette situation a été très favorable à la phytostabilisation naturelle d'un grand nombre de bassin-versant et n'a fait qu'amplifier la tendance amorcée par les travaux du RTM. Dans le bassin-versant de la *Drôme*, Bravard, Landon *et al.*, (1997) indiquent que le nombre de torrents contribuant à alimenter le cours principal est passé de 24 à 11 entre 1946 et 1991. Si de nombreux changements sont dus à l'efficacité des reboisements du RTM¹, il semble que l'incidence de la phytostabilisation naturelle sur la fourniture sédimentaire ait été insuffisamment analysée et soit à soigneusement réexaminer ; le long de la *Drôme*, elle pourrait être au moins aussi forte que celle résultant des actions de reboisement (Piégay, comm. orale, 1997). Ces observations vont dans le sens des résultats acquis sur des bassins peu aménagés des Alpes du Nord (Moutard, 1995 ; Ployon, 1996) (voir chap. 5).

3.3.3) Des ouvrages hydroélectriques qui perturbent le transit de la charge alluviale

A) Les étapes de l'équipement hydroélectrique alpin

L'équipement en ouvrages hydroélectriques des Alpes du Nord est le plus ancien, le plus dense et très certainement l'un des plus sophistiqués au monde. C'est sur les pentes du massif de Belledonne, à quelques kilomètres en amont de Grenoble que l'ingénieur A. Bergès fit construire la première conduite forcée, en 1870. L'énergie hydraulique fut d'abord utilisée pour la fabrication de la pâte à papier. L'invention de la dynamo par Gramme en 1870, la mise au point du moteur électrique en 1873, de l'alternateur et du transformateur en 1880, puis le premier transport de l'énergie électrique entre Vizille et Grenoble (14 km) par M. Desprès en 1883, ouvraient la voie de la transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique et son utilisation à des fins industrielles, puis domestiques (Vadot, 1987).

¹ Près du 1/4 des 582 km² de forêt du bassin-versant de la *Drôme* est géré par le service RTM.

Tableau 3.4 - Typologie des aménagements hydroélectriques et quelques exemples de réalisation
(d'après Edouard & Vivian, 1984, modifié)

Type	Génération	Description	Exemples d'aménagements
1	1880-1930	Association d'une haute chute et d'un petit réservoir	Équipement "historique" du versant Nord du massif de Belledonne, vallée du Grésivaudan et de la vallée de la Romanche
2	1930-1970	Association d'une moyenne ou haute chute barrant un verrou et d'un réservoir de forte capacité	Barrages du Sautet, de Tignes, de Serre-Ponçon...
3	1930-1970	Dérivations court-circuitant une portion de cours d'eau ou un tronçon de vallée	Dérivations Giffre-Arve, Isère-Arc, Arc-Isère, cette dernière mise en service en 1980 ayant pour particularité de pouvoir remonter l'eau par pompage dans le bassin de stockage
4	post. 1970	Grands réservoirs d'altitude alimentés par un réseau complexe de captages interconnectant des sous-bassins souvent très éloignés	Complexes d'Emosson, de Roselend, de Grand'Maison...

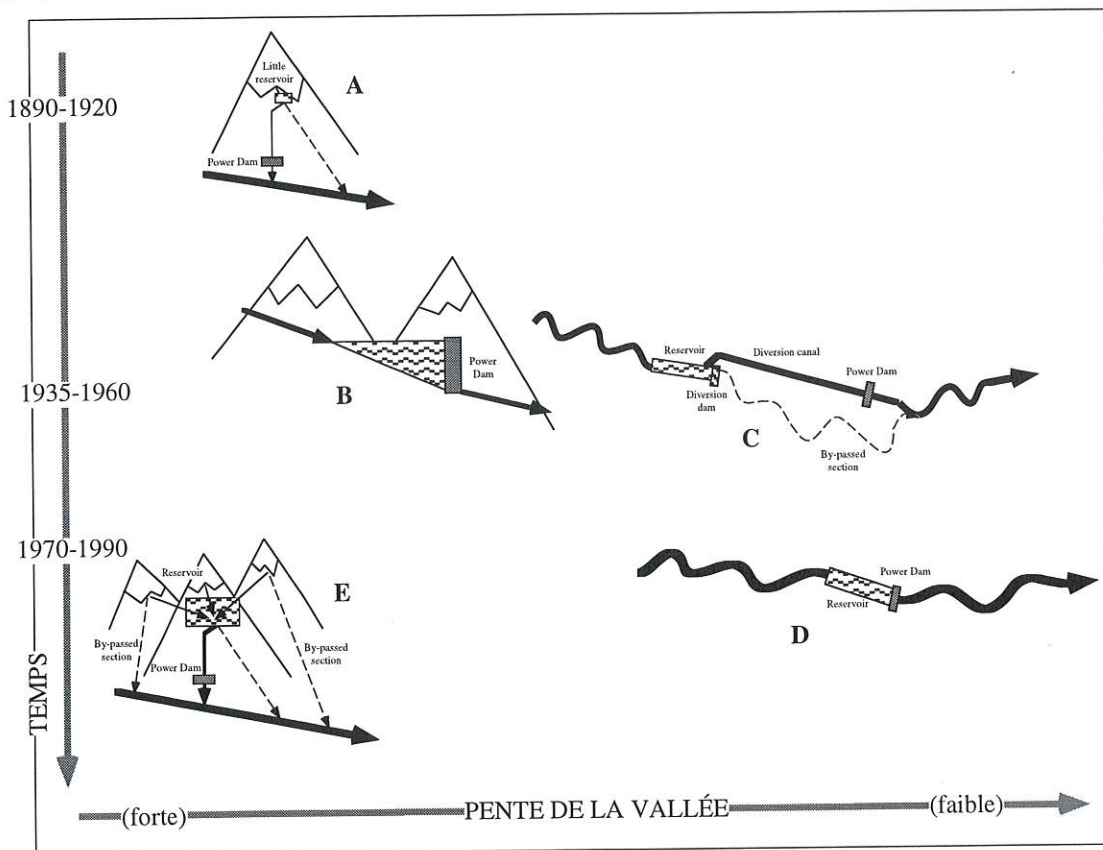


Figure 3.14 - Typologie simplifiée des aménagements hydroélectriques alpins depuis le début du XX^e siècle
(Source : Peiry, Girel *et al.*, 1997, modifié).

Edouard et Vivian (1984) ont identifié trois phases majeures successives dans l'équipement hydroélectrique des Alpes depuis le début du siècle (fig. 3.14 ; tab. 3.4) :

1) Avant 1920-30, les pionniers de la "Houille-Blanche" suivirent l'exemple de Bergès et associèrent un bassin de faible capacité, une conduite forcée de "haute chute" (dénivellation de plusieurs centaines de mètres) et une turbine placée au pied de la conduite. La faible réserve que constituait le bassin d'altitude soumettait le fonctionnement de l'usine au rythme très contrasté de l'hy-

drologie alpine et limitait fortement la production d'énergie. Dans les vallées, on multipliait les dérivations de l'axe principal d'écoulement avec les mêmes contraintes hydrologiques que pour les aménagements de haute chute, à l'image de l'équipement hydroélectrique de la *Romanche inférieure* (fig. 3.15/A).

2) Entre 1930 et 1960-70, l'équipement hydroélectrique prit essentiellement deux formes : a) les vallées les plus profondes furent barrées au niveau d'un verrou, l'aménagement combinant une haute ou moyenne chute

et un réservoir de grande capacité. Le fort pouvoir de stockage du réservoir permettait de s'affranchir partiellement des contraintes hydrologiques naturelles, en particulier de la longue période de basse eaux hivernales, et de produire du courant de manière beaucoup plus régulière. Le *bassin du Drac* et ses 5 réservoirs successifs correspond largement à ce type d'équipement (fig. 3.15/B) ; b) dans les auges glaciaires, on développa des ouvrages à dérivation court-circuitant des portions de cours d'eau, voire des tronçons de plusieurs dizaines de kilomètres de vallée. La réalisation de bassins de rétention de moyenne capacité a permis un fonctionnement en éclusées. L'équipement de *l'Arc en Maurienne* constitue l'archétype de ce mode d'aménagement.

3) Avec la décennie 1970, l'aménagement a gagné en complexité. En haute-montagne débuta l'ère des aménagements combinés associant de volumineux stockages à haute altitude et l'interconnexion de bassins-versants souvent forts éloignés par un réseau complexe de dérivations et de pompages à double sens. Conçus après les chocs pétroliers, ces aménagements sont destinés à la production d'énergie de pointe dans un contexte où 80 % de la production sont assurés par le parc des centrales électronucléaires. Dans la dernière génération de ces ouvrages, à l'usine hydroélectrique installée dans la vallée au pied de la conduite forcée, est associé un second bassin de rétention d'eau. L'originalité de cet aménagement est la réversibilité des turbines qui l'équipent : a) en période de forte consommation, les usines de haute chute produisent de l'énergie à haute valeur économique ; b)

pendant la nuit, la surproduction d'origine nucléaire est utilisée pour remonter l'eau dans les réservoirs d'altitude par pompage, permettant en principe au système d'être indépendant des rythmes hydroclimatiques.

Ces différentes catégories d'ouvrages hydroélectriques, dont l'expansion s'est principalement produite après 1950, ont affecté et perturbent encore de manière complexe la géomorphologie fluviale des vallées alpines. Leur incidence vis-à-vis de l'incision des lits fluviaux résulte de deux types de processus : a) de l'interruption du *continuum* des transports solides grossiers par les barrages ; ce phénomène peut être qualifié d'irréversible pendant la durée de vie de l'ouvrage, le barrage présentant une barrière physique infranchissable pour les transports solides ; b) de la perturbation du charriage par l'atténuation des contrastes saisonniers qui caractérisent l'hydrologie alpine, elle-même réversible car susceptible d'être atténuée si on rétablit les débits de prise en charge des matériaux.

B) Des barrages qui bloquent la charge de fond

La rupture du *continuum* sédimentaire par les barrages est un classique de la littérature géomorphologique faisant le point sur les impacts de ce type d'aménagement (Petts, 1984 ; Williams & Wolman, 1984). Le long du cours de *l'Ain*, Bravard, Franc *et al.* (1990) ont montré que la chaîne d'ouvrages hydroélectriques qui équipe le cours d'eau bloque totalement la fraction granulométrique supérieure à 250 microns. Les vidanges de bar-

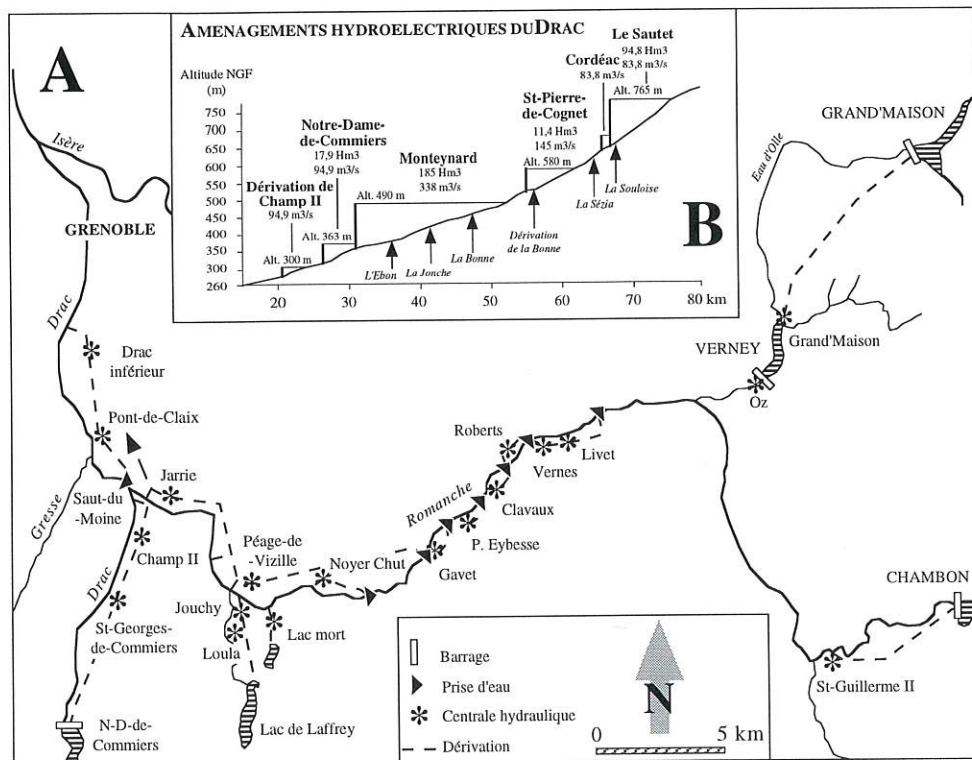


Figure 3.15 - Schéma hydraulique de la Romanche et du Drac en amont (Source : Peiry & Nouguié, 1994).

rages périodiquement pratiquées sur les grands réservoirs français concernent plus une remise en mouvement de la fraction habituellement transportée en suspension qu'une mobilisation de la charge grossière ; même si les vanes de fond sont ouvertes, les sédiments grossiers sont piégés sous une forme deltaïque en queue de retenue et ne sont généralement pas concernés par les manoeuvres de chasse. Dans les zones où la fourniture sédimentaire est forte, ce piégeage affecte des quantités considérables de matériaux : Salvador (1991) rapporte que le volume de sédiments déposé dans la retenue du Sautet, sur le *Drac supérieur*, entre 1930 et 1935, aurait atteint 13 Mm^3 ($370.000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) ; sur le *Rhône franco-suisse*, les suivis du comblement de l'ouvrage de Verbois par les gestionnaires a révélé que, selon les conditions hydrologiques de l'année, le volume des dépôts variait de 400.000 à $1.000.000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ (Bruschin, 1987 ; Peiry, 1988) ; la quasi-totalité provient de l'*Arve*.

L'incidence de la rupture du *continuum* sédimentaire sur l'incision est simple à comprendre : en aval des barrages, le bilan sédimentaire est caractérisé par un déficit d'apports. La rivière compense ce déficit par la prise en charge des matériaux dont elle dispose sur place ; elle les trouve principalement sur le fond de son lit, qu'elle affouille lorsque les débits lâchés par le barrage dépassent le seuil de mise en mouvement des sédiments. Les études réalisées à l'aval des ouvrages ont montré l'apparition rapide d'un pavage du lit venant atténuer l'incision (Williams & Wolman, 1984) : les graviers, plus fréquemment mis en mouvement que les galets, sont les plus facilement exportés ; les éléments les plus grossiers voient alors leur proportion relative s'accroître, favorisant ainsi la mise en place d'une carapace plus ou moins fortement imbriquée qui protège le fond du chenal de l'érosion.

Le blocage du transit par les barrages peut, sous certaines conditions hydrologiques, être largement atténué et différé dans le temps : sur le *Drac*, le barrage le plus aval (Notre-Dame-de-Commiers) fonctionne avec une dérivation et laisse ordinairement dans l'ancien lit un débit réservé de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Peiry & Vivian, 1994) ; le chenal naturel court-circuité continue de recevoir les crues, en tout cas la fraction de débit dépassant la capacité d'équipement de l'usine hydroélectrique ($95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Une longue période sans crue entre 1964, date de mise en service de l'aménagement, et 1993, date à laquelle une crue décennale de $525 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s'est écoulée dans le chenal naturel, a en quelque sorte figé l'évolution géomorphologique du lit court-circuité (voir *infra*). Les déversées qui se sont produites depuis la crue d'octobre 1993 ont déclenché le processus d'incision. Il se manifeste par une tendance à la concentration des écoulements et des abaissments de l'ordre du 50 cm ont été mesurés sur plusieurs centaines de mètres, en aval du barrage. Les études réalisées sur les aménagements de la vallée du Rhône

(Chautagne, Miribel-Jonage, Donzère-Mondragon), qui fonctionnent également avec des dérivation, ont montré que le Drac en aval de Notre-Dame-de-Commiers était un cas particulier ; les lits court-circuités étudiés ont tous enregistré en quelques années de profonds changements de la dynamique des fonds lorsqu'ils écoulaient régulièrement des crues (Poinsart, 1992 ; Klingeman, Bravard *et al.*, 1994).

C) Des changements hydrologiques qui modifient les conditions de mise en mouvement de la charge de fond

La modification des rythmes hydrologiques par les ouvrages hydroélectriques vient se superposer au blocage des sédiments par les barrages. A chaque type d'ouvrage, ou presque, correspondent des conséquences hydrologiques particulières, si bien qu'une synthèse s'avère difficile à réaliser. Les impacts hydrologiques ayant été décrits en détail par les auteurs cités, nous en rappellerons les principales caractéristiques ; puis nous chercherons à analyser l'incidence des changements de la dynamique des flux d'eau sur les transports solides :

1- Dans les parties sommitales de l'hydrosystème, les captages implantés dans le cadre des interconnexions complexes ont eu pour conséquence de profondément réduire les écoulements sur l'émissaire principal des bassins versants d'altitude. La diminution des débits affecte fortement la fourniture sédimentaire provenant des processus géomorphologiques montagnards : sur l'*Isère supérieure*, par exemple, les complexes de la Girotte, de Roselend et du Chevril bloquent les apports dans les têtes de bassin-versant. Sur l'*Arve* et le *Giffre*, le complexe d'Emosson dérive les apports de la haute montagne englacée, la charge séparée de l'eau par des dégrilleurs étant laissée dans les talwegs asséchés (Gaudet, 1973). Cette absence de transit de la charge et son maintien dans la montagne par assèchement des lits affectent nécessairement les bilans sédimentaires de la haute-montagne et, par contrecoup, des cours d'eau de vallée.

L'exemple de l'aménagement d'Emosson montre que ce phénomène peut être réversible : en juillet 1996, de forts transports solides ont été observés, à l'occasion d'une crue de l'*Arve* qui a gravement inondé Chamonix. Certains riverains ont mis en cause les travaux effectués depuis plusieurs mois sur le réseau de captages alimentant le réservoir d'Emosson. Ils auraient conduit à stopper les dérivation et à la remettre en eau des talwegs partiellement court-circuités depuis l'aménagement. Outre le surplus d'eau occasionné par l'arrêt des captages, la remise en service du réseau de drainage naturel, dans lequel les sédiments se sont accumulés sous l'effet d'autres mécanismes que les processus fluviaux (avalanches, apports de versant...), pourrait avoir engendré un accroissement de la fourniture sédimentaire alimentant le chenal de l'*Arve*. Cet exemple montre, de toute éviden-

ce, la nécessité de ne pas laisser les chenaux court-circuités à l'abandon, leur équilibre géomorphologique étant non seulement lié aux débits qu'ils écoulent, mais aussi au volume des sédiments qui s'y accumule (Peiry, 1990).

2- Dans les vallées, les ouvrages hydroélectriques affectent les écoulements à tous les pas de temps, des modules interannuels aux débits horaires (fig. 3.16). Les travaux de H. Vivian sur les changements hydrologiques affectant les rivières alpines lui ont permis de distinguer deux catégories d'impacts sur les écoulements : a) les débits sont qualifiés de résiduels lorsqu'ils sont très profondément perturbés par les ouvrages ; b) lorsque la perturbation est moindre, les débits sont seulement qualifiés d'influencés (Vivian, 1986 ; 1989 ; Peiry & Vivian, 1994 ; Vivian, 1994) :

a) Certains tronçons court-circuités sont parcourus de débits résiduels qui, le plus souvent, sont nettement inférieurs au débit minimum légal servant actuellement de référence (1/10^e du module), tout simplement parce que les aménagements sont antérieurs à la législation. L'exemple du *Drac court-circuité* en aval de Notre-Dame-de-Commiers en constitue le parfait exemple : au pied du barrage, le débit réservé ne dépasse pas 3 % du module interannuel du Drac à Avignonet. Le régime de la section court-circuitée, comme d'ailleurs la courbe des débits classés, traduisent remarquablement le tarissement des écoulements dans cette portion de cours d'eau (fig. 3.17 ; tab. 3.5). Sur ces types d'aménagements, les crues continuent de circuler, souvent intégralement, dans le lit court-circuité ; dans le lit du Drac en aval de Notre-Dame-de-Commiers, par exemple, la crue bicentennale calculée par la méthode du Gradex par EDF est de 1850 m³.s⁻¹. Comme l'ont montré Edouard & Vivian (1982), la *vallée de la Maurienne* est très largement touchée par ce type de perturbations hydrologiques.

b) Sur d'autres cours d'eau ou tronçons de rivières où les changements hydrologiques se combinent de manière complexe d'amont en aval, les débits sont seulement influencés par rapport à l'écoulement de référence. La nature et l'intensité de l'influence des ouvrages dépend très largement du type d'aménagement et de sa position

dans la chaîne des ouvrages, si bien que toute tentative de généralisation est fortement réductrice. Cependant prévaut une tendance à l'atténuation des contrastes saisonniers de l'hydrologie alpine, excès qui en faisaient d'ailleurs l'originalité ; cela tient bien évidemment à la fonction des ouvrages de produire des kWh lors des pics de consommation hivernaux. Sur la *Haute-Isère* et l'*Arc*, les aménagements hydroélectriques sont très clairement à l'origine de l'accroissement des débits lors des basses eaux hivernales, période pendant laquelle les stocks constitués dans les réservoirs sont turbinés ; inversement au printemps, la tendance à la rétention dans les réservoirs des écoulements issus de la fusion nivale provoque une diminution souvent marquée de l'abondance estivale (Edouard & Vivian, 1982 ; 1984). A un pas de temps plus réduit, le fonctionnement en éclusée des ouvrages, y compris ceux dont la capacité de rétention est limitée, se traduit par des variations journalières du débit et des lignes d'eau marquées : sur l'Isère à Grenoble, par exemple, les lâchers de l'usine du Cheylas située environ 30 km en amont sont potentiellement capables de doubler le module en quelques heures (200 m³.s⁻¹) ; actuellement, les consignes d'exploitation de l'usine sont de limiter les lâchers à une valeur de 150 m³.s⁻¹, ce qui se traduit quand même par des variations du niveau d'eau de 1,00 m à 1,50 m en 3 à 4 heures (Bois, 1993).

Les recherches hydrologiques les plus récentes ont porté sur l'impact des ouvrages sur les crues (Pupier, 1996 ; Vivian & Pupier, 1996). Deux grands bassins versants ont plus particulièrement été étudiés, l'Isère et le Drac en amont de Grenoble. Les résultats sont très clairs : les ouvrages hydroélectriques n'ont aucun effet sur les crues rares (f>10 ans). Sur l'Isère en amont de Grenoble, cela est très aisé à comprendre, l'équipement hydroélectrique du bassin-versant étant essentiellement constitué de dérivations sans volumineux bassins de rétention ; quelques grands réservoirs existent mais trop hauts dans les bassins versants pour être capables d'écrêter significativement les crues. Ce résultat peut apparaître plus surprenant sur le Drac où les retenues du Sautet et de Monteynard cumulent à elles deux un volume utile de 280 Hm³. En fait, les volumes d'eau mobilisés par une crue rare sont sans commune mesure avec la capacité de stockage de réservoirs, ceux-ci n'étant d'ailleurs pas

Tableau 3.5 - Fréquence de dépassement des débits caractéristiques avant et après la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (Avignonet, 1939-61 : débits influencés par le Sautet ; 1965-96 : déversés du barrage de Notre-Dame-de-Commiers).

(Source : d'après les données d'EDF, Energie-Alpes et Usine de St-Georges-de-Commiers).

Débits classés du Drac moyen	≥ 132 m ³ /s	≥ 67 m ³ /s	≥ 43 m ³ /s	≥ 27 m ³ /s	≥ 8 m ³ /s
Avant les barrages (1939-61)	10 j/an (DC10j)	90 j/an (DC3)	180 j/an (DC6)	270 j/an (DC9)	355 j/an (DCE)
Après les barrages (1965-93)	0,5 j/an	3,2 j/an	7,2 j/an	11,6 j/an	17,6 j/an

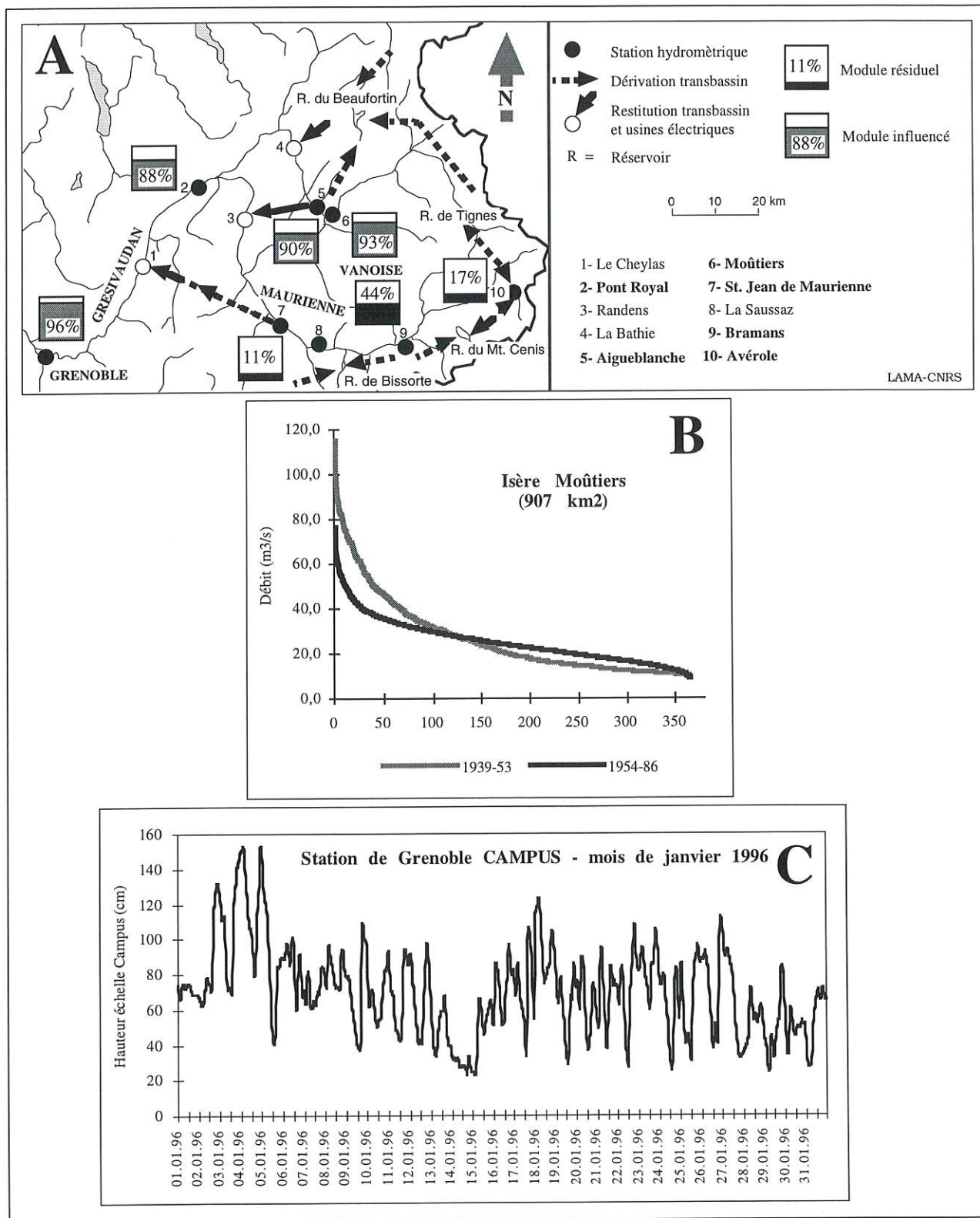


Figure 3.16 - Artificialisation des débits dans les Alpes du Nord à tous les pas de temps ; l'exemple du bassin de l'Isère en amont de Grenoble : A) Diminution des modules (d'après les données de Vivian, 1994) ; B) Transformation des débits moyens journaliers classés (Source : Besson, 1992, modifié) ; C) Fluctuations des niveaux horaires en relation avec les lâchers des usines hydroélectriques (d'après les données transmises par Ph. Bois, ENSHM Grenoble).

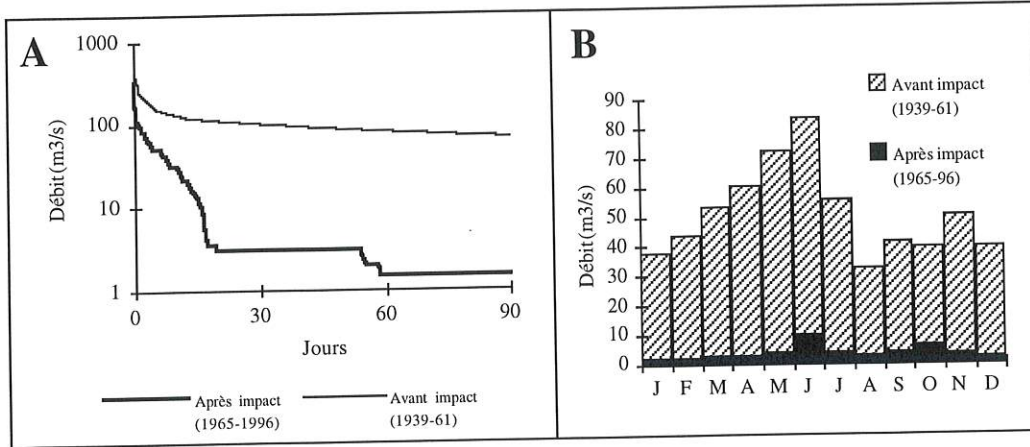


Figure 3.17 - A/ Débits classés déversés en aval du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (moyenne 1965-96). En moyenne, le débit journalier n'est supérieur à $3 m^3.s^{-1}$ que $20 j.an^{-1}$; pendant $35 j.an^{-1}$, un débit de $3 m^3.s^{-1}$ s'écoule dans le chenal court-circuité afin de soutenir la nappe captée alimentant Grenoble en eau potable; au-dessus de la valeur de $60 j.an^{-1}$, le débit est invariablement de $1,5 m^3.s^{-1}$ (Source : Peiry & Vivian, 1994, actualisé); B/ Régime hydrologique du Drac avant et après la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (Source : Peiry & Vivian, 1994, actualisé).

conçus pour écrêter les crues mais pour produire de l'hydroélectricité. Les résultats sont à nuancer pour les crues plus fréquentes ($f \approx 10$ ans) : a) sur l'Isère, la période postérieure à l'équipement (1951-93) est marquée par l'absence de débits supérieurs à $700 m^3.s^{-1}$ au mois de mai. D'après Pupier (1996), il pourrait s'agir de l'effet des réservoirs, en début de remplissage à cette période de l'année, et qui écrèteraient une partie des écoulements de fusion nivale; b) sur le Drac, l'effet des retenues conjuguées de Monteynard/Notre-Dame-de-Commiers est très clairement perceptible sur les crues d'occurrence inférieure à 10 ans (Vivian & Pupier, 1996). Leur inci-

dence a d'ailleurs pu être établie à l'occasion de la crue décennale d'octobre 1993 dans le lit court-circuité de Notre-Dame-de-Commiers (fig. 3.18) : lors du premier pic de la crue, une réduction d'environ $170 m^3.s^{-1}$ a été obtenue par le jeu conjoint de la rétention d'eau dans la retenue et le maintien actif de la dérivation vers l'usine hydroélectrique (Peiry & Vivian, 1994). Ainsi, les gestionnaires disposent d'une petite marge de manoeuvre et peuvent dans une certaine mesure, gérer leur réserve de manière à écrêter les crues courantes. Cette opération ne présente pas de grosse difficulté pour les crues de printemps, période où les réserves sont au plus bas; la capa-

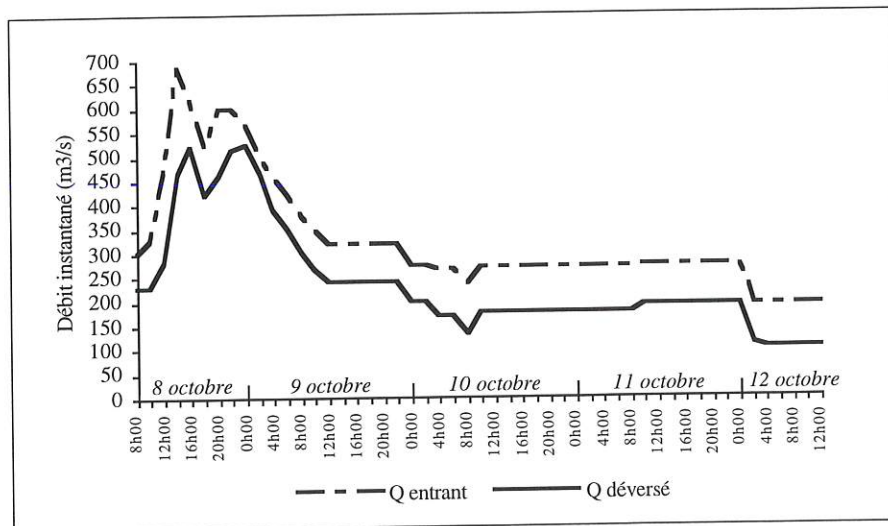


Figure 3.18 - Hydrogramme de la crue du 8-9 octobre 1993
(Source : Peiry & Vivian, 1994)

cité d'écroulement est nettement plus réduite en automne, période à laquelle les réservoirs sont remplis en prévision de la saison de production hivernale.

L'incidence des changements hydrologiques artificiels sur les transports solides par charriage est un phénomène particulièrement difficile à cerner, d'autant plus que chaque cours d'eau ou tronçon de cours d'eau présente des conditions particulières. Sur les rivières naturelles, les transports de fond sont tributaires de conditions hydrologiques susceptibles de provoquer le mouvement des graviers et galets, mais aussi de la composition granulométrique des fonds et de la présence ou non d'un pavage stabilisateur. Un moyen d'appréhender les mouvements de charge de fond est de recourir aux puissances spécifiques (3) qui représentent le travail effectué ou la perte d'énergie par m^2 de chenal ($W \cdot m^{-2}$).

$$\omega_0 = \gamma \cdot Q_b \cdot S / L \quad (3)$$

où Q_b est le débit à plein bord ($m^3 \cdot s^{-1}$), S la pente et L la largeur du lit (m). Les études réalisées sur divers cours d'eau ont montré que le transport se produit pour des valeurs de ω_0 très variables, notamment en raison de la nature des matériaux transportés (granulométrie, imbrication...):

- Sur l'*Ourthe*, dans les Ardennes belges (B.V. 2640 km^2 , débit à plein bord de 300 $m^3 \cdot s^{-1}$), F. Petit a observé des mouvements de charge de fond pour des puissances spécifiques ω_0 relativement faibles de 40 à 50 $W \cdot m^{-2}$ (Petit, communication personnelle). Par ailleurs, les récentes recherches entreprises sur les transports solides du *canal de Miribel*, en amont de Lyon, indiquent que du matériel grossier est transporté dès 440 $m^3 \cdot s^{-1}$ (environ 1/3 du débit de débordement Q_b ; occurrence 40 $j \cdot an^{-1}$), le transport se généralisant dès 580 $m^3 \cdot s^{-1}$ (0,44 Q_b ; 27 $j \cdot an^{-1}$) (Petit, Poinart *et al.*, 1996). Les auteurs indiquent que cette fréquence du transport est nettement plus forte que celle généralement admise. Ils l'expliquent essentiellement par la faible dimension du matériel composant le lit et l'absence de pavage protecteur. Sur ce type de cours d'eau, un écrêtement artificiel des hautes eaux courantes et des crues fréquentes par des barrages hydroélectriques pourrait effectivement conduire à un ralentissement substantiel des déplacements de la charge de fond et à une forte diminution des tonnages annuels transportés.

- Sur le *Rhône court-circuité de Chautagne*, les déplacements de galets sont beaucoup moins fréquents. D'après les calculs réalisés sur la base de mesures de terrain, le charriage débiterait dans le chenal habituellement occupé par les basses eaux pour un débit atteint en moyenne 3 $j \cdot an^{-1}$ (1420 $m^3 \cdot s^{-1}$); pour un débit de 2100

$m^3 \cdot s^{-1}$ (1 journée tous les 10 ans), 50 % seulement des sites où un calcul a été effectué seraient soumis au charriage (Klingeman, Bravard *et al.*, 1994).

Sur les *rivières des Alpes du Nord*, la modulation des régimes par les ouvrages hydroélectriques peut modifier notablement la dynamique des transports solides :

a) En diminuant le nombre de jours où les puissances spécifiques dépassent le seuil d'un transport par charriage, sur les rivières où les forts débits sont très affectés par l'aménagement : la fréquence de mise en mouvement des galets est ainsi diminuée ; cela crée des discontinuités spatiales dans le régime des transports solides et compromet l'alimentation en matériaux des tronçons situés à l'aval de la zone dont l'hydrologie est perturbée. Nous avons déjà évoqué le cas du Drac court-circuité de Notre-Dame-de-Commieres où les forts débits sont désormais rares (Peiry & Vivian, 1994) (voir fig. 3.17). Sur l'*Arc à la Saussaz*, l'*Isère à Moûtiers* et l'*Isère à Aigueblanche*, les hautes eaux de fusion ont été fortement affectées par les aménagements hydroélectriques : sur l'*Isère à Moutiers*, le tableau 3.6 donne un aperçu de la diminution des fréquences de certains débits seuils, au fur et à mesure que l'équipement du bassin-versant amont progressait. Tous les aménagements hydroélectriques ne semblent pas engendrer une perturbation aussi forte des hautes-eaux : la *dérivation Arc-Isère* mise en service en 1980 prive l'*Isère* de 30 % de son module (45 $m^3 \cdot s^{-1}$) entre le confluent de l'*Arc* et la restitution du Cheylas (Vivian, 1994) (fig. 3.19) ; cependant, si les fréquences des débits de fin de printemps et d'été continuent d'être affectées par l'aménagement pour le $DC_{10\text{jours}}$, elles le sont beaucoup moins pour les autres débits caractéristiques (tab. 3.6). Les transports solides se produisant au plus quelques semaines par an, cette modification des plus fortes valeurs pourrait suffire à perturber notablement les transits de charge de fond ; il est d'ailleurs à noter que depuis une quinzaine d'année, l'*Isère* dans la Combe de Savoie subit une phytostabilisation accélérée de ses bancs de galets.

b) En accroissant le nombre de jours par an où les puissances spécifiques dépassent le seuil du transport solide. C'est le cas sur les rivières où les portions de rivière localisées en aval de restitutions hydroélectriques qui augmentent artificiellement le débit naturel par le rejet d'eau claire. La déstabilisation des fonds entraîne alors d'importantes reprises d'incision : nous avons évoqué plus haut l'incision de l'*Arve moyenne* en aval de la restitution de Pressy ; sur l'*Isère*, la restitution du Cheylas est à l'origine d'un basculement du profil en long de plusieurs décimètres qui s'est manifesté en moins de 15 ans (A.D. Isère-Drac-Romanche, 1993). Les matériaux grossiers, exportés sur plusieurs kilomètres en aval de la restitution, s'accumulent en aval du pont de Brignoud.

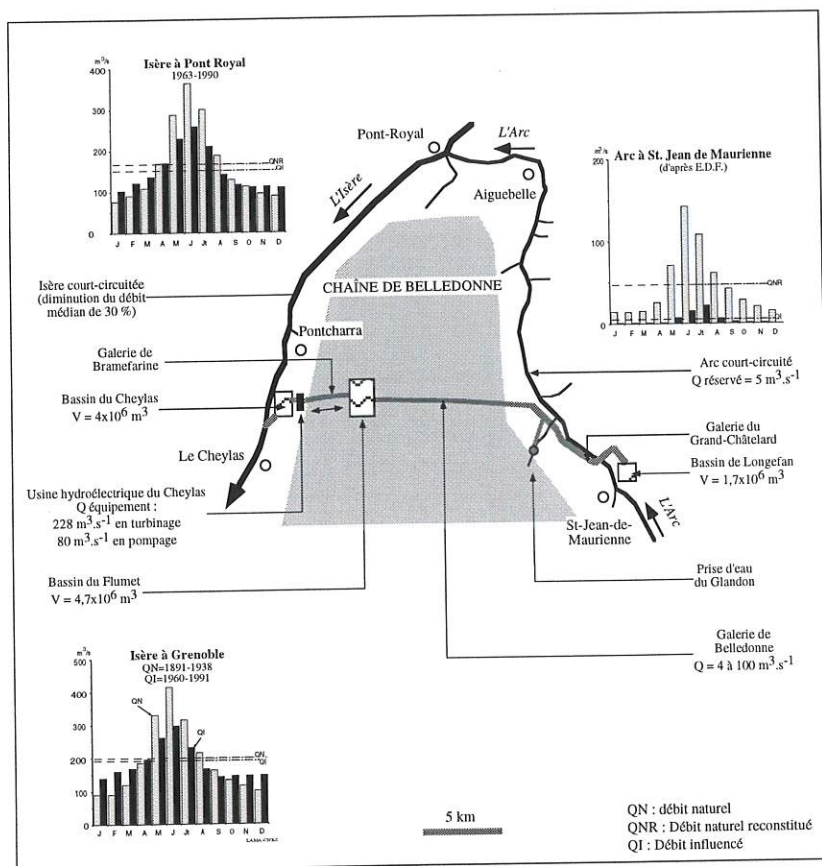


Figure 3.19 - Dérivation hydroélectrique Arc-Isère et perturbation du régime hydrologique à Saint-Jean-de-Maurienne (d'après Vivian, 1994 & Pupier, 1996).

Tableau 3.6 - ISÈRE, stations de MOUTIERS et de PONT-ROYAL ; évolution de la fréquence (%) des débits dépassant respectivement le $DC_{10\text{jours}}$, $DC_{1\text{mois}}$ et le $DC_{3\text{mois}}$. Seuls, les mois de fort débit naturel ont été sélectionnés (mai à août). Les débits caractéristiques ont été calculés sur l'ensemble de la période de mesure (Moutier, 1903-1986 ; Pont-Royal, (1965-90) (Extrait de Besson, 1992).

	MOUTIERS	mai	juin	juillet	Août		PONT-ROYAL	mai	juin	juillet	Août
$DC_{10\text{jours}}$	1903-25	19,6	48,4	21,2	2,0	$DC_{10\text{jours}}$	1965-79	14,5	20,7	11,1	1,6
$>67,6 \text{ m}^3/\text{s}$	1939-53	9,9	3,4	15,1	0,6	$>334 \text{ m}^3/\text{s}$	1980-90	7,6	16,4	7,3	0,3
	1954-86	1,8	10,7	1,8	1,0						
$DC_{1\text{mois}}$	1903-25	39,6	79,2	48,8	15,3	$DC_{1\text{mois}}$	1965-79	30,6	36,7	29,1	7,6
$>51,1 \text{ m}^3/\text{s}$	1939-53	24,3	57,1	34,0	8,4	$>268 \text{ m}^3/\text{s}$	1980-90	25,2	38,2	16,4	1,5
	1954-86	6,8	25,1	8,1	4,6						
$DC_{3\text{mois}}$	1903-25	72,7	97,3	89,5	63,1	$DC_{3\text{mois}}$	1965-79	69,1	68,4	62,7	30,6
$>33,6 \text{ m}^3/\text{s}$	1939-53	54,4	89,1	62,0	30,8	$>187 \text{ m}^3/\text{s}$	1980-90	66,5	72,1	41,3	10,3
	1954-86	23,9	48,0	33,6	19,3						

3.3.4) L'extraction dans le chenal d'énormes quantités de matériaux alluvionnaires

Les extractions de graviers dans le chenal sont sans conteste la cause principale de l'incision récente des rivières alpines. De nombreux prélèvements ont été exécutés dans le lit des rivières depuis la fin du XIX^e siècle,

notamment à l'occasion de la construction des voies ferroviaires, très gourmandes en matériaux. Dans la grande majorité des cas, ces extractions sont restées d'ampleur modérée (photo 3.1). Elles se sont développées au début des années cinquante avec l'extension des villes et des voies de communication le long des vallées. Les extractions furent d'autant plus intenses que l'extrême abon-

dance de cette charge avait causé d'énormes inconvénients depuis le milieu du XIX^e siècle (exhaussement et submersion des digues - voir P3, § 2.2). La charge alluviale stockée dans les chenaux fluviaux paraissait ainsi être une manne perpétuellement renouvelable, dans laquelle on pouvait puiser impunément. Les prélèvements de granulats ont constitué une ressource financière avouée ou occulte pour nombre de collectivités riveraines qui souhaitaient, en même temps, régler les problèmes d'inondation des terres de lit majeur. De ce point de vue, leurs espérances ont été comblées car nombreux sont les tronçons de cours d'eau pour lesquels la crue centennale n'est aujourd'hui plus débordante ! Plusieurs types d'extractions furent menés, souvent conjointement :

a) Le plus aisé consistait à faire descendre des engins sur les bancs de galets en période de basses eaux et à racler les matériaux. De telles techniques ont été utilisées sur des rivières telles que le *Drac*, *l'Isère*, *l'Arve* (Blanc, 1981 ; Peiry, 1988 ; A.D. Isère-Drac-Romanche, 1993). Le long des rivières présentant un tressage actif et une zone exondée très large, les extractions étaient exécutées directement par prélèvement dans le chenal, éventuellement à l'abri d'une levée alluvionnaire (photo 3.2) (Peiry & Pupier, 1993).

b) Le long des rivières ou des sections de rivières canalisées, les graviers étaient extraits préférentiellement par des dragages localisés en postes fixes. Cette technique créait de profondes souilles d'extraction qui se remplissaient régulièrement lors des périodes de transport solide. Elles constituaient aussi des barrières infranchissables pour la charge de fond, accentuant d'autant le déficit sédimentaire à l'aval.

Quelles qu'aient été les techniques utilisées, les volumes extraits furent énormes, provoquant des érosions régressives et des érosions par déficit d'apport provenant de l'amont. Il s'est avéré particulièrement difficile de réunir des chiffres sur l'ensemble des cours d'eau des Alpes du Nord, à la fois parce que les données sont éparpillées dans de multiples rapports et de nombreux services administratifs, mais aussi parce qu'elles sont entourées d'une certaine confidentialité. Par ailleurs, de nombreux témoignages indiquent que les valeurs réelles excèdent presque systématiquement les volumes des autorisations. Vérifier les chiffres collectés n'est pas chose aisée ; cela a pu être fait sur les rivières pour lesquelles les valeurs de l'incision sont connues avec une bonne précision et pour lesquelles un bilan sédimentaire précis peut être calculé. La carte des volumes extraits, bien que n'étant pas un document exhaustif, témoigne de l'ampleur du phénomène entre 1950 et 1985 (voir fig. 3.13). Sur *l'Isère* entre 1949 et 1968, 9 Mm³ auraient été prélevés sur le tronçon Goncelin-Domène. Sur le *Drac* dans la plaine de Grenoble, les données issues des archives de la Direction Départementale de l'Équipement indiquent l'extraction de 7 Mm³ de granulats entre 1950 et 1972 ; une carte pré-

cise des principales zones d'extraction a pu être dressée (fig. 3.20) (Peiry & Nougier, 1994). Celles-ci se sont accompagnées d'un déstockage massif et d'une redistribution dans l'espace de la charge alluviale : lors d'un essai de bilan sédimentaire sur *l'Arve* pour la période 1950-1985, Blanc, Pinteur *et al.* (1989) ont estimé les extractions à 2,5 Mt pour la fraction < 0,2mm et 17,5 Mt pour la fraction > 0,2mm. En plus des extractions, les ajustements du chenal consécutifs aux prélèvements auraient remanié 6 Mt de fines (fraction < 0,2 mm) et 15 Mt de graviers et galets (fraction > 0,2 mm) ; cela conduit approximativement à doubler le chiffre des prélèvements. Sur le *Fier supérieur*, les études hydrauliques réalisées au début des années 1980 admettaient le même rapport entre les prélèvements effectifs et le remaniement des fonds consécutif aux extractions.

Le long de beaucoup de cours d'eau, les extractions de caractère privé ont été interdites au cours de la décennie 1970 et ont effectivement cessé au cours des années 1980. Malgré tout, certains travaux d'intérêt national justifient encore leur poursuite : sur *l'Isère*, la construction de l'autoroute A49 Grenoble-Valence fut à l'origine d'un dragage de 1,2 Mm³ dans l'ombilic de Moirans (Salvador, 1991). Les autorisations de curage se multiplient depuis quelques années : bien que portant sur des volumes réduits (quelques centaines à quelques milliers de m³), les curages constituent un moyen de détourner la réglementation et l'accroissement de leur nombre participe au déficit des transports solides. Sur les rivières de tête de bassin-versant où la proximité des sources sédimentaires maintient de volumineux transits, des extractions subsistent (*Arve chamoniarde*, *Drac supérieur*...). La poursuite de la construction des infrastructures de communication (autoroute Sisteron-Grenoble, autoroute de Maurienne, TGV transalpin) n'incite guère à l'optimisme.

3.3.5 Des seuils sous-fluviaux qui bloquent les transits de charge de fond

Pour tenter de résoudre le problème de l'incision, les ingénieurs hydrauliciens édifièrent des seuils sous-fluviaux. Une large gamme d'ouvrages fut expérimentée dès le début des années 1980 : seuils avec chute et fosse de dissipation de l'énergie, seuils-radiers. Leur rôle est multiple : a) ils constituent des points durs du profil en long dont le but est de bloquer les processus d'érosion régressive ; b) ils rehaussent artificiellement les lignes d'eau, ce qui présente un intérêt hydrogéologique et écologique, en permettant notamment de limiter l'impact d'une trop grande incision sur la ripisylve du corridor fluvial ; c) ils concentrent la dissipation de l'énergie hydraulique dans la zone de chute, ce qui a pour objectif d'atténuer les érosions et l'incision sur les lits demeurés naturels. Progressivement, des ouvrages de correction ont barré les rivières des Alpes du Nord, transformant leur profil en long en une succession de marches d'esca-

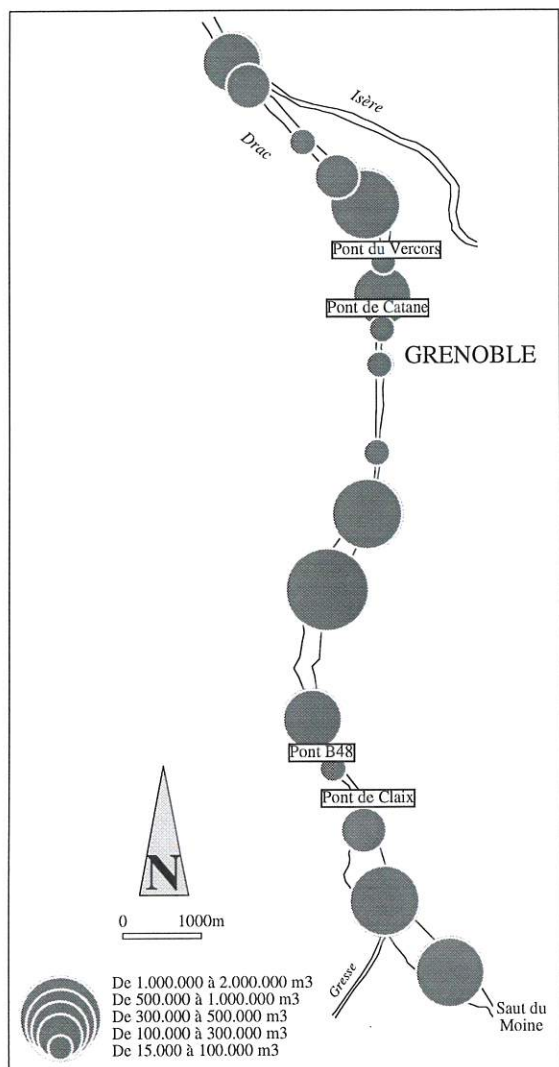


Figure 3.20 - Extraction de graviers sur le Drac aval entre 1950 et 1972

(Source : Peiry & Nougier, 1994, modifié).

liers : on ne compte pas moins de 5 seuils sur *l'Arve moyenne*, entre Cluses et Bonneville (environ 20 km) pour un montant qui dépassait 200 millions de francs en 1990.

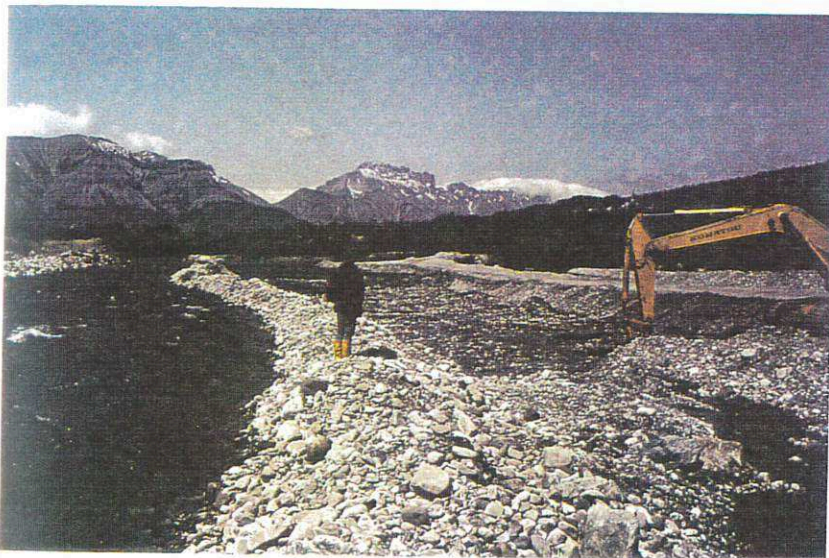
Dans un contexte de très forte pénurie des transports solides, ces ouvrages, que l'on peut assimiler à des barrages de faible hauteur, ont un impact, au moins pendant un temps, en bloquant la charge et accroissant le déficit des apports en provenance de l'amont. Par exemple, les nombreux seuils sous-fluviaux qui barrent le *Drac* et *l'Isère* dans la traversée de Grenoble bloquent les transports solides déjà très altérés par les extractions, à tel point que les sédiments grossiers ne parviendraient plus au confluent Drac-Isère (Salvador, 1991). Par ailleurs,

l'expérience montre que ces ouvrages ne suffisent pas toujours à enrayer l'incision : sur *l'Arve* en aval de Cluses (photo 3.3), les fondations d'un seuil construit en 1983 sont affouillées d'environ 1,50 m, ce qui conduit à s'interroger sur l'opportunité de construire un contre-seuil protégeant le premier ouvrage.

En définitive, dans les Alpes du Nord, le fait marquant de la deuxième moitié du XX^e siècle est la tendance à la généralisation de l'incision des rivières. Elle témoigne d'une très nette diminution des flux sédimentaires, en particulier des charriages (fourniture et transit), et de l'altération à des degrés divers de l'hydrologie. Les multiples aménagements de rivière participent à des degrés divers et de manière plus ou moins directe à l'incision des cours d'eau, par les perturbations de la dynamique des flux qu'ils engendrent. Dans le contexte de pénurie des transits sédimentaires dont nous sommes les témoins aujourd'hui, les digues construites au XIX^e siècle empêchent les érosions latérales et la recharge en graviers et galets. Le succès de la politique de contrôle de la torrentialité, entreprise dans le dernier quart du XIX^e siècle, intervient également de manière indirecte, au niveau des flux d'eau comme de la fourniture sédimentaire. En interrompant le *continuum* amont-aval des transports solides, l'équipement hydroélectrique alpin a une place dans cette évolution de la géomorphologie fluviale. Les très volumineuses extractions de graviers, qui pendant plus de trente ans ont exploité le stock alluvial lentement accumulé au fil des siècles, sont sans conteste la cause principale de l'incision contemporaine des rivières. Plus récemment enfin, les seuils sous-fluviaux, construits pour bloquer l'incision, ont accru le tronçonnement des cours d'eau en compartiments déconnectés les uns des autres, au moins temporairement.

Après quelques décennies d'ajustement complexe, dont une phase de très forte instabilité verticale, les études de géomorphologie fluviale témoignent que nous sommes aujourd'hui dans une période d'accroissement de la stabilité des rivières. Souvent, les aménagements la renforcent en supprimant les degrés de liberté des lits fluviaux (latéral et vertical, principalement). Comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, cette phase de stabilisation se manifeste par une tendance à la fixation des formes du chenal, à leur végétalisation par la forêt alluviale et à la descente d'espèces collinéennes dans les lits endigués.

Photo 3.1 - ARVE.
Extraction de sable sur
l'Arve à Genève, au
début du XX^e siècle
(Collection : J.-L. Peiry).



**Photo 3.2 - DRAC
SUPERIEUR.** Extrac-
tion de gravier dans le
chenal, à l'abri d'une
levée alluvionnaire
(Cliché : N. Pupier, 1995).

Photo 3.3 - ARVE. Seuil
sous-fluvial bloquant
l'érosion ré-gressive en
aval de Cluses. L'ouvra-
ge, construit en 1983,
était affouillé 10 ans plus
tard, comme en témoigne
le dégagement des fonda-
tions (Cliché : J.-L. Peiry,
1993).



CHAPITRE 4

LA TENDANCE CONTEMPORAINE AU DÉVELOPPEMENT DE LA VÉGÉTATION DANS LES LITS FLUVIAUX

4.1) La végétalisation du chenal à l'aval d'un ouvrage hydroélectrique : l'exemple du Drac en aval de Notre-Dame-de-Commiers.

4.2) Le développement végétal du Drac dans la plaine de Grenoble

Résumé du chapitre 4

Depuis un quinzaine d'années tout au plus, l'accroissement de la stabilité des lits fluviaux nord-alpins se traduit par la tendance à la végétalisation du chenal, à l'instar de ce qui se passe sur les cours d'eau de piémont (Piégay, 1995 ; Bravard, Franc *et al.*, 1990). Une rivière comme le Drac, dont la dynamique des transits de charge de fond et d'eau est profondément perturbée par l'homme, est touchée de plein fouet par la biométamorphose du chenal : a) dans le tronçon court-circuité à l'aval de l'ouvrage de Notre-Dame-de-Commiers, le manque cruel d'épisodes hydrologiques morphogènes au cours des 30 dernières années a conduit à la fermeture presque complète du chenal par une dense forêt alluviale. Cette végétation pose des problèmes si l'ancien chenal doit évacuer une crue de grande ampleur ($1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et plus). En effet, l'expérience de la crue décennale d'octobre 1993 a montré que des dégâts majeurs à la forêt alluviale sont à craindre. L'exportation d'énormes quantités de bois flotté dans la traversée de Grenoble accroît très sérieusement le risque d'inondation de la ville ; b) dans la plaine de Grenoble où l'hydrologie est pourtant moins perturbée, la phytostabilisation des formes du chenal est toute aussi préoccupante. L'analyse pluridisciplinaire des conditions de développement de la végétation indique que la métamorphose du paysage fluvial traduit un changement profond des conditions écologiques procédant d'un changement du style fluvial (passage d'un lit tressé à un lit unique méandrique). Elle se traduit par la mise en place d'unités "*espace-temps*" qui ont la capacité de mémoriser les caractéristiques de la dynamique fluviale de référence (morphométrie des chenaux, modalités de dissipation de l'énergie cinétique, composition granulométrique du substrat), et celles résultant des impacts anthropiques (approfondissement de la nappe, modification des modalités de dissipation de l'énergie cinétique...). Il en résulte une capacité d'innovation, c'est à dire à produire des unités paysagères jamais vues au bord de la rivière, au moins depuis plusieurs siècles.

Les études réalisées sur l'évolution récente des cours d'eau de vallée, plus ou moins fortement affectés par les activités humaines, indiquent fréquemment la tendance au développement de la végétation dans les lits fluviaux. Sur l'Ain, le passage du tressage à une dynamique de méandrage, voire de chenal fixe a conduit à la colonisation par la forêt des surfaces abandonnées par le cours d'eau (Fagot, Gadiolet *et al.*, 1989 ; Bravard, Franc *et al.*, 1990 ; Marston, Girel *et al.*, 1995). Piégay (1995, p. 106) précise qu'une "forêt alluviale est née entre 1945 et 1990 sur les rivières de piémont telles que l'Ain, l'Ardèche et l'Ouvèze" au détriment de la bande d'activité fluviale, la ripisylve de chacune de ces rivières présentant malgré tout une évolution spécifique au cours des vingt dernières années. Les études en cours ou récemment réalisées sur l'Isère (Didier, 1992 ; 1994 ; Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel *et al.*, 1996) et le Drac supérieur et inférieur (Peiry & Pupier, 1993 ; Peiry & Nouguié, 1994 ; Peiry & Vivian, 1994 ; Pautou, Peiry *et al.*, 1997) confirment cette tendance à la végétalisation, la particularité de ces deux rivières n'étant pas seulement la colonisation des espaces gagnés sur le chenal (plaine d'inondation récente), mais la fixation des bancs de graviers autrefois mobiles et leur "biométagmorphose" (Piégay, 1995) en îles stables et végétalisées. Les études de cas réalisées sur les rivières intra-alpines et de piémont indiquent que les corridors fluviaux subissent une évolution se traduisant simultanément par : a) une extension de leur surface au détriment de la zone occupée par le chenal ; b) une tendance au remplacement des séquences végétales pionnières par des forêts alluviales de bois durs infiltrées à des degrés divers par des essences collinéennes (Pautou, Girel *et al.*, 1996).

Les parties qui suivent présentent les principaux résultats de trois études de cas réalisées sur la végétalisation du Drac inférieur. La première s'intéresse à la colonisation du chenal à l'aval de l'ouvrage hydroélectrique de Notre-Dame de Commiers, dans un contexte de diminution drastique des flux hydriques ; les deux suivantes concernent plus spécifiquement la dynamique de colonisation de l'ancienne bande active de tressage et des bancs de galets sur le Drac dans la plaine de Grenoble, à la suite de changements majeurs affectant la dynamique de charriage (fig. 3.21).

4.1) La végétalisation du chenal à l'aval d'un ouvrage hydroélectrique : l'exemple du Drac en aval de Notre-Dame-de-Commiers

Le barrage de Notre-Dame de Commiers, réservoir hydroélectrique le plus en aval de la chaîne des barrages du Drac, a pour effet de démoduler les débits turbinés par l'usine du Monteynard ($338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et de restituer des écoulements qui soient plus proches du module inter-annuel ($48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Mis en service en 1963, l'ouvrage a court-circuité les 8 derniers kilomètres de vallée par un tunnel percé dans la montagne, la restitution de débit s'opérant un peu en amont du confluent Drac-Romanche. Depuis cette date, le débit habituel du tronçon court-circuité est de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les crues sont pourtant susceptibles de se produire avec la même intensité que par le passé : les services de la Direction Technique Générale (DTG) d'EDF ont estimé à $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le débit de la crue centennale, par la méthode du GRADEX ; dans le meilleur

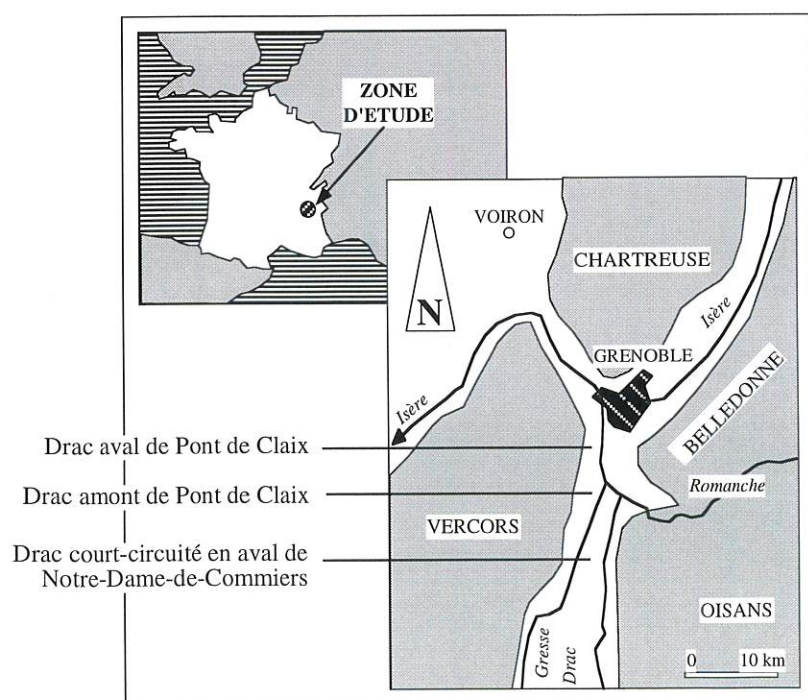


Figure 3.21 - Localisation des secteurs d'étude sur le Drac inférieur.

Tableau 3.7 - Quelques caractéristiques morphologiques et hydrologiques du Drac "naturel" au droit du barrage de Monteynard.

Surface B.V. à Avignonet	Pente du lit	Module interannuel (1939-1961)	Débit de la crue centennale	Largeur moyenne du chenal
2007 km ²	0,0067	48 m ³ .s ⁻¹	1600 m ³ .s ⁻¹	300 m

des cas (prise d'eau fonctionnelle lors de la crue), le tunnel pourrait diminuer de 95 m³.s⁻¹ la valeur de la crue centennale transitant dans le tronçon court-circuité, ce qui représente bien peu de chose au regard de l'intensité de l'événement.

Le barrage hydroélectrique a eu pour double effet de réduire de manière spectaculaire les contraintes hydrauliques dans la section court-circuitée et de tarir les apports sédimentaires aussi bien en charge de fond qu'en matière en suspension, le grand réservoir de Monteynard (C.U. : 185 Hm³) constituant un décanteur particulièrement efficace. Le profond changement de la dynamique des flux a eu pour impact de provoquer la biométamorphose du chenal, la végétation profitant d'une période d'une trentaine d'années sans forte crue pour conquérir la presque totalité du chenal naturel du Drac. L'objectif de cette étude est triple : a) présenter ce qu'était la dynamique du cours d'eau avant l'aménagement hydroélectrique ; b) analyser la biométamorphose du chenal ; c) décrire comment le nouveau lit réagit aux crues transitant dans la section court-circuitée.

4.1.1) Le Drac avant l'aménagement hydroélectrique : un tressage très actif ne permettant pas une installation durable de la végétation

Cours d'eau à pente forte (> à 0,006) et à l'hydrologie abondante ($q=24 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) et contrastée ($Q_{\text{max,mens}}/Q_{\text{min,mens}} = 2,56$), le Drac naturel présentait encore au milieu du XX^e siècle un vigoureux style en tresses (photo 3.4). Dans la partie encaissée de la vallée, le chenal occupait tout le fond de vallée, soit une largeur moyenne de 300 mètres ; il conservait une largeur identique en aval du pont de la Rivoire où la vallée s'élargit fortement. Les fréquents déplacements latéraux des bras en eau occasionnés par chaque hausse un peu marquée du débit empêchaient que la végétation colonisant les bancs de galets ne dépasse les stades pionniers (fourrés de saules et de peuplier noir). Une analyse diachronique de la dynamique du chenal a été réalisée sur la base des photographies aériennes de 1948 et 1956 (fig. 3.22). La caractéristique des rivières tressées est d'avoir un fond très plat et des berges topographiquement peu marquées, ce qui ne facilite pas la délimitation du chenal. Certains auteurs ont tendance à limiter le chenal aux parties immergées du lit, ce qui, sur une rivière tressée où la topographie est peu contrastée et les espaces exondés majoritaires, présente une réelle ambiguïté (Peiry & Pupier, 1993). Nous avons donc considéré comme faisant partie du chenal l'ensemble des zones sur lesquelles l'eau exerce une action érosive fréquente (bras en eau

et plages de galets nus) à l'occasion des crues courantes (Q_1 à 3 ans) ; celles-ci ont d'ailleurs pour effet de submerger les bancs et de donner au cours d'eau la physionomie d'une rivière à lit unique (Schumm, 1977 ; Schumm, 1985). Dans la littérature spécialisée, on donne très fréquemment le nom de *bande active* au chenal des rivières tressées.

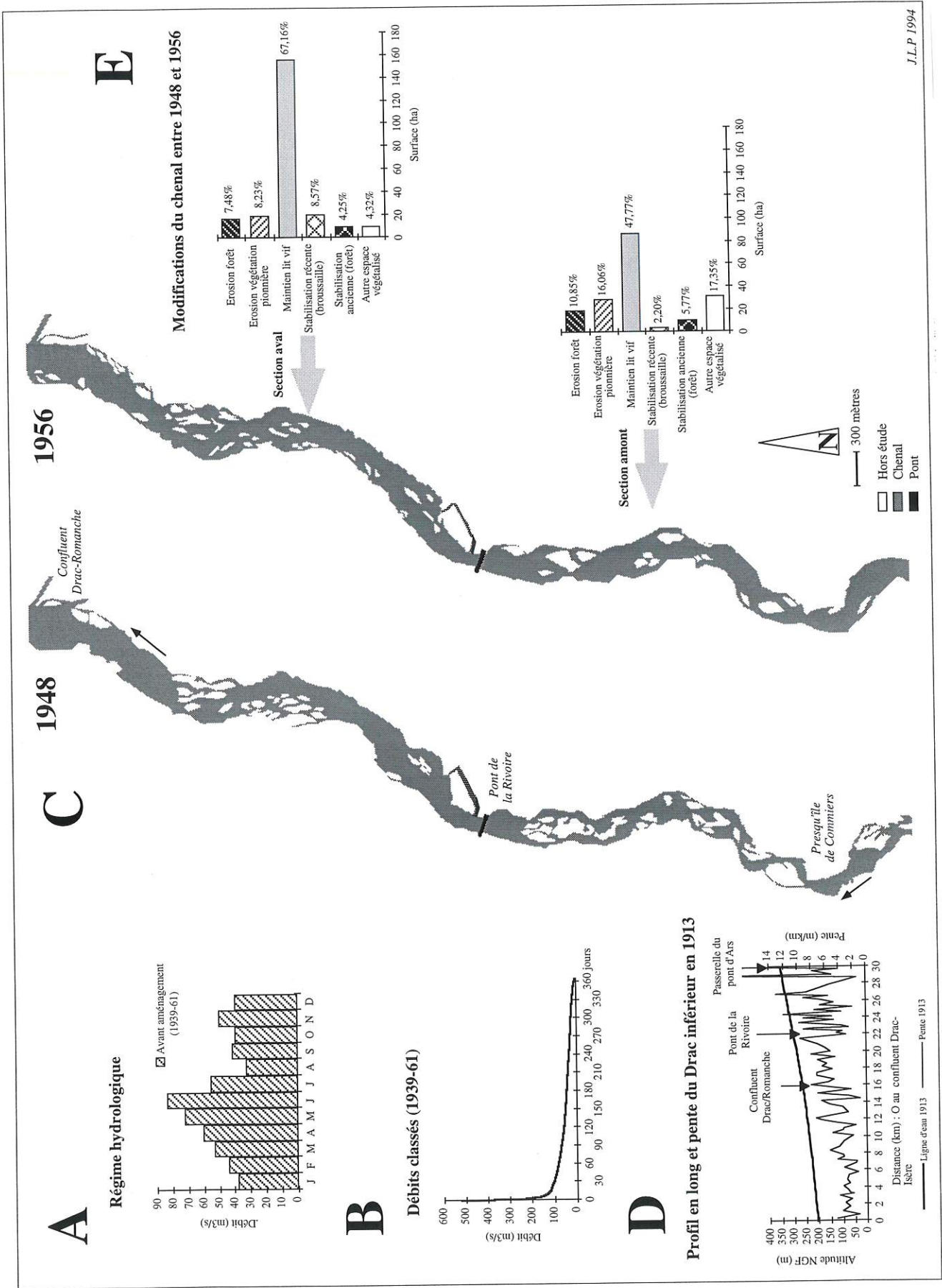
La cartographie du chenal du Drac en 1948 et 1956 montre que ses dimensions résultent d'un équilibre entre les forces érosives dues aux écoulements et aux déplacements de la charge de fond et la colonisation par la végétation des plages moins exposées à l'énergie cinétique. Les ajustements de la dimension du chenal mis en évidence par la cartographie diachronique en sont la preuve (fig. 3.22 et fig. 1.17) :

1) La situation de 1948 traduit l'état du cours d'eau à la suite d'une succession d'années sèches (décennie 1940-49), au cours desquelles les crues ont été plutôt rares et de faible intensité.

2) L'état du chenal en 1956 enregistre la réponse du chenal à une courte période de forte hydraulicité marquée par des débits moyens annuels ($Q_{m1951} = 78 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $Q_{m1955} = 68 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) dépassant nettement le module inter-annuel et surtout des débits forts qui persistent pendant un assez grand nombre de jours consécutifs (voir tab. 3.8). L'année 1948, dont le module avoisine la moyenne, connaît la plus forte crue enregistrée à Avignonet avec un débit moyen de 520 m³.s⁻¹ le 19 juin, la durée de l'épisode étant cependant très courte par rapport aux autres événements cités (Peiry & Vivian, 1994).

Tableau 3.8 - Les crues de la période 1940-1955 : débits journaliers maximums et séquences de jours consécutifs de débits supérieurs à un seuil donné
(d'après les données fournies par EDF-DTG, Grenoble).

Juin 1941	5-29 juin le 5 juin	$Q \geq 200 \text{ m}^3/\text{s}$ $357 \text{ m}^3/\text{s}$
Mai 1951	6-24 juin 27 mai-3 juin le 27 et 28 mai	$Q \geq 140 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q \geq 160 \text{ m}^3/\text{s}$ $370 \text{ m}^3/\text{s}$
Novembre 1951	9-15 novembre 19-24 novembre le 20 novembre	$Q \geq 150 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q \geq 170 \text{ m}^3/\text{s}$ $420 \text{ m}^3/\text{s}$
Juin 1955	16 juin au 4 juillet 7 -11 juin le 8 juin	$Q \geq 120 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q \geq 150 \text{ m}^3/\text{s}$ $384 \text{ m}^3/\text{s}$



J.L.P 1994

Figure 3.22 - Dynamique du chenal du Drac entre la presqu'île de Commiers et la Romanche. A) Régime hydrologique ; B) Débits classés ; C) Style fluvial en tresse du chenal ; D) Evolution amont-aval du profil en long et de la pente du chenal (1913) ; E) Modifications affectant le chenal au cours de la période 1948-1955 (Source : Péry & Vivian, 1994).

La comparaison des deux situations permet d'analyser les conséquences de l'accroissement de l'hydraulicité sur la morphométrie du chenal. Elle montre une progression sensible de la surface du chenal, surtout sur le tronçon amont (fig. 3.22/E et fig. 1.17) : a) en amont du pont de la Rivoire où la rivière, encaissée dans une vallée étroite, dispose de capacités de débordement limitées, d'actives érosions se produisirent, détruisant la couverture végétale pionnière sur 27 % de la surface du chenal (184 ha) ; dans le même temps, la phytostabilisation des bancs ne concerna qu'un peu moins de 8 % de cette même surface ; b) en aval du pont de la Rivoire, où la vallée s'élargit fortement, la rive droite subit principalement l'érosion. Toutefois celle-ci fut moindre que dans la zone amont (accroissement de 2 % de la surface du chenal (234 ha), certainement en raison de la perte d'énergie engendrée par les débordements dans la plaine d'inondation. Au cours de la même période, des modifications semblables de la morphométrie du chenal furent observées sur le Drac dans la plaine de Grenoble (Pautou, Peiry *et al.*, 1997). Des processus de même nature mais de plus grande ampleur ont pu être également analysés sur l'Ouvèze, à l'occasion de la crue dramatique du 22 septembre 1992 (Piégay, 1993 ; Piégay, 1995). Il nous a aussi été donné de les étudier récemment sur l'Arc d'Aix-en-Provence (Peiry & Vautier, 1997).

4.1.2) Le Drac après l'aménagement hydroélectrique : l'envahissement progressif du chenal par la végétation et une très inquiétante réduction de la capacité d'écoulement

La mise en service du barrage de Notre-Dame-de-

Commiers (1963), puis de l'usine hydroélectrique de Saint-Georges-de-Commiers en 1964 a occasionné, nous avons déjà eu l'occasion de l'écrire plus haut, une réduction drastique des circulations d'eau dans la section court-circuitée. Une analyse des débits journaliers maximums a été faite ; la littérature spécialisée s'accorde à reconnaître que ces événements sont ceux qui façonnent la géométrie du chenal sur les rivières à fond mobile. Alors que des crues toutes aussi fortes que par le passé sont censées pouvoir s'écouler dans le lit court-circuité, les débits journaliers maximums ont enregistré une baisse très sensible (fig. 3.23). Celle-ci témoigne de l'impact de la chaîne de réservoirs sur les crues courantes et, très probablement aussi, d'une période de 3 décennies au cours de laquelle les crues furent de moindre ampleur. Deux crues rapprochées d'une amplitude supérieure à la moyenne de la période 1939-1961 se sont produites depuis 1993, accélérant considérablement l'évolution du lit (voir *infra*).

La conséquence de la réduction du transit hydrique dans la section court-circuitée a été une très forte végétalisation du chenal (fig. 3.24). Ce phénomène est un impact très classique à l'aval des réservoirs hydroélectriques (Williams & Wolman, 1984 ; Debanco & Schmidt, 1990 ; Pautou, Girel *et al.*, 1992). L'originalité du Drac inférieur est l'absence totale de traitement du problème pendant plus de trente ans par les gestionnaires de la retenue, alors que cette végétation constitue aujourd'hui une menace indéniable pour la ville de Grenoble en cas de crue majeure. A cours de dix premières années qui ont suivi la fermeture du barrage, la tendance principale a été la colonisation végétale des surfaces auparavant occu-

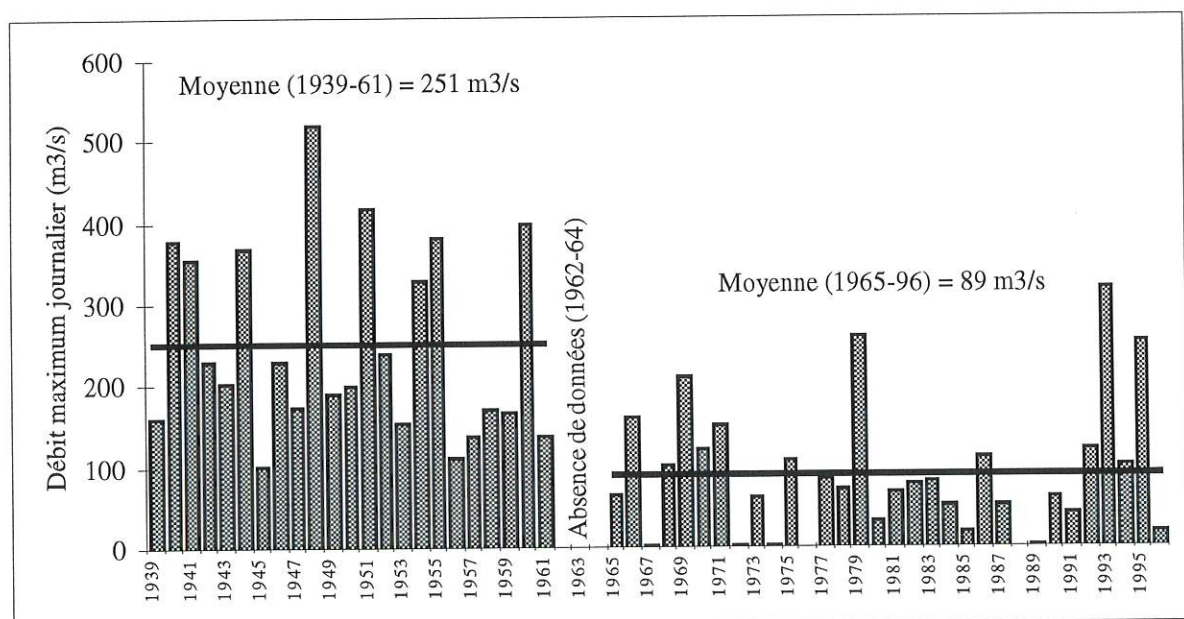


Figure 3.23 - Changements affectant le débit journalier maximum entre 1939 et 1996. La mise en eau du barrage (1963) s'est traduite par une très forte diminution des transits. Une longue période sans crue supérieure à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ marque les années 1980 à 1992 ; seulement 3 événements ont dépassé $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au cours de 33 dernières années dont deux rapprochés en 1993 et 1995.

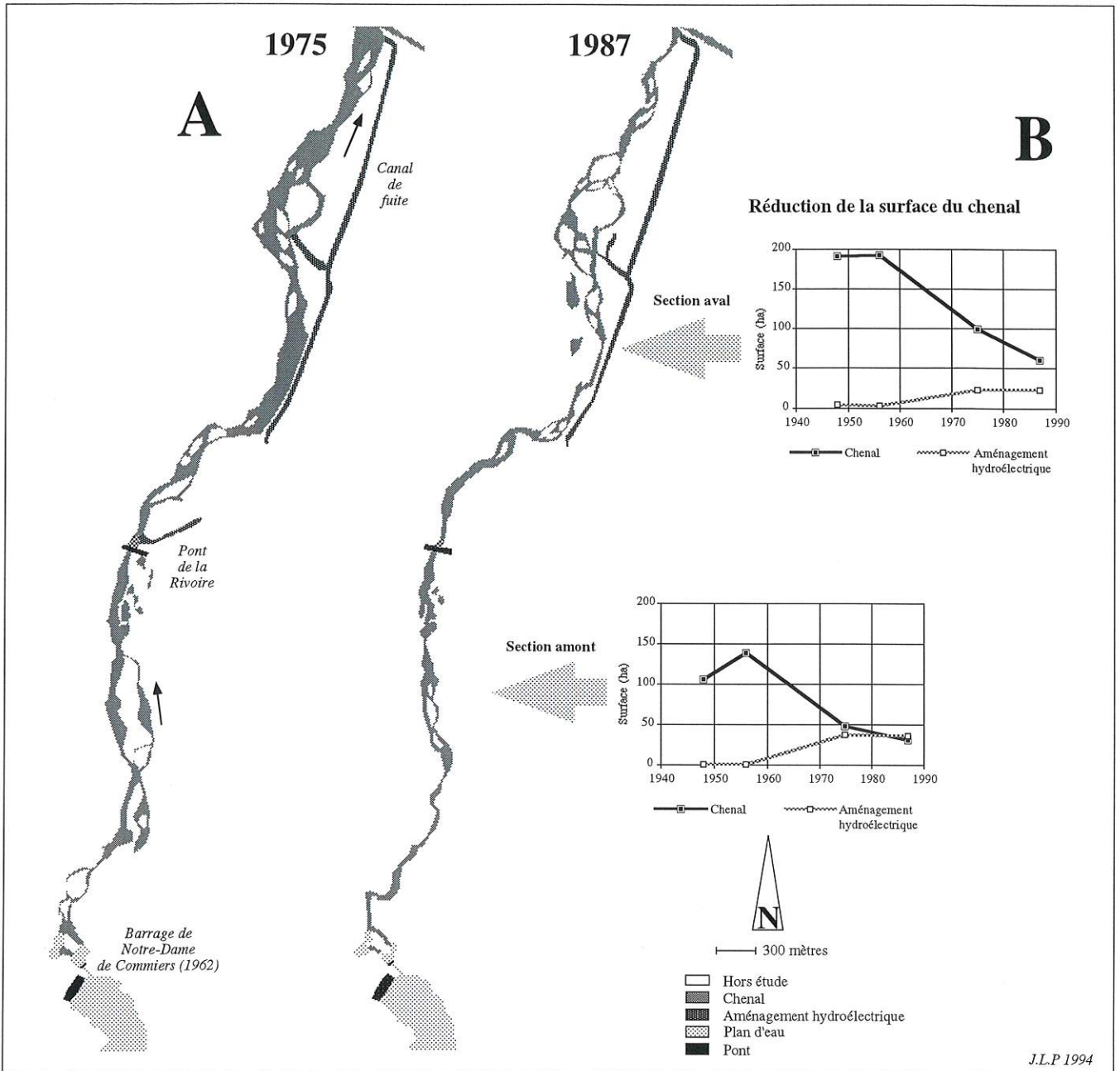


Figure 3.24 - Transformation du lit court-circuité du Drac en aval de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers.

A) Vue en plan de la bande active ; B) Réduction de la surface du chenal

(Source : Peiry & Vivian, 1994).

pées par le chenal, la densification du recouvrement et l'accroissement de la biomasse aérienne se faisant plutôt lentement ; la grande sécheresse des graviers du Drac particulièrement filtrants n'est pas étrangère à cette dynamique. Il n'en demeure pas moins qu'en 1975, la surface de la bande active avait diminué d'environ 200 ha sur l'ensemble de la section court-circuitée (47 % de la surface de 1956) (fig. 3.24/D). Après 1975, les surfaces végétalisées ont continué à croître à un rythme plus lent, le changement résidant essentiellement dans la densification de la couverture végétale et l'augmentation de la

biomasse. En 1987, la réduction de la superficie du chenal initial atteignait approximativement 70 %. Dans les années qui ont suivi, elle a continué de progresser lentement en amont du pont de la Rivoire, où la pousse de la végétation est facilitée par un niveau phréatique peu profond, soutenu par de nombreuses sources provenant des versants ; la progression fut beaucoup plus lente en aval du pont de la Rivoire où les conditions de sécheresse sont extrêmes.

4.1.3) La crue du 8-9 octobre 1993 et ses conséquences géomorphologiques

Avec un débit maximum instantané de $525 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans la section court-circuitée, la crue du 8-9 octobre 1993 constitue le plus fort événement hydrologique observé depuis la mise en eau du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (Peiry & Vivian, 1994) (photo 3.5) ; sa valeur est cependant loin d'être exceptionnelle et n'excède que de très peu la fréquence décennale. Marquée par deux pics successifs respectivement écrêtés de 175 et $95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par le jeu des rétentions dans les réservoirs (voir fig. 3.18), la crue fut brève, son temps de base n'excédant pas 24 heures. La conjonction d'un fort débit et de l'inadaptation du chenal court-circuité à l'écoulement d'une crue de l'ampleur de celle d'octobre 1993 s'est traduite par d'importants changements géomorphologiques ; ils ont agi comme une "sonnette d'alarme" auprès des gestionnaires de l'aménagement hydroélectrique. Le phénomène majeur fut la tendance au rétablissement partiel de la capacité d'écoulement du lit court-circuité. Il a pris deux formes : a) un arrachage massif de la forêt alluviale et son exportation vers l'aval, beaucoup de débris étant piégés dans le barrage de Saint-Egrève, en aval de Grenoble ; b) d'importants remaniements des fonds engendrant de volumineux transits de charge de fond.

L'exploitation des missions photographiques de 1992 (Sintégra) et de 1996 (IGN) agrandies au $1/10.000^{\text{e}}$ a permis une analyse relativement fine des dégâts occasionnés à la ripisylve, notamment de calculer les surfaces forestières arrachées par les écoulements de crue (fig. 3.25). Sur les 9 premiers kilomètres de chenal (80 % du tronçon court-circuité), on a évalué à environ 40 ha la surface des groupements arbustifs et forestiers détruits par la crue ($4,4 \text{ ha/km}$ de chenal). Deux principaux types

de processus de destruction de la forêt alluviale ont été observés :

a) des érosions de berge et des affouillements se sont produits le long de l'axe principal d'écoulement et ont provoqué le déracinement et le basculement des arbres dans le lit. Les forts surcreusements du chenal occasionnés par le passage de l'onde de crue ont très largement contribué à ce phénomène. Il a été d'autant plus efficace que la profondeur d'enracinement de la végétation est généralement faible, ceci étant lié à la nature des espèces végétales composant la ripisylve, au caractère très grossier et filtrant du matériel alluvial (galets), et à la présence de la nappe phréatique à faible profondeur. Les processus d'érosion ont probablement été renforcés par l'absence de sédiments fins en surface de la plaine alluviale. Sur l'Isère, on a pu montrer que les formations superficielles fines renforcent la cohésion du matériel alluvial, et facilitent l'enracinement et la mise en place d'un appareil racinaire protecteur. L'absence de dépôts fins tient au style fluvial tressé du Drac avant la construction des barrages. Elle provient également du piégeage de la charge en suspension dans la succession des réservoirs du Drac, les eaux qui transitent dans la section court-circuitée ne fournissant pas de sédiments fins au lit majeur lors des périodes d'inondation.

b) Les écoulements de crue ont très largement utilisé le réseau d'anciens bras du système tressé. Une partie des arbres arrachés dans le lit principal et pris en charge par les écoulements de crue est venue former de volumineux embâcles en tête des bras secondaires. La pression exercée par l'eau contre ces embâcles a progressivement couché la forêt alluviale dans l'axe de l'écoulement, les accumulations de bois agissant un peu à la manière d'un bulldozer. Dans certains bras secondaires, la durée et la puissance de la crue ont été insuffisantes pour que le che-

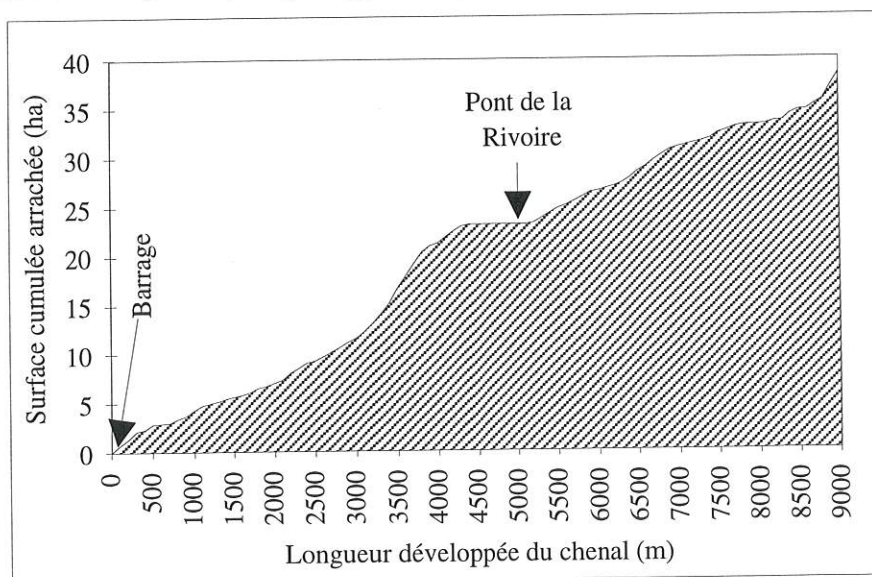


Figure 3.25 - Cumul amont-aval des surfaces pour lesquelles des arrachages massifs de végétation ont été observés lors de la crue du 8-9 octobre 1993.

nal soit totalement ouvert. Les embâcles que l'on peut encore observer sur le site témoignent du front de progression du déboisement au moment de la décrue.

Les photographies aériennes ont également permis d'évaluer les changements en plan occasionnés par la crue. La mesure, tous les 100 mètres, de la largeur de la bande active, individualise une succession de tronçons homogènes (fig. 3.26 ; tab. 3.9). A l'exception des abords du pont et du seuil de la Rivoire, où la géométrie du chenal est figée par des aménagements lourds, et d'un tronçon de 600 mètres le long du canal de fuite de l'usine de Saint-Georges-de-Comniers, un fort élargissement du chenal a partout été enregistré (+40 m). C'est entre les kilomètres 3,0 et 4,4 que la rivière a connu le plus fort élargissement (+80 mètres en moyenne, localement +130 mètres). Cette zone coïncide avec un secteur de stockage massif de la charge de fond mise en mouvement au pied du barrage et sur les kilomètres suivants. Ce dépôt est à mettre en relation avec le fort étalement des flux de crue et la très forte diminution des vitesses

d'écoulement. Diverses causes sont à l'origine de cette chute brutale de la compétence de l'écoulement : a) le contrôle aval du profil en long exercé par le seuil de la Rivoire ; b) les extractions effectuées dans le chenal à la fin des années 1980 et l'ouverture d'un vaste plan d'eau en rive droite, juste en amont du pont routier. La zone où les remaniements ont été les plus intenses, ainsi que les anciennes gravières, ont également joué le rôle de pièges pour la charge de fond, si bien qu'une quantité très limitée de matériaux charriés a franchi le seuil. Cet espace a également été particulièrement propice au blocage d'embâcles lors de la décrue (photo 3.6).

4.2) Le développement végétal du Drac dans la plaine de Grenoble

Une étude interdisciplinaire approfondie des changements géomorphologiques et phytoécologiques¹ du Drac dans la plaine de Grenoble a été entreprise depuis 1993

Tableau 3.9 - Evolution amont-aval de la largeur du chenal pour chacun des tronçons au comportement homogène.

Localisation (km 0 au barrage)	Largeur en 1992 (m)	Largeur en 1996 (m)	Δ Largeur (m)
0-0,4	123	170	+47
0,5-2,9	24	59	+35
3,0-4,4	42	122	+80
4,5-5,1	63	63	0
5,2-7,8	29	66	+37
7,9-8,6	64	84	+20
8,7-9,0	93	184	+91

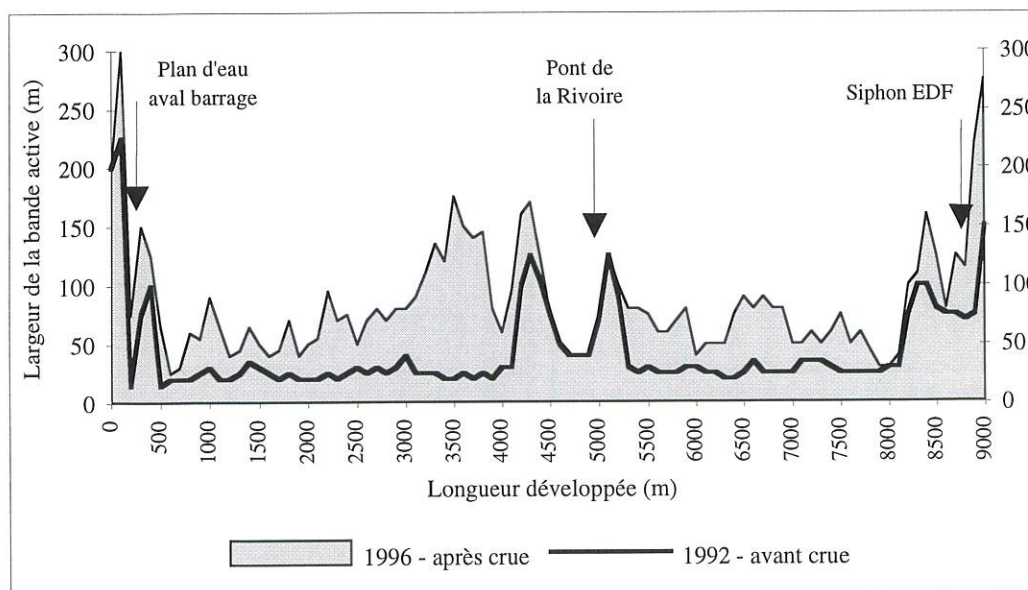


Figure 3.26 - Evolution de la largeur du chenal court-circuité entre 1992 et 1993. Pour l'essentiel, les changements observés sont dus à la crue du 8-9 octobre 1993 ; la crue plus faible de 1995 n'a provoqué que des retouches limitées.

¹ Les déterminations floristiques citées dans le texte ont été faites par J. Girel du Laboratoire de Biologie Alpine, UJF.

(voir fig. 3.21) (Blanchard, 1994 ; Peiry & Nouguier, 1994 ; Pautou, Peiry *et al.*, 1997). Elle a donné lieu à des travaux de différente nature : cartographie physiologique diachronique pour évaluer les changements, cartographie géomorphologique et phytoécologique détaillée (1/10.000^e), investigations de terrain visant à relier la nature des séries végétales aux conditions écologiques². Le Drac dans la plaine de Grenoble est une rivière où la dynamique des flux a été fortement altérée par les perturbations d'origine anthropique : comme nous avons déjà eu l'occasion de l'exposer, les débits sont influencés par la présence de réservoirs hydroélectriques ; les transports solides ont été profondément modifiés par les changements artificiels de la géométrie du chenal (endiguement) ou la chenalisation résultant de l'extraction de 7 Mm³ de gravier entre 1955 et 1970 (environ 440.000 m³.km⁻¹).

4.2.1) Une métamorphose géomorphologique et biogéographique du chenal et de la plaine d'inondation en moins de trente ans

La végétalisation contemporaine du lit du Drac est l'illustration de la réponse complexe de l'hydrosystème (Schumm, 1977 ; Schumm, Harvey *et al.*, 1984) à la profonde modification des flux d'eau et de sédiments. En amont de Pont-de-Claix, l'étude de l'évolution physiologique du chenal a été faite sur la base de l'analyse de 5 instantanés régulièrement échelonnés entre 1948 et 1994 (fig. 3.27). En aval de Pont de Claix, 7 états du chenal et de la plaine d'inondation ont été dressés entre 1926 et 1992 afin de suivre avec précision son évolution (tab. 3.10)

A) 1948-1956, une dynamique fluviale active interdisant une colonisation végétale durable

En amont de Pont de Claix en 1948 et 1956, les photographies aériennes ont permis d'individualiser trois niveaux de colonisation arbustive du chenal et de ses abords immédiats : a) des bancs de galets connaissant un

début de colonisation ; b) des communautés pionnières ouvertes ; c) des fourrés denses. Des herbacées colonisaient les bancs de galets, en même temps qu'un niveau d'arbustes épars composé de *Populus nigra*, *Alnus incana* et de fourrés de saules tels que *Salix eleagnos*, *S. daphnoides*, *S. alba* ou *viminalis* croissaient sur les plages de gravier et de sable. Le style fluvial était tressé, la largeur du chenal atteignant couramment 300 à 500 mètres. Au cours de cette décennie, les crues contrôlaient à la fois la dynamique fluviale et l'établissement des communautés alluviales boisées. Ceci est illustré par une succession de petits événements suivis d'une crue décennale, en juin 1956, qui détruisirent la végétation la plus exposée ; nous avons déjà évoqué plus haut leur rôle morphogène. En dépit de ces crues, la végétation de quelques petites zones mieux protégées ne fut pas affectée, leur ampleur et leur fréquence n'étant pas assez forte pour toucher la plaine alluviale dans son ensemble. La principale conclusion de cette analyse de la dynamique de référence est que le système tressé était tellement actif qu'une plaine d'inondation évoluée, présentant des formations superficielles épaisses et des communautés de bois dur, ne pouvait pas se former.

En aval de pont de Claix, le chenal n'était tressé que sur environ deux kilomètres dans un secteur de forte largeur entre digues, la rivière entrant ensuite dans la section canalisée depuis le XVII^e siècle (fig. 3.28/A et B). La totalité de la largeur entre digues était alors occupée par le lit vif, des bancs latéraux mobiles alternés occupant une large partie du chenal. Dans la *section tressée*, une végétation de fourrés denses se développait exclusivement en dehors du lit vif et occupait environ 20 % de la superficie moyenne entre digues (fig. 3.28/C, tronçons 1 à 5) ; dans la *section endiguée* (tronçon 6 à 12), la végétation était quasiment absente des bancs mobiles, si ce n'est localement, sous la forme de communautés pionnières très ouvertes.

Tableau 3.10 - Sources documentaires utilisées sur le Drac dans la plaine de Grenoble, en amont et en aval de Pont-de-Claix.

Date	Localisation	Type de document	Source
1926	Aval Pont de Claix	Carte topographique, 1:20.000	IGN
1948	Amont et aval Pont de Claix	Photo aérienne NB, 1:30.000	IGN
1956	Amont et aval Pont de Claix	Photo aérienne NB, 1:30.000	IGN
1966	Aval Pont de Claix	Carte topographique, 1:25.000	IGN
1975	Amont Pont de Claix	Photo aérienne IR, 1:15.000	IGN
1981	Amont et aval Pont de Claix	Photo aérienne NB, 1:30.000	IGN
1988	Aval Pont de Claix	Aéroposter de Grenoble, 1:10.000	IGN
1992	Aval Pont de Claix	Photographie aériennes couleur, 1:5.000	Clichés SINTEGRA
1994	Amont Pont de Claix	Photographie aériennes couleur, 1:5.000	Clichés SINTEGRA actualisés sur le terrain

² Analyse de la dynamique des flux hydriques et sédimentaires, dissipation de l'énergie cinétique lors des crues, profondeur de la nappe phréatique, nature du substrat, texture et épaisseur des formations superficielles.

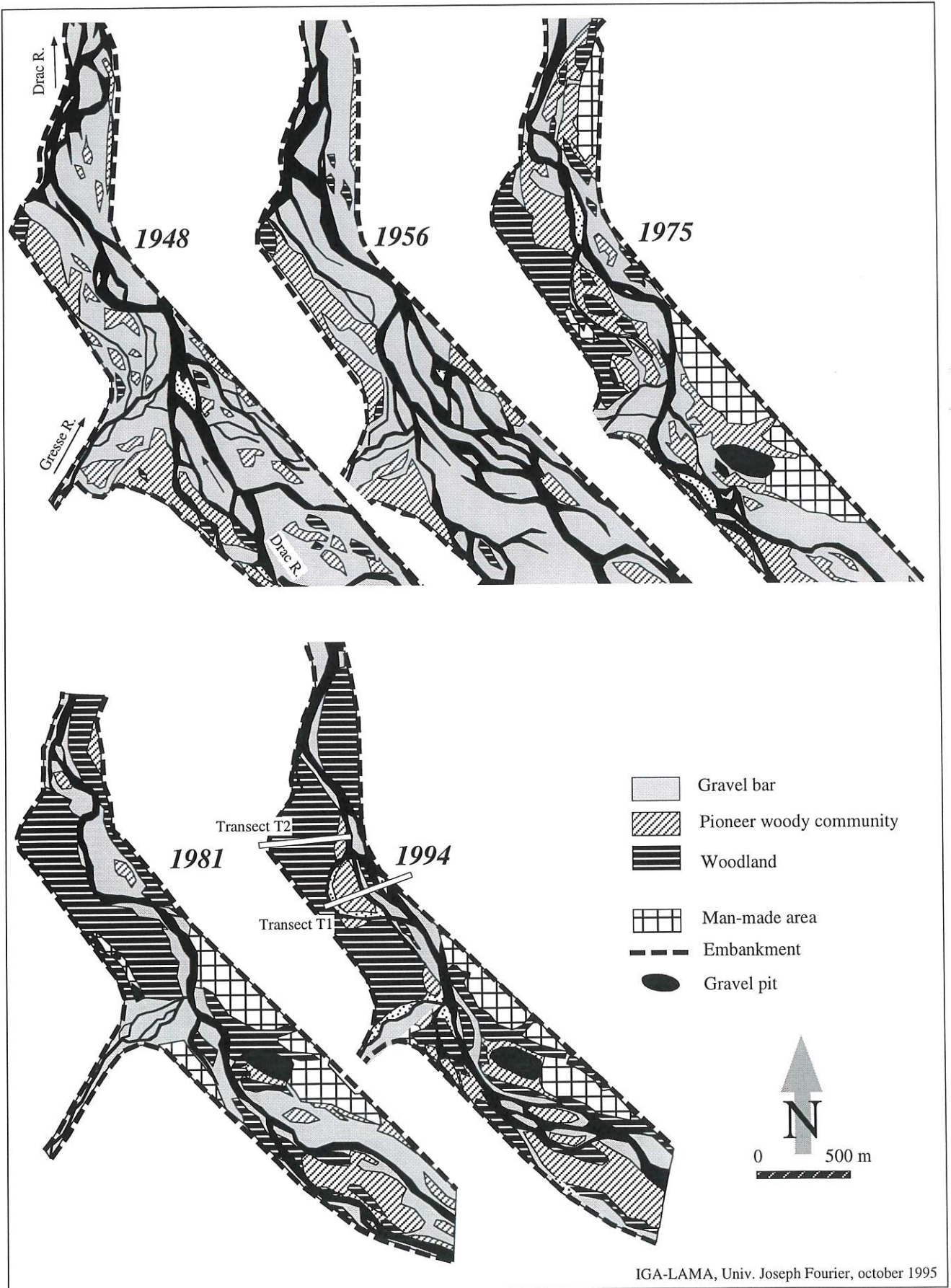


Figure 3.27 - Changement de la physionomie du Drac entre 1948 et 1994, en amont de Pont-de-Claix
(Source : Pautou, Peiry et *al.*, 1997).

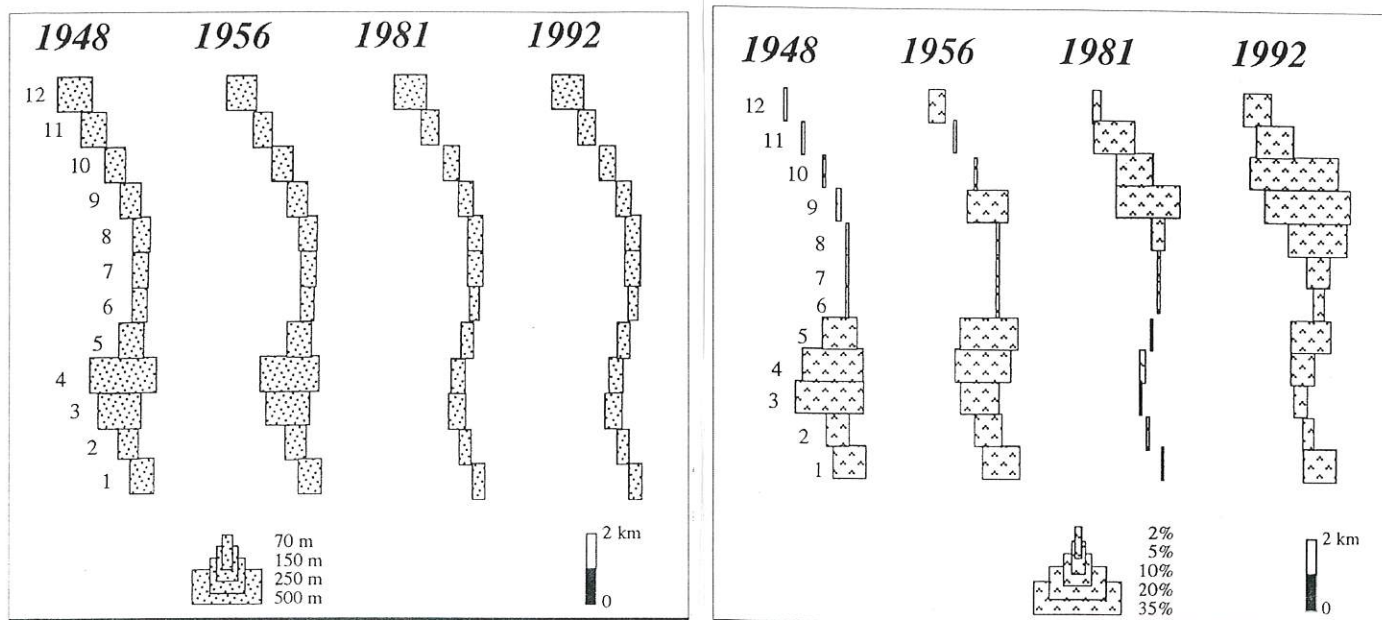


Figure 3.28 - Evolution de la largeur du chenal et de la végétalisation du Drac en aval de Pont-de-Claix.
A/ Concentration progressive des écoulements ; B) Progression de la surface du chenal végétalisée
 (Source : Peiry & Nougier, 1994).

B) 1960-1994, le développement d'une forêt alluviale mature sur les espaces délaissés par le chenal

La surexploitation des réserves alluvionnaires est à l'origine de la disparition progressive du tressage sur le Drac inférieur et de son remplacement, dans les zones où la rivière dispose encore d'une liberté de divagation, par un lit développant une tendance au méandrage (voir fig. 3.27). Ce changement de style fluvial a accompagné une incision de près de 3 mètres du chenal et la contraction progressive des écoulements : a) *en amont de pont de Claix*, la largeur de la bande active décroissait à moins de 300 mètres en 1975, puis moins de 200 mètres en 1981 ; celle-ci n'était plus large que d'une centaine de mètres au début des années 1990. Par ailleurs, les bancs longitudinaux, qui étaient majoritaires dans le lit tressé, disparaissaient progressivement au bénéfice des bancs latéraux ; b) *en aval de Pont de Claix*, la concentration des écoulements touchait l'ensemble du cours du Drac, y compris la section étroitement endiguée, les bancs alternés perdant progressivement leur mobilité aval (voir fig. 3.28).

La végétation a rapidement enregistré les changements géomorphologiques. Trois modifications majeures sont apparues : a) des espèces pionnières ont colonisé les surfaces qui n'étaient plus sujettes aussi fréquemment aux inondations actives ; b) les communautés végétales localisées sur les unités les plus anciennes de la mosaïque ont

évolué vers des communautés boisées (successions) ou vers des communautés originales liées aux nouvelles conditions hydrologiques et pédologiques (innovations³) (Pautou, Girel *et al.*, 1996 ; Pautou, Peiry *et al.*, 1997) ; c) au cours des dix dernières années, les bancs stabilisés de la section aval étroitement endiguée ont connu le développement de denses fourrés de saules et d'aulnes blancs (photo 3.7). En 1992, les boisements de cette section du Drac occupaient environ 30 à 35% de la surface du lit, ce que l'on peut qualifier d'inquiétant pour qui connaît la vigueur des crues du Drac (voir fig. 3.28). Finalement, les changements écologiques et géomorphologiques contemporains ont produit un nouveau paysage fluvial fortement végétalisé, si l'on se réfère à ce qu'il était il y a seulement cinquante ans.

4.2.2) Une transformation des modalités de fonctionnement liée au changement de style fluvial

Le changement de la dynamique de l'écoulement induit par le passage du tressage au méandrage a eu deux effets majeurs : A) il a conduit à une modification profonde de la distribution spatiale des dépôts fins ; B) il a aussi engendré un accroissement du nombre d'unités biogéographiques et la création de nouvelles unités de plaine d'inondation.

³ Le terme "innovations" (Pautou, Girel *et al.* 1996, Pautou, Peiry *et al.*, 1997) témoigne ici du caractère original des communautés végétales, les espèces typiquement alluviales étant infiltrées d'espèces qui témoignent d'un changement des conditions écologiques relatif à l'impact (espèces xérophiles, espèces de l'étage collinéen).

A) Le changement de la distribution spatiale des dépôts fins et ses conséquences écologiques

Alors que la rivière tressée n'était pas capable de piéger les sédiments issus d'un transport en suspension, parce que l'écoulement était trop rapide, la chenalisation a concentré à la fois l'écoulement et l'énergie. Les écoulements de débordement plus lents ont déposé leur sédiments en suspension dans la plaine d'inondation, provoquant un changement des conditions écologiques et la mise en place d'une boucle de rétroaction positive ; les premiers végétaux favorisent le dépôt des formations superficielles, celui-ci accroissant ensuite la rapidité du développement végétal.

La réalisation de transects topographiques et biogéographiques recoupant toutes les unités fonctionnelles actuellement présentes sur le Drac permet de saisir l'intensité du changement (fig. 3.29/1 et 2, localisation des transects sur la fig. 3.27) :

1) L'unité correspondant à l'ancien chenal de tressage, et qui constitue actuellement une basse terrasse alluviale (+3 m), est presque totalement dépourvue de formations superficielles, à la fois parce que les fines n'étaient pas piégées lorsque le tressage était fonctionnel, mais aussi parce que l'incision rapide du chenal ne permet plus leur submersion. La végétation reflète l'ensemble des conditions écologiques issues de l'histoire de cette unité de la mosaïque fluviale : a) une communauté alluviale de bois dur à base de *Fraxinus excelsior* infiltrée d'essences collinéennes tels que *Acer pseudoplatanus* et *Acer platanoides* indique que la forme est âgée ; son évolution est déconnectée des processus fluviaux (absence d'inondation par les flux de débordement) ; b) une strate basse xérophile et ouverte, adaptée à des sols très filtrants et de texture très grossière (*Hippophae*, *Salix eleagnos*, *S. purpurea*, *Populus nigra*, *Buddleja variabilis* et *Acer monspessulanum*), témoigne à la fois de l'absence de formation superficielle et de l'approfondissement de la nappe phréatique.

2) La constitution de la plaine d'inondation récente contraste de manière saisissante avec celle de l'unité précédente. Les dépôts fins, composés principalement de sable et parfois de limon, sont épais de 50 à 80 cm sur les unités les plus anciennes ; ils fossilisent plus ou moins parfaitement une topographie d'anciens chenaux de débordement (voir fig. 29/2). La texture et l'épaisseur des sols, la profondeur de la nappe (50 à 60 cm) et l'âge de la forme fluviale expliquent la présence d'une communauté homogène d'*Alnus incana* et de *Salix alba* et d'une strate basse, caractéristique d'une zone humide (*Carex acutiformis*). Le banc de convexité, abandonné à la suite d'un recoupement de méandre (voir fig. 29/1), présente une structure biogéographique complexe caracté-

risée par une grande variété de communautés végétales, dépendantes de la topographie et du substrat. La très forte densité des fourrés composant la végétation est un facteur très favorable au piégeage des fines lors des débordements, ce qui devrait conduire ce type de forme à évoluer de la même manière que les unités de plaine d'inondation plus anciennes.

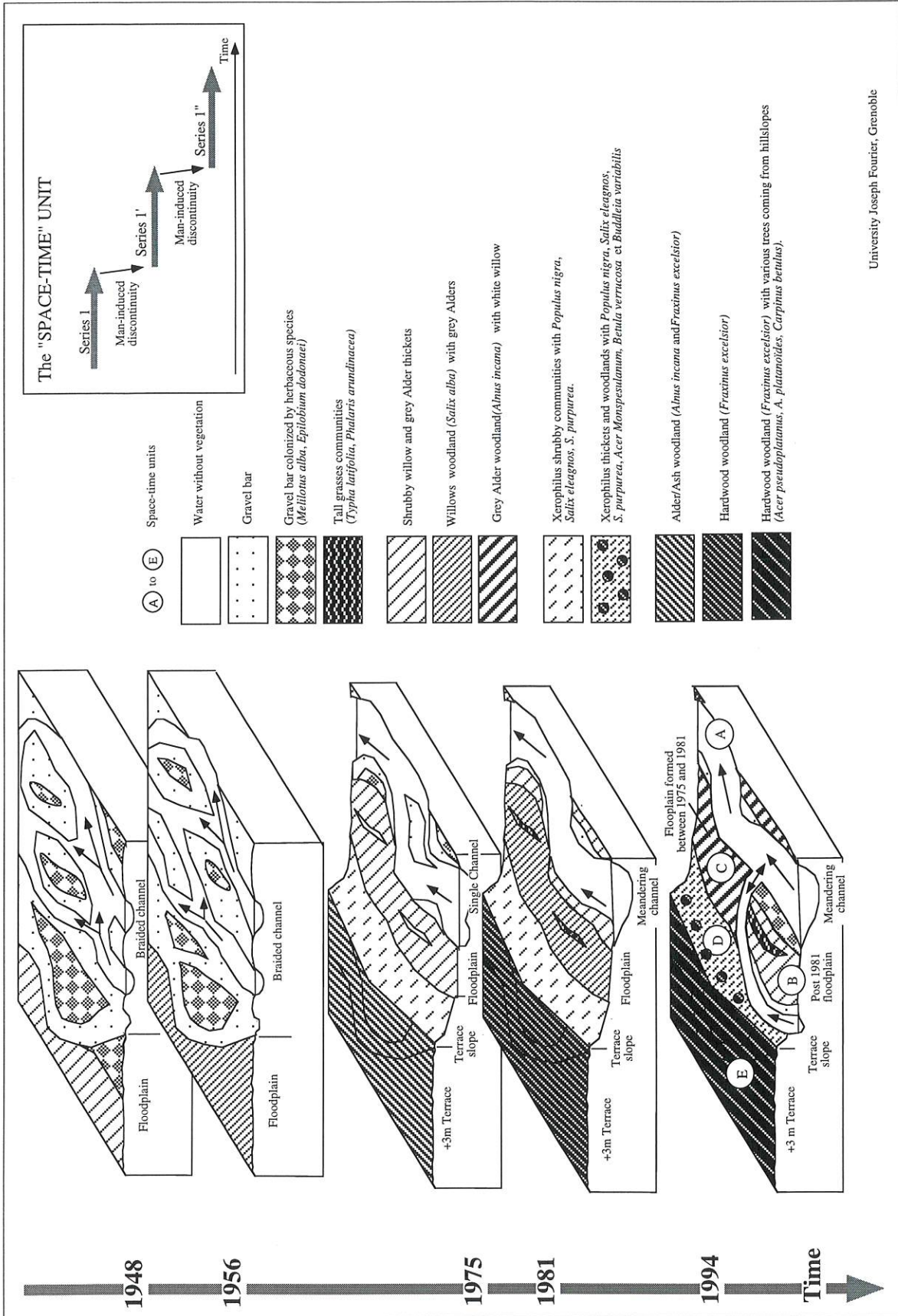
B) La multiplication du nombre d'unités fonctionnelles "espace-temps"

Outre le changement des conditions écologiques, le nouveau paysage fluvial a vu augmenter le nombre d'unités fonctionnelles juxtaposées. Leur nombre et leur agencement reflète la manière dont les nouvelles conditions issues de l'impact se sont surimposées aux conditions héritées du passé⁴ ; elles peuvent être perçues en terme d'unités "espace-temps" (Pautou, Peiry *et al.*, 1997) qui décrivent et expliquent la dynamique de chaque fragment de la mosaïque. Une unité "espace-temps" consiste en des séries végétales séparées les unes des autres par des discontinuités (fig. 3.30, coin supérieur droit). Une série est un fragment de séquence végétale (Pautou, Girel *et al.*, 1979 ; Pautou, 1984) qui a été interrompue du fait de la réponse accélérée de l'hydrosystème à des interventions humaines. Les changements écologiques issus de l'impact introduisent de nouvelles dynamiques, sans pour autant que l'unité biogéographique perde totalement (en tout cas à court terme) la mémoire de la série végétale précédente. La physionomie et la dynamique de l'unité "espace-temps" dépend : a) de l'âge de l'unité morphologique ; b) des impacts cumulés provoqués par les interventions humaines. Les discontinuités viennent brutalement interrompre l'évolution attendue de la série végétale sans l'altération artificielle de la dynamique fluviale.

Cinq unités espace-temps ont été identifiées sur le Drac (fig. 3.30). Elles sont organisées selon : a) un gradient latéral décroissant d'énergie cinétique, du chenal en direction de la basse terrasse (+3 m) ; b) un gradient de sécheresse augmentant du chenal en direction des marges de la plaine, où la nappe s'approfondit et la submersion devient de plus en plus rare. Trois unités sont susceptibles d'être remaniées et rajeunies par les processus fluviaux (par exemple, le déplacement latéral du chenal méandrique), alors que les deux dernières sont déconnectées de la dynamique fluviale ; par conséquent, leur évolution est davantage dépendante de la compétition entre les espèces.

1) Le chenal est constitué d'un lit en eau circulant entre des bancs de convexité. Les contraintes hydrodynamiques sont intenses et empêchent généralement le développement de la végétation. L'héritage des conditions anciennes est modéré, en dépit, localement, des

⁴Texture grossière du substratum, faible épaisseur des formations superficielles sur les unités tressées, morphométrie des formes de chenal spécifique au tressage.



University Joseph Fourier, Grenoble

Figure 3.30 - Les unités "espace-temps" du Drac dans la plaine de Grenoble (Source : Pautou, Peiry et al., 1997).

contrôles géomorphologiques exercés par la présence d'un pavage d'incision. C'est notamment le cas dans la portion aval endiguée du chenal, la faible mobilité de la charge de fond ayant induit une stabilisation des formes fluviales propice à leur végétalisation (Peiry & Nougier, 1994).

2) Du point de vue géomorphologique, la plaine d'inondation récente (post-1981) résulte de l'instabilité latérale du chenal de méandrage actuel. L'exemple le plus significatif est le banc de convexité abandonné en 1991, en amont de Pont-de-Claix (voir fig. 29/1). Une grande variété de communautés végétales s'y sont rapidement développées : *Phalaris*, *Molinia*, *Typha* dominent dans les dépressions abandonnées ; des fourrés d'aulne blanc colonisent les levées sableuses ; des arbustes alluviaux alpins se développent sur les galets et graviers bordant le chenal (*Myricaria germanica*, *Salix eleagnos*, *Hippophae rhamnoides*). Les îles végétalisées de la section endiguée aval du Drac appartiennent à ce type d'unité espace-temps.

3) Avec son épais recouvrement de sables et limons et sa forêt de bois tendres homogène et bien développée (aulnes blancs et saules blancs), la plaine d'inondation formée après la phase d'incision constitue un stade plus évolué que le précédent. Âgée d'environ 25 ans, sa bonne connexion aux flux d'eau et de matière en suspension, ainsi que la faible profondeur de la nappe (50 à 60 cm) induisent une dynamique dépendant principalement de processus allogènes. L'évolution écologique peut être interrompue de manière spectaculaire par des processus érosifs destructifs conduisant à une réinitialisation de la séquence végétale (photo 3.8).

4) La plaine d'inondation contemporaine à la basse terrasse + 3 mètres est une bande d'une largeur maximum de 60 mètres. Dans les zones où le chenal de méandrage a accidentellement érodé la bordure de la terrasse, la pente est subverticale (voir fig. 28/1). Les dépôts très grossiers et filtrants constituant le sol imposent des conditions de forte xéricité à la végétation. Celle-ci est composée de communautés ouvertes adaptées à des sols très perméables (*Hippophae*, *Salix eleagnos*, *Populus nigra*, *Buddleja variabilis* et *Acer monspessulanum*) localement infiltrés d'espèces provenant de la terrasse voisine (peuplier noir, érable, frêne).

5) La basse terrasse + 3 mètres n'a subi aucun rajeunissement par la dynamique fluviale depuis 1948. De ce fait, elle a mémorisé l'ensemble des impacts produits par les activités humaines. Sa topographie porte les traces de vieux bras de tressage très plats ; le substratum grossier est très imparfaitement recouvert de dépôts fins de débordement d'épaisseur toujours inférieure à 25 cm. La végétation est une forêt de bois durs à base de frênes riche en espèces collinéennes tels que le charme, le chêne, l'érable, le tilleul et le bouleau. Il a donc fallu

moins de 50 ans pour produire une forêt de bois durs en bordure d'un cours d'eau ; cet accroissement de la vitesse de succession végétale est indubitablement lié à l'action de l'homme.

Les exemples du Drac court-circuité et du Drac dans la plaine de Grenoble montrent que la métamorphose accélérée de la dynamique fluviale en réponse à la nouvelle combinaison de débit et de transport de charge de fond a conduit à des changements écologiques majeurs ; il en résulte une modification profonde du paysage fluvial. Les communautés végétales, près du chenal comme sur les terrasses, connaissent aujourd'hui un degré de maturité jamais vu depuis le Petit Age Glaciaire. L'homme apparaît être un agent fondamental de cette biométamorphose, en favorisant le développement de nouvelles combinaisons de communautés végétales jamais observées auparavant (innovations) : par exemple, l'établissement à proximité d'un cours d'eau d'espèces non alluviales d'origine méditerranéennes telles que *Acer monspessulanum*, *Cotinus coggyria* ou *Pistacia terebinthus*. Cependant les études interdisciplinaires conduites sur le Drac montrent que des espèces alluviales, telles que le peuplier noir ou les saules, sont capables de maintenir leur régénération là et quand la fourniture en eau est suffisamment abondante. Une dynamique fluviale active susceptible de produire des phases de destruction/construction sur un espace le plus étendu possible est donc le garant du maintien d'une diversité spatio-temporelle des unités de la mosaïque végétale. La capacité de régénération des formes par la dynamique fluviale est non seulement conditionnée par la préservation d'un nombre suffisant d'espaces où elle puisse librement travailler ; elle dépend aussi du maintien du dynamisme de la fourniture et des transits d'eau et de sédiments, afin que les processus soient entretenus. Le chapitre 3 a montré que le transit de charge grossière était très largement affecté par les multiples aménagements fluviaux. La végétalisation des lits fluviaux (chap. 4) témoigne de l'adaptation constante de la dynamique fluviale à cette réduction des apports. L'objectif du chapitre suivant est d'examiner si le tarissement des sources de matériaux grossiers doit se poursuivre dans l'avenir, en étudiant l'effet de la déprise rurale des rivières de tête de bassin sur la fourniture sédimentaire.

Photo 3.4 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Le lit tressé occupait la totalité de la largeur de la vallée au début du XX^e siècle ; l'instabilité latérale du chenal empêchait le développement des séquences végétales, celles-ci ne dépassant pas les stades pionniers (Collection de l'Institut de Géographie Alpine).

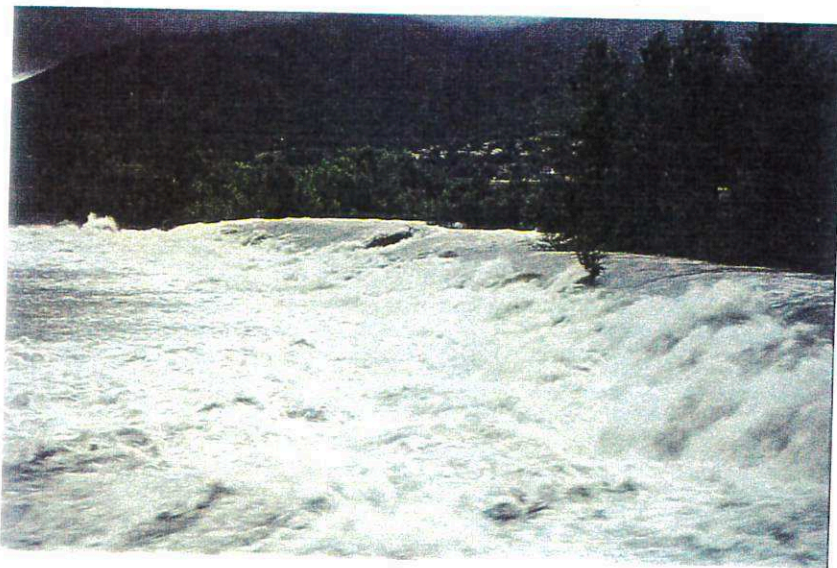
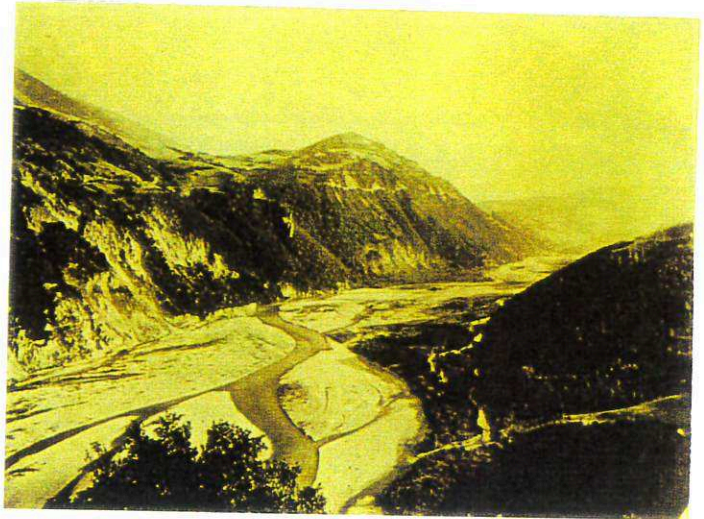


Photo 3.5 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Crue du 8-9 octobre 1993 au niveau du seuil de la Rivoire ($550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). En situation de débit réservé ($1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), le seuil est totalement exondé (Cliché : J.L. Peiry, 1993).

Photo 3.6 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Blocage des embâcles dans les souilles d'extractions de gravier, en amont du seuil de la Rivoire, lors de la crue du 8-9 octobre 1993 (Cliché : J.L. Peiry, 1994).





Photo 3.7 - DRAC À GRENOBLE. Développement de la végétation sur les bancs de galets, dans la section rectiligne endiguée au XVII^e siècle (Cliché : J.-L. Peiry, 1993).



Photo 3.8 - DRAC EN AMONT DE PONT-DE-CLAIX. Destruction de la forêt alluviale par le déplacement latéral du chenal de méandrage (Cliché : J.-L. Peiry, 1997).

CHAPITRE 5

L'EFFET DE LA DÉPRISE RURALE : UNE TENDANCE À LA PURGE SÉDIMENTAIRE DES COURS D'EAU DE TÊTE DE BASSIN-VERSANT

5.1) L'analyse des impacts indirects : un problème de méthode

5.2) La végétalisation du bassin de la Gresse et son incidence sur la morphologie du chenal

5.3) La stabilisation des rivières de tête de bassin, une tendance qui tend à se généraliser

Résumé du chapitre 5

Afin de compléter la connaissance des changements affectant les transits de la charge alluviale dans les grandes vallées des Alpes du Nord, une synthèse dégageant les tendances récentes de l'évolution de la recharge sédimentaire a été faite sur des cours d'eau de tête de bassin-versant peu anthropisés. L'exemple du bassin-versant de la Gresse montre, depuis moins de cinquante ans, une végétalisation des zones localisées à proximité des talwegs qui alimentent la rivière principale. Cette végétalisation se développe à la suite de l'abandon du parcellaire par les agriculteurs, mais gagne également sur les espaces jusqu'alors instables et dépourvus de végétation. Elle conduit à la purge progressive de la charge grossière de l'hydrosystème, celle-ci non remplacée étant progressivement exportée à l'aval. Le cas de la Gresse est loin d'être un cas isolé : a) d'autres cours d'eau de montagne faiblement anthropisés connaissent la même évolution ; b) beaucoup de bassins-versants torrentiels présentent une forte végétalisation naturelle qui se traduit par une baisse substantielle de l'activité des transports solides ; c) la phytostabilisation se produit également sur les petits bassins versant de l'avant-pays molassique, engendrant une baisse marquée de leur activité morphodynamique. Ce triple constat incite à penser que la carence de transports solides dans les troncs principaux de l'hydrosystème pourra difficilement être compensée par des apports de tête de bassin, en cours d'altération croissante. Ces observations indiquent donc très clairement que la restauration des transits de charge de fond sur les principaux axes de drainage alpestres, si elle s'avère nécessaire pour leur bon fonctionnement, devra faire l'objet d'actions volontaristes de restauration, à l'initiative des gestionnaires.

5.1) L'analyse des impacts indirects : un problème de méthode

Dans les Alpes du Nord, l'étude des rivières de vallée et de piémont, dont nous venons de présenter un exemple avec le Drac, montre sans conteste une tendance à la phytostabilisation des lits fluviaux. Nous l'avons attribuée conjointement à la modification hydrologique et à la raréfaction des transports solides par charriage, en insistant sur les changements affectant le chenal de manière directe pour expliquer la réduction des flux et la biométamorphose (endiguement, hydroélectricité, extractions dans le chenal, seuils sous fluviaux...). Pour être complet, il convient de s'interroger sur d'éventuels changements affectant indirectement les flux, en particulier sous l'effet de la végétalisation des parties supérieures des bassins versants. Nous avons déjà évoqué ce problème en montrant que le reboisement artificiel des bassins torrentiels à la fin du XIX^e siècle a contribué à réduire les entrées d'eau et de sédiments dans les cours d'eau de vallée. Cependant, à l'échelle des grands bassins-versants des Alpes du Nord, les surfaces concernées par le reboisement artificiel sont tout au plus de l'ordre de quelques pour-cent et ne permettent pas réellement de juger de l'importance de ces facteurs indirects sur la métamorphose contemporaine des rivières de vallée. Une autre question est de savoir si la végétalisation des versants se traduira par une poursuite du processus de tarissement des apports sédimentaires dans la décennie à venir.

La déprise rurale et ses conséquences sur le paysage alpin sont, depuis un dizaine d'années, très largement étudiés par les chercheurs (Eynard-Machet, 1993). Les études montrent, depuis 100 ans environ, une tendance à l'abandon progressif de l'espace rural montagnard. Celui-ci était jusqu'alors très largement surexploité ; il suffit pour s'en convaincre de relire les descriptions sur l'état de dégradation des forêts alpines datant du début du siècle (Demontzey, 1894 ; Mougin, 1919 ; Sclafert, 1933 ; 1934 ; 1959). De nombreux témoignages photographiques viennent conforter les descriptions et analyses faites dans ces ouvrages, en montrant des versants dénudés et soumis à d'intenses phénomènes d'érosion. Ce constat a d'ailleurs été à la base de toute l'action de la Restauration des Terrains de Montagne entreprise pendant le dernier quart du XIX^e siècle dans les Alpes du Nord. L'exode de populations rurales en direction des vallées industrialisées et des villes s'est traduite par l'abandon des pratiques agricoles qu'imposait la surpopulation, à savoir : a) le défrichage et l'utilisation agricole de la moindre parcelle disponible, y compris dans des situations défavorables où les récoltes demeuraient très aléatoires ; b) des pratiques d'écobuage intensif et de surpâturage sur les espaces forestiers difficilement accessibles ou impossibles à mettre en culture, en raison de leur pente ou orientation défavorables. Sans entrer dans une analyse détaillée qui ne relève pas de cette étude, la

déprise s'est produite par étapes successives, en relation avec les mutations socio-économiques, le développement industriel, les crises et conflits mondiaux... Les espaces les moins favorables furent abandonnés les premiers, les espaces éloignés des lieux d'habitation le furent ensuite, les activités agro-pastorales se concentrant aujourd'hui aux environs immédiats des villages et hameaux, où réside encore l'agriculteur. La déprise rurale s'est traduite par deux grandes catégories de changements : a) le développement de la friche et l'extension progressive de la forêt sur de vastes surfaces ; b) l'arrêt de l'entretien d'aménagements traditionnels, en particulier relatifs à la maîtrise des écoulements superficiels.

Le changement du paysage des Alpes du Nord sous l'effet de la déprise rurale ne peut qu'avoir eu une incidence sur le couple écoulement/charge, moteur de la dynamique fluviale. Le rôle du couvert végétal, en particulier de la forêt sur les bilans hydrologiques, la protection des sols contre l'érosion diffuse et la réduction des glissements de terrain sont depuis longtemps reconnus et étudiés (Pardé, 1930 ; Gril & Duvoux, 1991 ; Cosandey, 1992 ; Combes, Hurand *et al.*, 1994 ; Piégay, 1995). Saisir son importance vis-à-vis de la dynamique des rivières de vallée reste particulièrement difficile ; les facteurs locaux directs occultent souvent complètement les impacts indirects de la recolonisation végétale spontanée de terroirs abandonnés. En effet, comment mettre en évidence les effets diffus de la déprise rurale sur des lits fluviaux déjà profondément affectés par des interventions humaines directes ? Une des solutions à ce problème méthodologique réside dans l'étude de cours d'eau de tête de bassin sur lesquels les interventions humaines directes sont inexistantes ou limitées.

La question de l'incidence de la déprise rurale sur la dynamique fluviale des fonds de vallée a été abordée à plusieurs reprises à l'occasion de travaux entrepris sur les rivières de montagne et les torrents. La difficulté actuelle est de fournir des résultats quantitatifs sur d'éventuels changements affectant la dynamique de la recharge sédimentaire. La quantification est déjà très lourde à mettre en œuvre et les éléments chiffrés sont très difficiles à obtenir lorsque l'on travaille sur la dynamique contemporaine ; exiger une quantification de l'évolution de la recharge sédimentaire lorsque l'on fait une étude rétrospective et travaille sur un pas de temps de l'ordre du siècle relève de l'impossible. Aussi est-il nécessaire de fonder le diagnostic sur une approche indirecte se substituant à la géomorphologie quantitative, l'objectif devenant alors d'établir des liens entre les modifications de l'utilisation du sol et les tendances évolutives de la dynamique fluviale.

Les résultats de plusieurs études permettent d'illustrer l'effet de la déprise rurale sur la dynamique fluviale. Dans un premier temps, nous nous attacherons à analyser les résultats acquis dans la bassin versant de la

Gresse, affluent du Drac drainant la bordure orientale du massif du Vercors ; ils proviennent pour partie du mémoire de Maîtrise d'E. Ployon (1996) que nous avons dirigé et sont complétés par des observations personnelles. Dans une seconde partie, nous nous emploierons à rédiger la synthèse d'observations faites sur différents types de cours d'eau de tête de bassin-versant.

5.2) La végétalisation du bassin de la Gresse et son incidence sur la morphologie du chenal

Ployon (1996) a entrepris l'étude des changements affectant la recharge sédimentaire de la Gresse (fig. 3.31). Le choix de ce cours d'eau se justifie par le fait que, contrairement aux rivières drainant les grandes vallées alpines, la Gresse est demeurée sauvage et peu aménagée pendant tout le XX^e siècle, hormis quelques travaux de stabilisation des sols par le Service RTM et l'aménagement de micro-centrales hydroélectriques. Ce cours d'eau paraissait donc en situation idéale pour étudier la phytos-

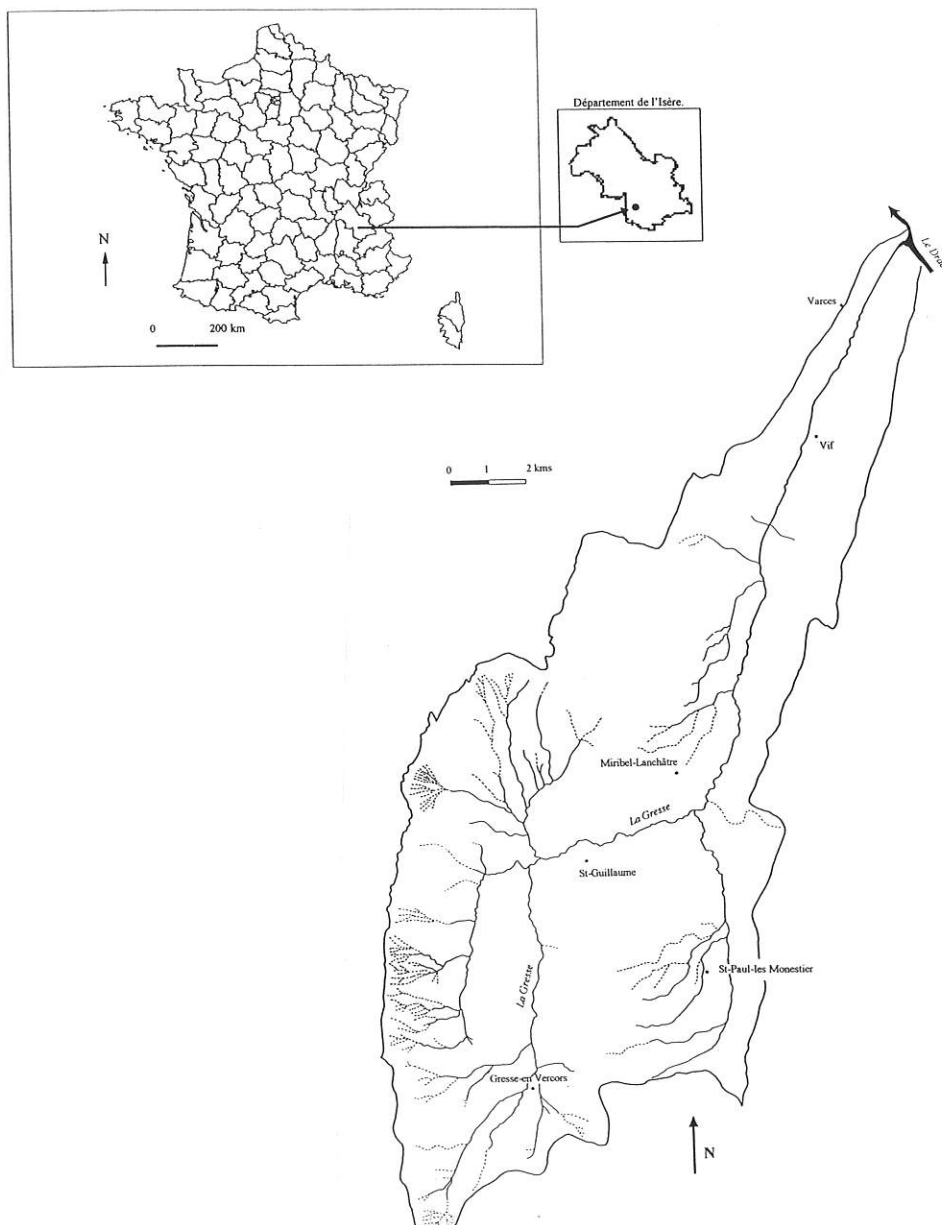


Figure 3.31 - Bassin-versant de la Gresse : localisation de la zone d'étude
(Source : Ployon, 1996, modifié).

tabilisation des zones de production sédimentaire dans un bassin-versant où la déprise rurale fut particulièrement sévère. Dernier affluent d'importance du Drac avant sa confluence avec l'Isère, la Gresse est majoritairement établie dans les formations géologiques profondément altérées et fortement affouillables du Jurassique supérieur et moyen (marnes noires et schistes). A la fragilité lithologique du substratum vient s'ajouter l'instabilité des épais placages morainiques mis en place au Würm par le glacier de l'Isère ; ceux-ci recouvrent une grande partie des pentes du bassin versant (Monjuvent, 1978). Les conditions géologiques sont donc réunies pour que les versants dominant la rivière fournissent une masse considérable de débris de tous calibres. Sa position abritée des perturbations d'origine océanique fait du bassin de la Gresse l'une des zones les moins arrosées des Préalpes du Nord (Blanchet, 1993). Ployon (1996, p. 10) insiste cependant sur le rôle des précipitations d'origine méditerranéenne "*à caractère spasmodique*" dans la mise en œuvre de vigoureuses crues qui, associées à de fortes pentes, donnent à la rivière un caractère très torrentueux. De telles conditions environnementales font de la Gresse une rivière particulièrement efficace pour exporter sa charge alluviale vers l'aval.

La Gresse a fait l'objet d'une analyse relevant de trois changements successifs d'échelle spatio-temporelle (tab. 3.11) :

1) A l'échelle historique, et en dépit de difficultés pour obtenir des informations homogènes sur l'ensemble de la période d'étude (1730-1988), un état de l'évolution de l'occupation forestière a pu être dressé. En 1730, l'état de dégradation de la forêt était extrême, tant du point de vue

de la qualité des boisements que de leur superficie (Ployon, 1996). Les incidences de la déforestation sur l'alimentation du chenal en matériaux ont été clairement établies par les archives où il est mentionné que les terres sont entraînées par la fusion nivale "*dans les chemins et dans le bas pays, et même cela forme des atterrissements dans les rivières*" (...); "*on ne peut remédier à ces inconvénients qu'en faisant ressemer du gland, ou du châtaignier dans ces endroits (...)* ce qui empêchera que ces terres soient emportées par les torrents qui descendent de la montagne" (AD38, IIC 934). Les documents cadastraux des 3 principales communes localisées dans les terrains les plus affouillables du bassin-versant permettent de dresser un état relativement précis des superficies boisées en 1829. Il montrent que les taux de boisement variaient de 3 à 33 % selon les communes (tab 3.12), leurs potentialités agricoles différant fortement d'une commune à l'autre avec la pente et l'orientation. Ces taux resteront pratiquement inchangés jusqu'à la première guerre mondiale (fig. 3.32). A partir de 1913, les taux d'occupation forestière des différentes communes vont connaître un fort accroissement, la surface en forêt étant même multipliée par 12 sur la commune initialement peu boisée de Saint-Paul-lès-Monestier. Alors que les taux de boisement différaient très fortement d'une commune à l'autre en 1913, on observe dès 1988 une tendance à l'homogénéisation des taux de boisement, ceux-ci s'établissant approximativement entre 45 et 50 % de la surface communale. Le suivi historique de l'évolution des boisements communaux indique donc une nette tendance à la végétalisation du bassin-versant de la Gresse qui débute de façon marquée après la première guerre mondiale, date à laquelle les mutations agro-pastorales vont engendrer l'abandon progressif des terres agricoles.

Tableau 3.11 - Types d'investigations, niveaux d'échelle spatio-temporelle d'étude et méthodes mises en œuvre sur la Gresse (d'après Ployon, 1996).

Type d'investigation	Echelle spatiale	Echelle temporelle	Méthodologie
Analyse historique de l'évolution de la couverture forestière (1730-1988)	Communes du bassin	250 ans	Etude des archives et des statistiques forestières, cadastres et inventaires communaux
Cartographie diachronique des changements de la couverture végétale	Zone de 300 m de part et d'autre du réseau hydrographique	50 ans environ	Photo-interprétation, C.A.O (MapInfo), utilisation d'un SIG (IDRISI)
Typologie et distribution spatiale des zones de recharge sédimentaire	Zone de contact versant-vallée	Etat actuel	Investigations et cartographie de terrain

Tableau 3.12 - Evolution des boisements des 3 communes localisées dans les terrains très affouillables du bassin de la Gresse (d'après Ployon, 1996).

Commune	1829		1913		1971		1988	
	Surface (ha)	Taux (%)	Surface (ha)	Taux (%)	Surface (ha)	Taux (%)	Surface (ha)	Taux (%)
Miribel-Lanchâtre	164	17	165	18	432	48	400	44
Saint-Guillaume	431	33	447	35	562	44	608	46
Saint-Paul-lès-Monestier	43	3	63	5	321	24	500	37

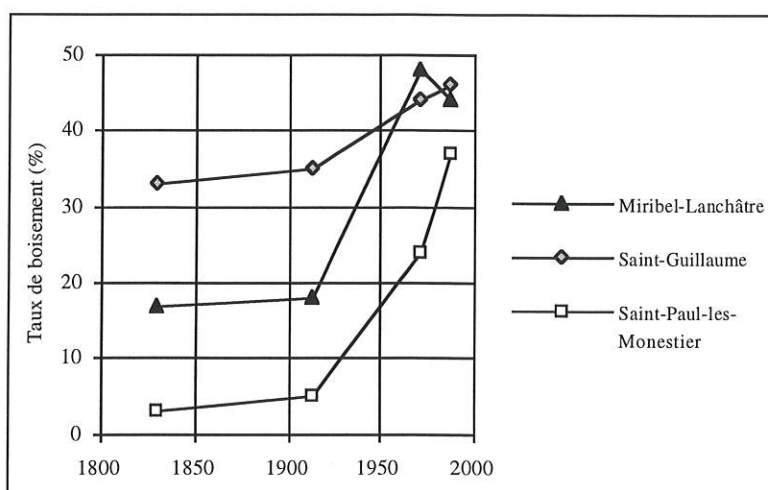


Figure 3.32 - Evolution des taux de boisement entre 1829 et 1988

(Source : d'après Ployon, 1996).

2) Les changements de l'occupation du sol au cours des cinquante dernières années ont été analysés à partir de deux séries de photographies aériennes (1956-1994). Cette étude a permis de préciser les modalités de recolonisation végétale et leur impact sur la recharge en sédiments. Elle a été limitée à une bande de 300 mètres de largeur, de part et d'autre du chenal de la Gresse et de ses ravines affluentes (fig. 3.33). Par ce choix, il s'agissait de concentrer les observations sur les zones de contact entre les versants et le cours d'eau, là où une grande partie des processus de versants alimente directement le chenal en matériaux (Tricart, 1960 ; Harvey, 1987 ; Harvey, 1991).

La photo-interprétation a consisté à cartographier les zones de sols nus favorables à l'érosion (schistes et marnes noires, calcaires marneux, tabliers d'éboulis, matériaux morainiques) et les trois grandes catégories physionomiques de la couverture végétale (forêts, broussailles, cultures et prairies). Le travail a été réalisé à l'échelle du 1/20.000^e, ce qui a nécessairement limité la précision de la délimitation des zones de recharge sédimentaire : la surface réelle des zones en forte pente est

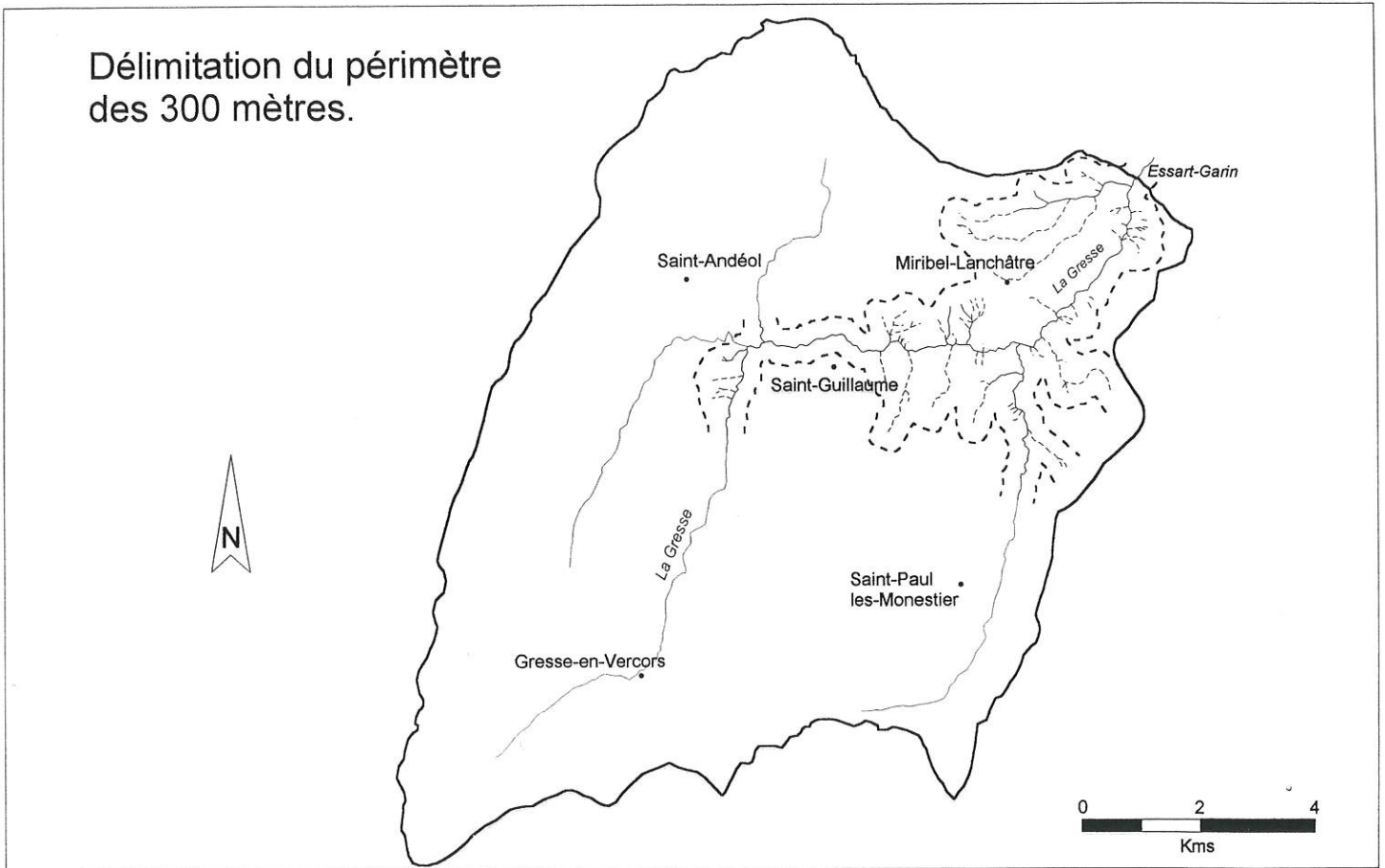
très largement sous-estimée sur des vues verticales, comme le sont d'ailleurs les sapements de berge généralement invisibles sur les photographies aériennes, alors que leur rôle dans la recharge sédimentaire est souvent majeur. Les cartes issues de la photo-interprétation ont été numérisées, puis traitées par un Système d'Information Géographique (IDRISI) de manière à étudier la distribution spatiale des changements par superposition et reclassement des modalités d'utilisation du sol, et à quantifier les surfaces. Les principaux résultats statistiques provenant de cette analyse d'images sont consignés dans le tableau 3.13.

Un certain nombre d'enseignements fondamentaux sont à tirer de cette étude :

a) La déprise rurale a engendré une très nette diminution de la surface mise en culture ou régulièrement entretenue (-15 %). Ce changement s'est traduit par une augmentation sensible de la couverture boisée (+12 %) et des broussailles (+3 %) (tab. 3.13/A, fig. 3.34).

Tableau 3.13 - Zone des 300 mètres de part et d'autre du chenal : A/ Distribution des 4 grands types de physionomie du sol ; B/ Distribution des modalités de la variable "sols nus".

	19 56		19 94			19 56		19 94	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)		(ha)	(%)	(ha)	(%)
A/					B/				
Sol nus	67,90	3,62%	54,34	2,90%	Calcaire	14,23	0,76%	10,32	0,55%
Cultures et prairies	989,60	52,75%	714,70	38,09%	Eboulis	10,87	0,58%	6,97	0,37%
Broussailles	102,90	5,49%	162,80	8,68%	Moraine	8,88	0,47%	4,23	0,23%
Forêt	715,50	38,14%	944,30	50,33%	Schistes	33,92	1,81%	32,82	1,75%
Total	1875,90	100,00%	1876,14	100,00%	Total	67,90	3,62%	54,34	2,90%



PLOYON Estelle, Mai 1996.

Figure 3.33 - Localisation de la bande des 300 mètres de part et d'autre du réseau hydrographique ayant fait l'objet d'une étude cartographique (Source : Ployon, 1996).

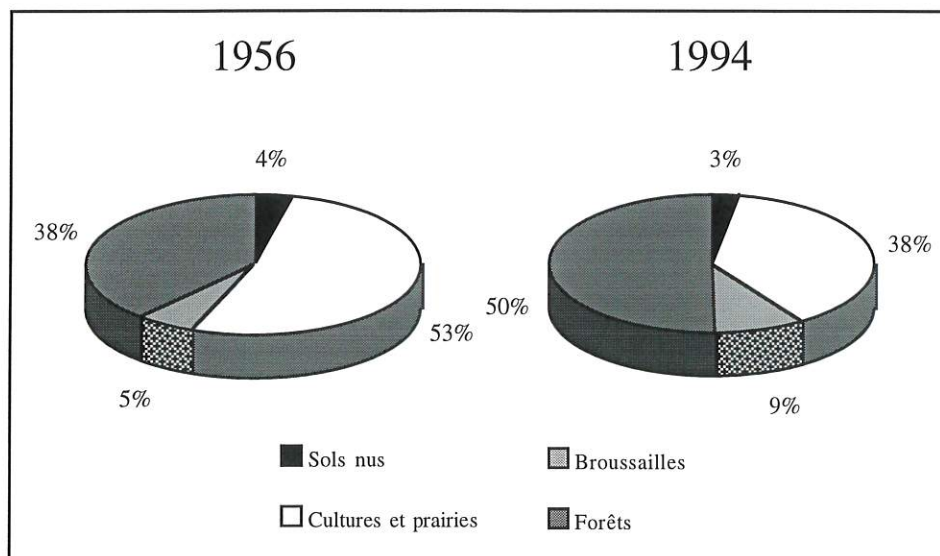


Figure 3.34 - Evolution de la nature de l'occupation du sol entre 1956 et 1994 (d'après les données de Ployon, 1996).

b) Les surfaces dénudées n'occupaient qu'un très faible pourcentage de la surface totale en 1956 (3,62 %), ce qui représente tout de même une surface de près de 68 ha (tableau 3.13/B). Le caractère ponctuel des zones de recharge vis-à-vis de l'ensemble de la surface d'un bassin-versant a été signalé à plusieurs reprises (Peiry, 1990 ; Latulippe & Peiry, 1996), ce qui relativise l'intérêt des taux d'érosion pour comparer la production sédimentaire de bassins versants différents. La variation de la surface de sols nus entre 1956 et 1994 fut très faible (-0,7 %). Tous les types de substrat ne semblent pas avoir répondu de la même manière au processus de végétalisation (fig. 3.35). Les affleurements de schistes, généralement profondément altérés, furent, semble-t-il, peu sensibles à la phytostabilisation (taux de végétalisation de 3,2 %), alors que les autres formations géologiques présentèrent des taux de végétalisation variant de 30 à plus de 50 % au cours de la même période (tab. 3.14).

Le traitement de deux états de l'occupation du sol par superposition et reclassement avec le système d'information géographique IDRISI a permis d'analyser assez finement la répartition spatiale des changements, en particulier la manière dont la fermeture du paysage s'est

produite. L'étude de la progression des boisements entre 1956 et 1994 montre que la végétalisation a généralement évolué des fonds de vallée en direction du haut des versants (fig. 3.36), dans des zones où la vigueur des pentes et les difficultés d'accès expliquent l'arrêt préférentiel des activités agro-pastorales. L'analyse spatiale de la végétalisation des sols nus indique très clairement leur localisation à proximité immédiate des talwegs (fig. 3.37) ; cela confirme que ce sont bien les zones de recharge sédimentaire le long de la Gresse et de ses affluents principaux qui sont directement touchées par la déprise rurale, la phytostabilisation témoignant d'une baisse d'activité des processus de versant quelque soit leur nature et leur efficacité à alimenter le chenal.

3) Des investigations de terrain ont été réalisées le long du cours de la Gresse de manière à compléter l'analyse en plan, en particulier pour identifier le rôle des sapelements de berge, invisibles sur les photographies aériennes. L'objectif était double : a) il s'agissait d'abord de dresser une typologie des processus de recharge sédimentaire en contact direct avec le cours d'eau et de les classer en fonction de leur degré d'efficacité ; une méthodologie utilisant une technique de terrain identique à

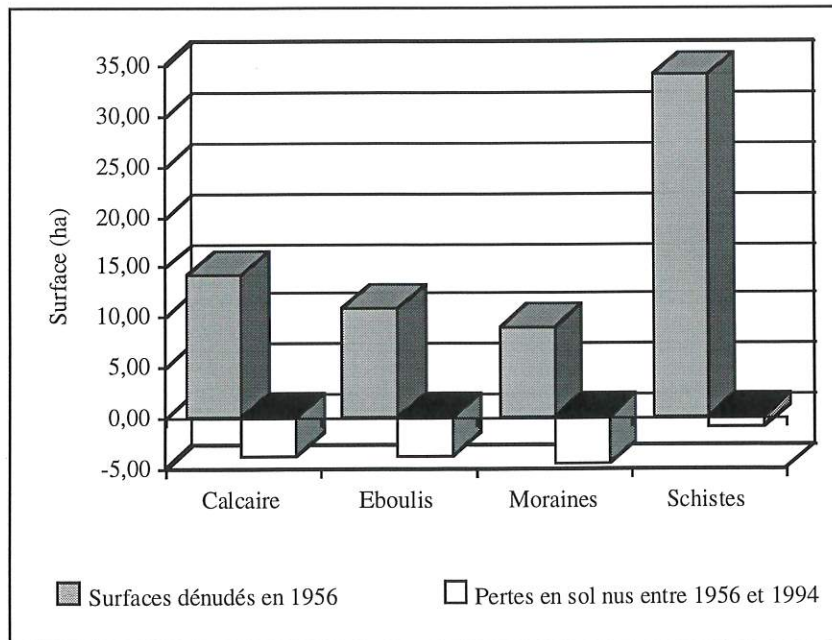


Figure 3.35 - Distribution des sols nus en fonction de la nature géologique des terrains et variation de la surface de chacune des modalités de sol nu entre 1956 et 1994.

Tableau 3.14 - Diminution des surface de sol nu entre 1956 et 1994 selon la nature géologique des terrains (Source : Ployon, 1996).

Nature géologique	Variation de surface (ha) (1956-1994)	Taux de variation (%) (1956-1994)
Calcaire	3,91	27,5
Eboulis	3,90	35,9
Moraine	4,65	52,3
Schistes	1,10	3,2

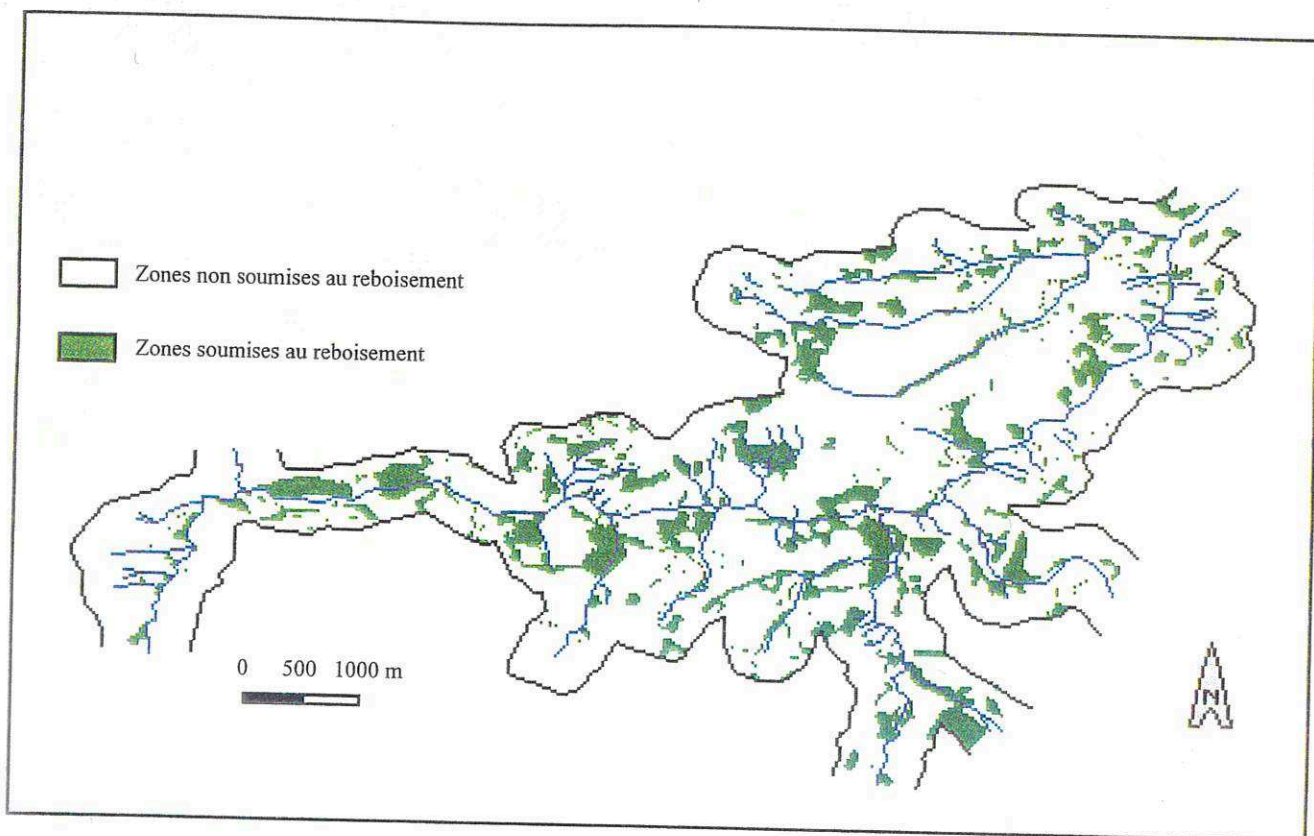


Figure 3.36 - Localisation des zones soumises à reboisement à proximité du réseau de drainage
(Source : Ployon, 1996).

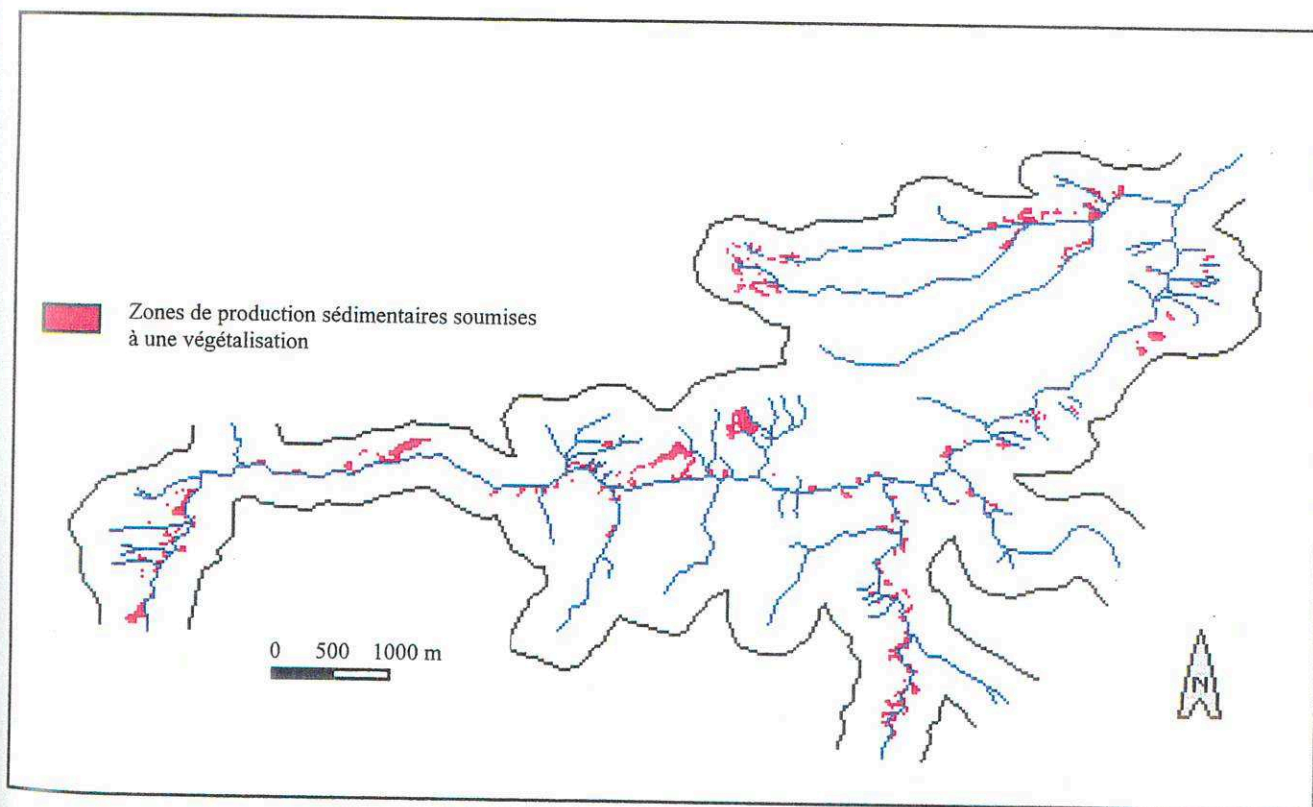


Figure 3.37 - Localisation des sols nus soumis à la végétalisation entre 1956 et 1994
(Source : Ployon, 1996).

celle mise en oeuvre sur le Tacon et le Flumen fut employée (voir P1, § 3.3) ; b) il s'agissait ensuite d'observer les indices morphologiques d'une éventuelle réponse du chenal de la Gresse à une diminution de la recharge sédimentaire.

a) Soixante dix-neuf zones fournissant une charge sédimentaire au chenal ont été relevées sur une distance d'environ 10 km. Quatre modalités de recharge à l'efficacité variable ont été identifiées (tab. 3.15). L'étude de la distribution des processus géomorphologiques fournissant des sédiments au lit de la Gresse a indiqué que les petites cicatrices (< 250 m²) et les grandes cicatrices (≥ 2000 m²), dont l'activité est majoritairement forte, sont les plus fréquentes (fig. 3.38). Ployon (1996) insiste sur l'inégale densité de leur distribution spatiale et la concentration par type de processus sur certains tronçons, en relation avec la forme de la vallée, la lithologie et la structure des affleurements géologiques. L'étude de terrain a montré qu'une cicatrization des processus actifs par la végétation était bien souvent en cours et faisait baisser la fourniture sédimentaire, confirmant ainsi les

résultats de la photo-interprétation. La phytostabilisation est récente, composée d'herbacées ou de formations arbustives jeunes qui témoignent des fortes contraintes écologiques imposées par l'instabilité des substrats et l'absence de sol.

b) Dans la partie encaissée du cours de la Gresse, les investigations de terrain ont révélé des indices de l'adaptation du chenal à une diminution des entrées de sédiments. Il est probable que cette diminution touche aussi bien la fourniture grossière que de matières fines, sans toutefois que l'on soit capable de préciser dans quelle proportion chaque type d'apport est touché. La dynamique fluviale enregistre la diminution des entrées et des transits de charge grossière transportée par charriage, les sédiments fins étant évacués sans possibilité de piégeage jusqu'au Drac. L'impact n'est pas perceptible dans les sections étroites où le lit est généralement pavé de gros blocs de dimension métrique et plus. Par contre, lorsque la vallée est suffisamment large pour qu'existe une basse terrasse alluviale, l'impact se manifeste par un abaissement du chenal d'environ 1 mètre (photo 3.9). Toutefois,

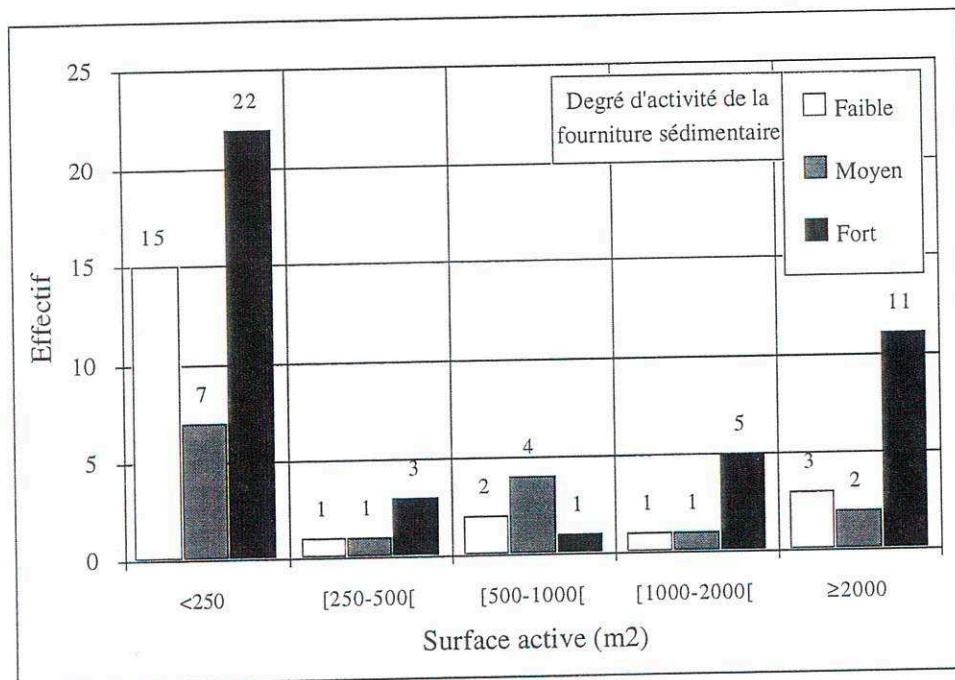


Figure 3.38 - Distribution des zones de recharge en fonction de leur surface active et de leur degré d'activité (d'après les données de Ployon, 1996).

Processus	Fréquence	Nature des sédiments délivrés	Efficacité pour la recharge
Glissements	48%	fins prépondérants	forte
Eroulements	16%	grossiers prépondérants	moyenne
Ravines	18%	tous calibres	moyenne
Sapements	23%	grossiers prépondérants	faible

NB : La somme des fréquences est supérieure à 100%, certains processus se combinant sur un même site.

Tableau 3.15 - Typologie des principaux processus géomorphologiques connectés au chenal et efficacité vis-à-vis de la recharge

(d'après les données de Ployon, 1996).

l'appareil racinaire des arbres se développant en bordure du chenal limite fréquemment la recharge par sapement latéral de la terrasse (photo 3.10). Localement, l'incision a été bloquée par l'affleurement du substratum composé de schistes et de marno-calcaires ; celui-ci n'oppose qu'une résistance limitée à l'érosion fluviale et le substratum est en voie de démantèlement (photos 3.11 et 3.12).

Les observations faites sur la dynamique de la charge grossière dans la moyenne vallée encaissée contrastent avec celles réalisées dans la basse vallée où la rivière s'écoule à la surface d'une large plaine alluviale. Progressivement chenalisée dans un lit rectiligne entre 1760 et 1829 (Blanc, 1996), la rivière semble encore aujourd'hui disposer d'une charge alluviale en transit abondante dans sa section corrigée, permettant même le maintien d'un tressage actif sur le cône de déjection de la Gresse. Il convient toutefois de relativiser l'activité des transports solides contemporains : pendant une grande partie du XIX^e siècle, les riverains eurent à combattre d'incessants exhaussements du chenal par des opérations de curage, et par le rehaussement et un renforcement des digues (Blanc, op. cit.) ; depuis plusieurs décennies, il n'existe plus aucun problème d'exhaussement de la Gresse entre ses digues.

Les éléments développés ci-dessus semblent indiquer qu'à l'échelle du bassin versant de la Gresse la déprise rurale au cours du XX^e siècle a conduit à une purge progressive de la charge grossière de l'amont vers l'aval : la diminution de la fourniture sédimentaire au sein de l'hydrosystème montagnard est progressivement exportée vers l'aval sous la forme d'une diminution progressive des transits par charriage. La plaine alluviale de la Gresse, partie distale du bassin-versant, ne paraît avoir que modérément enregistré ce changement. Ce temps de retard est probablement lié à la durée que nécessite la transmission de la charge de fond vers l'aval ; on assiste, semble-t-il ici, au mécanisme inverse de celui qui s'est produit au XVIII^e et XIX^e siècle dans toutes les grandes vallées alpines, avec la descente progressive du tressage par recrudescence des transports de charge de fond et migration vers l'aval des zones d'accumulation. Il est également possible que les travaux récents entrepris aux abords de la commune de Vif aient provoqué d'importants remaniements des fonds, ces réajustements masquant temporairement les tendances de la dynamique fluviale. Cette série d'observations revêt une importance non négligeable en terme de gestion de la ressource alluvionnaire. Des gestionnaires peu avisés, à la seule analyse de la dynamique des transports de charge de fond dans la partie distale du bassin-versant, pourraient en préconiser l'extraction d'une partie, sous prétexte que les apports paraissent forts. L'analyse du bassin dans sa globalité indique pourtant très clairement que cette ressource n'est pas renouvelable et qu'extraire ne ferait qu'accélérer le processus de purge de l'arborescence fluviale.

5.3) La stabilisation des rivières de tête de bassin, une tendance qui se généralise

L'exemple de la Gresse, aussi convaincant soit-il, impose que l'on s'interroge sur son degré de représentativité par rapport aux autres rivières de tête de bassin. Il est indéniable que le nombre de monographies sur le changement des rivières relevant de la déprise rurale demeure à ce jour réduit : d'abord parce que les rivières sur lesquelles l'homme exerce une pression directe limitée sont peu nombreuses ; ensuite, parce que les études ont concerné d'abord les grandes rivières de vallée sur lesquelles les enjeux de gestion sont forts et complexes. Cependant, depuis environ 3 ans, nous avons orienté certaines de nos recherches personnelles ou des travaux d'étudiants sur cette thématique. Le but est "d'échantillonner", en quelques sortes, sur tous les types de cours d'eau de tête de bassin (torrents, rivières de montagne, petites rivières du piémont alpin) et de dégager des tendances générales communes.

1) Nous avons déjà eu l'occasion d'évoquer assez longuement la stabilisation des torrents alpins par les opérations de correction torrentielle (voir chap. 3, §3.3.2). Bien que les séries RTM soient nombreuses dans les Alpes du Nord (voir fig. 3.12), les torrents qui ne constituaient pas un enjeu majeur pour la maîtrise de la torrentialité n'ont pas fait l'objet d'intervention des forestiers. L'un des plus intéressants résultats acquis lors de l'étude des torrents de l'Arve (Peiry, 1988 ; Peiry, 1989 ; 1990) fut que bon nombre de bassins versants torrentiels s'étaient végétalisés de manière intensive au cours du XX^e siècle. Cette végétalisation fut pour l'essentiel naturelle, l'homme donnant un coup de pouce à la nature sur les bassins corrigés par le RTM. Que l'homme ait été présent ou pas, il fallait de toute manière que les contraintes écologiques diminuent de manière significative pour permettre le développement végétal ; là où ce n'était pas le cas (trop fortes pentes, processus géomorphologiques trop actifs), le taux de végétalisation des bassins versants n'a guère évolué depuis la fin du XIX^e siècle. Des études réalisées sur d'autres torrents que ceux de l'Arve sont venues depuis confirmer ces résultats : sur le Malnant, affluent du Fier supérieur en aval de Thônes, Moutard (1995) montre une progression des boisements par rapport à la situation fournie par la Carte Sarde (1732) qui excède très largement les périmètres ayant bénéficié de l'intervention des services RTM. On peut regretter que Ballandras (1997), dans sa thèse sur le fonctionnement des torrents alpins, n'ait pas abordé plus en détail l'évolution récente du couvert végétal. Nous avons déjà cité plus haut le cas des torrents de la Drôme, dont l'activité morphogénique a considérablement diminué depuis 1946, en grande partie sous l'influence d'une phytostabilisation indépendante des actions de reboisement (Bravard, Landon, *et al.*, 1997). Force est donc de conclure (provisoirement, en attendant de nouvelles

études) que le développement souvent spontané de la végétation correspond à la réponse des versants à une diminution d'activité naturelle des processus géomorphologiques. Cette phase de biostasie est également repérable sur d'autres types de milieux : par exemple, Delannoy (comm. orale, 1997) observe une phase de travertinisation des émissaires karstiques depuis le début du XX^e siècle. L'amélioration très rapide du climat depuis 1850, dernier maximum du Petit-Age-Glaciaire, n'est bien évidemment pas étrangère à cette évolution ; celle-ci a très probablement été facilitée par la diminution de la pression exercée par l'homme sur les versants, lors des différentes étapes de la déprise rurale.

2) Le comportement des rivières de montagne n'est pas différent de celui des torrents. Nous avons présenté le cas de la *Gresse* où la relation existant entre la diminution des surfaces de production sédimentaire et la purge du système fluvial nous a semblé évidente. Un autre exemple, non alpin mais montagnard tout de même, va dans le même sens, celui du *Tacon*, affluent de la Bienne dans le Parc Naturel Régional du Haut-Jura (Bravard & Peiry, 1994). Dans la partie méthodologique de cette étude (voir P1, § 3.3), nous avons mis l'accent sur la présentation de la technique mise en oeuvre pour établir le diagnostic, délaissant quelque peu les résultats de l'expertise. Celle-ci indique pourtant très clairement une rupture d'équilibre récente dans le bassin du Tacon marquée par une purge sédimentaire de l'hydrosystème. Elle repose sur : a) la réduction des apports solides au cours d'eau, en liaison avec la recolonisation végétale des versants depuis une cinquantaine d'années ; b) une série d'années déficitaires du point de vue hydrologique, entre 1950 et 1980, ayant probablement limité les apports et les transports de charge et facilité la conquête végétale des versants et du lit fluvial ; c) la reprise d'une hydraulicité plus forte au cours des années 1980 ayant entraîné un ajustement du chenal par incision. Il en est résulté la reprise d'activité de certaines érosions de berge (égrevines) localisées dans des concavités, par suppression de la butée de pied. Sur l'*Ubaye*, Piégay (1995) a déterminé que la surface forestière globale de 13 communes était passée de 101 km² à 324 km² entre 1833 et 1988 (+320 %), 70 % des communes enregistrant plus d'un doublement de leur superficie forestière (p. 186 et suiv.). L'exode rural et la baisse de la pression pastorale furent des facteurs très favorables à la reprise spontanée des forêts, même si le reboisement a d'abord été volontaire (l'*Ubaye* est le plus grand périmètre de restauration français). L'auteur note également que la progression de la végétation fut particulièrement sensible sur l'*Ouvèze* (+65%, soit 111 km²), l'explosion arborée touchant l'ensemble du bassin versant montagneux. Sur le *Giffre*, la végétalisation a été plus modeste, le taux de boisement passant de 28,6 % à 32,6 % entre 1907 et 1988. Sur le *Giffre* comme sur l'*Ubaye* à l'orée du XX^e siècle, la réponse de la dynamique fluviale prit la forme d'une biométamorphose de la bande active et la diminution de sa largeur. Sur

l'*Ubaye*, les facteurs anthropiques paraissent prépondérants, la très forte végétalisation des versants ayant modifié la dynamique des flux hydriques et sédimentaires ; sur le *Giffre*, les facteurs naturels ont la faveur de Piégay (1995), la fin du Petit-Age-Glaciaire étant marquée par une décroissance du nombre et de l'ampleur des crues (1890-1934).

3) Le cas des petits cours d'eau de tête de bassin drainant les avant-pays molassiques est tout aussi intéressant que les exemples précédents. Leur pente, moins forte que celle des rivières de montagne, leur confère un hydrodynamisme plus modéré. Plus qu'une modification sensible du comportement géomorphologique, le changement prend sur ces rivières l'allure d'une biométamorphose, d'autant plus marquée que l'homme a très souvent abandonné l'entretien de la végétation depuis plusieurs décennies. Sur l'*Aire* et la *Drize*, affluents franco-suisse de l'Arve (voir P 1, § 3.2), la végétation qui a envahi le chenal exerce un puissant contrôle sur la dynamique fluviale (Peiry, 1995). Il en est de même sur le *Châlon*, la *Joyeuse* et le *ruisseau de Bagnols* (affluent de la Savasse), petits cours d'eau de l'avant-pays dauphinois récemment étudiés (Morin, 1996). Le rôle de la végétation est ici très ambigu et mérite que l'on y consacre quelques lignes :

a) elle a un effet stabilisateur indéniable, en armant les berges argileuses particulièrement sensibles à l'érosion de leur dense appareil racinaire ou en constituant des seuils transversaux qui tiennent le profil en long par leurs grosses racines horizontales (photo 3.13) ;

b) lorsqu'elle réduit de manière sensible les sections d'écoulement, elle favorise, par contre, la déstabilisation du lit en accroissant fortement les écoulements de crue et provoquant des anses d'érosion ou de profonds surcreusements des fonds (photo 3.14). Par ailleurs, la déstabilisation des arbres est fréquemment à l'origine de la formation de volumineux embâcles susceptibles de modifier notablement l'allure du profil en long et dont l'effet pourrait être désastreux en cas de crue exceptionnelle ; l'incidence des embâcles, bien connue sur les torrents, est un des éléments récents du fonctionnement de ces petites rivières dont la prise en compte par les gestionnaires s'avérera nécessaire dans l'avenir (Piégay, 1995).

En définitive, la confrontation des résultats acquis sur des milieux différents mais complémentaires indique, à l'échelle de l'ensemble de l'hydrosystème, la tendance à la phytostabilisation des versants. Celle-ci influence à des degrés divers la dynamique fluviale par l'intermédiaire d'une modification de la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Si l'on se réfère au changement hydrologique, la phytostabilisation réduit le ruissellement, modifie les rythmes d'écoulement et accroît la capacité de stockage en eau des versants, en renforçant les écoulements hypodermiques, la rétention hydrique par la

végétation et l'évapotranspiration. La fourniture sédimentaire alimentant les talwegs est également nettement altérée par la diminution de l'érosion diffuse et la décroissance d'activité des principaux processus géomorphologiques qui agissent à l'interface versant-chenal (ruissellement concentré, glissements). Les rivières de têtes de bassin, qu'elles soient dans des milieux où l'énergie gravitaire est forte ou plus modérée, réagissent de manière sensible à la diminution conjointe des flux liquides (Q_l) et sédimentaires (Q_s), d'abord par une tendance à la purge de la charge alluviale, ensuite par la fixation des formes du chenal par la végétation. Cette évolution de l'activité des zones de recharge sédimentaire indique donc très clairement que l'insuffisance des transits de charge de fond dans les lits fluviaux de vallée pourra difficilement être inversée dans l'avenir, sans des mesures de gestion visant à restaurer le *continuum* amont-aval de la fourniture sédimentaire et des transports solides.

Photo 3.9 - GRESSE.
Incision du chenal au détriment du lit de galets se traduisant par la transformation de la plaine d'inondation en basse terrasse (Cliché : E. Ployon, 1996).

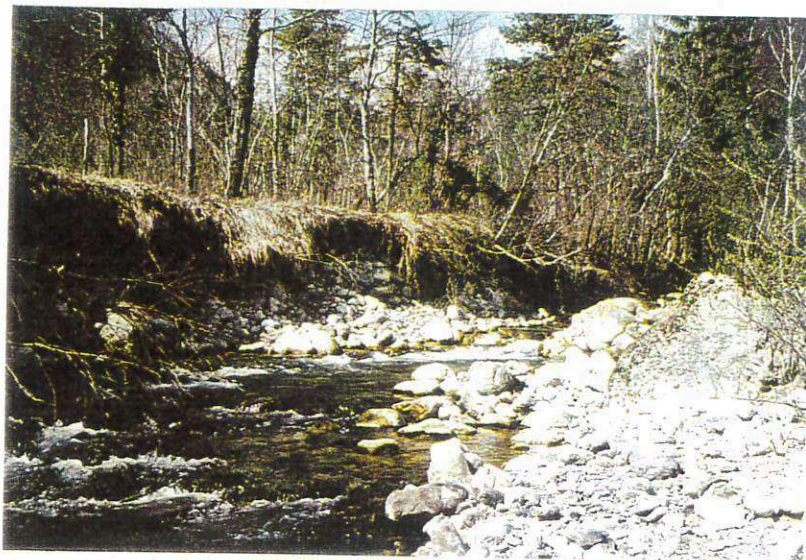


Photo 3.10 - GRESSE.
Protection des berges par l'appareil racinaire des arbres poussant dans la plaine d'inondation (Cliché : E. Ployon, 1996).

Photo 3.11 - GRESSE.
Purge de la charge de galets en période de pénurie de recharge sédimentaire ; l'incision est bloquée par la présence du bedrock schisteux (Cliché : E. Ployon, 1996).



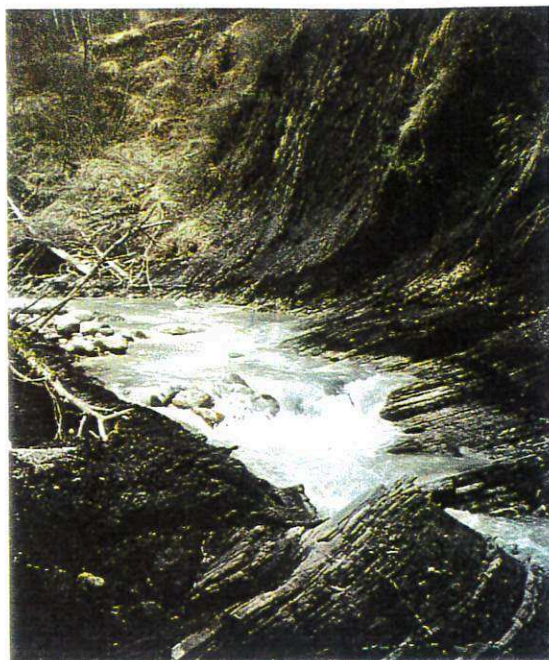


Photo 3.12 - GRESSE. Incision du chenal bloquée par les schistes. la présence de quelques blocs sur le substratum témoigne du démantèlement récent de l'alluvium (Cliché : E. Ployon, 1996).

Photo 3.13 - DRIZE. Protection des berges argileuses par l'appareil racinaire des arbres poussant en bordure du chenal (Cliché : J.-L. Peiry, 1994).



Photo 3.14 - DRIZE. Destabilisation du chenal par la végétation. En poussant dans le chenal, les vieux arbres diminuent la section mouillée et accroissent les vitesses d'écoulement. Il en résulte des érosions de berge et de profonds surcreusements du fond (Cliché, J.-L. Peiry, 1994).

CHAPITRE 6

SYNTHÈSE ET DISCUSSION : LA MÉTAMORPHOSE DES RIVIÈRES DES ALPES DU NORD ET SON APPORT POUR LA CONNAISSANCE DES MÉCANISMES DE L'IMPACT

6.1) Une tendance continue à l'altération des flux hydriques et sédimentaires depuis 150 ans, dans les Alpes du Nord

6.2) Des résultats qui font progresser la connaissance des mécanismes de l'impact et les concepts qui s'y réfèrent

Résumé du chapitre 6

L'étude des rivières des Alpes du Nord permet de faire progresser la connaissance des mécanismes de l'impact et les concepts qui s'y réfèrent : 1) elle met en évidence le fait qu'un aménagement fluvial n'engendre jamais un impact simple, mais un enchaînement de réponses qui se mettent en place sur plusieurs années, voire plusieurs décennies, et débordent très largement du strict cadre spatial où les travaux ont été exécutés ; 2) elle conduit à s'interroger sur les pas de temps auxquels les changements se produisent, la transmission des changements hydrologiques étant beaucoup plus rapide que celle de la charge de fond, soumise à des délais parfois forts longs ; 3) elle révèle le rôle fondamental des héritages paléoenvironnementaux, trop souvent ignorés des aménageurs et pourtant si importants pour une prévision correcte de l'impact ; 4) elle montre que les interventions de l'homme engendrent des ruptures conduisant à l'accélération très sensible de l'évolution géomorphologique et écologique des unités fonctionnelles du chenal ou de la plaine d'inondation ; 5) elle indique que depuis plusieurs décennies, le rythme des aménagements est beaucoup plus rapide que la durée de la réponse complexe. Il en résulte une dérive progressive des hydrosystèmes fluviaux nord-alpins qui pose le problème de l'irréversibilité des changements à l'échelle de temps du gestionnaire, les interventions de l'homme visant à atténuer les impacts induits par les aménagements précédents. Cette fuite en avant ne peut, en aucune manière, être assimilée à une procédure de gestion ; 6) elle incite à se questionner sur ce qu'est la qualité physique d'un cours d'eau dans un contexte de changement accéléré et sur les moyens de la restaurer en traitant les problèmes locaux, tout en respectant les modalités de fonctionnement à l'échelle du bassin-versant.

6.1) Une tendance continue à l'altération des flux hydriques et sédimentaires depuis 150 ans, dans les Alpes du Nord

1) Les perturbations directes des cours d'eau induites par les activités humaines, depuis environ 150 ans, sont venues se surimposer à une dynamique fluviale que l'on ne doit pas considérer comme stable et immuable à l'échelle de temps d'un à deux siècles. C'est pour cela que nous employons le terme de dynamique de référence plutôt que d'état de référence pour qualifier les caractéristiques fonctionnelles des rivières des Alpes du Nord avant la grande phase d'aménagement fluvial. Les variations morphodynamiques sont analysées en se référant aux "changements de régime" du moteur de la dynamique fluviale, c'est à dire les variations relatives des flux d'eau (Ql) et de sédiments (Qs) (Schumm, 1977; Starkel, 1983). Si on analyse ce qui s'est produit depuis l'Époque Moderne, la crise climato-anthropique du Petit Age Glaciaire s'est traduite par l'augmentation conjointe des flux liquides (Ql⁺) et solides (Qs⁺) (Thom & Ledger, 1976 ; Grove, 1972, 1987), les premiers intervenant probablement de manière plus précoce (dès le XIV^e siècle) que les seconds (Bravard, 1989). L'adaptation de

la dynamique fluviale à ces nouvelles conditions de charge et de débit fut l'accentuation du tressage, l'augmentation de la largeur de la bande active et l'exhaussement du plancher alluvial. C'est dans ce contexte d'écoulements forts et de transports solides surabondants que les premières activités humaines touchant directement ou indirectement les cours d'eau se sont développées (endiguement, correction torrentielle) (fig. 3.39).

2) La fin du Petit-Age-Glaciaire a affecté la dynamique des flux d'eau et de sédiments alimentant les hydrosystèmes fluviaux nord-alpins. Elle a été marquée par une très rapide amélioration des conditions climatiques. Avec un temps de réponse plus ou moins long selon les bassins-versants¹, cette diminution progressive des contraintes du climat a eu des conséquences sur la morphogénèse et a conduit à une lente phytostabilisation ; les exemples de la végétalisation spontanée de certains torrents de l'Arve, évoquée dans le chapitre précédent, en sont l'illustration. Celle-ci a progressivement conduit à une baisse naturelle des flux d'eau et de sédiments, renforcée dans les décennies suivantes par la diminution de la pression de l'homme sur les versants (déprise rurale) (voir fig. 3.39) ; cette dernière semble particulièrement

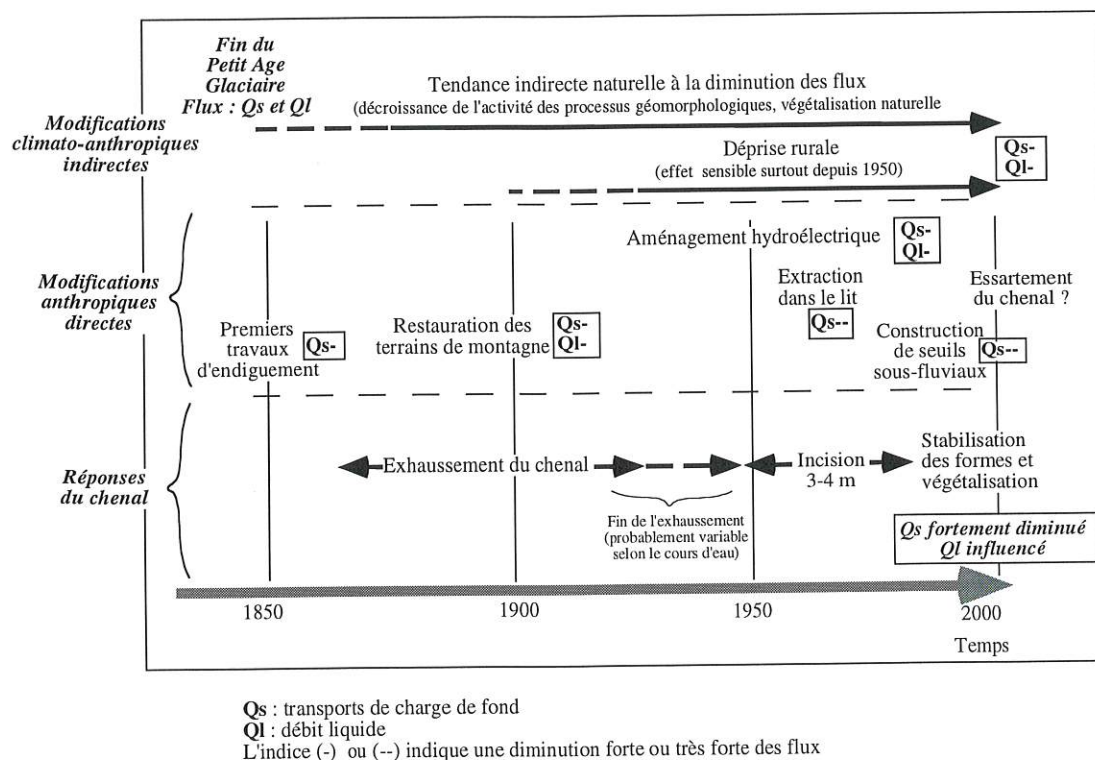


Figure 3.39 - Modèle conceptuel des variations relatives des flux de sédiments (Qs) et des débits liquides (Ql) sur les rivières des Alpes du Nord depuis le milieu du XIX^e siècle. Les flux Qs et Ql abondants de la fin du Petit-Age-Glaciaire servent de référence pour les changements relatifs.

¹ En fonction de leur altitude moyenne, de leur orientation, de leur pente, de leur degré de déstabilisation initial...

marquée depuis la seconde guerre mondiale. En moins d'un siècle, ces changements complexes ont conduit à la phytostabilisation de versants très dégradés et à la diminution de l'activité d'un grand nombre de processus de versant. Pour des raisons de délai de réponse des systèmes (délais de la pédogenèse, des processus de colonisation végétale ; durée des temps de transfert amont-aval de la matière...), les conséquences de ces changements de la dynamique des flux sur les hydrosystèmes fluviaux sont probablement sensibles, à une macro-échelle, depuis moins de trente ans. Il convient donc de conclure que, pendant tout le XX^e siècle, l'aménagement des cours d'eau a été développé dans un contexte de diminution, d'abord lente jusqu'à la seconde guerre mondiale, puis ensuite plus rapide, des entrées d'eau (Ql⁻) et surtout de matière (Qs⁻) dans l'hydrosystème, avec la progression de la phytostabilisation naturelle (déprise rurale) ou provoquée (actions RTM).

3) Les perturbations anthropiques directes du XX^e siècle ont accentué la modification indirecte des flux d'eau (Ql⁻) et de sédiments (Qs⁻). Les flux sédimentaires ont très certainement été beaucoup plus touchés que les flux hydriques (voir fig. 3/39) : a) dans le contexte actuel de pénurie de charge, l'endiguement, qui dans un régime de fort transit solide provoquait avant 1950 l'exhaussement du chenal, limite aujourd'hui très fortement les possibilités de recharge du lit fluvial par érosion latérale (Qs⁻) ; b) comme nous l'avons longuement développé dans le chapitre précédent, l'aménagement hydroélectrique, qui a connu un très fort essor après la seconde guerre mondiale a altéré les flux liquides (Ql⁻) et les transports solides (Qs⁻), en provoquant des ruptures dans le *continuum* amont-aval et en modifiant la dynamique des charriages ; c) les extractions de gravier réalisées dans le chenal ont purgé les rivières de vallée de leur charge alluviale (Qs⁻), l'incision affectant même le stock lentement accumulé au cours de la période historique, voire d'une partie de l'Holocène (Peiry & Bravard, 1989) ; d) plus récemment, les mesures d'ingénierie prises pour stabiliser les profils en long en construisant des seuils sous-fluviaux ont encore diminué une charge solide (Qs⁻) déjà fortement déficitaire. Le bilan global d'un siècle et demi de perturbation des hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord plaide donc en faveur d'une très forte diminution des flux solides et de l'altération des flux liquides à des degrés divers selon le cours d'eau. La partition de l'hydrosystème en compartiments étanches (ruptures du *continuum* amont-aval) et la phytostabilisation des cours d'eau de tête de bassin versant, que ce soit en montagne ou sur le piémont, compromet tout retour en arrière à court ou moyen terme.

4) Sur beaucoup de cours d'eau des Alpes du Nord, la tendance évolutive contemporaine est la phytostabilisation des formes qui faisaient partie du chenal il y a moins

de 50 ans. C'est le cas de nombreux petits cours d'eau, que l'absence d'entretien rend de plus en plus difficile à parcourir (Aire, Drize, affluents de tête de bassin drainant le Bas Dauphiné, affluents du Fier...). C'est également une situation que l'on rencontre couramment sur les grands cours d'eau : les exemples du *Drac*, de *l'Isère dans le Grésivaudan* l'attestent ; une étude en cours sur *l'Isère dans la Combe de Savoie* montre une évolution identique ; des îles boisées occupent les quelques espaces où *l'Arve* dispose encore d'une latitude de divagation latérale (photo 3.15) ; sur *l'Arc inférieur*, le fort développement végétal enregistré depuis une vingtaine d'années a déjà nécessité l'intervention des gestionnaires, notamment à la suite de la forte crue de septembre 1993. Cette phytostabilisation prend deux formes :

a) Sur les surfaces anciennement occupées par le chenal et qui subissent aujourd'hui des contraintes hydrodynamiques moins fortes que dans le passé du fait de la métamorphose géomorphologique (chenalisation des écoulements, incision) ou de l'altération hydrologique (débits résiduels), la phytostabilisation a débuté il y a plusieurs décennies. Actuellement se met en place une forêt alluviale d'une extension et d'un degré d'évolution jamais enregistrés depuis le Petit Age Glaciaire, comme nous l'avons décrit sur le Drac dans la plaine de Grenoble ; ce nouveau paysage, où la présence de grands arbres est la règle, contraste avec la faible extension du corridor végétal pionnier, lorsque les rivières étaient tressées. Dans les zones où la capacité de rajeunissement des biotopes par la migration latérale du chenal n'existe plus (par ex. Drac et Isère endigués), la forêt alluviale de bois dur s'installe et s'enrichit très rapidement en espèces non alluviales, perdant ainsi une partie de ses spécificités. A l'image de ce que l'on enregistre classiquement dans le cas de l'enfrichement des versants ou de colonisation végétale des lits fluviaux (Bravard, Amoros *et al.*, 1986), l'accroissement de la biodiversité lié à la diversification des biotopes et l'augmentation de la richesse spécifique sont un phénomène temporaire, d'une durée de quelques dizaines d'années tout au plus. En effet, l'insuffisante activité des processus géomorphologiques ne permet pas le rajeunissement des formes et des biotopes et le maintien de la diversité biogéographique. Dans les zones où la capacité de rajeunissement subsiste (par ex. Drac en amont de pont de Claix), le développement de la forêt alluviale pose aux gestionnaires le problème du risque engendré par l'arrachage et le transport d'une masse considérable de débris ligneux grossiers, en particulier si la métamorphose du chenal le rend inadapté à l'écoulement d'une grande crue sans de gros dommages à la végétation riveraine.

b) Sur d'autres rivières, le développement de la végétation se produit dans un chenal dont les dimensions sont depuis plus d'un siècle fortement réduites par les digues (Isère et Drac). Intervenue au cours des 15 dernières années tout au plus, la phytostabilisation a trans-

Tableau 3.16 - Fréquence actuelle et passée du mouvement de la charge de fond sur le Drac dans la plaine de Grenoble

(Source : Peiry & Nouguier, 1994, modifié).

Période	Pente	Largeur moyenne (m)	Débit critique de mise en mouvement ($m^3.s^{-1}$)	Fréquence de mise en mouvement ($j.an^{-1}$)	Puissance spécifique ($W.m^{-2}$)
Avant 1950 :					
- zone tressée	0,0037	250	220-260	<8	30-40
- zone endiguée	0,0030	130			50-60
Période d'extraction alluvionnaire (1955-1970)	localement >0,0050 (nickzones)	120	130-150	70	55-65
Drac actuel chenalisé	0,0020	100	250-300	<4	50-60

formé les bancs de galets mobiles en îles végétalisées stables. L'hypothèse actuelle en cours de vérification (thèse de F. Vautier en préparation) est que la diminution de la fréquence et de l'ampleur des charriages constitue la cause principale de ce changement : 1) diminution de la fréquence sous l'effet d'un pavage d'incision du chenal résultant d'un transport différentiel des éléments les moins grossiers de la charge et du maintien en place des particules dont la mise en mouvement est rare ; 2) décroissance de l'ampleur des charriages, parce que la charge mobilisable est aujourd'hui peu abondante. La modification de la fréquence de mise en mouvement des galets est ainsi particulièrement sensible sur le Drac dans la plaine de Grenoble (Peiry & Nouguier, 1994) (tab. 3.16). La formation d'îles végétalisées dans le chenal pose des problèmes spécifiques aux gestionnaires : tout d'abord, celle-ci dirige les écoulements contre les digues à la manière d'épis transversaux, ce qui provoque la détérioration des protections de berge ; ensuite, en accroissant la rugosité de forme du chenal, elles augmentent sensiblement les lignes d'eau de crue, provoquant des risques de submersion des digues ; enfin, elles ne résisteraient probablement pas à une très forte crue, le transit de masses considérables de grands arbres sous des ponts au tirant d'air faible étant loin d'être assuré. Il est à noter qu'une forte incertitude demeure sur l'ampleur de la crue nécessaire à la destruction des îles végétalisées : sur l'Isère, les crues de faible périodicité de retour (<10 ans) exhausent les îles plus qu'elles ne les érodent (voir P2, § 3.4) ; sur l'Arc, la crue cinquantennale de septembre 1993 n'a eu qu'une incidence très limitée sur la végétation poussant dans le chenal. Ces cours d'eau sont peut-être des exceptions, parce que transportant d'énormes quantités de matière en suspension, dont la sédimentation accroît considérablement la cohésion des formations alluviales. La faible résistance de la végétation du Drac en aval de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers, sur un substrat grossier dépourvu de formations superficielles et dans un chenal particulièrement inadapté à l'écoulement d'une crue, plaide en cette faveur. Cette incertitude et l'impossibilité de répondre avec précision aux questions des gestionnaires indiquent qu'une phase de recherche fondamentale sur les méca-

nismes de l'arrachement est aujourd'hui nécessaire.

5) La tendance actuelle est à la stabilisation des hydro-systèmes nord-alpins, notamment sous l'effet de la végétalisation. Cependant, une couverture végétale trop dense, âgée et non entretenue peut sous certaines conditions être un facteur de déstabilisation de l'hydrosystème : a) sur les petits cours d'eau de piedmont, la diminution des sections d'écoulement par les troncs d'arbres ou les souches crée des reprises, pour l'instant ponctuelles, de l'érosion du fond et des berges (*Aire, Drize, cours d'eau du Bas-Dauphiné*) ; les chablis touchant principalement les vieux arbres favorisent la formation d'embâcles qui, s'ils ne sont pas régulièrement enlevés, créent les conditions d'un déséquilibre morphodynamique ; b) certaines rivières de montagne, sur lesquelles la végétalisation favorise la concentration des écoulements et l'incision, peuvent manifester un regain d'instabilité résultant de l'accroissement de l'activité de certains processus de versant (*Tacon, Flumen, Gresse*) ; c) les conditions de retour à des crues catastrophiques sont actuellement réunies sur certains torrents alpins. La surcharge de glissements potentiellement instables par des forêts âgées de plus d'un siècle (Ballandras, 1997), l'augmentation de la fréquence des bois morts dans le chenal torrentiel, liée à la chute des vieux arbres, multiplient les risques d'obstruction du chenal par les bois et les sédiments en cas d'épisode hydro-météorologique exceptionnel ; les risques de déstabilisation généralisée provoquée par une crue de débâcle sont, de ce fait, à envisager sérieusement (par ex. torrents drainant le massif de Belledonne, dans la vallée du Grésivaudan) ; d) les cours d'eau drainant les grandes vallées alluviales ne sont pas à l'abri de ces déstabilisations accidentelles. Les risques de crue catastrophique que fait courir à la ville de Grenoble la multiplication des grands arbres dans le chenal contemporain du Drac ou de l'Isère en sont l'illustration parfaite. Ces exemples sont intéressants du point de vue conceptuel car ils montrent, qu'en situation très stable, des boucles de rétroaction négatives tendant à favoriser un retour à l'instabilité des processus géomorphologiques peuvent se mettre en place. Il est probable cependant que cette instabilité prendrait une forme différente de celle que

l'on a connu au siècle passé ; étant engendrée à l'occasion de phénomènes paroxystiques de faible fréquence, elle serait plus transitoire et de toute manière, beaucoup moins généralisée. Ses conséquences sur le milieu et les activités humaines n'en seraient pas pour autant atténuées.

6.2) Des résultats qui font progresser la connaissance des mécanismes de l'impact et les concepts qui s'y réfèrent

1) L'analyse des changements géomorphologiques affectant les rivières des Alpes du Nord montre qu'un aménagement fluvial, quel qu'il soit, n'engendre jamais un impact simple, mais un enchaînement de réponses qui se mettent en place sur plusieurs années, voire plusieurs décennies, et débordent très largement du cadre spatial strict où les travaux ont été exécutés. Les changements sont transmis à d'autres compartiments de l'hydrosystème *via* les flux d'énergie et de matière qui contrôlent les processus géomorphologiques et écologiques. Dans le chenal, la transmission des changements est particulièrement efficace vers l'aval, sens préférentiel de l'écoulement ; elle se produit également dans les autres directions de l'espace : vers l'amont, comme l'illustre le développement de l'érosion régressive provoqué par l'extraction de granulats ; latéralement, *via* les échanges de surface et souterrains entre le chenal et les unités fonctionnelles de la plaine d'inondation ; verticalement enfin, en relation avec les changements d'altitude du lit fluvial. Ce principe, connu sous le nom de réponse complexe depuis les travaux de Schumm (1977), est fondamental pour l'évaluation de l'impact de tout nouveau projet touchant le cours d'eau. La réponse complexe, tant spatialement que temporellement, est encore peu souvent prise en compte dans les études d'impact actuelles (Persat, 1990).

2) Il convient de considérer de manière distincte les changements affectant les flux hydriques (QI) et ceux touchant les flux sédimentaires (QS), leur incidence sur la réponse de l'hydrosystème étant différente. Les études réalisées sur les rivières alpines ont montré que les ajustements de la dynamique fluviale aux variations hydrologiques (QI), sous l'effet des variations interannuelles du débit ou de fluctuations se manifestant sur des périodes plus longues, se font avec un temps de réponse bref. L'exemple du Drac en est une illustration (Peiry & Vivian, 1994 ; Peiry, cette étude) ; les bioajustements de la bande active du Giffre ou de l'Ubaye à l'occurrence des crues en sont d'autres (Piégay, 1995). Les ajustements de la dynamique fluviale aux changements affectant

tant la fourniture et le transit de la charge grossière (QS) sont beaucoup plus lents, d'une part, parce qu'ils sont soumis à des processus de production dont la vitesse d'évolution est faible², d'autre part, parce que dans l'hydrosystème fluvial, la transmission amont-aval des flux sédimentaires grossiers demande du temps³. Le délai entre l'augmentation ou la diminution de la production des zones de fourniture sédimentaire et la réponse de la dynamique fluviale est d'autant plus long que le cours d'eau est éloigné des sources de matériaux et que l'hydrodynamisme est faible. De nombreux exemples illustrent le rôle de ce *temps de réponse*, qui est de quelques décennies sur les cours d'eau de têtes de bassin versants (Peiry, 1990 ; Piégay, 1995), plusieurs siècles dans les grandes vallées alpines (Peiry, 1987 ; Bravard, 1989 ; Salvador, 1991), voire plusieurs millénaires sur les grands organismes fluviaux (Bravard, 1994). Il est indispensable de prendre en compte le temps de réponse dans les recherches paléoenvironnementales, en particulier si l'objectif est de corréler des observations paléoenvironnementales aux facteurs de la variation des flux, telles que, par exemple, les fluctuations climatiques.

3) Sur une rivière déséquilibrée, les héritages paléoenvironnementaux peuvent jouer un rôle considérable sur le diagnostic de l'impact. Ils peuvent très largement l'accentuer par rapport aux prévisions des experts : l'exhumation de formations fines hautement affouillables dans la vallée de l'Arve, près de Cluses, ou sur le *Fier supérieur*, en aval de Thônes, n'est pas étranger à l'ampleur de l'incision du chenal. Dans d'autres situations, les héritages paléoenvironnementaux peuvent sensiblement atténuer l'impact : le dégagement de formations alluviales grossières héritées d'un hydrodynamisme plus actif que l'actuel, l'affleurement du substratum jusqu'à alors enfoui dans l'*alluvium* sont capables de bloquer durablement l'abaissement du chenal, même si les pentes d'équilibre prévues par les modèles numériques ne sont pas encore atteintes. Une prévision correcte de l'impact nécessitera donc la prise en compte des héritages paléoenvironnementaux dans toute étude cherchant à déterminer quelles seront les conséquences d'un aménagement. Cependant, rares sont les études où les héritages sont effectivement analysés assez finement pour être introduits dans la modélisation de l'impact.

4) Il faut souligner une fois encore que la plupart des types d'aménagements du chenal identifiés⁴ ont actuellement des effets sensiblement identiques sur la dynamique des flux. Ils viennent renforcer une tendance générale des bassins versants à la biostabilisation dont l'origine est à la fois climatique (après la crise du Petit

² Par exemple, le développement de la couverture végétale et l'accroissement de la biomasse se produisent sur plusieurs décennies et leurs effets sur la fourniture sédimentaire se font sentir avec un long délai.

³ Le charriage ne se produit que quelques heures à quelques semaines par an dans les conditions les plus favorables. Les travaux de Salvador (1991) dans l'ombilic de Moirans ont montré que la progradation des formes de tressage était de l'ordre de 120 m.an⁻¹.

⁴ Dignes, barrages, prélèvements alluvionnaires, seuils sous-fluviaux...

Age Glaciaire) et anthropique (déprise rurale). Si l'on se réfère aux échelles de temps, les aménagements du chenal ont des conséquences qui se manifestent sous la forme de ruptures aux effets temporaires ou permanents, les processus étant altérés ou modifiés dans des délais généralement brefs. Au contraire, les changements affectant l'hydrosystème à l'échelle du bassin-versant sont soumis à des rythmes beaucoup plus lents, sous le contrôle des processus biologiques. Ainsi, la tendance générale à la phytostabilisation des bassins versants que l'on observe, en cette fin de XX^e siècle, constitue un phénomène dont l'origine remonte à une centaine d'années. Il est aujourd'hui difficile de dire si l'effet de cette végétalisation sur la dynamique des flux et des sédiments a atteint un *optimum*. La connaissance que nous avons des hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord nous incite à penser que c'est probablement le cas pour la recharge grossière. Il en va un peu différemment de la fourniture de matière en suspension. D'abord, en raison du caractère très ponctuel des zones de recharge⁵ : même si la végétation continue de progresser, des surfaces nues de dimension réduite assureront toujours une forte alimentation en matériaux fins. Ensuite, parce que le milieu montagnard recèlera toujours des espaces où les contraintes géomorphologiques ou écologiques seront telles que les conditions pour l'installation de la végétation demeureront très défavorables. Par ailleurs, des mécanismes compensatoires existent. Ils peuvent conduire à une réactivation des processus géomorphologiques et à une augmentation de la fourniture sédimentaire ; ils commencent à se manifester sur tous les types de milieux. La désaffection de l'homme pour les travaux traditionnels d'entretien du réseau de drainage, l'insuffisante gestion du vieillissement forestier dans certaines zones sensibles (anciennes zones glissées, proximité des lits torrentiels) en sont la cause principale.

5) Depuis une cinquantaine d'années, le rythme des aménagements des lits fluviaux est beaucoup plus rapide que la durée de la réponse complexe. De ce fait, les impacts directs et indirects se cumulent dans une "synergie d'impacts" (Bravard, 1987). Leurs causes "constituent un faisceau ; elles sont de nature différente, d'ancienneté variable, de localisation géographique précise ou diffuse, mais ont en commun cette particularité de cumuler leurs effets" (Bravard, 1986, p 397). De ce fait, il est souvent impossible d'identifier clairement la part de responsabilité d'un type d'aménagement plutôt que celle d'un autre dans l'évolution de l'hydrosystème fluvial. Ainsi, nous avons pris le parti d'examiner leur incidence sur les flux de matière et d'énergie, afin de dégager des tendances communes. Les combinaisons d'aménagements ont pour effet :

a) d'engendrer une métamorphose fonctionnelle profonde de l'hydrosystème fluvial, dans les limites qu'imposent les constantes du milieu⁶ à l'échelle de temps de l'impact. Par exemple, la régression du tressage et l'apparition de conditions écologiques nouvelles ont conduit à une explosion démographique des populations végétales, à l'origine de l'extension spatiale des corridors de végétation alluviale. Elles sont aussi marquées par des modifications qualitatives affectant les successions végétales : on voit ainsi se développer des séquences biogéographiques d'un degré d'évolution jamais atteint sur les rivières nord-alpines, depuis plusieurs siècles au moins ; apparaissent également de nouveaux types d'assemblages biotiques que l'on peut qualifier d'*innovations* (Pautou, Girel *et al.*, 1996 ; Pautou, Peiry *et al.*, 1997). Elles résultent de la combinaison des caractères écologiques de ce que fut le milieu avant l'impact (le système apparaît ainsi doué d'une mémoire structurelle) et des caractères écologiques acquis du fait de l'impact ;

b) d'engendrer des ruptures conduisant à l'accélération très sensible de l'évolution géomorphologique et écologique des unités fonctionnelles du chenal ou de la plaine d'inondation. Par exemple, il est certain que l'incision des lits fluviaux s'est déjà produite au cours de la période historique notamment au Moyen Age (Peiry, 1986 ; Bravard, 1989 ; Peiry & Bravard, 1989). Ce qui est nouveau, c'est le rythme, la rapidité et parfois même l'intensité⁷ avec laquelle l'incision s'est manifestée. La végétation des zones soumises aux impacts subit, elle aussi, une évolution accélérée. Sur le Drac, par exemple, il a fallu moins de 50 ans pour qu'une forêt de bois durs (frêne et érable, robinier faux-acacia) se développe sur d'anciens chenaux de tressage. Il est frappant de constater que de telles ruptures se manifestent à des échelles temporelles très différentes : alors que l'échelle de temps à laquelle nous percevons l'impact est tout au plus séculaire, Delannoy (1997) relie les étapes karstogéniques successives affectant le Vercors et la Transversale de Ronda (Andalousie), qui se sont déroulées sur une partie du Pliocène et au Pléistocène, à des ruptures fonctionnelles manifestant des changements dans les "*logiques géodynamiques*". Force est donc de conclure que les ruptures et les changements qui leur sont associés sont inhérents à la dynamique des géosystèmes et sont indépendants de l'échelle temporelle à laquelle on les étudie.

6) Cumuls d'impacts et ruptures fonctionnelles conduisent à la "dérive" des hydrosystèmes fluviaux nord alpins. Pautou & Manneville (1995) parlent "d'évolution transitoire", les actions de l'homme étant "responsables d'un déplacement des caractères (du milieu), au fur et à

⁵ Le bassin de l'Isère en constitue une illustration convaincante.

⁶ Géologie, relief, pente générale des cours d'eau qui conditionnent les forces gravitaires et l'intensité de l'énergie transitant dans le système.

⁷ Les nombreux exemples d'abaissement des lignes d'eau dépassant 10 mètres dans les Alpes du Nord, mettant à jour des dépôts qui se sont sédimentés au début de l'Holocène, attestent du caractère particulièrement intense de l'incision contemporaine.

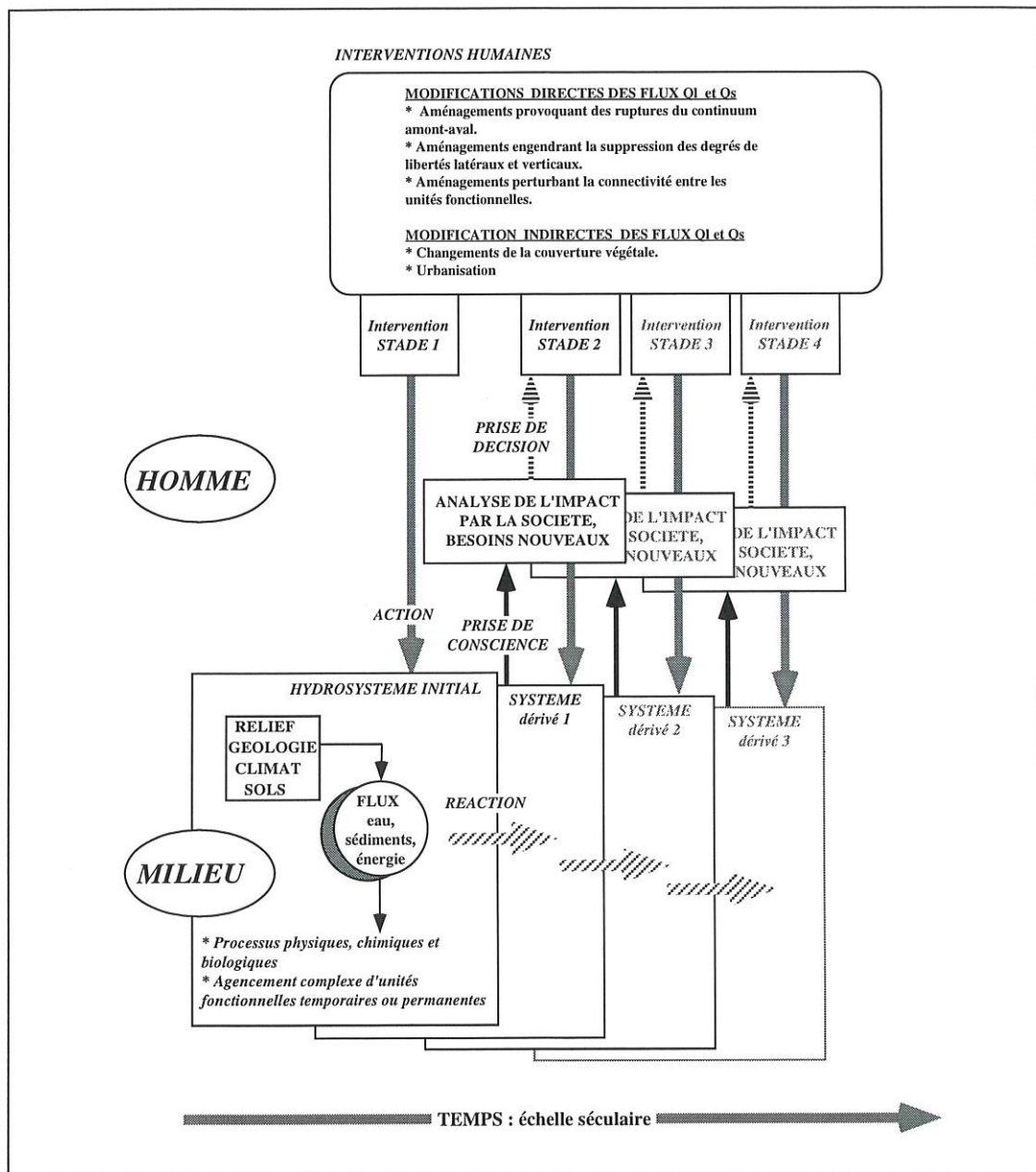


Figure 3.40 - Schématisation de la "dérive" des hydrosystèmes fluviaux, sous l'effet des interventions successives de l'homme.

mesure que l'homme a perfectionné les moyens de contrôle des flux" (p. 139). Nous employons à dessein le terme "dérive" parce que la métamorphose du système se produit par étapes successives dans lesquelles l'homme joue un rôle essentiel, et qu'elle pose le problème de la réversibilité des processus. Très schématiquement (fig. 3.40), la prise de conscience des transformations de l'hydrosystème générées par l'impact impose des décisions de correction conduisant à de nouvelles actions qui perturbent la dynamique des flux de matière et d'énergie ; le système s'adapte une nouvelle fois à ces changements. Le mécanisme conduisant à de nouvelles prises de décision se poursuit si la réponse du milieu continue à être

une gêne pour les riverains. On observe donc que les interventions de l'homme consistent généralement en une succession de corrections visant à atténuer les impacts induits par les aménagements précédents. Cette fuite en avant ne peut en aucune façon être assimilée à une procédure de gestion. Ainsi, il y a une centaine d'années, drainage et colmatage avaient pour objectif de combattre les remontées phréatiques dans les plaines d'inondation provenant de l'exhaussement du chenal entre les digues ; entre 1950 et 1980, les extractions de gravier permirent de régler le problème de la surabondance de la charge dans le chenal en provoquant l'incision ; au cours de la décennie 1980, la construction de

seuils sous-fluviaux contribua très largement à stabiliser les lits en cours d'abaissement rapide ; le déboisement extensif du chenal constituera très probablement l'étape prochaine de la correction de l'impact. Il est déjà pratiqué de longue date dans les lits court-circuités par les ouvrages hydroélectriques (Rhône, Durance) ; des opérations d'essartage sont également engagées depuis deux à trois ans dans les lits du Drac à Grenoble, sur l'Isère dans la Combe de Savoie ainsi que sur l'Arc, zones où le fort développement végétal inquiète les services de l'Etat.

Les notions de cumul d'impacts et de "dérive" conduisent à s'interroger sur le caractère irréversible de l'évolution. À l'échelle de temps géologique, la réversibilité totale des processus fluviaux ne soulève guère de doute. Il en va tout autrement à l'échelle de temps séculaire⁸ : Bravard (1987, p. 400) insiste sur le fait que "dans le domaine géomorphologique, la puissance des solutions techniques conduit à l'irréversibilité des changements". Tout au long de cette étude, nous avons montré qu'un grand nombre de cours d'eau des Alpes du Nord sont tronçonnés en compartiments largement indépendants les uns des autres. Tout retour à un état antérieur nécessiterait simultanément une forte réactivation de la dynamique fluviale, en particulier des processus de recharge sédimentaire, et la reconstitution du *continuum* amont-aval. La réactivation de la dynamique fluviale n'est possible qu'à l'occasion de situations météorologiques exceptionnelles, engendrant de très fortes concentrations d'énergie ou conduisant à des dysfonctionnements brutaux. De nombreuses publications témoignent des conséquences géomorphologiques catastrophiques de certaines crues, généralement d'occurrence très supérieure à la crue centennale ; elles affectent les surfaces végétalisées, réactivent les processus géomorphologiques et détruisent les ouvrages de protection (Tricart, 1960 ; Beaty, 1974 ; Fabre, 1989 ; Cooper, Mason *et al.*, 1990 ; Benech, Brunet *et al.*, 1993). Par contre, la disparition de la segmentation amont-aval nécessiterait un événement d'une exceptionnelle violence ; celui-ci devrait être capable de détruire des ouvrages construits pour résister à des crues décennales, ce qui apparaît hautement improbable. Il n'en demeure pas moins que l'abandon actuellement observé de plusieurs compartiments de l'hydrosystème pourrait, dans un futur proche, abaisser sensiblement les seuils à partir desquels une réactivation géomorphologique liée à un événement extrême est possible ; l'inadaptation de certains lits fluviaux à écouler des crues sans un arrachage et un transport massifs de végétation en constitue un exemple convaincant.

7) La métamorphose contemporaine des rivières des Alpes du Nord incite à s'interroger sur ce que peut être

la qualité physique d'un cours d'eau, dans un contexte de changement accéléré. Pautou, Girel *et al.* (1996, p. 59) insistent sur la nécessité d'aborder la métamorphose fluviale par une analyse des modifications des rapports quantitatifs entre les "sous-systèmes permanents"⁹ et les "sous-systèmes temporaires". Les premiers procèdent du maintien fonctionnel de processus auto-entretenus, ce qui impose la subsistance des mêmes modalités de dissipation de l'énergie cinétique : à court terme, le rajeunissement des formes et des biotopes dans le cadre des migrations d'un chenal de méandrage permet la mise en place de cette catégorie de sous-systèmes ; à moyen terme, ces sous-systèmes sont capables d'une métamorphose comme l'indique par exemple le passage progressif des rivières à lit unique et incisé, au Moyen-Âge, aux rivières à lit tressé et exhausé, lors du Petit Age Glaciaire. Les seconds sont liés à un stade de vie de l'hydrosystème et sont en rapport avec l'émergence de propriétés nouvelles résultant d'un changement des modalités de dissipation de l'énergie cinétique : les parties de la plaine alluviale situées à l'extérieur des digues en constituent un exemple.

Le maintien d'une forte proportion de sous-systèmes permanents témoigne d'une rivière en bonne santé et présentant une bonne qualité physique. Cette dernière est indépendante du degré d'évolution du sous-système permanent : ainsi, de notre point de vue, une rivière tressée où les séquences végétales demeurent à l'état pionnier, du fait d'un fort hydrodynamisme, n'est pas de moins bonne qualité qu'une rivière méandriforme à la dynamique fluviale plus sage, aux biocénoses plus diversifiées et agencées de manière plus complexe (juxtaposition d'unités évoluant sous l'influence de processus allo-gènes ou auto-gènes). La biodiversité devient donc un critère, à lui seul, insuffisant pour évaluer la qualité du milieu. Par contre, du point de vue biogéographique, les sous-systèmes à dynamisme permanent conservent un noyau dur d'espèces hygrophiles ou mésohygrophiles qui font leur spécificité. La baisse de la qualité physique d'un cours d'eau est d'autant plus marquée que les sous-systèmes à dynamisme temporaire gagnent en surface. Elle se produit dans le sens d'une fixation extensive des formes et de leur déconnexion plus ou moins rapide des flux hydriques superficiels et souterrains. Les sous-systèmes temporaires, même s'ils enregistrent un accroissement intermittent ou de plus longue durée de leur biodiversité, vont perdre progressivement leur spécificité avec la régression, voire la disparition des espèces de bois tendres et leur remplacement par une végétation méso-phile, voire mésoxérophile, comme le montre l'exemple du Drac.

Les apports conceptuels issus de l'analyse des mécanismes de l'impact, la mise en évidence des tendances

⁸ ou à l'échelle de temps du gestionnaire.

⁹ Nous préférons employer les termes de "sous-système à dynamisme permanent" et "sous-système à dynamisme temporaire" qui sont, selon nous, plus précis.

générales de la métamorphose des rivières des Alpes du Nord sur un pas de temps d'environ 150 ans, les éléments de réflexion sur ce qu'est la qualité physique des cours d'eau fortement anthropisés sont autant d'éléments permettant d'élaborer des principes généraux pour la gestion des hydrosystèmes fluviaux. Les liaisons amont-aval des différentes unités spatio-temporelles du bassin versant, mais également verticales et transversales résultant de la dynamique des flux de matière et d'énergie imposent d'envisager la gestion par une approche globale. Celle-ci doit permettre de traiter des problèmes locaux, dans le respect des modalités de fonctionnement de l'ensemble du bassin-versant.

Photo 3.15 - ARVE. Développement d'îles boisées dans le lit de l'Arve en aval de Bonneville (Cliché : J.-L. Peiry, 1993).



Photo 3.16 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Développement de la forêt alluviale dans l'ancien chenal tressé ; cette situation contraste avec le faible développement végétal lorsque le tressage était fonctionnel (voir photo 3.4) (Cliché : J.-L. Peiry, 1993).

Photo 3.17 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Physionomie du chenal du Drac après la coupe à blanc de la végétation réalisée au printemps 1997 (Cliché : J.-L. Peiry, 1997).



CHAPITRE 7

IMPACTS ET GESTION DES HYDROSYSTÈMES FLUVIAUX : LA SPÉCIFICITÉ DES COURS D'EAU ALPINS

7.1) Positionnement philosophique

7.2) L'évolution des relations homme-hydrosystème fluvial au cours des 200 dernières années

7.3) De nouvelles alternatives de gestion : l'ingénierie géomorphologique

7.4) Discussion et conclusion

Résumé du chapitre 7

Depuis une décennie environ, par suite de l'incapacité de la société à maîtriser la dérive des hydrosystèmes fluviaux, on assiste à l'émergence d'une conscience environnementale, dont témoigne le concept moral de développement durable. Il en résulte la mise en place progressive de principes de restauration des cours d'eau que les techniques classiques d'ingénierie fluviale sont inaptes à satisfaire, parce que nécessitant une analyse à la fois fine et approfondie des mécanismes géomorphologiques et écologiques. Cela a conduit à la naissance d'un nouveau corps de concepts et de techniques, *l'ingénierie géomorphologique*, dont la finalité est la "*re-création de caractéristiques morphologiques (et écologiques) durables*" (Brookes, 1995). Elle tend à développer des stratégies alternatives à l'échelle du tronçon de rivière et à l'échelle du bassin-versant. Développée jusqu'à une date récente, pour l'essentiel, sur les petites rivières de l'Europe du Nord, l'ingénierie géomorphologique en est à son tout début sur les grands cours d'eau, où elle se pose en des termes très différents. Dans les Alpes du Nord, elle consiste à promouvoir des stratégies visant à traiter les causes des impacts et des dérives environnementales, et non plus uniquement les conséquences. Cela consiste principalement à restaurer les conditions de fonctionnement du chenal, des berges, et à préserver l'intégrité du corridor fluvial ; il s'agit également de favoriser la fourniture et les transits de la charge de fond, tout en œuvrant pour le maintien du *continuum* amont-aval. Plusieurs exemples des possibilités offertes par l'ingénierie géomorphologique pour la gestion des rivières des Alpes du Nord sont présentés, notamment sur l'Arve, l'Isère et le Drac. Ils montrent que des solutions alternatives de gestion existent pour simultanément gérer les rivières au niveau local, comme à l'échelle de l'ensemble du bassin-versant. Cette approche pose le problème de la nécessité d'une *coopération symbiotique* entre l'homme et le milieu, dans le souci du respect des forces régissant les mécanismes environnementaux.

7.1) Positionnement philosophique

L'analyse des modalités complexes de l'impact et de la transformation des hydrosystèmes fluviaux incite à une réflexion plus globale, réflexion qui n'est pas sans jouer un rôle sur la manière d'aborder la gestion des hydrosystèmes fluviaux. A la suite de J.-M. Pelt (1996) s'interrogeant sur le "*sens et la cohérence de l'Univers*", on ne peut qu'être frappé de l'unité du fonctionnement régissant la matière à toutes ses échelles, du macrocosme au microcosme : "*depuis l'origine, le jeu simultané des forces centrifuges et centripètes est en place*" (Pelt, op. cit., p. 15). On l'observe à l'échelle de l'univers où les forces d'expansion contrastent avec les forces de condensation pour engendrer l'agglomération des poussières stellaires et la formation des astres ; on l'observe à l'échelle de notre planète où les "*forces de construction (érection) et de destruction (érosion) sont ici continuellement à l'œuvre*" (Pelt, op. cit., p. 29) ; on l'observe également à l'échelle de notre société "*au sein de laquelle s'exercent les conflits les plus cruels, mais aussi les solidarités les plus émouvantes*" (Pelt, op. cit., p. 101). L'unité dans la dualité, devient unité dans la diversité lorsque l'on observe à quel point chaque corps planétaire de notre système solaire, chaque écosystème de notre planète, chaque homme est une entité unique portant en elle la mémoire de son vécu, tout en étant également façonné par ce vécu. Cette mémoire qui marque la physiologie et témoigne du fonctionnement passé de ces entités, ce sont, par exemple, ces milliers de cratères qui couvrent la lune, comme autant de rides d'un vieil astre buriné par le temps ; ce sont ces couches fossilifères qui servent de référence pour la datation des formations géologiques terrestres ; ce sont ces "*arrangements originaux*" d'espèces végétales témoignant simultanément des modes de fonctionnement anciens et plus récents des écosystèmes de plaine alluviale (Pautou, Girel *et al.*, 1996). Cette mémoire individuelle est également inscrite dans le patrimoine génétique de l'homme, faisant de nous des descendants directs des tailleurs de silex du Néolithique, comme l'actualité scientifique l'a récemment démontré.

L'étude des rivières des Alpes du Nord permet de retrouver ces règles dans le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux. Par exemple, on retrouve la dualité dans les processus de construction/destruction incessants des formes fluviales et des biotopes en relation avec le maintien d'une dynamique fluviale active. La diversité apparaît à de multiples niveaux : *diversité statique ou instantanée* tout d'abord, dans l'agencement complexe et unique des unités fonctionnelles d'un tronçon de rivière,

qui fait que chaque cours d'eau ou portion de cours d'eau est différent d'un autre, bien que soumis aux mêmes types de processus ; *diversité dynamique* ensuite, parce que l'évolution spatio-temporelle des flux de matière et d'énergie, que le changement soit d'origine naturelle ou humaine (ou les deux), induit des réponses qui ne sont jamais parfaitement identiques sur toutes les rivières. A ce propos, on a longuement évoqué le rôle des héritages, cette mémoire des fonctionnements du passé dont témoigne encore aujourd'hui le modelé des plaines alluviales. Très souvent, elle déjoue les prévisions des experts chargés de déterminer les impacts d'un aménagement ; en effet, ceux-ci se fondent sur des modèles¹ qui négligent le caractère unique de chaque cours d'eau au détriment des seuls critères de ressemblance ou de similitude, eux-mêmes établis sur des liens de causalité ou des hypothèses souvent simplistes². A propos de l'effet de serre pour lequel les prévisions des modèles ne semblent pas conformes à l'observation, Leroux (1996, p. 208) écrit avec justesse que les modèles ont pour caractéristique "*d'offrir à la sortie ce qu'ils ont reçu en entrée comme concept théorique*". Ces concepts théoriques reflètent "l'état de l'art" à un instant donné ; il n'y a donc rien de plus dangereux que de les considérer comme étant des postulats immuables. A ce propos, Huggett (1993, p. 181 et suiv.) insiste sur l'extrême prudence indispensable dans toute démarche de modélisation, en particulier sur le niveau conceptuel de développement du modèle, le degré de finesse de la subdivision du domaine spatial étudié et le choix des méthodes mathématiques pour résoudre les équations du système. Il convient d'ajouter que la modélisation nécessite non seulement une très bonne connaissance des processus physiques, mais aussi des spécificités géographiques locales. Cela impose de disposer au préalable d'un *corpus* de mesures reflétant à la fois les disparités spatiales et temporelles (Guigo & Le Berre, 1989), *corpus* qui est relativement rare dans les faits.

Une des autres caractéristiques de l'unité de fonctionnement de la matière est la création permanente de conditions nouvelles. A propos des êtres vivants, Pelt (1996, p. 51) indique que "*les phénomènes additifs, associatifs, coopératifs, symbiotiques, constituent sans nul doute l'un des moteurs de l'évolution créatrice*". On retrouve cette additivité créatrice dans la reproduction : "*la fusion de deux cellules génère un être neuf, doué de propriétés différentes de celles des parents*" (op. cit., p. 62). On la retrouve également dans les mécanismes environnementaux. Par exemple, l'analyse des causes et des mécanismes des changements climatiques montre qu'interfèrent une multitude de paramètres externes ou internes

¹ Modèles physiques, modèles conceptuels, modèles mathématiques

² Notre propos n'est pas ici de faire le procès de la modélisation qui est un outil indispensable, tant pour le chercheur dont elle fait avancer les concepts et méthodes de travail que pour l'aménageur, qu'elle aide dans sa prise de décision. Il s'agit tout au plus d'une incitation à les utiliser avec discernement, c'est-à-dire à reconnaître que la modélisation a des limites qu'il faut se garder de franchir. Dans les faits, on arrive généralement sans trop de peine à régler un modèle pour reconstituer rétrospectivement un événement ou un processus ayant fait l'objet d'une mesure, la démarche prospective conduit, quant à elle, à des résultats qui ne sont bien souvent que le reflet très partiel de la réalité.

ayant chacun des amplitudes et des rythmes qui leur sont propres (Joussaume, 1993 ; Duplessy, 1996 ; Leroux, 1996) : répartition des continents et des reliefs dont l'importance est primordiale dans l'organisation de la circulation atmosphérique et océanique ; triple variation des paramètres orbitaux (cycles de Milankovitch) induisant des changements de l'intensité du rayonnement solaire reçu par la terre ; variations cycliques de l'activité solaire ; volcanisme aperiodique qui opacifie la troposphère et la stratosphère et affecte le bilan radiatif atmosphérique ; activités humaines qui engendrent l'augmentation exponentielle des gaz à effet de serre... La combinaison complexe et évolutive de toutes ces variables conduit à la création permanente de conditions nouvelles, illustrant le principe d'irréversibilité du temps qui est l'une des caractéristiques de l'approche systémique en géographie (Guigo & Davoine, 1995). L'évolution des hydrosystèmes fluviaux est, elle aussi, régie par les interrelations entre divers types de mouvements intervenant à différentes échelles de temps (Pautou, Girel *et al.*, 1996) : des mouvements annuels cycliques relatifs au régime des écoulements superficiels et des nappes phréatiques ; des mouvements de "respiration" des bandes d'activité fluviale par le biais des processus d'érosion, de charriage et de sédimentation (Piégay, 1993 ; Peiry & Vivian, 1994) ; des mouvements lents, de faible intensité mais continus pendant des siècles, voire des millénaires, reliés à la tectonique comme sur la Saône (Bravard, 1990 ; Astrade, 1996) ou à des facteurs dynamiques internes au système, comme le lent transfert amont-aval de la charge alluviale (Bravard, 1994). Les phénomènes d'innovation observés sur les rivières des Alpes du Nord et le Rhône par les géomorphologues et les phytoécologues, auxquels l'homme contribue fortement en accélérant la vitesse d'évolution des systèmes, témoignent de la réalité de cette évolution créatrice.

Face à cette "cohérence de l'Univers" à laquelle les hydrosystèmes fluviaux ne dérogent pas, il convient d'examiner s'il y a adéquation entre les pratiques d'aménagement ou de gestion environnementale et les forces qui régissent les mécanismes environnementaux.

7.2) L'évolution des relations homme-hydrosystème fluvial au cours des 200 dernières années

7.2.1) Surexploitation et dégradation des ressources

Les études paléoenvironnementales l'attestent, c'est lors de l'optimum climatique Atlantique (6000 ans B.P.) que l'on trouve les premiers indices d'une influence de l'homme sur le milieu, notamment sous l'effet des premiers défrichements de grande ampleur qui ont localement pu modifier la dynamique des flux d'énergie et de matière. Au cours des millénaires qui ont suivi, la pres-

sion de l'homme sur le milieu a connu de fortes variations, relatives aux fluctuations de la démographie et au degré d'organisation des sociétés (Josselin, 1995). Dans une large mesure, l'homme était soumis aux contraintes du milieu, plus qu'il était capable de le façonner, en particulier sur des environnements très instables de montagne, où les processus sous la dépendance de l'énergie gravitaire sont particulièrement contraignants. Lors des phases de fort accroissement démographique, la préservation du milieu n'était pas le souci premier des populations locales, la nécessité de survivre l'emportant sur l'intérêt de gérer les ressources afin d'éviter leur épuisement. Une nuance est tout de même à apporter puisque, dès le XVIII^e siècle, une prise de conscience de l'intérêt de préserver la forêt, par exemple, pour se protéger des inondations et des avalanches a débouché sur des mesures concrètes de conservation (Mougin, 1919 ; Piégay, 1995).

La révolution industrielle du XIX^e siècle et les progrès techniques sensibles qui y furent associés n'ont pas modifié cette tendance. L'acquisition de nouvelles technologies donnait pour la première fois à l'homme la possibilité de dompter, au moins partiellement, les éléments physiques (Guigo, Allier *et al.*, 1991) : protéger ses biens des inondations ; gagner de nouvelles terres arables... Cette maîtrise partielle de moyens techniques lourds marqua le début de l'ingénierie fluviale, avec notamment les premiers travaux de correction générale (voir Partie 3, chap. 2). La technique avait peut être fortement progressé, mais subsistait un large déficit de connaissance des processus de fonctionnement des cours d'eau. Il a conduit à des surprises désagréables prenant la forme d'impacts successifs aux effets cumulatifs, imposant la nécessité de s'adapter continuellement à la réponse des hydrosystèmes fluviaux et de corriger les impacts.

La plus grande partie du XX^e siècle fut une période de développement d'aménagements sans soucis d'apprécier et de limiter l'impact, ce qui répond bien à l'esprit positiviste de l'époque. Ce fut ce que l'on pourrait appeler la période de l'ingénierie glorieuse ou triomphante : endiguement, construction de grands barrages à la technologie toujours plus sophistiquée, extraction de matériaux alluvionnaires furent développés sans la conscience de la nécessité de préserver la ressource, ni d'évaluer l'incidence des travaux sur le fonctionnement. A propos de la surexploitation de la ressource alluvionnaire, il est frappant de voir que l'on a commencé à se préoccuper des impacts négatifs qu'elle engendrait à partir du moment où les premiers ponts tombèrent dans les rivières, c'est-à-dire lorsqu'il était déjà bien trop tard. Il semble que le seul objectif des gestionnaires ait été celui de réduire au maximum les contraintes du milieu. On aurait donc souhaité que les rivières n'inondent plus, n'érodent plus, ne déposent plus, soient figées, voire disparaissent même totalement, comme le montrent les opérations de mise

sous dalle de certains cours d'eau en milieu urbain. Les objectifs étaient également de répondre à des besoins de production et de rentabilité économique. Le résultat est une succession d'impacts non maîtrisés, se combinant de manière complexe ; une sorte de fuite en avant où l'on cherche à régler les problèmes au fur et à mesure qu'il se produisent, sans vision globale et sans grand succès non plus, puisque l'impact se manifestera à nouveau ultérieurement sous une forme imprévue.

Depuis quelques années, les choses évoluent lentement. En effet, la société a pris conscience du coût de l'impact et se rend compte que, dans un contexte de crise économique, la nécessité de le corriger fait très largement chuter la rentabilité de certains aménagements. Une série d'événements dramatiques a également montré que la technologie a des limites et que certains événements paroxystiques sont et resteront difficilement maîtrisables. Il en résulte la prise de conscience de négligences graves issues d'un optimisme excessif, qui incitent à des retours en arrière. Par ailleurs, l'évolution sociale fait émerger doucement la conscience de la nécessité de préserver les ressources, le fonctionnement et la diversité des milieux, ceux-ci faisant partie du patrimoine de l'humanité.

7.2.2) L'émergence d'une conscience environnementale : le concept de développement durable et ses implications pour la gestion

La fin du XX^e siècle est marquée par l'émergence d'un nouveau rapport de l'homme à l'environnement, dont témoigne le concept moral de développement durable. Newson (1992) indique que le mot "*durable*" est particulièrement difficile à définir, 61 versions d'une définition tantôt politique, philosophique, économique ou scientifique ayant été recensées. La définition du développement durable la plus communément utilisée est très certainement celle du rapport Brundtland (WCDE, 1987) :

"développement qui satisfait les besoins présents sans compromettre l'aptitude des générations futures à satisfaire leurs propres besoins". A Rio de Janeiro en 1992, lors du "*Sommet de la Terre*" (Conférence des Nations-Unies sur l'Environnement et le Développement), les gouvernements, environnementalistes, experts en développement... provenant de toutes les régions du globe ont considéré les progrès faits dans la voie du développement durable. A la suite de la conférence, ils ont mis en place un plan d'action appelé *Agenda 21* donnant une légitimité au concept ; le développement durable est alors devenu une plate-forme commune à partir desquels des passerelles entre la philosophie, la théorie, la pratique (sciences et arts) peuvent être construites. A propos des zones humides, l'Agenda 21 indique : a) que les ressources en eau doivent être planifiées et gérées de manière globale pour empêcher la pénurie en eau ou la pollution des ressources hydriques relatives à un développement incontrôlé ; b) que la satisfaction des besoins humains et la préservation des écosystèmes doivent constituer des priorités (*in* Gardiner, 1995). Le concept de développement durable pour l'aménagement et la gestion des hydrosystèmes fluviaux n'a pas été spécifiquement défini, mais peut être cerné de manière globale sur la base des éléments suivants (Newson, 1992, p. 281) : a) les usages et développements des ressources doivent être faits à des échelles spatiales et temporelles appropriées, dans le souci de préserver le fonctionnement optimum des bassins fluviaux, à l'image des systèmes naturels ; b) l'impact des développements techniques et des décisions politiques doit faire l'objet d'une évaluation approfondie ; c) l'état originel et développé du système doit faire l'objet d'un suivi scientifique, et l'ensemble des processus affectant le chenal et le bassin-versant doivent être étudiés. Pour Petts et Amoros (1993, p. 257), *"une gestion idéale des cours d'eau impliquerait une utilisation de la ressource sans détérioration du fonctionnement naturel des écosystèmes"*.

Tableau 3.17 - Les "dix commandements" de la durabilité
(d'après Gardiner, 1995)

1	La conservation dans le sens de protection est meilleure que la re-création.
2	Le principe préventif devra être appliqué dans toute décision
3	Le stock de capital environnemental devra être conservé constant ou accru
4	Les usages inévitables et les ressources non renouvelables devront être valorisés avec le meilleur rendement possible
5	Les seuils de capacité environnementale devront être établis (ce qui implique l'identification du capital naturel critique).
6	Les critères prenant en compte la totalité du système (aussi bien que locaux) devront être satisfaits, ce qui implique une approche holistique.
7	Le changement et ses effets devront être aussi localisés que possible.
8	Le changement devra être incrémenté (prévision de l'impact) et enregistré pour permettre une adaptation de la gestion à l'impact.
9	Les zones dégradées qui ne pourront pas être rendues sans difficulté à l'environnement devront être aussi réduites que possible, dans l'intérêt d'un recyclage efficace des ressources.
10	Travailler avec la nature est plus durable qu'essayer de vaincre la nature.

Gardiner (1995) a tenté de préciser le concept de durabilité. Il indique qu'elle est basée sur l'identification des capacités propres des écosystèmes récepteurs, englobant le "*capital naturel critique*" (à protéger absolument) et le "*capital naturel stable*" (qui peut faire l'objet d'une valorisation sous réserve de mesures compensatoires). Le capital naturel consiste en des ressources renouvelables ou non renouvelables qui peuvent être affectées de manière réversible ou irréversible par le développement. La question est de savoir si la perte d'un tel capital peut faire l'objet de *compensations* et si une telle perte est critique pour la qualité de la vie humaine ; là où la perte est estimée critique, la ressource peut être considérée comme étant un *capital naturel critique devant être résolument protégé*. Le problème revient alors à évaluer les *seuils* permettant l'identification d'un capital naturel critique en se fondant sur des critères objectifs, sachant que l'on se trouve en permanence au croisement d'intérêts politiques, économiques et de préservation, et que l'évaluation correcte de l'impact est loin d'être une évidence scientifique³. A titre d'exemple, l'hydrologie des Alpes du Nord est perturbée de manière extensive par les ouvrages hydroélectriques. Sans aucune hésitation, on peut qualifier les écoulements de capital renouvelable. Le problème devient nettement plus ardu lorsque l'on doit évaluer les seuils au delà desquels la modification hydrologique constitue une perte de capital naturel critique. Les travaux de hydrologues indiquent très clairement une atténuation des excès⁴ qui font la spécificité hydrologique du régime alpin (Edouard & Vivian, 1982 et 1984) ; le changement peut être encore plus profond dans le cas des tronçons court-circuités dont les écoulements sont résiduels (Peiry & Vivian, 1994). La détermination des seuils à partir desquels une modification hydrologique entame le *capital naturel critique* relève d'une étude globale de l'hydrosystème ou de la portion d'hydrosystème affectée par le changement hydrologique ; elle doit prendre en compte l'ensemble des interactions entre les différents compartiments, à la fois dans l'espace et dans le temps et à différents niveaux d'échelle imbriqués. La définition idéale d'objectifs de qualité et de quantité requiert donc de lourdes investigations interdisciplinaires qui nécessitent à la fois un savoir-faire plutôt rare et d'importants moyens financiers.

Avec la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau venant rénover et renforcer le dispositif législatif existant, la France s'est dotée d'une réglementation ambitieuse (Sironneau, 1992). Elle donne notamment une portée générale à la protection de l'eau en affirmant dans son article premier que "*L'eau fait partie du patrimoine*

commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général". Cela implique que la préservation des zones humides devient un élément important de la gestion environnementale, les usages et la valorisation économique des ressources devant prendre en compte la sauvegarde du milieu et son éventuelle restauration. La loi a également rendu obligatoire une planification du développement et de la gestion "*d'une certaine portée juridique*" (RMC, 1995) que les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) sont chargés de définir. Le SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée-Corse donne dix orientations fondamentales à la politique de gestion de l'eau. En matière de gestion des milieux physiques, cinq d'entre elles sont plus particulièrement à retenir (RMC, 1995, vol. 1, p. 17 et suiv.) : 1) respecter le fonctionnement naturel des milieux... ; 2) restaurer ou préserver les milieux aquatiques remarquables... ; 3) restaurer d'urgence les milieux particulièrement dégradés... ; 4) penser à la gestion de l'eau en terme d'aménagement du territoire... ; 5) renforcer la gestion locale et concertée... De manière très pragmatique, des axes prioritaires d'action sont identifiés. Ils partent du constat d'une déconnexion croissante des milieux entre eux, de leur banalisation par la perte de leur spécificité originelle⁵, de leur perturbation par des prélèvements excessifs ou des régimes de débits trop artificialisés, ce dont il a été question en détail dans cette étude. De ce fait, les actions prioritaires sont orientées vers : a) le maintien ou le rétablissement des connexions entre les différentes composantes du milieu fluvial, le mitage et le cloisonnement actuel étant très néfastes pour la qualité physique, biologique et l'aspect paysager ; la préservation et le rétablissement des corridors fluviaux (Forman & Godron, 1986) est notamment l'un des aspects retenus (Piégay, 1995) ; b) l'amélioration de la gestion des débits dans les rivières influencées par les ouvrages et les prélèvements d'eau, en tendant vers des objectifs de quantité⁶ et de qualité⁷ ; c) la limitation au maximum des travaux à fort impact, en développant notamment des approches qui intègrent les principes de la dynamique fluviale et en reconnaissant l'intérêt de la préservation de l'espace de liberté (Piégay, Bravard *et al.*, 1994 ; Piégay, Barge *et al.*, 1996).

³ L'exemple des cumuls d'impacts affectant les rivières des Alpes du Nord et de la très grande difficulté que présente leur évaluation précise par les scientifiques illustre parfaitement ces propos.

⁴ Très schématiquement, accroissement des basses eaux hivernales, diminution des hautes eaux estivales.

⁵ A la suite de travaux ou de la métamorphose du système fluvial.

⁶ Définition de valeurs seuils en deçà desquelles les flux sont insuffisants pour permettre la conservation des caractéristiques fonctionnelles du chenal et des milieux annexes.

⁷ Ici ce n'est pas seulement la qualité physico-chimique de l'eau qui est concernée, mais aussi le maintien ou le rétablissement de rythmes hydrologiques plus conformes au régime naturel.

7.3) De nouvelles alternatives de gestion : l'ingénierie géomorphologique

7.3.1) Le développement de la restauration des cours d'eau au cours de la dernière décennie

Comme le diagnostique très justement Newson (1995, p. 414), "la société a toujours requis ses ingénieurs fluviaux pour résoudre des problèmes ponctuels et pour les résoudre rapidement ; occasionnellement un ingénieur chanceux est amené à travailler sur un projet prestigieux généralement ponctuel aussi (comme un barrage hydro-électrique) ou, s'il est extensif, qui tend à remplacer le système naturel par un système artificiel". Les sciences de l'Ingénieur ont fondé leurs modalités d'intervention sur des bases théoriques (mécanique, physique des fluides... débouchant sur des modélisations mathématiques), des simplifications empiriques de la dynamique des rivières ou sur le transfert sur le terrain d'observations hydrauliques faites dans les conditions contrôlées d'un laboratoire (*flume*, modèles physiques). La pratique du géomorphologue est fondamentalement inverse puisqu'il observe à une large échelle et sur un pas de temps long. Il utilise l'approche systémique, concept fondamental pour conserver une ouverture d'esprit maximale face à la très complexe réalité fonctionnelle des milieux. Il a également fait de gros progrès dans l'analyse des processus, en produisant de l'information numérique de base, issue d'une instrumentation et de mesures de terrain. Les nouvelles politiques de gestion globale impliquent la nécessité d'un développement et d'une gestion durable à tous les niveaux d'échelle, du cadre local à l'ensemble du bassin-versant. Répondre à cette nouvelle demande sociale conduit nécessairement à faire se croiser les compétences de l'ingénieur et du géomorphologue, dont la complémentarité est évidente (tab. 3.18).

Depuis environ une décennie, les pratiques d'ingénierie traditionnelle souffrent de manière croissante d'une évaluation négative en raison des impacts difficilement maîtrisables qu'elles induisent sur le cours d'eau et ses annexes. Dans les pays développés, la tendance est actuellement à l'extension progressive de techniques douces de substitution, plus respectueuses du fonctionnement de l'hydrosystème et dont l'intégration dans le paysage est bien meilleure. Par exemple, lorsque cela est possible, on préfère aujourd'hui protéger les berges par des interventions de génie biologique plutôt que de construire des digues en enrochements (Lachat, 1991). Ce type de stratégie, où l'on préfère des structures naturelles à l'ingénierie civile, constitue, cependant, plus un changement dans la forme (dans l'esthétique) que sur le fond. En effet, ce n'est pas parce que l'on remplace des blocs d'enrochements par des géotextiles et du boutura-

Tableau 3.18 - Caractéristiques respectives de l'approche ingénierique et géomorphologique vis-à-vis du problème pratique de la dynamique fluviale (Newson, 1995).

<i>Ingénieur</i>	<i>Géomorphologue</i>
Expérience de projet	Expérience de terrain
Hydraulique	Fourniture sédimentaire, transport
Projets spatio-temporels d'envergure	Expérience spatio-temporelle des changements environnementaux
Spécialiste	Généraliste
Fonctionnelle, statique	Complexe, dynamique
Solutions faisant appel à l'ingénierie civile	Solutions flexibles, composites
Echelle : tronçon de cours d'eau	Echelle : bassin-versant

ge de saules que l'on réduit significativement les impacts des ouvrages, notamment si l'on poursuit l'aménagement anarchique du cours d'eau et que le mitage s'accroît.

Depuis le début des années 1990, la tendance n'est plus seulement au remplacement des pratiques de génie-civil par des techniques plus douces de génie écologique, mais au développement de protocoles de restauration⁸ de tronçons de rivières. Au niveau européen, les efforts de restauration les plus impressionnants ont jusqu'alors porté sur l'amélioration de la qualité de l'eau (Brookes, 1995). Des travaux de restauration de la morphologie du chenal ou de la capacité d'inondation ayant antérieurement fait l'objet d'un aménagement lourd (drainage, contrôle des crues) ont également été exécutés mais sont généralement ponctuels et géographiquement plus restreints (Danemark, Grande-Bretagne...). Si l'on s'intéresse strictement à l'expérience britannique, la restauration géomorphologique, faite à l'initiative de la National Rivers Authority, a jusqu'ici pour l'essentiel concerné de très petites rivières à faible énergie, fortement dégradées par des redressements de cours engendrant l'abandon du chenal de méandrage. La restauration consiste en la "re-création de caractéristiques morphologiques durables" (Brookes, 1995, p. 371), sur des secteurs où les caractéristiques fonctionnelles antérieures peuvent être rétablies sans nuisance pour l'habitat permanent : il s'agit par exemple, de remettre la rivière dans son ancien cours et de recréer la continuité de la ripisylve à partir des espaces où des boisements résiduels subsistent. Cela nécessite d'intervenir sur la géomorphologie du chenal, les travaux pouvant alors consister en des interventions micro-chirurgicales de reconstitution des successions seuil-

⁸ Par restauration, il faut strictement entendre "retour aux conditions originelles" (Gore & Shields Jr., 1995)... ce qui soulève bien évidemment beaucoup de questions lorsque l'on s'est attaché à démontrer que les conditions originelles ont largement changé au cours des derniers siècles et que les conditions de leur maintien (dynamique des flux) n'existent actuellement plus.

mouille. A ce stade de notre réflexion, une évidence s'impose : les petites rivières du nord de l'Europe sont généralement très différentes des grands cours d'eau des Alpes du Nord, et plus largement de celles du bassin du Rhône, tant par leur taille que par les puissances hydrauliques mises en œuvre. Le problème de la restauration des grands cours d'eau se pose donc en des termes très différents.

Les rivières des grandes vallées fluviales peuvent-elles être restaurées ? Dans une récente publication se focalisant sur les grands cours d'eau, (Gore & Shields Jr., 1995) font remarquer que *"la plupart des projets de restauration tentent de réadapter certaines sections choisies de cours d'eau à une structure et une fonction prédéterminée"*. C'est la fonction écologique qui est la plupart du temps privilégiée, les réalisations se focalisant sur l'amélioration des habitats aquatiques et terrestres existants, tant en qualité qu'en quantité (Ebersole, Liss *et al.*, 1997). La revalorisation passe essentiellement par une meilleure gestion des flux d'eau, à travers une restauration des liens hydrologiques entre les lits fluviaux, les zones ripariales et la nappe superficielle. Divers types d'interventions le permettent : 1) des manipulations portant sur le chenal (morphométrie, nature et qualité des substrats et des fonds) ; 2) des manipulations visant à accroître la disponibilité en zones refuges, en particulier pour le poisson (submersion de zones végétalisées, immersion d'objets...) ; 3) l'amélioration des conditions hydrauliques par des ouvrages de génie-civil ou de génie écologique visant à assurer une forte hétérogénéité spatiale et temporelle des champs de vitesse ; 4) le traitement des zones d'eau calme (anciens lits en eau, marais fluviaux...) ; 5) le traitement des zones d'érosion, là où elles affectent la plaine d'inondation et perturbent les zones ripariales ; 6) la diminution des contraintes imposées par la régulation des écoulements (changements des modalités de régulation des débits) de manière à retrouver des conditions hydrologiques (ampleur, fréquence, durée de submersion) adaptées au maintien de certains écosystèmes. Comme on peut le noter à l'énoncé de ces divers types d'interventions, l'amélioration de la gestion des flux de sédiments est très largement absente des travaux de revalorisation des grands cours d'eau, peut-être parce que le dynamisme géomorphologique des rivières sur lesquelles les efforts ont jusqu'alors porté n'est pas leur caractéristique fonctionnelle première. Il n'en est pas de même des rivières alpines, les précédents chapitres s'étant attachés à montrer la forte activité des processus géomorphologiques, tant du point de vue de leur fonctionnement naturel que de la réponse à des changements d'origine humaine. Une réponse différente aux problèmes de gestion des hydrosystèmes fluviaux de grande taille doit ainsi être envisagée, fondée non seulement sur le maintien de conditions hydrologiques

propres à satisfaire un écosystème dépendant de la circulation d'eau, mais aussi sur le maintien d'une activité géomorphologique propre à favoriser le renouvellement des formes et des biotopes.

7.3.2) Ingénierie géomorphologique et gestion des rivières dans les Alpes du Nord

L'ingénierie géomorphologique est une approche récente et très appliquée de la géomorphologie fluviale. Elle tend développer des stratégies alternatives à l'échelle du tronçon de rivière et à l'échelle du bassin-versant (Brookes, 1995). Sur les rivières alpines au potentiel morphodynamique élevé (fortes pentes, régimes hydrologiques contrastés...), les approches d'ingénierie géomorphologiques recèlent une forte spécificité par rapport à ce qui est développé ailleurs, puisqu'il s'agit avant tout de *"gérer les érosions, le transport de la charge de fond et l'écologie sur des bases géomorphologiques"* (Bravard, Landon *et al.*, 1997). A l'échelle du tronçon de cours d'eau, ces stratégies ont pour objectif premier le respect des conditions de fonctionnement du chenal, des berges et le maintien de l'intégrité du corridor fluvial (Piégay, 1995 ; Piégay, Barge *et al.*, 1996) ; à l'échelle du bassin-versant, elles préconisent la préservation de la fourniture sédimentaire de charge de fond et le maintien des conditions amont-aval de transit (Peiry, 1989 ; Bravard, 1991). La nécessité de développer une telle gestion part du constat que dans les zones où la dynamique fluviale est totalement régulées par les travaux, le manque d'instabilité géomorphologique accroît la proportion d'écosystèmes âgés et peu diversifiés, au détriment d'écosystèmes jeunes et diversifiés, régulièrement renouvelés par les processus allogènes (Amoros, Roux *et al.*, 1987 ; Petts, Large *et al.*, 1992). Le principe n'est donc pas de préserver ou de restaurer des écosystèmes en essayant de les maintenir dans un état dont on sait qu'il est temporaire⁹, mais de rétablir des conditions de fonctionnement propres à permettre le maintien actif des processus géomorphologiques et écologiques (Stanford, Ward *et al.*, 1996). En particulier, il s'agit d'intervenir sur les flux d'eau afin de maintenir la connectivité hydrologique latérale (Heiler, Hein *et al.*, 1995), et surtout de gérer les flux de sédiments, en particulier dans un contexte général d'interruption du continuum des transits de charge de fond résultant de la régulation des rivières (Kondolf, 1995).

Dans les Alpes du Nord, plusieurs projets d'aménagement de cours d'eau ayant des objectifs forts différents ont été conçus ou sont actuellement mis en œuvre. Dans la plupart des cas, les objectifs des aménagements sont limités à la restauration d'une fonction de l'hydrosystème (par ex. la capacité d'inondation), ce qui ne règle en rien les problèmes de dérive du système, sous l'effet des

⁹ Ceci est d'autant plus vrai que les rivières alpines sont généralement d'anciennes rivières tressées sur lesquelles la prédominance de processus allogènes conduit à une évolution très rapide des écosystèmes fluviaux (Bravard, Amoros *et al.*, 1986 ; Amoros, Roux *et al.*, 1987).

cumuls d'impacts et les difficultés quotidiennes de gestion qui en découlent. L'objectif de ce paragraphe est de présenter ces projets tels qu'ils sont actuellement définis, en mettant l'accent sur leurs insuffisances vis-à-vis du concept de gestion durable ; pour finalement montrer comment des pratiques d'ingénierie géomorphologique pourraient être susceptibles d'améliorer le fonctionnement du système, sans pour autant altérer la fonction que les gestionnaires souhaitent voir préférentiellement restaurée. Les diverses formes que prennent ou que pourraient prendre les interventions d'ingénierie géomorphologique sont représentées sur la figure de synthèse 3.41/A. Le tableau 3.19 regroupe les différents types de solution d'ingénierie géomorphologique retenues pour chaque étude de cas proposée, le principe de chacune d'entre-elles étant reproduit sur les figures 3.41/B à E.

A) La restauration du profil en long de l'Arve en aval de Bonneville

Sur l'Arve, l'incision profonde et continue du chenal sur près de 60 km de plaine alluviale est sans conteste le problème majeur auquel les gestionnaires sont actuellement confrontés. Elle a été et est toujours à l'origine de graves désordres géomorphologiques entraînant des dégâts aux ouvrages d'art et au digues. Ils ont occasionné de coûteux travaux d'ingénierie civile visant à stabiliser les fonds et les berges (Blanc, Pinteur *et al.*, 1989). Ceux-ci ont principalement consisté en la construction de seuils transversaux contrôlant l'érosion régressive et servant à dissiper l'énergie cinétique par des chutes d'eau et des rapides. Une dizaine de seuils successifs, distants de 2 à 5 km, ont ainsi été construits dans les zones où l'incision était la plus forte. Le profil en long de la rivière a donc été transformé en une série de marches d'escalier entrecoupées de tronçons en pente beaucoup plus faible que par le passé. En dépit de ces ouvrages, et plus de 10 ans après l'interdiction des extractions dans le chenal, l'éro-

sion régressive n'est pas encore totalement maîtrisée et les fondations de certains seuils édifiés au début des années 1980 sont aujourd'hui mises à nu.

Au cours de la période 1970-1985, l'Arve inférieure, localisée en aval de Bonneville a été soumise à une pression anthropique très forte. Elle a pris la forme d'une sur-exploitation de la ressource en gravier, d'abord par dragage dans le chenal, puis par l'ouverture de plusieurs dizaines de casiers d'extraction dans la plaine d'inondation (Peiry, 1989) (fig. 3.42). Toute la zone, dont la mise en valeur est actuellement très faible, a ensuite été abandonnée à la dynamique fluviale pendant plus d'une décennie : dans le cas le plus favorable, les érosions de berge ont localement détruit le cordon alluvial séparant certains plans d'eau de la rivière, ce qui a conduit à d'importants remaniements sédimentaires et à la création d'un nouveau champ d'inondation d'altitude moins élevée que la plaine d'inondation initiale ; dans le pire des cas, les érosions ont conduit à faire pénétrer l'Arve dans un ancien plan d'eau converti en décharge d'ordures ménagères, avec les surprises que l'on imagine pour les riverains localisés sur le cours aval¹⁰. Dans le cadre du Contrat de Rivière Arve, les gestionnaires ont choisi de faire porter leur effort sur la restauration du profil en long et la stabilisation latérale du chenal. Les travaux préconisés par les ingénieurs hydrauliciens consistent à entraver les possibilités de divagation latérale par des épis placés en vis-à-vis et régulièrement espacés, des seuils sous-fluviaux étant chargés de stabiliser le profil en long (fig. 3.41/B haut). Ce choix technique, s'il protège des plans d'eau dont on n'a par ailleurs pas prévu d'affectation future, a pour énorme désavantage de compromettre durablement toute possibilité de réhabilitation du profil en long par la recharge latérale induite par les érosions de berges.

Tableau 3.19 - Synthèse des pratiques envisageables ou en cours d'ingénierie géomorphologique sur quelques rivières alpines ou de montagne

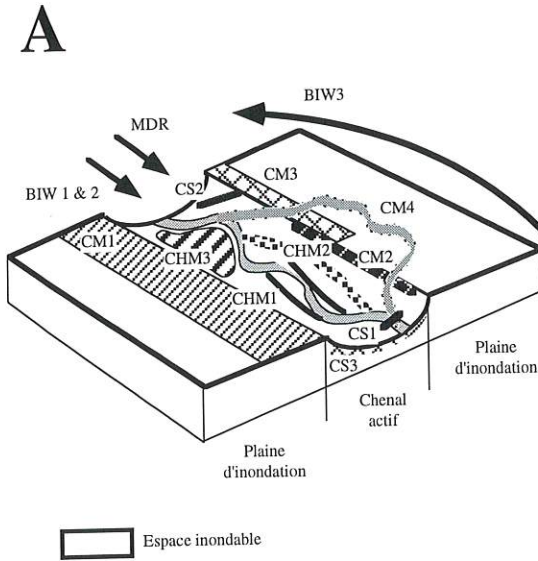
(d'après Bravard, Landon *et al.*, 1997, modifié).

	Structures de chenal			Maintenance du chenal			Gestion du corridor				Gestion de la fourniture sédimentaire			Gestion des débits
	CS1*	CS2	CS3	CHM1	CHM2	CHM3	CM1	CM2	CM3	CM4	BIW1	BIW2	BIW3	MDR
Arve	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Isère	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Drac C.C.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tacon-Flumen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

* voir Codes sur Figure 3.41 ■ oui □ non

¹⁰ En particulier pour les gestionnaires suisses du barrage de Verbois qui ont vu les détritux se sédimenter dans leur réservoir hydroélectrique

**PRINCIPES D'INTERVENTION
D'INGENIERIE GEOMORPHOLOGIQUE**



Modification de la régulation des débits : MDR

Entrée de charge de fond en provenance du bassin versant :
 BIW1 : Action pour restaurer le transit longitudinal
 BIW2 : Action visant à restaurer les apports de petits affluents
 BIW3 : Action visant à remonter les sédiments

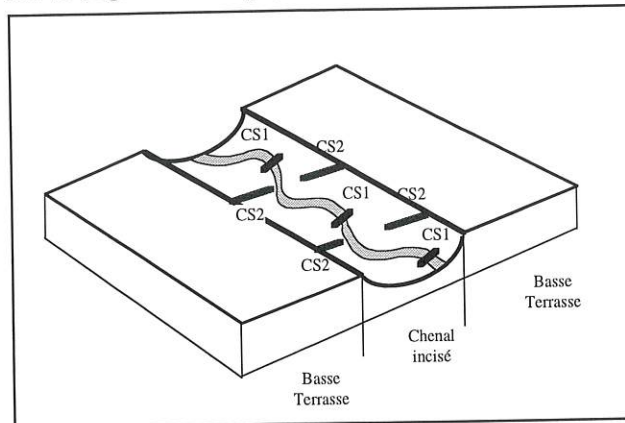
Gestion du corridor dans le but de favoriser les érosions latérales ou la biodiversité biologique :
 CM1 : Préservation (ou restauration) de l'espace de liberté
 CM2 : Suppression de digue
 CM3 : Essartement de la ripisylve (plaine inondable)
 CM4 : Réouverture des anciens lits végétalisés

Gestion du chenal :
 CHM1 : Nettoyage du chenal (sédiments et végétation)
 CHM2 : Ouverture de chenal
 CHM3 : Décapage de banc

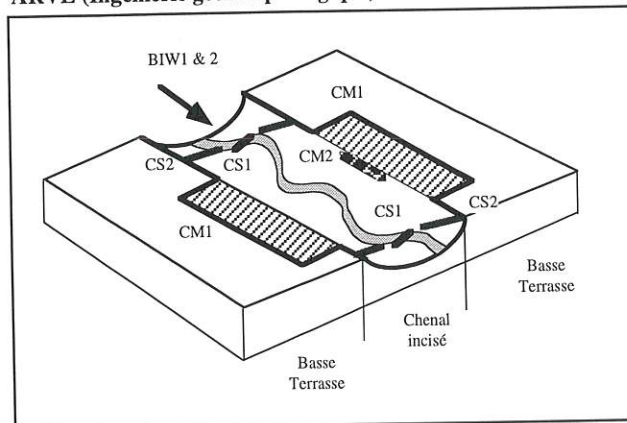
Structures du chenal :
 CS1 : Seuil sous fluvial
 CS2 : Epis
 CS3 : Pavage du fond

ARVE (Ingénierie classique)

B



ARVE (Ingénierie géomorphologique)



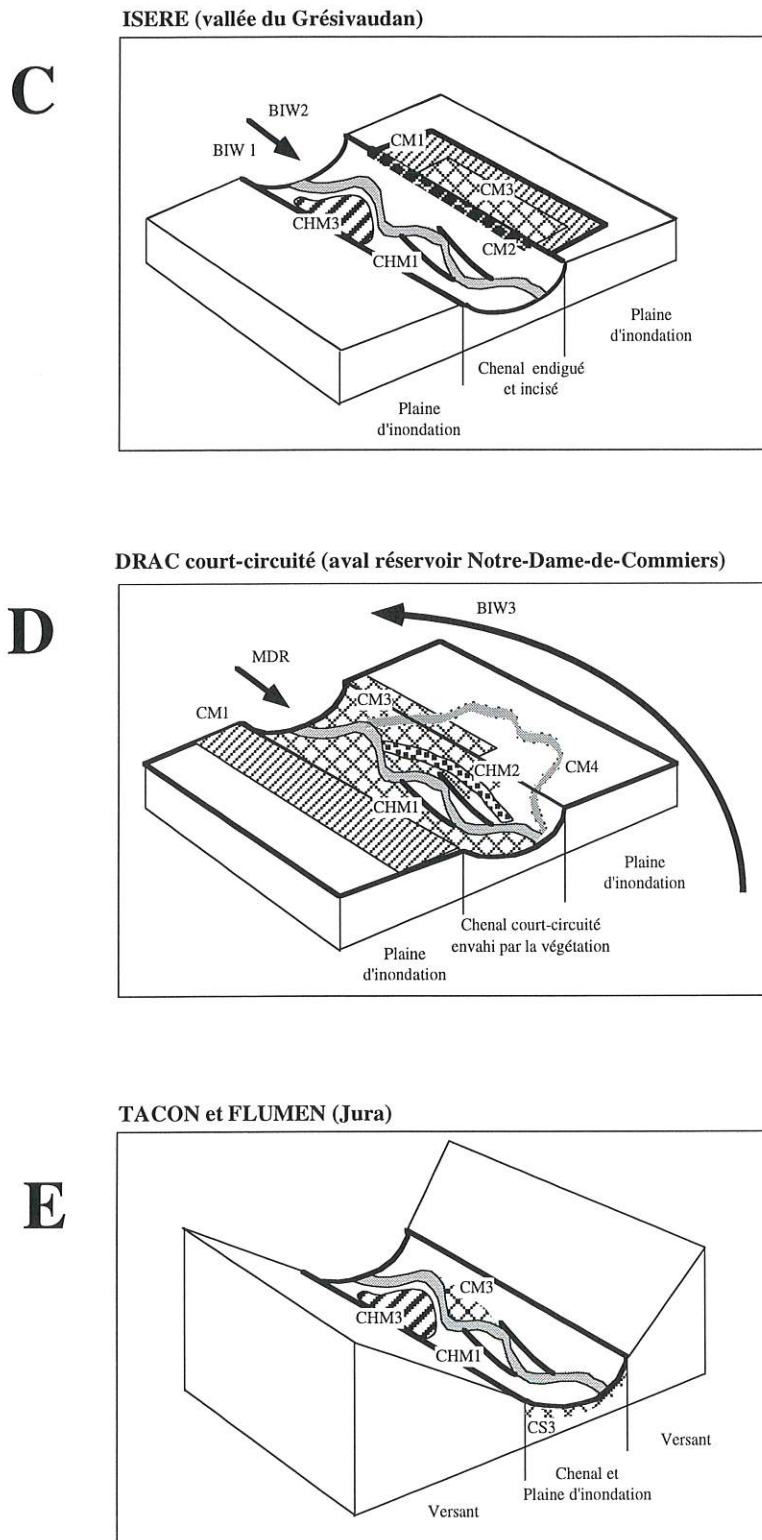


Figure 3.41 - Principes d'ingénierie géomorphologique sur quelques rivières des Alpes du Nord et de montagne
(Source : Bravard, Landon et *al.*, 1997 modifié).

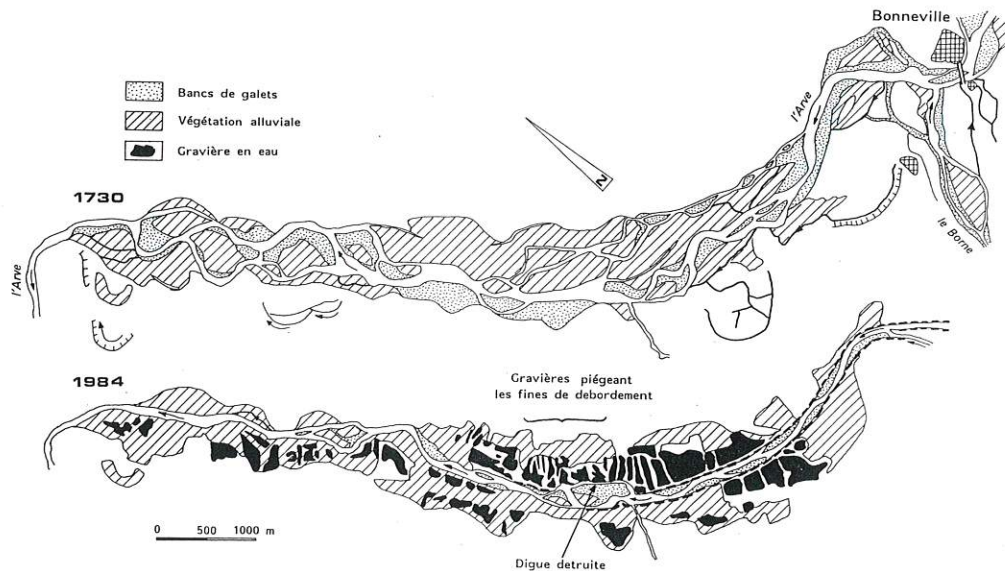


Figure 3.42 - La basse vallée de l'Arve en aval de Bonneville. Au tressage actif de 1730 s'est substitué une rivière à lit unique bordée de très nombreuses gravières en eau, provoquant le mitage du corridor végétal (Peiry & Bravard, 1989).

Le principe général d'une *solution alternative* aurait pu être de préserver un *espace de liberté* pour la rivière (fig. 3.41/B bas, CM1), y compris en détruisant quelques ouvrages de protection non indispensables (CM2). Il aurait alors suffi d'édifier un nombre très limité de points de contrôle verticaux (CS1) et latéraux (CS2), là où ils sont strictement indispensables vis-à-vis des contraintes locales. La libre évolution de la rivière dans son espace de liberté aurait permis la fourniture locale d'un volume important de charge de fond au chenal, variable clé pour le contrôle des processus d'abaissement du lit. La dynamique fluviale se serait chargée de redistribuer spatialement les graviers arrachés aux berges. Cette recharge locale aurait complété les apports amont provenant d'actions entreprises à l'échelle du bassin-versant et visant à restaurer le transit longitudinal (BIW1). L'ouverture de certains plans d'eau par les érosions latérales aurait permis de réintroduire dans l'hydrosystème actif des espaces qui n'y sont plus connectés que par l'intermédiaire des flux d'eau souterraine. Elle aurait pu également favoriser les processus écologiques d'édification d'une nouvelle plaine d'inondation interne au système de terrasses issu de l'incision (atterrissement, séquences végétales pionnières...), très intéressante du point de vue de la qualité physique du milieu ; cette plaine d'inondation aurait également un intérêt vis-à-vis de l'écêtement des crues et de la protection des zones densément urbanisées localisées en aval (agglomération annemassienne

et genevoise). On voit ainsi que des principes généraux simples permettraient de redonner à l'espace fluvial une vocation qui ne soit plus purement locale, mais intéresse une large portion d'hydrosystème. Le point fort de l'Arve en aval de Bonneville est que l'espace fluvial est actuellement très largement sous valorisé et qu'une telle politique ne se heurterait pas à des contraintes d'aménagement irrémédiables¹¹.

B) La re-création d'une zone inondable le long de l'Isère dans le Grésivaudan par l'ouverture de casiers d'inondation

L'endiguement longitudinal insubmersible du chenal de l'Isère dans le Grésivaudan, auquel il faut associer l'incision de la décennie 1970 d'environ 3 mètres, sous l'effet principalement des extractions de matériaux alluvionnaires, a très largement réduit les potentialités de débordement du cours d'eau et accéléré l'écoulement des crues (Peiry, Salvador *et al.*, 1994 ; Pupier, 1996) (fig. 3.43). Dans le souci d'améliorer la protection de l'agglomération contre les crues de l'Isère, l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche a cherché à diminuer le débit d'une crue bicentennale à Grenoble en rétablissant partiellement la capacité d'inondation de la plaine alluviale, de manière à réduire le débit de 1535 à 1428 $m^3 \cdot s^{-1}$ (-7,5 %) (CSCB RMC, 1994). Une série de casiers d'épandage latéraux localisés dans la vallée du

¹¹ Cela n'empêche pas que certains intérêts particuliers soient forts, par exemple vis-à-vis du remblaiement des anciennes gravières par des matériaux de construction. Cette activité, très largement développée dans la zone frontalière franco-suisse, a conduit au remblaiement très excessif sur l'Arve dans la plaine d'Etrembières (Peiry, 1988).

Grésivaudan et dans les boucles de l'Isère est prévue (tab. 3.20) ; actuellement, ce champ d'inondation est fonctionnel uniquement pour les crues rares. Il s'agira d'optimiser leur remplissage pour l'écrêtement de la crue bicentennale, par réglage d'un déversoir sur digue, associé si nécessaire à un seuil sous-fluvial rehaussant les lignes d'eau et stabilisant le lit. En complément de l'écrêtement des crues, des travaux de recalibrage du chenal et de stabilisation des berges seront exécutés à l'amont immédiat de la ville de Grenoble. Ils consisteront essentiellement à araser des hauts fonds, à élargir le lit en éliminant certaines îles végétalisées, et à corriger certains coudes mal calibrés. Comme sur l'Arve, il apparaît que les travaux préconisés dans ce projet constituent seulement "une lutte très ciblée contre l'inondation urbaine résultant de la mise en œuvre d'une étude hydraulique et pas un aménagement de rivière" (CSCB RMC, 1994). Aucun volet de l'étude n'est consacré à l'amélioration de la gestion de l'espace, et en particulier au problème de la

végétalisation des îles de l'Isère et du transit de la charge de fond (voir la Partie 2 de cette étude).

Les études géomorphologiques et phytoécologiques en cours sur l'Isère ont montré qu'outre quelques problèmes d'ajustement du profil en long (basculement des lignes d'eau en aval de la restitution du Cheylas), le principal impact dont les gestionnaires seront amenés à se préoccuper dans les années à venir est la fixation des formes du chenal et leur végétalisation accélérée. Les îles végétalisées semblent capables de résister sans érosion majeure à des crues de faible à moyenne importance ($\approx Q_{20 \text{ ans}}$?). En l'état actuel de nos connaissances, il apparaît que la très forte réduction des transits de charge de fond est l'un des facteurs principaux de cette phytostabilisation. Les gestionnaires vont tôt ou tard être amenés à s'interroger sur le moyen de gérer ce problème, en raison du risque d'embâcle majeur que la présence de grands arbres dans le chenal crée en cas d'épisode hydrologique

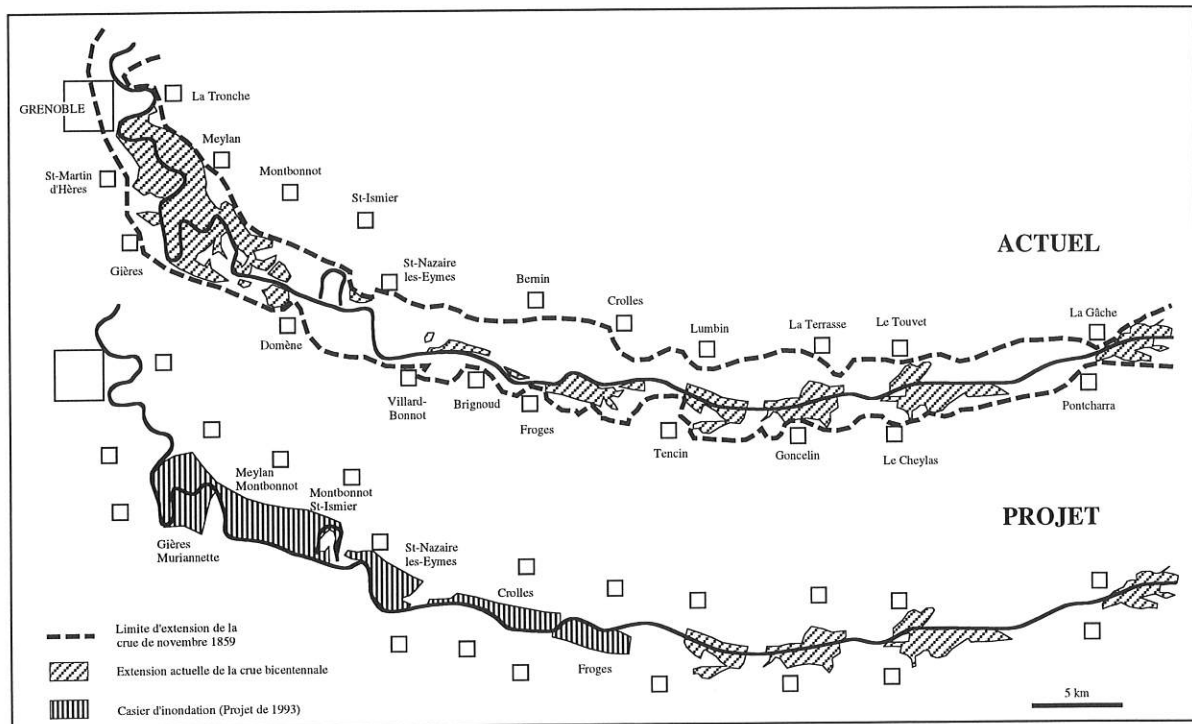


Figure 3.43 - Projet de protection de Grenoble contre la crue bicentennale et conséquences sur l'expansion de l'inondation. Le champ d'inondation de référence est celui de la crue de novembre 1859. La réduction de la zone inondable témoigne de l'impact de l'endiguement et de l'incision du chenal
(d'après des documents de l'A.D. Isère, Drac, Romanche).

Tableau 3.20 - Volumes stockés et gains de débit par rapport à la situation actuelle (1992) compte-tenu des apports et des écrêtements successifs des casiers
(Source : Etude hydraulique SOGREAH, 1993).

Amont							Aval
La Pierre	Brignoud	La Bâtie	Montbonnot St-Ismier	Meylan Montbonnot	Murianette	La Taillat	Total
2,5 Mm ³	1,5 Mm ³	2,25 Mm ³	2,6 Mm ³	2,46 Mm ³	1,55 Mm ³	1,86 Mm ³	14,42 Mm ³
77 m ³ .s ⁻¹	153 m ³ .s ⁻¹	234 m ³ .s ⁻¹	250 m ³ .s ⁻¹	120 m ³ .s ⁻¹	120 m ³ .s ⁻¹	132 m ³ .s ⁻¹	-

extrême. Un des traitements possibles serait l'essartage périodique des îles ; son coût est cependant non négligeable (5.000 à 10.000 frs/ha dans la phase d'entretien périodique) d'autant plus qu'il sera nécessaire d'intervenir de manière répétée.

Une alternative répondant à la nécessité de mise en œuvre d'une gestion durable, sans pour autant que la nécessité de préserver Grenoble des inondations soit remise en cause, pourrait consister à favoriser le transits des flux sédimentaires dans le chenal, de manière à rétablir la migration fréquente des formes fluviales et prévenir leur végétalisation (fig. 3.41/C). Le continuum de la fourniture sédimentaire étant très largement interrompu dans la vallée du Grésivaudan¹², l'objectif serait de promouvoir la recharge axiale (BIW1) et latérale par les affluents locaux (BIW2). En complément de ces mesures, il s'agirait de procéder à des ouvertures localisées de digues (CM2) sur des sites où les contraintes anthropiques sont faibles. Une ouverture des digues, en augmentant la largeur potentielle de la bande active (CM1), favoriserait la diminution des vitesses et le dépôt de la charge de fond, et pourrait renforcer l'érosion latérale. L'intérêt du rétablissement des érosions de berge et d'un déplacement latéral modéré du chenal est multiple : a) il permettrait de favoriser la biodiversité en assurant la pérennité des processus de construction/destruction des formes fluviales ; b) il assurerait la fourniture de charge de fond au chenal, celle-ci étant actuellement tellement déficitaire que les transits longitudinaux sont insuffisants pour que les bancs migrent vers l'aval. Par ailleurs, les études de terrain montrent que le rétablissement du transit axial est fondamental pour prévenir la végétalisation des bancs et la formation d'îles. En effet, actuellement, les seuls secteurs où les îles végétalisées sont soumises à des processus d'érosion/destruction coïncident avec des zones où des transits de charge de fond subsistent¹³ ; œuvrer pour le rétablissement d'un transit longitudinal de la charge de fond pourrait donc être une alternative à l'essartage périodique des bancs, dont le coût économique s'avèrera très certainement être une contrainte majeure pour les gestionnaires au cours des prochaines années.

C) L'essartage du chenal du Drac court-circuité en aval de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers

La crue du Drac des 8-9 octobre 1993 (525 m³.s⁻¹) qui s'est écoulée dans le Drac court-circuité de Notre-Dame-de-Commiers (Peiry & Vivian, 1994) et les dégâts occasionnés à la forêt alluviale lors de cet épisode (voir ce volume) ont fait prendre conscience aux gestionnaires du

risque que fait courir le développement d'une dense forêt alluviale dans un chenal susceptible d'avoir à évacuer des débits dépassant 1500 m³.s⁻¹. A l'initiative d'Electricité de France, concessionnaire de la section court-circuitée, et sous la pression du Préfet de l'Isère, des Services Départementaux de l'Équipement et de l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche, une procédure d'essartage du chenal du Drac entre le barrage et le confluent Drac-Romanche a été lancée ; elle a donné lieu à une étude d'impact réalisée au cours de l'automne et de l'hiver 1996-97. Des travaux d'urgence ont été réalisés dès le printemps 1997. Les études d'hydraulique ayant montré que la presque totalité de la largeur de la vallée était soumise à des conditions de fort hydrodynamisme à l'occasion de la crue de référence (Q_{200 ans} = 1800 m³.s⁻¹), l'essartage a porté sur l'ensemble des espaces occupés par la bande d'activité fluviale avant l'édification du barrage. Un nombre limité d'espaces particulièrement sensibles du point de vue écologique a été préservé, là où leur présence n'aggravait pas le risque de déstabilisation de la végétation, en cas de crue majeure dans le Drac court-circuité. L'étude d'impact a porté exclusivement sur les modalités de désouchage et d'essartage, ainsi que sur la gestion future de la végétation dans la section court-circuitée. Les études géomorphologiques réalisées à cette occasion ont pourtant révélé que la végétalisation n'était pas le seul problème à gérer : en effet, les crues récentes sont à l'origine d'un processus d'incision et de chenalisation à l'aval du barrage. Ce phénomène, très classique à l'aval des ouvrages hydroélectriques (Petts, 1984 ; Williams & Wolman, 1984 ; Peiry, Girel *et al.*, 1997), peut être relié à l'absence de transit de la charge alluviale, la chaîne des barrages du Drac empêchant tout passage de la charge de fond. Le processus de dégradation du chenal a été particulièrement lent à se mettre en place dans la section court-circuitée, en raison de l'absence de crue pendant les 30 premières années de fonctionnement du barrage (1963-1993) ; le processus semble s'être sensiblement accéléré depuis cette date, avec l'augmentation de la fréquence d'écoulement des flux morphogènes (20 à 50 cm d'incision en amont du pont de la Rivoire).

En l'état actuel, l'élaboration d'une procédure de gestion du Drac court-circuité a exclusivement porté sur le risque de déstabilisation massif de la végétation alluviale lors d'une crue rare, mais absolument pas sur la gestion courante de la zone. Les gestionnaires ont fait le choix du traitement exclusif de l'une des conséquences de l'aménagement, mais non de l'ensemble d'entre-elles et encore moins des causes de l'évolution actuelle. Par ailleurs, ils se sont contentés d'une analyse statique, alors que le problème aurait dû être examiné de manière dynamique :

¹² Les principaux facteurs de ces transits discontinus sont l'importante modification du régime dans la Combe de Savoie, les seuils sous-fluviaux, l'endiguement longitudinal ancien qui empêche la recharge latérale...

¹³ C'est notamment le cas en aval de la restitution du Cheylas où les ajustements du profil en long consécutifs à la mise en service de l'usine hydroélectrique (1980) provoquent la migration longitudinale de charge de fond. Une problématique d'étude fondamentale pour l'avenir pourrait être de quantifier quel volume minimum de graviers doit transiter pour qu'un processus extensif de destruction des îles se mette en place et que la mobilité des bancs de gravier soit assurée.

les signes avant-coureurs d'une concentration et d'une incision des écoulements laissent augurer des changements majeurs de la dynamique du Drac court-circuité dans les prochaines années ; ces observations, insuffisamment prises en compte actuellement, incitent à se questionner sur l'intérêt d'un plan de gestion de la végétation alluviale par des moyens mécaniques uniquement, alors que la métamorphose géomorphologique en cours est susceptible de remettre rapidement en question les modalités de gestion préconisées. S'interroger sur les causes du développement de la végétation aurait conduit à remarquer qu'il traduit une diminution profonde des contraintes hydrodynamiques, provenant de la très forte altération des flux d'eau (débit résiduel de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant une grande partie de l'année) et de l'insuffisante fréquence des épisodes morphogènes (transports solides et remaniements des formes de chenal). Le processus de concentration et d'incision du chenal actuellement observé témoigne, quant à lui, de l'absence d'alimentation de la section court-circuitée en charge de fond (blocage par les barrages) ; il indique aussi que la végétation poussant dans l'ancien chenal stabilise les formes et les empêche, pour une large part, de contribuer aux transports solides lorsque transitent des lâchers susceptibles de remanier les fonds (biostabilisation des formes du chenal) (Peiry & Vivian, 1994).

Le principe d'une gestion globale du Drac court-circuité par des propositions d'ingénierie géomorphologique existe (fig. 3.41/D). Gestion globale signifie qu'il s'agirait dans un projet unique de tenter : 1) de régler le risque de débâcle végétale catastrophique en cas de crue rare ; 2) d'enrayer ou de ralentir le dynamisme de la végétation ; 3) de maîtriser le mécanisme de dégradation du chenal ; 4) d'améliorer la gestion des débits de manière à assurer la pérennité des écoulements jusqu'à la Romanche, en période de débit réservé. L'opération est rendue difficile du fait de la nécessité de gérer des éléments contradictoires. En effet, la végétalisation du chenal est liée à la trop faible fréquence d'événements morphogènes susceptibles de mouvoir les galets et d'entraîner l'érosion des formations végétales pionnières ; *a contrario*, dans un contexte de pénurie de fourniture de charge de fond en provenance de l'amont, la dégradation du chenal (incision et chenalisation) serait accélérée par une augmentation de la fréquence des écoulements d'eau claire¹⁴. La déforestation de la bande active de tressage avec désouchage des arbres est une nécessité vis-à-vis de la protection de Grenoble contre le risque d'inondation (fig. 3.41/D, CM3). La réflexion doit porter sur le moyen d'enrayer ou en tout cas de ralentir l'invasion du chenal par la forêt alluviale, en utilisant la force de l'eau plutôt que des interventions mécaniques. Une possibilité serait de modifier la régulation des débits (MDR) de

manière à restaurer des épisodes de transports solides suffisamment fréquents pour remanier les formes fluviales de manière extensive. Avant la mise en service du barrage, des débits moyens journaliers supérieurs à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se produisaient en moyenne une fois tous les 3 ans (voir fig. 3.23) ; l'équipement du barrage de Monteynard permettant de turbiner un débit de $338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, des lâchers substantiels pourraient avoir lieu sans perte importante de production hydroélectrique sur cet ouvrage. L'augmentation de la fréquence des transports solides ne peut que conduire à une accélération du processus d'incision, les matériaux mis en mouvement n'étant pas remplacés du fait de la présence du barrage. Celle-ci pourrait être ralentie de trois manières : a) en favorisant la dispersion de l'énergie cinétique sur toute la largeur de la bande active par la réouverture des anciens bras de tressage (CHM1, CHM2), ce qui rendrait possible l'exploitation par l'érosion fluviale d'une volumineuse réserve alluvionnaire ; b) en laissant la bande d'activité fluviale (CM1, CM4) libre de se déplacer dans la plaine d'inondation, afin de permettre l'érosion du stock alluvial. Cela nécessite de laisser les berges libres de toute protection, sauf là où la protection de biens impose leur présence, et de détruire les ouvrages existants lorsque leur maintien ne présente pas d'intérêt majeur ; c) éventuellement, en remontant mécaniquement une partie de la charge de fond sous le barrage (BIW3), comme cela est fait depuis plusieurs années sur le Rhin, et comme cela est prévu sur la Drôme aval et le Rhône court-circuité de Chautagne (Klingeman, Bravard *et al.*, 1994 ; Klingeman, Bravard *et al.*, 1996 ; Bravard, Landon *et al.*, 1997). Le site du Drac court-circuité se prête très bien à ce dernier type d'intervention puisque de profondes souilles d'extraction localisées en amont du Pont de la Rivoire bloquent la totalité des transits de charge de fond se produisant sur la section amont. Des prélèvements faits dans cette zone pourraient ainsi permettre de recycler la charge de fond du Drac, afin de favoriser l'auto-entretien des processus de rajeunissement géomorphologique et écologique.

D) Les principes de gestion du chenal du Tacon et du Flumen (PNR du Haut-Jura)

Le cas du Tacon et du Flumen, deux affluents montagnards de la rivière Bienne dans le Jura français, a été évoqué dans la première partie de cette étude (voir P1, § 3.3). Les deux rivières ont connu de fortes crues, en 1978 et 1983, qui ont entraîné des débordements et la submersion des bas quartiers de la ville de Saint-Claude sous près de 1,50 mètre d'eau. Lors de ces crues, les transports solides et les exhaussements du lit ont été perçus comme étant à l'origine des débordements, sans pour autant que des preuves formelles soient fournies. Pour traiter le problème et à la suite de plusieurs études, les gestionnaires

¹⁴ Rappelons que la faible incision actuellement observée sur le Drac court-circuité tient à la rareté des déversements au cours de la période 1963-1993. Les quelques crues qui se sont produites depuis 1963 (3 événements dont le débit moyen journalier fut supérieur à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1979, 1993 et 1995 ; voir fig. 3.23) ont suffi à engendrer ce changement géomorphologique.

ont décidé de mener une double action d'ingénierie : 1) empêcher les érosions et la recharge en sédiments le long des cours d'eau par des actions de stabilisation du lit et des berges ; 2) limiter les transits de matériaux estimés à 20-25.000 m³.an⁻¹ en les bloquant en amont de la ville dans un piège à gravier. Les versants en forte pente du Tacon et du Flumen sont principalement localisés dans la moraine, dont le faciès varie localement de l'argile compacte dépourvue de blocs à des dépôts de graviers, galets lavés, voire même des blocs. Dans les coudes de la rivière principalement, ces versants sont soumis à des processus de glissement, de ravinement ou de sapement qui fournissent d'importantes quantités de matériaux au chenal (voir Partie 1, fig. 1.21 et 1.22). Les études réalisées par les ingénieurs entre 1984 et 1992 ont conclu que l'incision du lit fluvial dans les dépôts morainiques était à l'origine de l'instabilité des versants par suppression de la butée de pied des glissements ; elles préconisaient des travaux d'ingénierie lourde dont la construction de 36 seuils transversaux avec passes à poissons pour empêcher le lit de s'abaisser, la protection des berges les plus exposées par des gabions et la création de deux pièges à sédiments en amont de la ville, d'une capacité totale de 23.000 m³. Le coût des travaux était estimé à 14,2 millions de francs.

Dans le cadre d'un programme de gestion de la Bienne et de ses affluents, entrepris par le Parc Naturel Régional du Haut-Jura et diverses administrations, il a été demandé à ce que les interventions jugées prioritaires privilégient des techniques douces plus respectueuses de l'en-

vironnement. Une étude morphodynamique a été réalisée de manière à compléter la connaissance du fonctionnement global des affluents de la Bienne (Bravard & Peiry, 1994). Elle a confirmé que le chenal s'incisait dans la concavité des sinuosités et que cette attaque fragilisait les versants. Elle a aussi montré que l'érosion est très active le long des versants qui fournissent des argiles compactes, le recul de la berge permettant au chenal de s'établir directement sur des matériaux fins très affouillables. L'étude de la géomorphologie du chenal a permis d'observer de manière quasi-systématique que la concentration de l'énergie dans les concavités était liée à un défaut d'entretien du chenal : l'obstruction de chenaux de crue par les embâcles de bois, le développement de végétation dans le lit, en particulier près de la berge convexe, ont été les processus les plus fréquemment mis en cause lors de l'expertise géomorphologique. Parfois, ce sont des travaux mal réalisés qui ont renforcé l'incision et les attaques de versant, notamment lorsqu'ils ont conduit à la destruction du pavage de blocs protégeant le fond du chenal.

Le principe général des mesures de correction proposées était d'adapter les interventions à chaque cas à traiter en prenant simultanément en compte le fonctionnement du versant instable et la dynamique du chenal (fig. 3.41/E). L'utilisation des matériaux disponibles sur place ou au voisinage immédiat du site a également été préconisée. *La première série d'actions* recommandées avait pour but d'améliorer la dissipation de l'énergie en période de crue : 1) en réactivant les chenaux de crues obstrués par la suppression des embâcles ou des dépôts de matériaux

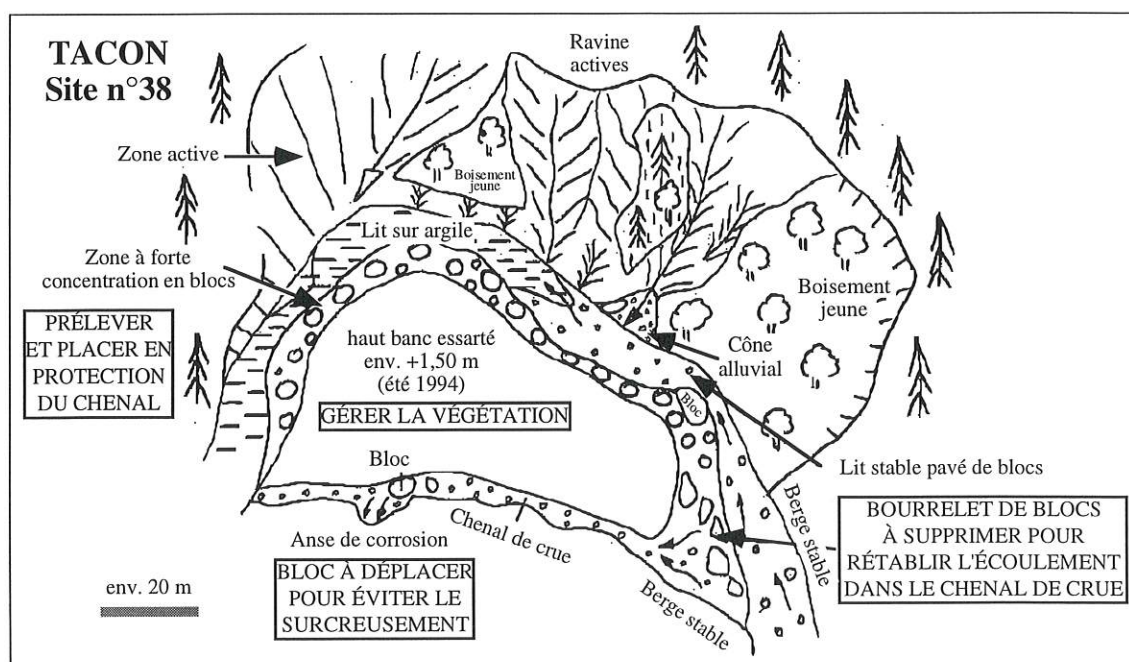


Figure 3.44 - Traitement des problèmes d'érosion en ingénierie fluviale sur le Tacon (PNR du Haut-Jura) (Source : Bravard & Peiry, 1994).

qui les encombrant (CHM1) ; 2) en supprimant des lambeaux de terrasses localisés dans les convexités de manière à élargir le chenal (CHM3) ; 3) en coupant des îlots de végétation qui dirigent les courants principaux contre le versant fragile (CHM1) ; 4) en essartant la végétation occupant la berge, car elle accroît la rugosité et perturbe la dynamique des écoulements (CM3). *La deuxième série d'actions* visait à empêcher l'incision du talweg en reconstituant le pavage ou renforçant les seuils naturels qui tiennent le profil en long par l'utilisation des blocs ne participant plus à la stabilité du chenal¹⁵. *La dernière série d'actions* proposée cherchait à limiter la migration latérale du lit en protégeant les berges les plus fragiles par des cordons de blocs ou des palissades de bois, et en stabilisant les versants par des travaux de génie-biologique. Les interventions les plus urgentes ont été réalisées au cours de l'été et de l'automne 1995, selon les recommandations établies sur des croquis géomorphologiques spécifiques à chaque site à traiter (fig. 3.44). Jusqu'à aujourd'hui, les travaux exécutés semblent donner entièrement satisfaction aux gestionnaires du PNR du Haut-Jura.

7.4) Discussion et conclusion

Au tout début de ce chapitre sur la gestion des cours d'eau, le problème de l'adéquation entre les pratiques d'aménagement ou de gestion environnementale et les forces qui régissent les mécanismes environnementaux était posé. Sur des espaces très proches, ces forces associent en permanence des processus de construction et de destruction, de flux et de reflux ; elles assurent une diversité fonctionnelle à tous les niveaux hiérarchiques ; elles participent à la création permanente de conditions nouvelles, auxquelles l'homme contribue largement par ses diverses interventions. On retrouve ces caractéristiques dans la notion d'écocomplexe (Blandin & Lamotte, 1988). L'écocomplexe, ensemble d'éléments ou sous-systèmes écologiques fortement connectés les uns aux autres, est régi par des "*liens de solidarité vigoureux*" entre les différents sous-systèmes, les liaisons de dépendance impliquant que "*toute intervention sur l'un d'entre-eux a des effets immédiats ou à plus longue échéance sur les autres*" (Pautou & Manneville, 1995, p. 6). Ces changements peuvent être occasionnés par des interventions sur le milieu, support de la vie, mais aussi par des modifications portant sur les êtres vivants eux-mêmes : par exemple, l'arrêt du pâturage d'un marais conduit à une transformation rapide de la couverture végétale. Cela impose d'examiner les différents sous-systèmes dans leur globalité, milieu et êtres vivants étant analysés à travers leurs interrelations, les liens de causalité étant souvent indirects et complexes. Gérer l'éco-

complexe, c'est avoir une approche globale synthétique qui prenne en compte les dimensions spatiales et temporelles. L'homme et ses activités sont partie intégrante de l'écocomplexe. Mettre en place une gestion obéissant aux exigences d'un développement durable (voir tableau 3.17) impose le maintien d'un équilibre, d'une association mutuellement avantageuse pour chacune des composantes de l'écocomplexe.

La synthèse sur la métamorphose des cours d'eau des Alpes du Nord révèle avec force que depuis 150 ans, le lien entre l'homme et l'hydrosystème fluvial témoigne plus d'une relation agresseur/agressé que d'un souci de coopération symbiotique. Elle montre également que la gestion du milieu n'a jusqu'alors jamais respecté les forces qui régissent les mécanismes environnementaux. Les sociétés ont de tout temps cherché à se dégager des contraintes du milieu (quand elles ne les ont pas purement et simplement ignorées) et à le modeler pour satisfaire leurs besoins nouveaux. L'accroissement de moyens techniques leur a d'ailleurs permis de modifier l'espace avec une efficacité redoutable. Il est frappant d'analyser que la plupart des actions d'aménagement réalisées depuis le milieu du XIX^e siècle n'ont eu qu'un objectif (ou qu'une conséquence), stabiliser le système fluvial ; et de constater que le l'hydrosystème est encore aujourd'hui susceptible de mettre en œuvre des "stratégies" visant à le faire sortir (au moins ponctuellement et temporairement) de cet état de trop grande stabilité et de retrouver une certaine liberté d'action. Ce comportement montre l'impérieuse nécessité de gérer l'hydrosystème fluvial de manière globale et dans le respect des forces qui régissent sa dynamique, c'est-à-dire : 1) permettre, voire favoriser par des actions d'ingénierie spécifiques, l'expression des forces de construction et de destruction, en réservant des *espaces de liberté* (Piégay, Barge *et al.*, 1996), espaces où le libre jeu des réajustements fluviaux peut s'exprimer sans trop de contraintes ; 2) permettre la diversité fonctionnelle, voire la favoriser là où elle ne s'exprime plus, de manière à assurer le maintien, autant que faire se peut, de l'ensemble des potentialités de l'écocomplexe.

Dans ses approches, l'aménagement fluvial classique a tendance à globaliser, classer, ranger dans des groupes et catégories étanches¹⁶. Dans ses réalisations, il reproduit fréquemment des recettes, des schémas simples, voire simplistes, ce qui conduit à mettre en œuvre des solutions techniques qui sont la plupart du temps déconnectées de la réalité de terrain et de la complexité fonctionnelle. Les études géomorphologiques et écologiques montrent au contraire que chaque bassin-versant, chaque rivière ou section de cours d'eau présente des modes de fonctionnement spécifiques liés à ses caractéristiques majeures, mais aussi à un "*vécu*", une histoire, une mémoire inter-

¹⁵ Blocs abandonnés sur les basses terrasses et les bourrelets de berge...

¹⁶ Ceci est inhérent aux concepts, théories et méthodes qui la fondent (Brookes, 1995).

ne. Une gestion sans imagination est donc nécessairement invalidante pour l'équilibre du système. Les aménagements et les modalités de gestion doivent ainsi être adaptés aux spécificités fonctionnelles, ce qui nécessite d'abord de procéder à des études suffisamment fines pour les révéler. Les approches d'ingénierie géomorphologique, dont nous avons montré les principes à travers quelques exemples, sont à la fois souples et adaptées aux spécificités du terrain, et permettent de gérer *l'unité dans la diversité*. Elles ne se situent pas au même niveau hiérarchique que les techniques d'ingénierie classique (voir tab. 3.18) et de ce fait n'entrent pas systématiquement en compétition avec elles, mais relèvent d'une approche complémentaire. L'ingénierie géomorphologique nécessite d'ailleurs très fréquemment d'avoir recours à des techniques d'ingénierie classique (Morris, 1995), mais avec la particularité qu'elles ne sont pas mise en œuvre seulement pour traiter les conséquences, mais surtout les causes de la dérive des hydrosystèmes fortement anthropisés, c'est-à-dire l'altération plus ou moins marquée des flux d'énergie et de matière (eau, sédiments, matière organique).

Le principe d'une gestion durable des hydrosystèmes fluviaux, option actuellement retenue par notre société, est à l'origine du développement d'un nouveau corps de concepts et de techniques d'aménagement, dont l'ingénierie géomorphologique constitue l'un des éléments clé. En cette fin de XX^e siècle, cette approche n'en est qu'à ces premiers balbutiements ; de très importants progrès seront à réaliser au cours de la prochaine décennie pour la rendre pleinement opérationnelle. Elle nécessitera, bien évidemment, une évolution des mentalités chez les décideurs, les techniciens et les acteurs locaux. Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), dont la mise en place est en cours, sont une étape dans la prise de conscience de la nécessité d'une gestion globale de l'hydrosystème fluvial par les décideurs institutionnels. Il ne faut pas cacher qu'à l'échelon local des résistances existent, bien souvent par ignorance des mécanismes du fonctionnement des cours d'eau et, plus particulièrement, de l'implication de phénomènes ponctuels sur l'ensemble de l'hydrosystème. De ce fait, de gros efforts sont à faire dans les prochaines années pour que les mentalités évoluent et que les résistances cèdent la place à une solidarité sans réserve.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES



Ce Diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches est construit autour du concept d'hydrosystème fluvial (Amoros & Petts, 1993). Lors de la structuration de ce mémoire de synthèse, une importance toute particulière a été accordée aux échelles d'espace et de temps ; travailler à toutes les échelles a été mon objectif prioritaire. Trois niveaux spatio-temporels ont été pris en compte : la *macro-échelle* (bassin-versant et temps long), la *méso-échelle* (tronçon de rivière et pas de temps séculaire) et la *micro-échelle* (site ou station d'étude et échelle événementielle et cyclique). Le géomorphologue doit être capable de travailler à chacune d'entre elles : d'abord, parce qu'elles constituent les niveaux emboîtés et hiérarchisés d'un même système ; ensuite, parce qu'elles fournissent des informations complémentaires indispensables pour une bonne compréhension de la structure et du fonctionnement de l'hydrosystèmes fluvial. Les deux premières permettent d'analyser les assemblages de géoformes et d'étudier leur évolution dans le temps ; elles sont fondamentales pour aborder les *métamorphoses fluviales* et comprendre leurs causes. La dernière est celle à laquelle agissent les processus à l'origine de l'agencement des formes et des biotopes. Au cours des neuf années de recherche ayant suivi la soutenance de ma thèse de Doctorat, être capable de fournir une information quantitative a été l'un des mes soucis permanents, comme le texte de synthèse de ce DHDR le reflète largement. Il a été organisé en trois parties complémentaires, chacune ayant pour objet de présenter les différentes facettes de ma recherche, tout en montrant sa cohérence et son organisation d'ensemble :

A) La première partie avait pour objectif de présenter certaines des méthodes de travail que je développe et utilise pour obtenir de l'information géographique quantitative, à l'échelle spatiale du tronçon de cours d'eau et à trois pas de temps emboîtés :

1) Au pas de temps long (multiséculaire), les techniques et outils développés ont pour finalité la reconstitution des paléoenvironnements fluviaux. Ils s'appuient sur l'exploitation géostatistique d'informations topographiques provenant de sondages géologiques ou géotechniques et de la granulométrie des dépôts sédimentés dans d'anciens chenaux. Trois études de cas ont été présentées pour illustrer les méthodes mises en œuvre, sur un ancien chenal du Rhône en amont de Lyon et le site de Grenoble.

2) A l'échelle de temps des 250 dernières années, le diagnostic géomorphologique est fondé sur l'analyse des documents anciens (études d'ingénierie, cartes anciennes...). Deux types de données sont relativement fréquentes et se prêtent à une utilisation scientifique : les profils en long et les cartes anciennes. L'intérêt et les limites des données altimétriques ont été discutés. Parmi les documents anciens, la carte ancienne s'avère particulièrement intéressante pour étudier la *dynamique de réf-*

rence des rivières et les étapes de leur transformation par l'homme. La forme en plan peut être l'objet d'une quantification et d'une analyse exploitation géostatistique, par le biais de paramètres tels que les *indices de sinuosité du tracé et de multiplicité des bras*. Ce dernier type d'indicateur doit cependant être utilisé avec circonspection, parce qu'il est fortement lié aux conditions hydrologiques et que celles-ci ne sont jamais mentionnées sur les cartes anciennes. Le développement de nouveaux outils, tels les Systèmes d'Information Géographique, peut faciliter l'exploitation des cartes anciennes, par leur capacité à homogénéiser les échelles, géoréférencer et redresser des images établies dans différents systèmes de coordonnées et de traiter, de créer et de quantifier de l'information géographique. Des études de cas réalisées sur l'Isère dans la vallée du Grésivaudan et du Drac dans la plaine de Grenoble ont permis d'illustrer l'intérêt des documents anciens pour les reconstitutions géomorphologiques.

3) Au pas de temps court, la réalisation de diagnostics géomorphologiques de terrain nécessite de recourir à des techniques de recueil de l'information parfaitement maîtrisées. Depuis 1990, les travaux réalisés pour le compte de diverses collectivités territoriales ont permis de mettre en place un *corpus* de méthodes visant à acquérir, mettre en forme, traiter et représenter dans l'espace des caractères quantitatifs et qualitatifs décrivant le fonctionnement des milieux étudiés. En se fondant sur trois études de cas présentant des degrés de sophistication croissants dans l'acquisition et le traitement des données, on a tenté de présenter les caractéristiques générales communes de ces méthodes, qui par certains de leurs aspects se rapprochent beaucoup des questionnaires d'enquête de géographie sociale. Les données sont collectées sur des fiches de terrain, chacune d'entre elles étant un individu d'une base de données. Selon la problématique et l'objectif de l'étude (recherche fondamentale ou appliquée), les données font l'objet de divers types de traitements. Ils peuvent prendre la forme d'une simple exploitation cartographique des données. Celles-ci peuvent aussi être préalablement codées, puis faire l'objet de traitements statistiques élémentaires ou plus sophistiqués (analyse multivariée).

B) La seconde partie avait pour objectif d'exposer comment je conçois et organise mes recherches en géomorphologie fluviale, tout en intégrant à ces travaux les étudiants dont je dirige les travaux. Un thème, sur lequel j'ai énormément investi depuis 1994, a été développé : celui de la *végétalisation du lit de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan et de la recherche des facteurs abiotiques qui contrôlent son développement*. Il fait l'objet d'études interdisciplinaires et de collaborations internationales, dans le cadre de deux contrats financés par la Communauté Européenne (1993-1995 et 1996-1999). Les études sont réalisées à différentes échelles spatio-temporelles emboîtées :

1) A l'échelle du tronçon de rivière et du temps séculaire, on a procédé à une étude du fonctionnement géomorphologique avant la grande période d'aménagement fluvial et on a analysé les grandes étapes de la métamorphose géomorphologique du cours d'eau, sous l'effet des multiples aménagements de l'homme ; c'est également à cette échelle que l'on étudie actuellement l'organisation spatio-temporelle des géoformes du chenal. Ces études constituent l'indispensable cadrage qu'impose une analyse quantitative fine des processus fluviaux actuels, ceux-ci étant largement sous la dépendance de l'évolution de la dynamique fluviale au cours des dernières décennies.

2) J'ai plus spécifiquement choisi de présenter les résultats de recherche dont j'ai été l'initiateur et l'artisan. Ceux-ci ont été acquis sur le pas de temps court (cycles annuels et événements) et l'échelle spatiale du site et de la station d'étude. Deux thèmes étroitement liés ont été traités : a) les transits de matière dissoute totale (MDT) et de matière en suspension (MES) de l'Isère, ceux-ci étant mesurés en continu à la station de Grenoble-Campus ; b) la dynamique des dépôts de MES, perçue à travers l'évolution topographique et de l'inondabilité d'une île végétalisée de l'Isère, au cours de la période 1994-1996.

L'étude quantitative des transports de MDT et de MES a été l'occasion de présenter les protocoles de mesure mis en œuvre, puis d'identifier les rythmes saisonniers et événementiels des concentrations de ces flux. La quantification des transports solides a permis de démontrer que l'Isère est un gros pourvoyeur de matière dissoute et de matière en suspension. Les écoulements très contrastés de la période d'étude montrent une très forte variabilité inter-annuelle des transits ; c'est pourquoi, les charges spécifiques s'inscrivent dans des fourchettes relativement larges (180 à 450 t.km⁻².an⁻¹ pour la MDT ; 215 à 1200 t.km⁻².an⁻¹ pour les MES). Ces études ont également clairement révélé le rôle de la fusion nivale sur les transports annuels de MES ; elle intervient aussi fortement sur les transports de MDT. Les premières investigations portant sur les zones de recharge sédimentaire fine, réalisées par des techniques indirectes de cartographie, ont permis de circonscrire les secteurs du bassin-versant de l'Isère qui participent fortement à la fourniture en MES.

Sur l'île végétalisée de Brignoud, l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) et son suivi dans le temps, ainsi que l'enregistrement des hauteurs d'eau ont permis de modéliser l'inondabilité pour différentes situations hydrologiques et de montrer les changements qui l'affectent, avec l'exhaussement de la forme fluviale. L'objectif de cette étude est de fournir une référence pour analyser les modalités de la régénération des espèces végétales ligneuses, sous le double effet des variations saisonnières de la hauteur d'eau et de la sédimentation minérale fine. La procédure de modélisation et de calage du modèle a fait l'objet d'une présentation méthodo-

logique détaillée. Au cours de la période d'étude (1994-1995-1996), la confrontation des données topographiques, de durée d'inondation et de concentration de MES a permis de montrer l'existence d'un processus de sédimentation forcée, les dépôts annuels atteignant régulièrement plusieurs décimètres ; des exhaussements locaux dépassant 80 cm.an⁻¹ ont été mesurés. Un calcul des taux de sédimentation indique des rythmes maximum d'exhaussement de 3 à 5 cm.h⁻¹, lorsque la concentration en MES est supérieure à 10 g.l⁻¹. Ces très fortes valeurs sont en dues au fort ralentissement de l'écoulement provoqué par la végétation ; celle-ci engendre aussi un peignage des sédiments fins, comme le montre la très rapide diminution de la granulométrie des dépôts dès que l'on quitte les zones les plus exposées au courant. Ces premiers résultats doivent maintenant être confrontés aux données phytoécologiques, dans un cadre interdisciplinaire.

C) La troisième partie avait pour objectif de rédigier une synthèse de l'évolution des cours d'eau des Alpes du Nord au cours des 250 dernières années, en s'appuyant sur des études récentes. Les 29 publications dont j'ai été l'initiateur ou auxquelles j'ai collaboré ont été très largement utilisées dans cette synthèse. Elles témoignent de mon souci permanent de maintenir un fil conducteur aux recherches que j'ai engagées sur les rivières nord-alpines, les investigations portant sur les multiples unités de l'hydrosystème (torrents, cours d'eau de montagne, petites rivières de piedmont, grandes vallées intra-alpines...). Cette vision globale de l'hydrosystème offre la possibilité d'analyser en détail et sur le long terme les causes de la métamorphose des rivières. Elles sont bien évidemment liées à des facteurs locaux relativement faciles à identifier (endiguements, extractions, aménagements hydroélectriques, etc.). Elles sont dues, aussi, à des facteurs indirects qui contribuent bien souvent à renforcer les tendances locales ou à compromettre toute réhabilitation naturelle (correction torrentielle et reboisement, déprise rurale et végétalisation des versants). Ainsi, au fil des chapitres, j'ai essayé de montrer les mécanismes complexes de l'impact de l'homme sur l'évolution de l'hydrosystème et sa difficile lutte pour non seulement maîtriser la rivière, mais également les aspects négatifs des premiers travaux. J'ai tenté d'établir comment les multiples aménagements, apparemment indépendants les uns des autres, se sont cumulés, ont engendré une "synergie d'impacts" (Bravard, 1987, p. 397) et ont conduit à la "dérive" rapide et bien souvent irréversible de l'hydrosystème, à l'échelle de temps du gestionnaire. L'impact a été abordé par les changements relatifs des flux d'eau (QI) et de sédiments (Qs) par rapport à la "dynamique de référence" précédant les travaux de correction généralisée (fin du XVIII^e siècle). Il apparaît ainsi que, depuis 150 ans, tous les efforts des ingénieurs et aménageurs vont dans le sens d'une altération plus ou moins forte de ces flux, la recharge et les transits de la charge de fond étant les plus fortement modifiés.

L'analyse des impacts a également montré que les interventions humaines ont presque toujours porté sur le traitement des conséquences et non des causes de la "dérive" des hydrosystèmes fortement anthropisés. Cette fuite en avant ne peut en aucun cas être assimilée à une procédure de gestion. La prise de conscience de la nécessité d'une gestion durable de l'environnement impose de complètement revoir l'approche de la gestion des cours d'eau : il convient d'agir localement tout en concevant globalement, dans un souci de coopération symbiotique entre l'homme et le milieu. Celle-ci passe par le maintien d'une diversité fonctionnelle à tous les niveaux hiérarchiques de l'hydrosystème et le maintien de la capacité permanente de créer des conditions nouvelles. Seul le rétablissement d'une activité minimale des transits sédimentaires est susceptible de favoriser celles-ci. C'est dans cette perspective qu'ont été exposés les principes d'une "ingénierie géomorphologique" adaptée aux rivières à charge de fond grossière, dont l'objectif est de "gérer les érosions, le transport de la charge de fond et l'écologie sur des bases géomorphologiques" (Bravard, Landon *et al.*, 1997). Plusieurs exemples proposant des situations très contrastées (rivières de plaine alluviale, tronçon court-circuité par un ouvrage hydroélectrique, cours d'eau de montagne) montrent quels pourraient être ou quels sont les principes d'une telle gestion, sans pour autant que cela remette en cause les objectifs d'aménagement ou d'utilisation de l'espace actuellement envisagés.

Arrivé au terme de la rédaction de ce texte de synthèse, il convient de dégager des perspectives. Mes réflexions actuelles m'orientent plus spécifiquement vers trois thématiques :

1) Pour encore au moins deux ans, la problématique de la végétalisation des lits fluviaux va retenir une grande partie de mon attention. Il est notamment indispensable, dans les mois à venir, de procéder au croisement interdisciplinaire des données recueillies sur l'Isère, cet aspect ayant jusqu'ici été insuffisamment abordé, faute de temps. Le démarrage de collaborations avec les hydrauliciens grenoblois devrait permettre également de mieux prendre en compte la mécanique des transports de charge de fond et son incidence sur la fixation des formes du chenal et leur végétalisation.

2) Depuis un peu moins d'un an, des recherches hydrologiques et hydrochimiques sont menées en collaboration avec J.-J. Delannoy (Prof. Univ. de Savoie, Chambéry) et des chercheurs physiciens de l'Université de Lille, sur le karst évolué du massif des Coulmes (Vercors). Elles ont été l'occasion d'installer des équipements de mesure (station météorologique sur le plateau calcaire, stations hydrométrique, physico-chimique et de comptage de gouttes dans la grotte touristique de Choranche). Le système karstique est ici considéré comme un filtre, l'objectif étant d'analyser le fonction-

nement de ce filtre vis-à-vis des transferts d'eau et de matière (matières dissoutes, matières en suspension, acides humiques, pollens...) dans le réseau de fissures. Cette étude devrait me permettre de diversifier mes recherches, en prenant mieux en compte que je ne l'ai fait jusqu'alors les processus de transfert hydrologique et hydrochimique, ainsi que les éléments du cycle de l'eau.

3) Mon troisième objectif est de lancer des travaux sur la géomorphologie des rivières de montagne, qui a jusqu'alors été assez peu étudiée en France. Les objectifs de gestion visant à maintenir ou restaurer le *continuum* des transports solides et de la recharge sédimentaire des cours d'eau de plaine intra-montagnarde imposent : a) de mieux comprendre quels sont les processus de recharge et de transfert de la charge alluviale sur ce type de cours d'eau ; b) de recenser les rivières qui présentent les potentialités les plus affirmées, dans un souci de gérer au mieux les ressources à l'échelle de l'hydrosystème.

BIBLIOGRAPHIE

—

- A.D. ISÈRE-DRAC-ROMANCHE (1993). *Projet d'aménagement de l'Isère, du Drac et de la Romanche*. Association Départementale, Grenoble ; dossier contenant divers rapports d'études.
- A.I.H.S. (1981). *Mesure de l'érosion et du transport des sédiments*. Actes du colloque de Florence, 22-26 juin 1981, IAHS-AIHS, publ. n°133, 527 p.
- AGARD, M. (1942). L'endiguement de l'Isère en Grésivaudan. *Revue de Géographie Alpine*, 30, 701-771.
- ALLIX, A. (1928). Géographie naturelle de l'Oisans. *Bulletin de la Société Scientifique du Dauphiné*, 49 (5^e série (8)), 113-416.
- AMIN, M. H. G., R. J. CHORLEY, K. S. RICHARDS, B. W.BACHE, L. D. HALL & T. A. CARPENTER (1993). Spatial and temporal mapping of water in soil by magnetic resonance imaging. *Hydrological processes*, 7, 279-286.
- AMOROS, C., A. L. ROUX, J.-L. REYGROBELLET, J.-P. BRAVARD & G. PAUTOU (1987). A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers : Research and Management*, 1, 17-36.
- ARMAND, G. (1950). Les crues de l'isère en juin et septembre 1948. *Revue de Géographie Alpine*, 38, 541-554.
- ASTRADE, L. (1996). *La Saône en crue : dynamique d'un hydrosystème anthropisé*. Thèse de Géographie et Aménagement. Université de Paris IV - Sorbonne, 358 p.
- BAKER, V. R. (1991). *A bright future for old flows*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 497-520.
- BAKÈS, J. (1995). *Impacts de la canalisation du Rhône et de l'aménagement du parc de loisirs sur le fonctionnement en crue de l'île de Miribel-Jonage*. Mémoire de MST, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 107 p. + annexes.
- BALLANDRAS, S. (1997). *Contribution à l'étude des bassins-versants torrentiels alpins. Stratigraphies, morphodynamique, paléoenvironnements depuis 15.000 ans*. Thèse de Géographie, Université de Savoie, 552 p.
- BAUD, N. (1995). *L'évolution de l'Arc et de l'occupation du sol en basse Maurienne (secteur Croix-d'Aiguebelle/Saint-Pierre-de-Belleville)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université de Savoie, 103 p.
- BEATY, C. B. (1974). Debris flows, alluvial fans, and a revitalized catastrophism. *Zeitschrift Geomorphologie*, S.B. 21, 39-51.
- BENECH, B., H. BRUNET, V. JACQ, M. PAYEN, J.-C. RIVRAIN & P. SANTURETTE (1993). La catastrophe de Vaison-la-Romaine et les violentes précipitations de septembre 1992 : aspects météorologiques. *La Météorologie*, 8^e série, 1, 72-90.
- BERGERON, N. & A. G. ROY (1985). Le rôle de la végétation sur la morphologie d'un petit cours d'eau. *Géographie Physique et Quaternaire*, 39(1), 323-326.
- BESSON, L. (1992). *Influence des actions anthropiques sur le fonctionnement d'un système fluvial : l'Isère en amont de Grenoble*. Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 104 p. + Annexes.
- BLANC, J.-M. (1996). *La Gresse et sa plaine alluviale : étude de la dynamique fluviale à l'Époque Moderne et des conséquences de l'endiguement*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 177 p.
- BLANC, X., F. PINTEUR, & T. SANCHIS (1989). Conséquences de l'enfoncement du lit de l'Arve sur les berges et les ouvrages. Bilan général des transports solides sur le cours d'eau. *La Houille Blanche* (3-4), 226-230.
- BLANCHARD, E. (1994). *Fonctionnement hydrologique, fonctionnement géomorphologique et dynamique de la végétation : la plaine d'inondation du Drac à proximité de Grenoble*. Mémoire de DEA, ENSA, Rennes - Centre de Biologie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 112 p.

- BLANCHARD, R. (1911). *Grenoble, étude de géographie urbaine*. Didier Richard, Grenoble, 234 p.
- BLANCHARD, R. (1913). La crue glaciaire dans les Alpes de Savoie au XVII^e siècle. *Revue de Géographie Alpine*, 1, 443-454.
- BLANCHET, C. & M. BRISSAUD (1968). *Type de protections adoptées, après étude sur modèle, pour les ponts de "Catane", du cours "Berriat", et du "Vercors". Protection du remblai de l'autoroute 48. Evolution du lit du Drac dans la traversée de Grenoble*. C. R. des X^{èmes} Journées de l'hydraulique, Société Hydrotechnique de France, Paris. "La prévision des crues et la protection contre les inondations", Tome 2, Question 5, rapport 8, 7 p.
- BLANCHET, G. (1993). Variabilité des précipitations annuelles dans la région Rhône-Alpes : présentation cartographique. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(2-3), 101-111.
- BLANDIN P. & M. Lamotte (1988). Recherche d'une identité écologique correspondant à l'étude des pypages : la notion d'éco-complexe. *Bulletin d'Ecologie*, 19(4), 547-555.
- BLANIC, R. & G. VERDET (1975). Quelques travaux de correction sur le cours de l'Isère. *La Houille Blanche* (2-3), 191-197.
- BLANIC, R. (1981). *Récentes études sur l'aménagement des lits de l'Isère et du Drac an amont et en aval de Grenoble*. Commission Internationale des Irrigations et du Drainage (Onzième congrès), 213-232.
- BOIS, P. (1993). *Variations rapides des débits des rivières influencées, exemple de l'Isère à Grenoble*. Livret Guide des "Journées Hydrologiques 1993, Centenaire Maurice Pardé", Laboratoire de la Montagne Alpine (LAMA), Université Joseph Fourier, Grenoble, 3 p.
- BOUCHAYER, A. (1925). Le Drac dans la plaine de Grenoble. *Revue de Géographie Alpine*, 13, 115-172, 287-358 et 549-621.
- BRAVARD, J.-P. (1981). *La Chautagne, dynamique de l'environnement d'un pays savoyard*. Institut des Etudes Rhodaniennes, Lyon, pub. n°18, 182 p.
- BRAVARD, J.-P. (1983). Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône (approche qualitative et spatiale). *Revue de Géographie Alpine*, 71, 363-379.
- BRAVARD, J.-P. (1987). *Le Rhône du Léman à Lyon*. , Ed. La Manufacture, Lyon, 452 p.
- BRAVARD, J.-P. (1989). La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Age et à l'époque moderne. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 145-157.
- BRAVARD, J.-P. (1990). Observations nouvelles sur la dynamique fluviale et l'alluvionnement de la Saône à l'holocène, entre Villefranche et Anse (Rhône). *Revue Géographique de l'Est*, 1, 57-76.
- BRAVARD, J.-P. (1991). Intérêt et limites des cartes anciennes pour l'étude des rivières alpines. *Société Géographique de Liège. Notes et Recherches n°11*, 78-85.
- BRAVARD, J.-P. (1991). La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à la gestion des rivières ? *La Houille Blanche*, (7-8), 515-521.
- BRAVARD, J.-P. (1994). La charge de fond du Haut-Rhône français, mise en perspective historique. *Dossier de la Revue de Géographie Alpine*, 12, 163-169.
- BRAVARD, J.-P., C. AMOROS & G. PAUTOU (1986). Impacts of civil engineering works on the succession communities in a fluvial system : a methodological and predictive approach applied to a section of the Upper Rhône River. *Oikos*, 47, 92-111.
- BRAVARD, J.-P. & J. BETHEMONT (1989). *Cartography of rivers in France*. In "Historical Change of Large Alluvial Rivers : Western Europe. G. E. Petts (Ed.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 95-111.

- BRAVARD, J.-P., O. FRANC, N. LANDON, J.-L. LARGE & J.-L. PEIRY (1990). *La basse vallée de l'Ain : étude géomorphologique*. Rapport d'étude, PIREN-CNRS, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 114 p.
- BRAVARD, J.-P., N. LANDON, J.-L. PEIRY, H. PIÉGAY & D. POINSART (1997). Managing erosion, bedload transport and ecology on geomorphological basis at the watershed and river scale, southeastern France. *Soumis pour publication*, 20 p.
- BRAVARD, J.-P. & J.-L. PEIRY (1993). La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau. *Zeitschrift Geomorphologie, S.B.* 88, 67-79.
- BRAVARD, J.-P. & J.-L. PEIRY (1994). *Projet de contrat de rivière Bienne. Etude géomorphologique des causes d'érosion des berges du Tacon et du Flumen et descriptif des travaux à entreprendre*. Rapport d'étude, Parc Naturel Régional du Haut Jura, XXVIII et 66 p.
- BRAVARD, J.-P., J.-L. PEIRY & P. GADIOLET (1991). La formation de la plaine alluviale holocène du Rhône à l'amont de Lyon. *Physio-géo*, 212-23, 167-172.
- BRICE, J. C. (1964). Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska. *Geological Survey Professional Paper*, 422-D, 1-41.
- BRIERLEY, G. J. (1989). River planform facies models : the sedimentology of braided wandering and meandering reaches of the Squamish River, British Columbia. *Sedimentary Geology*, 61, 17-35.
- BROOKES, A. (1995). Challenges and objectives for geomorphology in UK river management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(7), 593-610.
- BROOKES, A. (1995). *River channel restoration : theory and practice*. In "Changing river channels". A. M. Gurnell & G. E. Petts (Ed.). Chichester, J. Wiley & Sons Ltd, 369-388.
- BRUSCHIN, J. (1987). Envasement et chasses dans la retenue de Verbois, de 1942 à 1985. *Ingénieurs et architectes suisses*, 18, 280-286.
- CAUSSIN, F. (1995). *La conquête d'un terroir au XVIII^e siècle. Etude sur la mise en valeur d'un méandre abandonné par l'Isère en 1729 au lieu-dit les Eparres près de Grenoble*. Mémoire de Maîtrise, U.F.R. Sciences Humaines, Département d'Histoire, Université Pierre Mendès-France, Grenoble, 120 p.
- CHAMBOREDON, M. & M. BELLI-RIZ (1968). *Les travaux de l'aménagement de l'Isère et de la coupure de Bois Français sur cette rivière en amont de Grenoble*. C. R. des X^e Journées de l'hydraulique, Société Hydrotechnique de France, Paris. "La prévision des crues et la protection contre les inondations", Tome 2, Question 5, rapport 7, 8 p.
- CHARDON, M. (1996). La mesure de l'érosion dans le gypse/anhydrite des Alpes françaises du Nord ; méthodes et état des connaissances. *Revue de Géographie Alpine*, 84(2), 45-56.
- CHARDON, M., A. MARNEZY, & G. MONJUVENT (1980). *Carte géomorphologique détaillée de la France au 1:50.000*. Feuille de Grenoble XXXII-34, CNRS-Paris, carte couleur H.T. et notice explicative, 47 p.
- CHARRE, J., P. MIELLET & P. WANIEZ (1991). *Pratique des systèmes d'information géographique raster*. G.I.P. Reclus, 56 p.
- CHIARELLO, E. (1994). *Pyramide stochastique et écologie du paysage : modélisation des structures spatiales par images de synthèse*. Thèse d'Ecologie du paysage, Université Claude Bernard, Lyon, 179 p.
- CHOMEL, V. (1976). *Histoire de Grenoble*. Privat Ed., Toulouse, 466 p.
- CHURCH, M. & D. JONES (1982). *Channels bars in gravel-bed rivers*. In "Gravel-Bed Rivers". R.D. Hey, J.C. Bathurst & C.R. Thorne (Ed.), Chichester, John Wiley & Sons, 292-338.

- CHURCH, M. (1983). Pattern of instability in a wandering gravel bed channel. *International Association of Sedimentologists, Spec. publ. n°6, 169-180.*
- CHURCH, M. (1978). *Palaeohydrological reconstructions from a Holocene valley fill.* In : "Fluvial Sedimentology". A. D. Miall (Ed.), Canadian Society of Petroleum Geologists, 5, 43-72.
- CHURCH, M., B. GOMEZ, E.A.HICKIN & O. SLAYMAKER (1985). Geomorphological sociology. *Earth Surface Processes and Landforms, 10, 539-540.*
- CHURCH, M., J. WOLCOTT & J. MAIZELS (1990). Palaeovelocity : a parsimonious proposal. *Earth Surface Processes and Landforms, 15, 475-480.*
- CLOSE-LECOCQ, J. F., A. PISSART & G. KOCH (1982). Les transports en suspension et en solution de la Meuse à Liège et à Tailfer (amont de Namur). *Bulletin de la Société géographique de Liège, 18, 5-18.*
- COMBES, F., A. HURAND & M. MEUNIER (1994). La forêt de montagne, un remède aux crues. *CEMAGREF, Grenoble, PEGR., 481-486.*
- COOPER, J. A. G., T. R. MASON, J. S. V. REDDERING, W. K. ILLENBERGER (1990). Geomorphological effects of catastrophic flooding on a small subtropical estuary. *Earth Surface Processes and Landforms, 15, 25-41.*
- COSANDEY, C. (1992). Influence de la forêt sur le cycle de l'eau - Conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel. *Hydrologie continentale, 7(1), 13-22.*
- CSCB RMC (1994). *Expertise du projet de protection de l'agglomération grenobloise contre les crues du Drac et de l'Isère.* Rapport du Conseil Scientifique du Comité de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon, 19 p.
- DEBANO, L. F. & L. F. SCHMIDT (1990). Potential of enhancing riparian habitats in the southwestern United States with watershed practices. *Forest Ecology and Management, 33-34(1-4), 385-403.*
- DELANNOY, J.-J. (1997). *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la Transversale de Ronda (Andalousie) ; les apports morphogéniques du Karst.* Thèse d'Etat en Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 678 p.
- DEMONTZEY, P. (1894). *L'extinction des torrents en France par le reboisement.* Imprimerie Nationale, Paris, 459 p.
- DIDIER, M. (1992). *Impacts des aménagements sur le paysage fluvial de l'Isère à l'intérieur des digues dans le Grésivaudan et la Combe de Savoie ; la végétation en tant qu'intégrateur des changements.* DEA de Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 87 p. + annexes.
- DIDIER, M. (1994). *L'action de l'homme sur les paysages fluviaux. Contribution de l'écologie et de la géographie à l'étude d'une vallée anthropisée : l'Isère dans le Grésivaudan.* Thèse de Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 265 p. + annexes.
- DIDIER, M. (1994). Relation entre l'enfoncement du lit de l'Isère et la stabilité de ses îles dans le Grésivaudan. *Revue de Géographie Alpine, 82(2), 147-155.*
- DIETRICH, W. E., J. W. KIRCHNER, H. IKEDA & F. ISEYA (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature, 340, 215-217.*
- DOEGLAS, D. J. (1946). Interpretation of the results of mechanical analyses. *Journal of Sedimentary Petrology, 16, 19-40.*
- DOLÉDEC, S. (1986). *Les peuplements de macro-invertébrés benthiques du cours inférieur de l'Ardèche. Dynamique spatio-temporelle.* Thèse de Biologie. Université Claude Bernard, Lyon, 244 p.
- DOWNWARD, S. R. (1995). *Information from topographic survey.* In "Changing river channels". A. M. Gurnell & G. E. Petts (Ed.), Chichester, J. Wiley & Sons Ltd, 303-323.

- DOWNWARD, S. R., A. M. GURNELL & A. BROOKES (1994). *A methodology for quantifying river channel plan-form change using GIS*. In "Variability in Stream Erosion and Sediment Transport", L. J. Olive, R. J. Loughran & J. A. Kesby (Ed.), Canberra, IAHS-AIHS, publ. n°224, 449-457.
- DUPLESSY, J.-C. (1996). *Quand l'océan se fâche ; histoire naturelle du climat*. Editions Odile Jacob, Paris, 277 p.
- DURAND, S. (1990). *La systémique*. Que sais-je ? P.U.F., 127 p.
- EBERSOLE, J.L., W.J. LISS & C.A. FRISSEL, (1997). Restoration of stream habitats in the Western United States : restoration as reexpression of habitat capacity. *Environmental Management*, 21/1, 1-14.
- EDF/DEPT/DTG (1993). *Métrologie des matières en suspension*. EDF-DTG, Grenoble. Rapport interne, 60 p.
- EDOUARD, J. L. & H. VIVIAN (1982). La nouvelle hydrologie d'une vallée alpine : la Maurienne. *Revue de Géographie Alpine*, 70(3), 257-278.
- EDOUARD, J.-L. & H. VIVIAN (1984). Une hydrologie naturelle dans les Alpes du Nord ? *Revue de Géographie Alpine*, 72(2-3), 165-188.
- EISMA, D. (1993). *Suspended matter in the aquatic environment*. Berlin, Springer-Verlag, 315 p.
- EPTEAU S.A., (1996) : *Etude d'impact des travaux d'aménagement de l'Isère en amont de Grenoble*. A.D. Isère-Drac-Romanche - Epteau S.A. Rapport d'étude.
- EYNARD-MACHET, R. (1993). Anciens cadastres et évolution des paysages. Cartographie historique de l'occupation des sols dans les Alpes de Savoie, France. *Revue de Géographie Alpine*, 81(3), 51-66.
- FABRE, G. (1989). Les inondations catastrophiques de Nîmes et de sa région du lundi 3 octobre 1988. *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 224-230.
- FAGOT, P., P. GADIOLET, M. MAGNE & J.-P. BRAVARD (1989). Une étude dendrochronologique dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une "métamorphose fluviale". *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 213-223.
- FÉOUGIER, C. (1994). *A propos de la fondation de Grenoble : reconstitution du paléoenvironnement fluvial sur les sites d'archéologie urbaines*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 96 p.
- FERGUSON, R. I. & A. WERRITTY (1983). Bar development and channel changes in the gravelly River Feshie, Scotland. *International Association of Sedimentologists, Sp. Pub. n°6*, 181-193.
- FORMAN, R. T. T. & M. GODRON (1986). *Landscape ecology*. New-York, Wiley & Sons, 620 p.
- FOURNEAUX, J.-C. (1976). Les formations quaternaires de la vallée de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble. *Géologie Alpine*, 72, 31-72.
- GARDINER, J. L. (1995). *Towards a sustainable water environment*. In : "Changing river channels". A. M. Gurnell & G. E. Petts (Ed.). Chichester, J. Wiley & Sons Ltd, 389-411.
- GAUDET, F. (1973). *Les cours d'eau de régime glaciaire*. Thèse de Géographie, Univ. de Lille 3, 417 p.
- GAUTHERON, A. (1995). *Elaboration d'un modèle explicatif des flux de matière en suspension dans l'Isère à Grenoble*. DEA E.N.S.H.M.G. (LTHE) et E.D.F.-D.T.G., Université Joseph Fourier, Grenoble, 73 pages + annexes.
- GAUTIER, E. (1992). *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buëch (Alpes du Sud)*. Thèse de Géographie, Université Paris-X-Nanterre, 439 p.
- GAUTIER, E. (1993). *Diguements et colmatages du Buech (05)*. In : "Le fleuve et ses métamorphoses", Didier Erudition, Lyon, 233-243.

- GAUTIER, E. (1994). Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine - l'exemple du Buëch (Alpes du Sud). *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 57-62.
- GEMAEHLING, C. & J. CHABERT (1962). *Transport solide et modification du lit d'une rivière à forte pente : la Drôme*. Bari, 1962, IAHS-AIHS, publ. n°59, 259-272.
- GEX, F. (1940). Le diguement de l'Isère dans la Combe de Savoie. *Revue de Géographie Alpine*, 28, 1-71.
- GIREL, J. (1991). Aménagements anciens et récents. Incidences sur l'écologie d'un corridor fluvial : la Leysse dans le bassin chambérien. *Revue d'Ecologie Alpine*, 1, 81-95.
- GIREL, J. (1991). *Deux siècles d'évolution d'un paysage alluvial : la végétation de la combe de Savoie à l'aval d'Alberville (1790-1990)*. Journée Ecologie et Paysage. Semaine du paysage en Savoie, Le Bourget du Lac, Université de Savoie, Technolac, 28, 6-27.
- GIREL, J. (1992). *Diguements et colmatages sardes dans la vallée de l'Isère (38)*. In : "Le fleuve et ses métamorphoses", Didier Erudition, Lyon, 217-232.
- GIREL, J. (1993). *Aménagements anciens et incidences sur la végétation actuelle. L'Isère et la combe de Savoie entre Albertville et Montmélian*. 116^e Congrès National des Sociétés Savantes, Section des Sciences, Chambéry, 29 avril-4 mai 1991, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, 147-160.
- GIREL, J. (1994). Old distribution procedure of both water and matter fluxes in floodplains of Western Europe : Impact on present vegetation. *Environmental Management*, 18(2), 203-221.
- GONERA, P. & S. KOZARSKI (1987). River channel changes and rough paleodischarge estimates for the Warta River, West-Central Poland. *Geografiska Annaler*, 69A(1), 163-171.
- GORE, J. A. & F. D. SHIELDS JR. (1995). Can large rivers be restored ? *BioScience*, 45(3), 142-152.
- GREGORY, K. J. & J. K. MAIZELS (1991). *Morphology and sediments : typological characteristics of fluvial forms and deposits*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 31-59.
- GRIL, J. J. & B. DUVOUX (1991). *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes américaines*. CEMAGREF, Anthony, 157 p.
- GROVE, J. M. (1972). The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway, during the Little Ice Age. *Arctic and Alpine Research*, 4, 131-138.
- GROVE, J. M. (1987). *The Little Ice Age*. Methuen, London, 498 p.
- GUIGO, M. & M. LE BERRE (1989). *Ecrire un modèle de simulation systémique. Impact des aménagements sur le comportement de la nappe phréatique d'une plaine alluviale. Essai pédagogique* Université Joseph Fourier, Grenoble, 102 p.
- GUIGO, M. & P.-A. DAVOINE (1995). *Gestion de l'environnement et systèmes experts*. Masson, Paris, 182 p.
- GUIGO, M., C. ALLIER, A. CHAPOT, M. CHAPOT-BLANQUET & A. DAUPHINÉ (1991). *Gestion de l'environnement et études d'impact*. Masson, Paris, 231 p.
- GURNELL, A. M., G. H. BROWN & M. TRANTER (1994). Sampling strategy to describe the temporal hydrochemical characteristics of an alpine proglacial stream. *Hydrological Processes*, 8, 1-25.
- HANNSS, C. (1984). La constitution des plaines alluviales et leurs rebords dans la vallée de l'isère entre l'embouchure de l'Arc et le bassin de Moirans, ainsi que de la plaine alluviale de la Leysse dans le Val du Bourget. *Revue de Géographie Alpine*, 72(2-3), 439-456.

- HARVEY, A. M. (1987). *Sediment supply to upland streams : influence on channel adjustment*. In : "Sediment transport in gravel-bed rivers". C. R. Thorne, J. C. Bathurst & R. D. Hey (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 121-150.
- HARVEY, A. M. (1991). The influence of sediment supply on the channel morphology of upland streams : Howgill fells, northwest England. *Earth surface processes and landforms*, 16, 675-684.
- HEILER, G., T. HEIN, F. SCHIEMER & G. BORNETTE (1995). Hydrological connectivity and flood pulses as the central aspect for the integrity of river-floodplain system. *Regulated Rivers : Research and Management*, 11, 351-361.
- HICKIN, E. J. (1984). Vegetation and river channel dynamics. *Canadian Geographer*, 28(2), 112-126.
- HOOKE, J. M. (1995). *Processes of channel planform change on meandering channels in the UK*. In : "Changing river channels". A. Gurnell & G. E. Petts (Ed.). Chichester, J. Wiley & Sons Ltd., 87-115.
- HOOKE, J. M. & A. M. HARVEY (1983). Meander changes in relation to bend morphology and secondary flows. *International Association of Sedimentologists, Sp. Pub. n°6: 121-132*.
- HOROWITZ, A. J., K. A. ELRICK, P. B. VON GUERARD, N. O. YOUNG, G. R. BUELL, & T. L. MILLER (1992). *The use of automatically collected point samples to estimate suspended sediment and associated trace element concentrations for determining annual mass transport*. In : "Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins", Oslo, IAHS-AIHS publ. n° 210, 209-218.
- HUGGETT, R. J. (1993). *Modelling the human impact on nature ; systems analysis of environmental problems*. Oxford University Press, 202 p.
- INMAN, D. L. (1949). Sorting of sediment in light of fluvial mechanics. *Journal of Sedimentary Petrology*, 19, 51-70.
- JOSSELIN, D. (1995). *La déprise agricole en zone de montagne : vers un outil d'aide à la modélisation spatiale couplant Système d'Induction et d'Information Géographique*. Thèse de géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 391 p. + annexes.
- JOUSSAUME, S. (1993). *Climat, d'hier à demain*. CNRS Editions.
- JURAMY, S. & S. MONTFORT (1986). *L'évolution des lits fluviaux ; l'exemple d'une rivière aménagée : la Durance*. Thèse de Géographie, Université d'Aix-Marseille, 600 p.
- KLINGEMAN, P. C., J.-P. BRAVARD & Y. GIULIANI (1994). Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France). *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 73-89.
- KLINGEMAN, P. C., J.-P. BRAVARD, Y. GIULIANI, J.-M. OLIVIER, G. PAUTOU (1996). *Hydropower reach bypassing and dewatering impacts in gravel-bed rivers*. In : "Gravel-Bed Rivers IV". P. C. Klingeman et al. (Ed.), in press.
- KONDOLF, G. M. (1995). *Managing bedload sediment in regulated rivers : examples from California, U.S.A*. In : "Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology". J. E. Costa, A. J. Miller, K. W. Potter & P. R. Wilcock, (Ed.), The American Geophysical Union, 165-176.
- KOUTANIEMI, L. (1987). Little Ice Age flooding in the Ivalojoiki and Oulankajoki valleys, Finland ? *Geografiska Annaler*, 69A(1), 71-83.
- KOUTANIEMI, L. (1991). *Glacio-isostatically adjusted palaeohydrology, the rivers Ivalojoiki and Oulankajoki, northern Finland*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 65-78.
- KOZARSKI, S. (1991). *Warta - A case study of a lowland river*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 189-215.

- LACHAT, B. (1991). *Le cours d'eau. Conservation, entretien et aménagement*. Comité directeur pour la protection et la gestion de l'environnement et du milieu naturel, Strasbourg, Conseil de l'Europe. Série aménagement et gestion n° 2, 84 p.
- LANDON, N. (1996). L'incision du profil en long des affluents du Rhône moyen ; du constat aux principes de gestion. *Revue de Géographie de Lyon*, 71(4), 363-386.
- LANDON, N. & H. PIÉGAY (1994). L'incision de deux affluents subméditerranéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 63-72.
- LATULIPPE, C. (1995). *Recherche sur les zones de production sédimentaire et les transports de matière en suspension du bassin-versant de l'Isère en amont de Grenoble*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 106 p.
- LATULIPPE, C. & J.-L. PEIRY (1996). Essai de hiérarchisation des zones de production de matière en suspension dans le bassin versant d'un grand cours d'eau : l'Isère en amont de Grenoble. *Revue de Géographie Alpine*, 84(2), 29-44.
- LEOPOLD, L. B. & M. G. WOLMAN (1957). River channel patterns : Braided, meandering, and straight. *U. S. Geological Survey, Professional Paper*, 282-B, 39-85.
- LEROUX, M. (1996). *La dynamique du temps et du climat*. Paris, Masson, 310 p
- LEWIN, J. (1978). Meander development and floodplain sedimentation : a case study from mid-Wales. *Geological Journal*, 13(1), 25-36.
- LEWIN, J. (1983). *Changes of channel patterns and floodplains*. In "Background to Palaeohydrology". K. J. Gregory (Ed.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 303-319.
- MACÉ, S., A. VÉROT-BOURRELY & J. P. BRAVARD, (1991). *Genèse et fonctionnement Holocène de la plaine alluviale du Rhône à Lyon*. 116^e Congrès National des Sociétés Savantes, Chambéry, 29 avril-4 mai 1991, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, 17-31.
- MAIZELS, J. & J. AITKEN (1991). *Palaeohydrological change during deglaciation in upland Britain : a case study from Northeast Scotland*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 105-145.
- MAIZELS, J. K. (1979). Proglacial aggradation and changes in braided channel patterns during a period of glacier advance : an alpine example. *Geografiska Annaler*, 61A(1-2), 87-101.
- MAIZELS, J. K. (1983). *Palaeovelocity and palaeodischarge determination for coarse gravel deposits*. In : "Background to Palaeohydrology". K. J. Gregory (Ed.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 101-139.
- MARSTON, R. A., J. GIREL, G. PAUTOU, H. PIÉGAY, J.-P. BRAVARD & C. ARNESON (1995). Channel metamorphosis, floodplain disturbance and vegetation development : Ain River, France. *Geomorphology* 13, 121-134.
- MEYBECK, M. (1984). *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments*. Thèse d'Etat en Sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- MONJUVENT, G. (1978). *Le Drac. Morphologie, stratigraphie, et chronologie quaternaires d'un bassin alpin*. Thèse de géologie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 431 p.
- MOODY, J. A. & R. H. MEADE (1994). Evaluation of the method of collecting suspended sediment from large rivers by discharge-weighted pumping and separation by continuous-flow centrifugation. *Hydrological Processes*, 8, 513-530.
- MORIN, S. (1996). *Mise en place d'une méthode de sectorisation morphodynamique de petits cours d'eau, en vue de leur gestion*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 133 p. + annexes.

- MORRIS, S. E. (1995). Geomorphic aspects of stream-channel restoration. *Physical Geography*, 16(5), 444-459.
- MORTILLET, G. (1856). Diguement des rivières torrentielles des Alpes et plus spécialement de l'Arve. *Revue Savoisiennne*, 145-165.
- MOUGIN, P. (1914). *Les torrents de Savoie*. Imprimerie Générale, Grenoble, 1251 p.
- MOUGIN, P. (1919). *Les forêts de Savoie*. Imprimerie Nationale, Paris, vol. 48-49, 776 p.
- MOUGIN, P. (1931). *La restauration des Alpes*. Imprimerie Nationale, Paris, 584 p.
- MOUTARD, R. (1995). *L'évolution de la vulnérabilité à l'érosion des pentes d'un bassin-versant torrentiel sous l'effet des événements climatiques et des interventions humaines (1730-1995) : l'exemple du Malnant dans les Bornes occidentales*. Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 49 p.
- MÜLLER, H. (1930). Les origines de Grenoble. *Revue de Géographie Alpine*, 18, 451-489.
- NAVAS, A. (1991). The pattern of gypsum transport in the Ebro river network. *Catena*, 18, 45-49.
- NEWSON, M. (1992). *Land, water and development - River basin systems and their sustainable management*. London, Routledge, 351 p.
- NEWSON, M. (1994). *Hydrology and the river environment*. Oxford University Press, 221 p.
- NEWSON, M. D. (1995). *Fluvial geomorphology and environmental design*. In : "Changing river channels". A. M. Gurnell & G. E. Petts (Ed.), Chichester, J. Wiley & Sons Lt., 413-432.
- NOUGUIER, F. (1992). *La métamorphose de l'Isère et du Drac à travers l'étude du profil en long (XIX-XX^e siècle)*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 97 p.
- O'RIORDAN, C., M.-A. MALDINEY, J.-M. MOUCHEL & M. POULIN (1996). Un nouveau dispositif d'analyse du transport des matières en suspension dans les rivières. *C. R. Académie des Sciences de Paris*, 322, série II a, 285-291.
- OLIVE, L. J. & W. A. RIEGER (1992). *Stream suspended sediment transport monitoring - why, how and what is being measured ?* In : "Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins". Oslo, IAHS-AIHS, publ. n° 210, 245-254.
- PARDÉ, M. (1925). *Le régime du Rhône ; étude hydrologique*. Institut des Etudes Rhodaniennes, Lyon, 2 vol, 883 + 440 p.
- PARDÉ, M. (1930). La forêt et les cours d'eau. Résultats d'expériences. *Revue de Géographie Alpine*, 18, 189-200.
- PARDÉ, M. (1931). Les crues de l'Arve en octobre 1930. *Revue de Géographie Alpine*, 19, 495-497.
- PARDÉ, M. (1941). La crue de septembre 1940 dans les Alpes du Nord. *Revue de Géographie Alpine*, 29, 107-134.
- PASSEGA, R. (1957). Texture as characteristic of clastic deposition. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 41(9), 1952-1984.
- PASSEGA, R. (1964). Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentology Petrology*, 34(4), 830-847.
- PASSEGA, R. (1977). Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. *Sedimentology*, 24, 723-733.
- PASSEGA, R. & R. BYRAMJEE (1969). Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 13, 233-252.
- PAUTOU, G. (1984). L'organisation des forêts alluviales dans l'axe rhodanien entre Genève et Lyon ; comparaison avec d'autres systèmes fluviaux. *Documents de Cartographie Ecologique*, 27, 43-64.

- PAUTOU, G. & GIREL, J. (1994). Interventions humaines et changement de la végétation alluviale dans la vallée de l'Isère (de Montmélian à Port-St-Gervais). *Revue de Géographie Alpine*, 82, 127-146.
- PAUTOU, G. & MANNEVILLE, O (1995). *Les Eco-complexes : structure, fonctionnement, dynamique et gestion ; l'exemple de la plaine alluviale du Rhône entre Genève et Lyon*. Directeur de publication, J. Bouvet, Centre de télé-enseignement à distance. Universités fédérées ; Tome 61, Maîtrise de Sciences Naturelles, écologie appliquée, gestion des milieux naturels, 233 p.
- PAUTOU, G., J. GIREL & J.-L. BOREL (1992). Initial repercussions and hydroelectric developments in the french Upper Rhone valley : a lesson for predictive scenarios propositions. *Environmental Management*, 16(2), 231-242.
- PAUTOU, G., J. GIREL, B. LACHET, G. AIN (1979). Recherches écologiques dans la vallée du Haut Rhône français. *Document de Cartographie Ecologique*, 22, 5-63.
- PAUTOU, G., J. GIREL, M.-P. PAUTOU & R. GRUFAZ (1995). Hydrologie, paludisme et démoustication ; l'exemple de la Région Rhône-Alpes. *Revue de Géographie Alpine*, 83(1), 33-52.
- PAUTOU, G., J. GIREL, J.-L. PEIRY, F.M.H. HUGHES, K.S. RICHARDS, R. FOUSSADIER, B. GARGUET-DUPORT, T. HARRIS & N. BARSOUM (1996). Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux. L'exemple du Haut-Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan. *Revue d'Ecologie Alpine*, 3, 41-66.
- PAUTOU, G., J.-L. PEIRY, J. GIREL, E. BLANCHARD, F. HUGUES, K.S. RICHARDS, T. HARRIS, A. EL-HAMES, N. BARSOUM & R. FOUSSADIER (1997). Space-time units in floodplains : the example of the Drac river upstream of Grenoble (French Alps). *Global Ecology and Biogeography Letters*, sous presse.
- PELT, J.-M. (1996). *De l'Univers à l'Être*. Fayard, 122 p.
- PEIRY, J.-L. (1986). Dynamique fluviale historique et contemporaine du confluent Giffre-Arve (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon*, 61(1), 79-96.
- PEIRY, J.-L. (1987). Channel degradation in the middle Arve river, France. *Regulated Rivers*, 1, 183-188.
- PEIRY, J.-L. (1987). *Dynamique fluviale historique de l'Arve dans le bassin de Cluses (Haute-Savoie)*. 112^e Congrès National des Sociétés Savantes, Lyon. Section de Géographie, Comité des Travaux Historiques et scientifiques, 95-108.
- PEIRY, J.-L. (1988). *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments. L'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*. Thèse de Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin, Lyon, 378 p.
- PEIRY, J.-L. (1989). La Mapped Sarde. Utilisation pour une étude historique de l'Arve. (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 197-203.
- PEIRY, J.-L. (1989). Les sédiments dans les torrents de l'Arve : discontinuité fonctionnelle et impacts de l'aménagement des bassins versants. *La Houille Blanche*, (3/4), 205-211.
- PEIRY, J.-L. (1990). Les torrents de l'Arve : dynamique des sédiments et impact de l'aménagement des bassins versants sur l'activité torrentielle. *Revue de Géographie Alpine*, 78(1-2-3), 25-58.
- PEIRY, J.-L. (1990). Paléodynamique fluviale et chronologie de l'incision holocène de la basse vallée de l'Arve (haute-Savoie). *Revue géographique de l'Est*, (1), 77-92.
- PEIRY, J.-L. (1994). Application de l'analyse statistique multivariée et de l'image CM des dépôts fluviaux à la reconstitution des paléoenvironnements fluviaux : l'exemple d'un bras mort du Rhône en amont de Lyon. *Quaternaire*, 5(2), 59-67.
- PEIRY, J.-L. (1994). *L'ingénieur et la rivière dans la vallée de l'Arve (Haute-Savoie) et ses conséquences sur la dynamique fluviale contemporaine*. In : "Le Fleuve et ses métamorphoses". Didier Erudition, Paris, 245-255.

- PEIRY, J.-L. (1995). *Atelier impact et évaluation*. C. R. des Entretiens sur l'Eau (2ème édition) - "Qualité des Hydrosystèmes Continentaux", Grenoble (France), 29 et 30 mars 1995. Publ. Electricité de France, Paris, 39-53.
- PEIRY, J.-L. (1995). *Etude morphodynamique des bassins versant de l'Aire et de la Drize*. Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble ; Etat de Genève ; SIVOM de St-Julien-en-Genevois, rapport d'étude, 75 p.
- PEIRY, J.-L. (1996). La charge en suspension et la charge dissoute dans l'Isère à Grenoble : protocole de mesure et de test des données. *Revue de Géographie Alpine*, 84(2), 103-110.
- PEIRY, J.-L. & C. FÉOUGIER (1997). A propos de la fondation de Grenoble : un réexamen de l'hypothèse d'une installation primitive sur un môle alluvial. *Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes, sous presse*.
- PEIRY, J.-L. & F. NOUGUIER (1994). Le Drac dans l'agglomération de Grenoble : première évaluation des changements géomorphologiques contemporains. *Revue de Géographie Alpine*, 82(2), 77-96.
- PEIRY, J.-L. & F. VAUTIER (1996). *Etude géomorphologique en vue de la gestion de l'Arc (Bouches-du-Rhône)*. Syndicat pour l'Aménagement du Bassin de l'Arc (SABA) - SIEE - Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, rapport d'étude dactyl.
- PEIRY, J.-L. & H. VIVIAN (1994). *Dynamique des crues et réduction de la capacité du chenal consécutive à la construction d'un barrage hydroélectrique : l'exemple du Drac inférieur en amont de Grenoble*. Congrès "Crues et inondations", Nîmes, 14, 15 et 16 septembre 1994. XXIII^e Journées de l'Hydraulique, Publications Société Hydrotechnique de France, Paris, 321-329.
- PEIRY, J.-L. & J.-P. BRAVARD (1989). Evolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impacts des aménagements contemporains : l'exemple de la vallée de l'Arve (74). *La Houille Blanche*, (3/4), 221-225.
- PEIRY, J.-L. & N. PUIPIER (1994). *La notion de lit fluvial sur les rivières alpines et méditerranéennes et ses implications pour la gestion du chenal*. Actes du Colloque "Aménagement et gestion des grandes rivières méditerranéennes", Avignon, 8-9-10 septembre 1993. *Etudes Vauclusiennes, Numéro spécial - n°5*, 51-57.
- PEIRY, J.-L., J. GIREL & G. PAUTOU (1997). *Hydroelectrical developments and their impact on fluvial hydrosystems*. In : "Encyclopedia of Environmental Sciences". D. Alexander (Ed.), sous presse.
- PEIRY, J.-L., P. G. SALVADOR & F. NOUGUIER (1994). L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 47-56.
- PERSAT, H. (1990). Espace et temps, pierres d'achoppement des études d'impact en milieu fluvial. *Bulletin Ecologique*, 22(1), 203-212.
- PETIT, F. (1989a). Evaluation des critères de mise en mouvement et de transport de la charge de fond en milieu naturel. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 91-112.
- PETIT, F. (1989b). L'influence de la forme des cailloux en tant que facteur de résistance à l'érosion. *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), 231-239.
- PETIT, F. (1988). Phénomènes influençant la mise en mouvement et le transport des particules en rivières naturelles. *Zeitschrift Geomorphologie*, 32(3), 299-310.
- PETIT, F., D. POINSART & J.-P. BRAVARD (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26, 209-226.
- PETTS, G. E. & J.-P. BRAVARD (1993). *Le réseau hydrographique dans le bassin-versant*. In : "Hydrosystèmes fluviaux". C. Amoros & G. E. Petts (Ed.), Masson, Paris, 21-41.
- PETTS, G. E. (1984). *Impounded rivers : perspectives for ecological management*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 326 p.

- PETTS, G. E. & C. AMOROS (1993). *Le concept d'hydrosystème appliqué à la gestion écologique des fleuves*. In : "Hydrosystèmes fluviaux." C. Amoros et G. E. Petts (Ed.), Masson, Paris, 257-274.
- PETTS, G. E., A. R. G. LARGE, M. T. GREENWOOD & M. A. BICKERTON (1992). *Floodplain assessment for restoration and conservation : linking hydrogeomorphology and ecology*. In : "Lowland floodplain rivers : geomorphological perspectives". P. A. Carling & G. E. Petts (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 217-234.
- PIÉGAY, H. (1993). Impact de la crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992 sur la forêt alluviale. *Mappemonde*, (4), p. 3.
- PIÉGAY, H. (1993). Nature, mass and preferential sites of coarse woody debris deposits in the lower Ain valley (Mollon reach), France. *Regulated rivers : research & management*, 8, 359-372.
- PIÉGAY, H. (1995). *Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye), XIX^e-XX^e siècles*. Thèse de Géographie et Aménagement. Université Paris IV - Sorbonne, 259 p.
- PIÉGAY, H. (1996). Représentation de la biodynamique fluviale : la forêt alluviale de la moyenne Ardèche. *Mappemonde*, (3), 15-22.
- PIÉGAY, H. & J.-L. PEIRY (1997). Long profile evolution of an intra-mountain stream and gravel load management : example of the middle Giffre river (French Alps). *Environmental Management*, sous presse.
- PIÉGAY, H., J.-P. BRAVARD & P. DUPONT (1994). *The french water law : a new approach for alluvial hydrosystems management, french alpine and perialpine stream examples*. In "Effects of human-induced changes on hydrologic systems". R.A. Marston & V.R. Hasfurther (Ed.). Jackson Hole, Wyoming, USA. American Water Resources Association, 371-383.
- PIÉGAY, H., O. BARGE, J.-P. BRAVARD, N. LANDON & J.-L. PEIRY (1996). *Comment délimiter l'espace de liberté des rivières ?* In : "L'eau, l'homme et la nature". Colloque, de la Société Hydrotechnique de France, 18-19-20 septembre 1996, Paris, 10 p.
- PILOT, J. J. A. (1859). *Grenoble inondé*. Grenoble, Maisonville & fils, 112 p.
- PLOYON, E. (1996). *Evolution de la couverture végétale et dynamique de la recharge sédimentaire sur un cours d'eau peu anthropisé. L'exemple de la Gresse (Isère)*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 95 p.
- POINSART, D. (1992). *Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides : l'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon*. Thèse de Géographie, Université Jean Moulin, Lyon, 501 p.
- PONT, D. & B. BOMBLED (1995). *Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure durant l'année hydrologique 94-95*. 7^e rencontres de l'Agence Régionale de l'Environnement PACA, Digne-les-Bains, 24-27 octobre 1995, 283-291.
- PUPIER, N. (1996). *Analyse des fluctuations récentes de la nappe d'un hydrosystème perturbé, l'Isère dans le Grésivaudan*. Thèse de Géographie, Institut de Géographie Alpine. Université Joseph Fourier, Grenoble, 219 p. + annexes.
- REID, L. M. & T. DUNNE (1996). *Rapid evaluation of sediment budgets*. GeoEcology paperback. Reiskirchen, Catena verlag, 164 p.
- RICHARDS, K. (1990). 'Real' geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 195-197.
- RICHARDS, K. & N. CLIFFORD (1991). Fluvial geomorphology : structured beds in gravelly rivers. *Progress in Physical Geography*, 15(4), 407-422.

- RICHARDS, K., F. HUGHES, A. EL-HAMES, T. HARRIS, G. PAUTOU, J.-L. PEIRY & G. GIREL (1996). *Integrated fields, laboratory and numerical investigations of hydrological influences on the establishment of riparian tree species*. In : "Floodplain Processes". M. Anderson, D. Walling & P. Bates (Ed.). Chichester, Wiley & Sons Ltd., 611-635.
- RIEGER, W. A., L. J. OLIVE & C.J. Gippel (1988). *Channel sediment behaviour as a basis for modelling delivery processes*. In : "Sediment budgets". M.P. Bordas & D.E. Walling (Ed.). IAHS-AIHS, publ. n°174, 541-548.
- RMC, SDAGE (1995). *Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse*. Comité de Bassin RMC, 4 volumes.
- RODITIS, J.-C. & D. PONT (1993). Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta. *Méditerranée* 3-4, 5-18.
- ROTNICKI, K. (1983). *Modelling past discharges of meandering rivers*. In : "Background to Palaeohydrology". K. J. Gregory (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 321-354.
- ROTNICKI, K. (1991). *Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous alluvial rivers and its palaeohydroclimatic implications*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 431-471.
- ROUSSET, A. (1993). *Exploitation de cartes anciennes pour une approche de l'évolution du profil en plan de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble, 135 p.
- ROUSSET-MESTRALLET, M. (1986). *Des torrents et des hommes : trois siècles d'histoire à Samoëns*. Marignier, Imprimerie Off'7, 150 p.
- ROY, H. (1927). La vallée de l'Isère en péril. *Revue de Géographie Alpine*, 15, 145-150.
- RUST, B. R. (1978). *A classification of alluvial channel systems*. In : "Fluvial sedimentology". A. D. Miall (Ed.), Memoirs of the Canadian Society of Petroleum Geologists, 5, 187-198.
- SALVADOR, P.-G. (1991a). La métamorphose des cours du Drac et de l'Isère à l'époque moderne dans la région grenobloise (Isère, France). *Physio-Géo*, (22-23), 173-178.
- SALVADOR, P.-G. (1991b). *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère - bassin de Malville et ombilic de Moirans (Bas-Dauphiné)*. Thèse de Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin, Lyon, 498 p.
- SCHUMM, S. A. (1977). *The fluvial system*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 335 p.
- SCHUMM, S. A. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annals of the Review of Earth Planetary* 13, 5-27.
- SCHUMM, S. A., M. D. HARVEY & C. C. WASTON (1984). *Incised channels - Morphology, dynamics and control*. Littleton, Water resources publications, 198 p.
- SCLAFERT, T. (1933). A propos du déboisement des Alpes du Sud. *Annales de Géographie*, 42, 266-277 et 350-360.
- SCLAFERT, T. (1934). A propos du déboisement des Alpes, le rôle des troupeaux. *Annales de Géographie*, 43, 126-145.
- SCLAFERT, T. (1959). *Cultures en haute-Provence. Déboisement et pâturages au Moyen-Age*. Paris, SEVEPN, 271 p.
- SEMHI, K. (1996). *Erosion et transferts de matières sur le bassin versant de la Garonne. Influence de la sécheresse*. Thèse de Géologie. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 200 p.
- SIRONNEAU, J. (1992). La nouvelle loi sur l'eau ou la recherche d'une gestion équilibrée. *Revue Juridique de l'Environnement*, 2, 137-233.

- SLAYMAKER, O. (1987). *The process geomorphology of British Columbia Pacific Ranges (Coast Mountains)*. "Processus et mesure de l'érosion". A. Godard & A. Rapp (Ed.), Paris, CNRS, 23-32.
- SMITH, D. G. (1976). Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 857-860.
- SOGREAH, (1993). *Aménagement de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan*. A. D. Isère-Drac-Romanche, rapport d'étude hydraulique, mai 1993, réf. 3 0114 R2.
- STANFORD, J. A., J. V. WARD, W.J. LISS, C.A. FRISSEL, R.N. WILLIAMS, J.A. LICHTOWITZ & C.C. COUTANT (1996). A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regulated Rivers : Research and Management*, 12, 391-413.
- STARKEL, L. (1983). *The reflection of hydrologic changes in the fluvial environment of the temperate zone during the last 15,000 years*. In : "Background to Palaeohydrology". K. J. Gregory (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 213-235.
- STARKEL, L. (1991). *Characteristics of temperate zone and fluvial palaeohydrology*. In : "Temperate palaeohydrology". L. Starkel, K. J. Gregory & J. B. Thornes (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 3-12.
- STARKEL, L. (1995). *Changes of river channels in Europe during the Holocene*. In : "Changing river channels." A. Gurnell & G. E. Petts (Ed.). Chichester, J. Wiley & Sons Ltd., 27-42.
- STARKEL, L. (1995). *Introduction to global palaeohydrological changes*. In : "Global continental palaeohydrology". K. J. Gregory, L. Starkel & V. R. Baker (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 1-20.
- STRUNK, H. (1989). Dendrogeomorphology of debris flows. *Estratto da "Dendrochronologia"*, 7, 15-25.
- STRUNK, H. (1991). Frequency distribution of debris flows in the Alps since the "Little Ice Age". *Zeitschrift Geomorphologie, S.B.* 83, 71-81.
- STRUNK, H. (1992). *Reconstructing debris flow frequency in the southern Alps back to AD 1500 using dendrogeomorphological analysis*. In : "Erosion, debris flows and Environment in Mountain Regions", Chengdu, IAHS-AIHS, publ. n°209, 299-306.
- SUNDBORG, A. (1967). Some aspects on fluvial sediments and fluvial morphology ; general views and graphic methods. *Geografiska Annaler*, 49A, 333-343.
- THIOULOUSE, J. (1989). Statistical analysis and graphical display of multivariate data on the Macintosh. *Computer Applications in the Biosciences*, 5(4), 287-292.
- THIOULOUSE, J. (1990). MacMul and GraphMu : two MacIntosh programmes for the display and analysis of multivariate data. *Computers and Geosciences*, 8, 1235-1248.
- THOM, A. S. & LEDGER, D. C. (1976). Rainfall, runoff, and climatic change. *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 2/61, 631-652.
- TRICART, J. (1960). Mécanismes normaux et phénomènes catastrophiques dans l'évolution des versants du bassin du Guil (Hautes-Alpes). *Zeitschrift Geomorphologie*, 5(4), 277-301.
- VADOT, L. (1987). Histoire énergétique du ruisseau de la Combe de Lancey. *Le Monde Alpin et Rhodanien*, (3-4), 67-86.
- VEROT, A., C. JACQUET, et al. (1987). *Le site Gallo-Romain de la place Bellecour (Lyon 2e) ; reconstitution interdisciplinaire du paléoenvironnement*. La ville et le fleuve, Lyon, C.T.H.S.
- VIVIAN, B. J. & J. N. QUINTON (1993). Automated water sampling in ephemeral hydrological systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 863-868.

- VIVIAN, H. (1986). Un exemple de régime influencé : hydrologie et hydroélectricité dans les cours d'eau des Alpes du Nord. *Hydrologie continentale*, 1(1), 63-78.
- VIVIAN, H. (1989). *Hydrological changes of the Rhône river*. In : "Historical change of large alluvial rivers : western Europe". G. E. Petts (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 57-77.
- VIVIAN, H. (1994). L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Revue de Géographie Alpine*, 82(2), 97-112.
- VIVIAN, H. & N. PUIPIER (1996). Crues et aménagements hydroélectriques. L'exemple des crues de l'Isère et du Drac à Grenoble. *Hommes et terres du Nord*, (1), 13-19.
- WALLING, D. E. & B. W. WEBB (1986). *Solutes in river systems*. In : "Solute Processes". S. T. Trudgill (Ed.). Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 251-327.
- WALLING, D. E. & B. W. WEBB (1992). *Water quality - I. Physical characteristics*. In : "The river handbook". P. Calow & G. E. Petts (Ed.). Oxford, Blackwell Scientific Publications. 1, 48-72.
- WANIEZ, P. (1990). *Système d'information géographique, initiation pratique sur MacIntosh*. Paris, Eyrolles, 150 p.
- WCDE (1987). *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. Oxford, Oxford University Press.
- WEBB, B. W. & D. E. WALLING (1992). *Water quality - II. Chemical characteristics*. In : "The river handbook". P. Calow & G. E. Petts (Ed.). Oxford, Blackwell Scientific Publications. 1, 73-100.
- WILLIAMS, G. P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.
- WILLIAMS, G. P. & M. G. WOLMAN (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. *Geological Survey Professional paper*, 1286, 83 p.
- WINGHART, J. & J. CHABERT (1965). Haut-Rhône à l'amont de Lyon : étude hydraulique de l'île de Miribel-Jonage. *La Houille Blanche*, (7), 1-20.
- WOLMAN, M. G. & J. P. MILLER (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68, 54-74.

TABLE DES FIGURES

—

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Figure I.1 - Localisation des cours d'eau étudiés, avec référence aux échelles spatiales et temporelles d'étude.** 26
- Figure I.2 - Organisation des différents chapitres de ce DHDR en fonction des échelles spatiales et temporelles abordées.** 27

PARTIE I

- Figure 1.1 - Topographie de la surface du Grenoble ancien ; le cœur de la vieille ville est légèrement exhaussé par rapport au reste de la cité, ce qui explique que l'inondation de 1859 ait laissé certaines rues exondées** (Source : Peiry & Féougier, 1997). 36
- Figure 1.2 - Topographie du toit de gravier à Grenoble ; le cœur de la ville ancienne est nettement plus bas que le reste de la cité** (Source : Peiry & Féougier, 1997). 37
- Figure 1.3 - Changements de la dynamique fluviale du confluent Drac-Isère depuis le XV^e siècle** (Source : Salvador, 1991, modifié). 37
- Figure 1.4 - Les enceintes successives de Grenoble : elles marquent le développement progressif de la ville en direction du Sud, puis de l'Ouest liée à la réussite du programme d'endiguement** (Source : Chomel, 1976, modifié). 38
- Figure 1.5 - Localisation du méandre étudié (A) dans la plaine alluviale du Rhône en amont de Lyon** (Source : Bravard, Peiry *et al.*, 1991, modifié). 40
- Légende de la figure 1.5**
- | | |
|--|--|
| 1 : Moraine würmienne et rissienne ; | 2 : Avancée maximum du glacier würmien ; |
| 3 : Retrait du Würm ; | 4 : Terrasse éoholocène ; |
| 5 : Terrasse atlantique ; | 6 : Bande active subboréale et subatlantique ; |
| 7 : Bande active historique ; | 8a : Zone hors lit majeur au XIX ^e siècle ; |
| 8b et c : Paléoméandres hors zone inondable au XIX ^e siècle ; | 10 : Limite de terrasse hypothétique ; |
| 9 : Limite de terrasse ; | 12 : Bois fossile extrait d'une gravière ; |
| 11 : Paléochenal ; | 14 : Bois fossile extrait dans un paléochenal. |
| 13 : Bois fossile extrait sur un banc caillouteux ; | |
- Figure 1.6 - Reconstitution stratigraphique après la discrimination statistique des unités sédimentaires par l'ACP ; A : Localisation des sondages en plan ; B : Plan d'échantillonnage ; F1 à F3 : Cartographie des coordonnées factorielles et regroupement des échantillons en 6 ensembles sédimentaires ; a/ Groupements sédimentaires (1 à 6) et mélange (M) ; b/ Matière organique ; c/ Zone de transition sédimentaire** (Source : Peiry, 1994). 40
- Figure 1.7 - A/ Discrimination des unités sédimentaires sur le plan factoriel F1/F2 ; B/ Graphe des valeurs propres ; C) Classes de tailles (µm)** (Source : Peiry, 1994). 41
- Figure 1.8 - Variations spatiales de la texture des dépôts représentée par les histogrammes des distributions granulométriques** (Source : Peiry, 1994). 41
- Figure 1.9 - Image CM des unités sédimentaires : chaque courbe-enveloppe regroupe les prélèvements discriminés par l'ACP dans un même sous-ensemble** (Source : Peiry, 1994). 42

Figure 1.10 - Reconstitution de la stratigraphie du fossé gallo-romain par l'étude sédimentologique des dépôts de remplissage.	43
Figure 1.11 - Reconstitution du fossé de Sainte-Claire ; plan factoriel F1/F2 de l'ACP sur profils.	44
Figure 1.12 - Différentes cotes mesurées pour dresser le profil en long d'un cours d'eau à partir des profils en travers.	50
Figure 1.13 - Superposition des cartes de 1785 (Ing. Marmillot), de 1846 (Charpin) et de 1991 (IGN) sur une courte section de l'Isère en amont de Grenoble (Source : Pupier, 1996).	51
Figure 1.14 - Indices de sinuosité (A) et de tressage (B) des rivières à bras multiples. N : nombre de bras ; S : taux de sinuosité moyen (Source : Peiry, 1989).	52
Figure 1.15A - Physionomie en plan du chenal de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan, d'après le "Plan Mermillot" de 1785 (Source : Rousset, 1993, modifié).	53
Figure 1.15B - Physionomie en plan du chenal de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan, d'après le "Plan Charpin" de 1846 (Source : Rousset, 1993, modifié).	54
Figure 1.16 - Evolution amont-aval de la largeur du chenal en 1785 et 1846. La figure inférieure superpose les courbes enveloppes à trois dates successives, traduisant la transformation du paysage fluvial suite au développement de l'endiguement (Source : d'après les mesures de Rousset, 1993).	57
Figure 1.17 - Changements géomorphologiques affectant le chenal du Drac avant la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers, à l'occasion des crues de la période 1948-1956.	59
Figure 1.18 - Carte de sectorisation morphodynamique de l'Aire et de la Drize et extrait de la carte morphodynamique au 1/2500^e (Fiche Drize n° 5).	66
Figure 1.19 - Relations entre les processus de versant et les processus fluviaux sur le Tacon et le Flumen.	68
Figure 1.20 - Croisement cartographique des variables décrivant la dynamique des versants.	71
Figure 1.21 - Processus géomorphologiques et nature des apports sur les égrevines du Tacon et du Flumen	72
Figure 1.22 - Degré d'activité et estimation des surfaces actives sur les égrevines du Tacon et du Flumen	73
Figure 1.23 - Localisation des bras morts étudiés dans la zone de Miribel-Jonage	74
Figure 1.24 - Exemple de fiche de terrain dressée à l'occasion de l'étude des bras morts de Miribel-Jonage (Source : Bakès, 1995, modifié).	75
Figure 1.25 - Calcul de nouvelles variables morphométriques par recombinaison des variables initiales.	76
Figure 1.26 - Types de cartes thématiques pouvant être dressées à partir de la base de données quantitative ; A : morphométrie ; B : formations superficielles ; C : végétation (d'après les données de Bakès, 1995).	77
Figure 1.27 - Cartes factorielles F1 à F3 et découpages en tronçons homogènes par superposition des axes factorielles F1 à F3.	78
Figure 1.28 - Plan factoriel et cercles des corrélations montrant la position des variables et des individus.	79

Figure 1.29 - Typologie des bras morts de l'île de Miribel-Jonage (Source : Bakès, 1995, modifié).	81
Figure 1.30 - Organigramme des méthodes mises en œuvre dans le cadre des trois études de cas présentées.	83
Figure 1.31 - Sectorisation de l'instabilité latérale le long de la basse vallée de l'Ain (Source : Bravard, Franc <i>et al.</i> , 1990, modifié).	85
 PARTIE II	
Figure 2.1 - L'Isère en amont de Grenoble ; localisation des sites de mesure dans la vallée du Grésivaudan	95
Figure 2.2 - Evolution amont-aval de la végétalisation de l'Isère entre le pont de la Gâche (entrée du département de l'Isère) et Grenoble ; les courbes représentent le cumul amont-aval des surfaces intra-digues couvertes de végétation (Source : EPTEAU S.A., 1996).	97
Figure 2.3 - Basculement du profil en long de l'Isère depuis la mise en service de la dérivation Arc-Isère (1980) montré par le suivi de profils en travers ; le point de rotation du profil se trouve approximativement au pont de Brignoud (Source : EPTEAU S.A., 1996).	97
Figure 2.4 - Evolution de l'activité des fonds avec la diminution de la fourniture sédimentaire du chenal lors de phases de transport solide (Source : Dietrich, Kirchner <i>et al.</i> , 1989, modifié).	101
Figure 2.5 - Schématisation des stratégies interdisciplinaires de recherche mises en œuvre sur l'Isère.	102
Figure 2.6 - Diagramme de l'organisation de la recherche en géomorphologie fluviale sur l'Isère en amont de Grenoble (1^{er} janvier 1997).	103
Figure 2.7 - Distribution annuelle des travaux d'étudiants géographes portant sur la dynamique fluviale et la biogéographie des îles de l'Isère dans le Grésivaudan.	104
Figure 2.8 - Station de Grenoble-Campus ; localisation des appareillages de mesure et des capteurs (Source : Peiry, 1996, modifié).	110
Figure 2.9 - Relation liant la concentration issus des prélèvements par pompages avec : A) la turbidité moyenne de la demi-heure précédent le prélèvement ; B) la turbidité instantanée au moment du prélèvement.	112
Figure 2.10 - Chronique de la conductivité moyenne journalière (C_{Jmoy}) et de l'étendue journalière ($C_{Jmax}-C_{Jmin}$) à la station de Grenoble-Campus entre le 24 mai 1995 et le 31 décembre 1996.	113
Figure 2.11 - Mise en relation de la concentration moyenne mensuelle en charge dissoute et du débit moyen mensuel faisant apparaître le cycle annuel de la minéralisation des écoulements.	114
Figure 2.12 - Chroniques horaires de la conductivité et du débit mettant en évidence l'effet de la baisse de production hydroélectrique des week-ends sur l'hydrologie et les flux dissous.	114
Figure 2.13 - Fluctuations accidentelles de la conductivité de l'Isère à la station de Grenoble-Campus.	115
Figure 2.14 - Chronique journalière des transports de matière dissoute totale entre novembre 1994 et juin 1996.	116

Figure 2.15 - Transport mensuel et transport cumulé de matière dissoute totale sur l'Isère à la station de Grenoble-Campus entre le 1^{er} novembre 1994 et 30 octobre 1996.	116
Figure 2.16 - Relation conductivité journalière/débit journalier à la station Grenoble-Campus pour la période du 24/05/95 au 31/06/96.	117
Figure 2.17 - Chroniques de la concentration en MES au cours des 3 premières années de mesure.	118
Figure 2.18 - Distribution annuelle des concentrations au cours des deux premières années de mesure.	119
Figure 2.19 - Diagramme des concentrations et des débits des 11 crues de MES observées par turbidimétrie à la station de Grenoble-Campus.	120
Figure 2.20 - Typologie provisoire des hystérésis entre la concentration en MES et le débit à la station de Grenoble-Campus.	121
Figure 2.21 - Transports solides cumulés de MES au cours des trois premières années de mesure.	123
Figure 2.22 - Débits classés supérieurs à 350 m³.s⁻¹ à la station de Grenoble Campus en 1994, 1995 (d'après les données hydrologiques fournies par Ph. Bois).	124
Figure 2.23 - Relations concentration/débit à la station de Grenoble-Campus depuis le début des mesures.	126
Figure 2.24 - Evolution saisonnière de la relation concentration/débit au cours de l'année 1995-96.	126
Figure 2.25 - Cartographie thématique des sols nus et de la géologie favorable à l'érosion sur les bassins-versants de rang 4 de l'Isère (Source : Latulippe & Peiry, 1996 modifié).	128
Figure 2.26 - Classement des bassins-versants en fonction de leur indice de sensibilité globale à l'érosion (Source : Latulippe & Peiry, 1996).	132
Figure 2.27 - Hiérarchisation cartographique des bassins-versants de rang 4 en fonction de leur sensibilité à l'érosion (Source : Latulippe et Peiry, 1996).	132
Figure 2.28 - Instrumentation de l'île de Brignoud - a/ vue en coupe ; b/ vue en plan (Source : Richards, Hughes et al., 1996).	138
Figure 2.29 - Principe de la modélisation de l'inondabilité et de la sédimentation sur l'île de Brignoud.	140
Figure 2.30 - ISÈRE - Relation hauteurs d'eau Campus/île de Brignoud	141
Figure 2.31 - ISÈRE - Île de Brignoud ; pente de la ligne d'eau lors de la crue du 25-26 février 1995 (585 m³.s⁻¹).	142
Figure 2.32 - Confrontation entre la modélisation et la réalité lors de la crue du 25-26 février 1995.	143
Figure 2.33 - ISÈRE - Île de Brignoud - Hiver 1994. Inondabilité pour des débits de 400 à 650 m³.s⁻¹.	144
Figure 2.34 - ISÈRE - Île de Brignoud - Hiver 1995. Inondabilité pour des débits de 400 à 650 m³.s⁻¹.	145

Figure 2.35 - Variation de la surface et du volume hors d'eau de l'île de Brignoud pour différentes situations d'inondation en 1994 et 1995.	146
Figure 2.37 - Variation du volume des dépôts et des érosions de l'île de Brignoud en 1994 et 1995.	146
Figure 2.36 - ISÈRE - Île de Brignoud - Epaisseur des formations superficielles fin 1993 et variation annuelle des dépôts en 1994 et 1995.	147
Figure 2.38 - ISÈRE - île de Brignoud - Haut : granulométrie ; variation spatiale de la médiane (microns). Bas : végétation, printemps 1994.	150

PARTIE III

Figure 3.1 - Localisation du tressage alpin à la fin du XVIII^e siècle (Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié).	160
Figure 3.2 - Reconstitution du tressage à bras divagants de l'Arve entre le confluent du Giffre et Bonneville, d'après la Mappede Sarde de 1730 (Source : Peiry, 1989).	161
Figure 3.3 - Progradation de la bande de tressage sur le Drac et l'Isère à Grenoble au cours de l'Epoque Moderne (Source : Salvador, 1991a).	162
Figure 3.4 - Chronologie des projets et réalisations de l'endiguement sur quelques rivières alpines (Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié).	167
Figure 3.5 - Extension de l'endiguement longitudinal sur les rivières alpines à la fin du XIX^e siècle (Source : Bravard & Peiry, 1993, modifié).	169
Figure 3.6 - Élévation progressive des niveaux atteints par les crues de l'Arve au pont de Bonneville entre 1850 et 1940 (d'après les données de Pardé, 1931 et 1941).	171
Figure 3.7 - Exhaussement du fond moyen de l'Isère entre 1854 et 1943 (Salvador, 1991 ; Peiry, Salvador et al., 1994).	172
Figure 3.8 - Evolution de l'altitude du lit du Drac entre 1896 et 1975. A) Exhaussement du chenal pendant la première moitié du XX^e siècle ; B) Rapide et profonde incision après 1950 (Source : Peiry & Nougouier, 1994).	173
Figure 3.9 - Mécanismes immédiats et différés de l'impact ; l'exemple de l'endiguement de l'Isère dans la Combe de Savoie et le Grésivaudan au XIX^e siècle (Source : Bravard & Peiry, 1993).	175
Figure 3.10 - Système de colmatage Sarde établi dans la plaine d'inondation de l'Isère (Combe de Savoie) : a) système à déversements simultanés ; b) système à déversements successifs (Source : Girel, 1994).	176
Figure 3.11 - Localisation des principales zones d'incision le long des rivières des Alpes du Nord (Source : Peiry, Salvador et al., 1994). Incision : 1/ continue ; 2/ ponctuelle ; Exhaussement : 3/ continu ; 4/ ponctuel ; 5/ Cours d'eau étudiés ; 6/ Cours d'eau sur lesquels les données ou les observations manquent	182
Figure 3.12 - Abaissement des lignes d'eau de l'Arve entre la ville de Cluses et le confluent du Giffre. L'incision qui avoisinait 10 mètres avant l'aménagement du lit en 1983 a été accentuée par l'exhumation d'une épaisse formation fine holocène (Source : Peiry, 1988, modifié).	183

- Figure 3.13 - Principales modifications engendrées par l'homme sur les rivières des Alpes du Nord depuis le milieu du XX^e siècle** (Source : Peiry, Salvador *et al.*, 1994).
 1/ Extractions de gravier de volume connu entre 1950 et 1985 ; 2/ Extractions de volume inconnu ; 3/ Réservoir hydroélectrique modifiant les flux d'eau et de sédiments (Rhône exclu) ; 4/ Usine hydroélectrique ; 5/ Principaux périmètres d'intervention du Service de Restauration des Torrents de Montagne (RTM) ; 6/ Principaux endiguements longitudinaux insubmersibles ; 7/ Cours d'eau hors étude. 186
- Figure 3.14 - Typologie simplifiée des aménagements hydroélectriques alpins depuis le début du XX^e siècle** (Source : Peiry, Girel *et al.*, 1997, modifié). 188
- Figure 3.15 - Schéma hydraulique de la Romanche et du Drac en amont** (Source : Peiry & Nougquier, 1994). 189
- Figure 3.16 - Artificialisation des débits dans les Alpes du Nord à tous les pas de temps ; l'exemple du bassin de l'Isère en amont de Grenoble** : A) Diminution des modules (d'après les données de Vivian, 1994) ; B) Transformation des débits moyens journaliers classés (Source : Besson, 1992, modifié) ; C) Fluctuations des niveaux horaires en relation avec les lâchers des usines hydroélectriques (d'après les données transmises par Ph. Bois, ENSHM Grenoble). 192
- Figure 3.17 - A/ Débits classés déversés en aval du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (moyenne 1965-96)**. En moyenne, le débit journalier n'est supérieur à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que $20 \text{ j} \cdot \text{an}^{-1}$; pendant $35 \text{ j} \cdot \text{an}^{-1}$, un débit de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s'écoule dans le chenal court-circuité afin de soutenir la nappe captée alimentant Grenoble en eau potable ; au-dessus de la valeur de $60 \text{ j} \cdot \text{an}^{-1}$, le débit est invariablement de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source : Peiry & Vivian, 1994, actualisé) ; B/ Régime hydrologique du Drac avant et après la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (Source : Peiry & Vivian, 1994, actualisé). 193
- Figure 3.18 - Hydrogramme de la crue du 8-9 octobre 1993** (Source : Peiry & Vivian, 1994). 193
- Figure 3.19 - Dérivation hydroélectrique Arc-Isère et perturbation du régime hydrologique à Saint-Jean-de-Maurienne** (d'après Vivian, 1994 & Pupier, 1996). 195
- Figure 3.20 - Extraction de graviers sur le Drac aval entre 1950 et 1972** (Source : Peiry & Nougquier, 1994, modifié). 197
- Figure 3.21 - Localisation des secteurs d'étude sur le Drac inférieur.** 203
- Figure 3.22 - Dynamique du chenal du Drac entre la presqu'île de Commiers et la Romanche**. A) Régime hydrologique ; B) Débits classés ; C) Style fluvial en tresse du chenal ; D) Evolution amont-aval du profil en long et de la pente du chenal (1913) ; E) Modifications affectant le chenal au cours de la période 1948-1955 (Source : Peiry & Vivian, 1994). 205
- Figure 3.23 - Changements affectant le débit journalier maximum entre 1939 et 1996**. La mise en eau du barrage (1963) s'est traduite par une très forte diminution des transits. Une longue période sans crue supérieure à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ marque les années 1980 à 1992 ; seulement 3 événements ont dépassé $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au cours de 33 dernières années dont deux rapprochés en 1993 et 1995. 206
- Figure 3.24 - Transformation du lit court-circuité du Drac en aval de la retenue de Notre-Dame-de-Commiers**. A) Vue en plan de la bande active ; B) Réduction de la surface du chenal (Source : Peiry & Vivian, 1994). 207
- Figure 3.25 - Cumul amont-aval des surfaces pour lesquels des arrachages massifs de végétation ont été observés lors de la crue du 8-9 octobre 1993.** 208
- Figure 3.26 - Evolution de la largeur du chenal court-circuité entre 1992 et 1993**. Pour l'essentiel, les changements observés sont dus à la crue du 8-9 octobre 1993 ; la crue plus faible de 1995 n'a provoqué que des retouches limitées. 209

Figure 3.27 - Changement de la physionomie du Drac entre 1948 et 1994, en amont de Pont-de-Claix (Source : Pautou, Peiry <i>et al.</i> , 1997).	211
Figure 3.28 - Evolution de la largeur du chenal et de la végétalisation du Drac en aval de Pont-de-Claix. - A/ Concentration progressive des écoulements ; B) Progression de la surface du chenal végétalisée (Source : Peiry & Nouguié, 1994).	212
Figure 3.29 - Transects biogéomorphologiques sur le Drac dans la plaine de Grenoble (Source : Pautou, Peiry <i>et al.</i> , 1997).	214
Figure 3.30 - Les unités "espace-temps" du Drac dans la plaine de Grenoble (Source : Pautou, Peiry <i>et al.</i> , 1997).	215
Figure 3.31 - Bassin-versant de la Gresse : localisation de la zone d'étude (Source : Ployon, 1996, modifié).	222
Figure 3.32 - Evolution des taux de boisement entre 1829 et 1988 (Source : d'après Ployon, 1996).	224
Figure 3.33 - Localisation de la bande des 300 mètres de part et d'autre du réseau hydrographique ayant fait l'objet d'une étude cartographique (Source : Ployon, 1996).	225
Figure 3.34 - Evolution de la nature de l'occupation du sol entre 1956 et 1994 (d'après les données de Ployon, 1996).	225
Figure 3.35 - Distribution des sols nus en fonction de la nature géologique des terrains et variation de la surface de chacune des modalités de sol nu entre 1956 et 1994.	226
Figure 3.36 - Localisation des zones soumises à reboisement à proximité du réseau de drainage (Source : Ployon, 1996).	227
Figure 3.37 - Localisation des sols nus soumis à la végétalisation entre 1956 et 1994 (Source : Ployon, 1996).	227
Figure 3.38 - Distribution des zones de recharge en fonction de leur surface active et de leur degré d'activité (d'après les données de Ployon, 1996).	228
Figure 3.39 - Modèle conceptuel des variations relatives des flux de sédiments (Qs) et des débits liquides (Ql) sur les rivières des Alpes du Nord depuis le milieu du XIX^e siècle. Les flux Qs et Ql abondants de la fin du Petit-Age-Glaciaire servent de référence pour les changements relatifs.	237
Figure 3.40 - Schématisation de la "dérive" des hydrosystèmes fluviaux, sous l'effet des interventions successives de l'homme.	242
Figure 3.41 - Principes d'ingénierie géomorphologique sur quelques rivières des Alpes du Nord et de montagne (Source : Bravard, Landon <i>et al.</i> , 1997 modifié).	257
Figure 3.42 - La basse vallée de l'Arve en aval de Bonneville. Au tressage actif de 1730 s'est substitué une rivière à lit unique bordée de très nombreuses gravières en eau, provoquant le mitage du corridor végétal (Peiry & Bravard, 1989).	258
Figure 3.43 - Projet de protection de Grenoble contre la crue bicentennale et conséquences sur l'expansion de l'inondation. Le champ d'inondation de référence est celui de la crue de novembre 1859. La réduction de la zone inondable témoigne de l'impact de l'endiguement et de l'incision du chenal (d'après des documents de l'A.D. Isère, Drac, Romanche).	259
Figure 3.44 - Traitement des problèmes d'érosion en ingénierie fluviale sur le Tacon (PNR du Haut-Jura) (Source : Bravard & Peiry, 1994).	262

TABLE DES TABLEAUX

—

PARTIE I

Tableau 1.1 - Longueur et superficie du méandre des Eparres (Isère) recoupé en 1729, d'après divers documents d'archives (commune de Saint-Martin-d'Hères) (d'après les données de Caussin, 1995).	51
Tableau 1.2 - Evolution du taux de sinuosité (SI) avant, pendant et après l'endiguement de l'Isère (d'après les cartes de Rousset, 1993).	56
Tableau 1.3 - Avantages présentés par l'adoption d'une approche basée sur le SIG en géomorphologie fluviale (d'après Downward, Gurnell <i>et al.</i>, 1994).	58
Tableau 1.4 - Exemple de fiche de tronçon sur la Drize. Sa localisation figure sur la carte de synthèse (fig. 1.18). La cartographie au 1/2.500e de cette zone correspondant à un avant-projet sommaire apparaît également sur la figure 1.18, comme extrait de la carte originale.	65
Tableau 1.5 - Liste des caractères et modalités répertoriés sur chaque fiche de site. NB : Q (quantitatif) ; qN (qualitatif nominal) ; qO (qualitatif ordinal) ; QRM (question à réponses multiples)	69
Tableau 1.6 - Exemple d'une fiche de terrain dressée sur le Tacon (Source : Bravard & Peiry, 1994).	70
Tableau 1.7 - Variables retenues pour le traitement statistique en ACP centrée réduite.	80
Tableau 1.8 - Les variables géomorphologiques étudiées sur la basse vallée de l'Ain et leurs modalités (Source : Piégay, Barge <i>et al.</i>, 1996).	84

PARTIE II

Tableau 2.1 - Quelques caractéristiques des rivières sur lesquelles les processus de régénération végétale ont été étudiés.	96
Tableau 2.2 - Principales caractéristiques des rivières faisant l'objet d'un étude dans le cadre du second contrat européen.	96
Tableau 2.3 - Basculement du profil en long de l'Isère au cours des décennies quatre-vingt et quatre-vingt dix (Source : A.D. Isère-Drac-Romanche, 1993, modifié).	98
Tableau 2.4 - Les unités terrestres internes au système d'endiguement datant de la phase d'incision des années 1970 (d'après les données figurant dans Didier, 1994a ; Didier, 1994b ; Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel <i>et al.</i>, 1996).	99
Tableau 2.5 - Les unités terrestres des îles récentes colonisées par la végétation pionnière et en cours d'exhaussement rapide (d'après les données figurant dans Didier, 1994a ; Didier, 1994b ; Pautou & Girel, 1994 ; Pautou, Girel <i>et al.</i>, 1996).	99
Tableau 2.6 - Dérive du capteur pour des durées de 6 à 8 jours entre deux nettoyages et facteur de correction appliqué aux données de conductivité.	111
Tableau 2.7 - Différents modèles statistiques reliant la charge dissoute à diverses variables explicatives	117
Tableau 2.8 - Valeurs classées des concentrations supérieures en MES à 5 g.l⁻¹ mesurées sur l'Isère entre le 23 mars 1994 et le 22 mars 1996.	119

Tableau 2.10 - Classement des plus forts tonnages journaliers supérieurs à 100.000 t.j⁻¹ au cours des 3 années de mesure.	122
Tableau 2.11 - Relation Concentration-Débit à Grenoble-Campus pour les trois premières années de mesure.	125
Tableau 2.12 - Relation concentration-débit par périodes à Grenoble Campus pour l'année 1995-96.	125
Tableau 2.13 - Caractéristiques des formations géologiques les plus érodibles sur le bassin-versant de l'Isère (Source : Latulippe & Peiry, 1996).	129
Tableau 2.14 - Les 8 caractères retenus dans la base de données, leur coefficient de sensibilité à l'érosion et le B.V. auquel ce coefficient a été attribué.	129
Tableau 2.15 - Base de données initiale sur laquelle les calculs d'indices de sensibilité ont porté. Les combinaisons géologie/couverture végétale sont exprimées en pourcentage de la surface du bassin-versant considéré (Source : Latulippe & Peiry, 1996).	130
Tableau 2.16 - Calcul de l'indice de sensibilité globale à l'érosion SGI (Source : Latulippe & Peiry, 1996).	131
Tableau 2.17 - Nature des enregistrements de données sur l'île de Brignoud depuis décembre 1993.	137
Tableau 2.18 - Grilles de données actuellement disponibles pour l'analyse de l'évolution de l'île de Brignoud.	141
Tableau 2.19 - Evolution des volumes et surfaces des formations superficielles sur l'île de Brignoud entre l'hiver 1994 et l'hiver 1996.	146
Tableau 2.20 - Durée de submersion de l'île de Brignoud pour différents débits (d'après les données hydrométriques de la station de Grenoble-Campus).	148
Tableau 2.21 - Durées de submersion de l'île de Brignoud en 1994 et 1995 pour différents épisodes hydrologiques et concentration de MES associées à ces épisodes (d'après les mesures hydrométriques et de transport de MES faites à Grenoble-Campus).	149
 PARTIE III	
Tableau 3.1 - Typologie fonctionnelle des tressages alpins à la fin du XVIII^e siècle	159
Tableau 3.2 - Le réseau de drainage mis en place dans la plaine du Grésivaudan, en réponse au développement de l'insalubrité et à l'exhaussement du chenal (d'après Agard, 1942).	177
Tableau 3.3 - Principaux types d'aménagements et leurs incidences sur la dynamique contemporaine des flux solides (Qs) et liquides (Ql).	185
Tableau 3.4 - Typologie des aménagements hydroélectriques et quelques exemples de réalisation (d'après Edouard & Vivian, 1984, modifié).	188
Tableau 3.5 - Fréquence de dépassement des débits caractéristiques avant et après la construction du barrage de Notre-Dame-de-Commiers (Avignonet, 1939-61 : débits influencés par le Sautet ; 1965-96 : déversés du barrage de Notre-Dame-de-Commiers) (Source : d'après les données d'EDF, Energie-Alpes et Usine de St-Georges-de-Commiers).	191

Tableau 3.6 - ISÈRE, stations de MOUTIERS et de PONT-ROYAL ; évolution de la fréquence (%) des débits dépassant respectivement le DC_{10jours}, DC_{1mois} et le DC_{3mois}. Seuls, les mois de fort débit naturel ont été sélectionnés (mai à août). Les débits caractéristiques ont été calculés sur l'ensemble de la période de mesure (Moutier, 1903-1986 ; Pont-Royal, (1965-90) (Extrait de Besson, 1992).	195
Tableau 3.7 - Quelques caractéristiques morphologiques et hydrologiques du Drac "naturel" au droit du barrage de Monteynard.	204
Tableau 3.8 - Les crues de la période 1940-1955 : débits journaliers maximums et séquences de jours consécutifs de débits supérieurs à un seuil donné (d'après les données fournies par EDF-DTG, Grenoble).	204
Tableau 3.9 - Evolution amont-aval de la largeur du chenal pour chacun des tronçons au comportement homogène.	209
Tableau 3.10 - Sources documentaires utilisées sur le Drac dans la plaine de Grenoble, en amont et en aval de Pont-de-Claix.	210
Tableau 3.11 - Types d'investigations, niveaux d'échelle spatio-temporelle d'étude et méthodes mises en œuvre sur la Gresse (d'après Ployon, 1996).	223
Tableau 3.12 - Evolution des boisements des 3 communes localisées dans les terrains très affouillables du bassin de la Gresse (d'après Ployon, 1996).	223
Tableau 3.13 - Zone des 300 mètres de part et d'autre du chenal : A/ Distribution des 4 grands types de physionomie du sol ; B/ Distribution des modalités de la variable "sols nus".	224
Tableau 3.14 - Diminution des surface de sol nu entre 1956 et 1994 selon la nature géologique des terrains (Source : Ployon, 1996).	226
Tableau 3.15 - Typologie des principaux processus géomorphologiques connectés au chenal et efficacité vis-à-vis de la recharge (d'après les données de Ployon, 1996).	228
Tableau 3.16 - Fréquence actuelle et passée du mouvement de la charge de fond sur le Drac dans la plaine de Grenoble (Source : Peiry & Nouguié, 1994, modifié).	239
Tableau 3.17 - Les "dix commandements" de la durabilité (d'après Gardiner, 1995).	251
Tableau 3.18 - Caractéristiques respectives de l'approche ingénierique et géomorphologique vis-à-vis du problème pratique de la dynamique fluviale (Newson, 1995).	253
Tableau 3.19 - Synthèse des pratiques envisageables ou en cours d'ingénierie géomorphologique sur quelques rivières alpines ou de montagne (d'après Bravard, Landon <i>et al.</i>, 1997, modifié).	255
Tableau 3.20 - Volumes stockés et gains de débit par rapport à la situation actuelle (1992) compte-tenu des apports et des écrêtements successifs des casiers (Source : Etude hydraulique SOGREA, 1993).	259

TABLE DES PHOTOS



- Photo 3.1 - ARVE. Extraction de sable sur l'Arve à Genève, au début du XX^e siècle** (Collection : J.-L. Peiry). 199
- Photo 3.2 - DRAC SUPERIEUR. Extraction de gravier dans le chenal, à l'abri d'une levée alluvionnaire** (Cliché : N. Pupier, 1995). 199
- Photo 3.3 - ARVE. Seuil sous-fluvial bloquant l'érosion régressive en aval de Cluses. L'ouvrage, construit en 1983, était affouillé 10 ans plus tard, comme en témoigne le dégagement des fondations** (Cliché : J.-L. Peiry, 1993). 199
- Photo 3.4 - DRAC COURT-CIRCUITf DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Le lit tressé occupait la totalité de la largeur de la vallée au début du XX^e siècle ; l'instabilité latérale du chenal empêchait le développement des séquences végétales, celles-ci ne dépassant pas les stades pionniers** (Collection de l'Institut de Géographie Alpine). 217
- Photo 3.5 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Crue du 8-9 octobre 1993 au niveau du seuil de la Rivoire (550 m³.s⁻¹) . En situation de débit réservé (1,5 m³.s⁻¹), le seuil est totalement exondé** (Cliché : J.L. Peiry, 1993). 217
- Photo 3.6 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS. Blocage des embâcles dans les souilles d'extractions de gravier, en amont du seuil de la Rivoire, lors de la crue du 8-9 octobre 1993** (Cliché : J.L. Peiry, 1994). 217
- Photo 3.7 - DRAC À GRENOBLE. Développement de la végétation sur les bancs de galets, dans la section rectiligne endiguée au XVII^e siècle** (Cliché : J.-L. Peiry, 1993). 218
- Photo 3.8 - DRAC EN AMONT DE PONT-DE-CLAIX. Destruction de la forêt alluviale par le déplacement latéral du chenal de méandrage** (Cliché : J.-L. Peiry, 1997). 218
- Photo 3.9 - GRESSE. Incision du chenal au détriment du lit de galets se traduisant par la transformation de la plaine d'inondation en basse terrasse** (Cliché : E. Ployon, 1996). 233
- Photo 3.10 - GRESSE. Protection des berges par l'appareil racinaire des arbres poussant dans la plaine d'inondation** (Cliché : E. Ployon, 1996). 233
- Photo 3.11 - GRESSE. Purge de la charge de galets en période de pénurie de recharge sédimentaire ; l'incision est bloquée par la présence du bedrock schisteux** (Source : E. Ployon, 1996). 233
- Photo 3.12 - GRESSE. Incision du chenal bloquée par les schistes. la présence de quelques blocs sur le substratum témoigne du démantèlement récent de l'alluvium** (Cliché : E. Ployon, 1996). 234
- Photo 3.13 - DRIZE. Protection des berges argileuses par l'appareil racinaire des arbres poussant en bordure du chenal** (Cliché : J.-L. Peiry, 1994). 234
- Photo 3.14 - DRIZE. Destabilisation du chenal par la végétation. En poussant dans le chenal, les vieux arbres diminuent la section mouillée et accroissent les vitesses d'écoulement. Il en résulte des érosions de berge et de profonds surcreusements du fond** (Cliché, J.-L. Peiry, 1994). 234
- Photo 3.15 - ARVE. Développement d'îles boisées dans le lit de l'Arve en aval de Bonneville** (Cliché : J.-L. Peiry, 1993). 245

- Photo 3.16 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS.**
Développement de la forêt alluviale dans l'ancien chenal tressé ; cette situation contraste avec le faible développement végétal lorsque le tressage était fonctionnel (voir photo 3.4) (Cliché : J.-L. Peiry, 1993). 245
- Photo 3.17 - DRAC COURT-CIRCUITÉ DE NOTRE-DAME-DE-COMMIERS.**
Physionomie du chenal du Drac après la coupe à blanc de la végétation réalisée au printemps 1997 (Cliché : J.-L. Peiry, 1997). 245