



Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche de gisements alluvionnaires : application à la Loire Supérieure (42-France)

Françoise Allignol

► To cite this version:

Françoise Allignol. Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche de gisements alluvionnaires : application à la Loire Supérieure (42-France). Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 1997. Français. NNT : 1997STET2037 . tel-00824954

HAL Id: tel-00824954

<https://theses.hal.science/tel-00824954>

Submitted on 22 May 2013

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.

**UNIVERSITE JEAN MONNET
DE SAINT-ETIENNE**

**ECOLE NATIONALE DES MINES
DE SAINT-ETIENNE**

**Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche
de gisements alluvionnaires - application
à la Loire Supérieure (42 - France)**

**Thèse présentée par
Françoise ALLIGNOL**

pour obtenir le titre de Docteur en Géographie

Soutenue le : 4 avril 1997

Devant la commission d'Examen :

Jury : **B. Blavoux** Rapporteur

A. Musy Rapporteur

B. Etlicher

D. Graillot

G. Vitel

R. Déchomets

C. Vallier

**UNIVERSITE JEAN MONNET
DE SAINT-ETIENNE**

**ECOLE NATIONALE DES MINES
DE SAINT-ETIENNE**

**Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche
de gisements alluvionnaires - application
à la Loire Supérieure (42 - France)**

**Thèse présentée par
Françoise ALLIGNOL**

pour obtenir le titre de Docteur en Géographie

Soutenue le : 4 avril 1997

Devant la commission d'Examen :

Jury : **B. Blavoux Rapporteur**
A. Musy Rapporteur
B. Etlicher
D. Graillot
G. Vitel
R. Déchomets
C. Vallier

Contexte de la thèse et Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne sous la direction de Didier Graillot, Maître de Recherche (centre SIMADE - laboratoire Ingénierie de l'Environnement) et à l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne (département de Géographie Physique), sous la direction scientifique du Professeur Bernard Etlicher (CRENAM). Ce travail a bénéficié de la collaboration industrielle du groupe HORIZONS bureau d'études spécialisé en hydrogéologie (Villefontaine -38) et du soutien financier du Conseil Régional Rhône-Alpes.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

En tout premier lieu je voudrais remercier Monsieur le Professeur Bernard Etlicher. Malgré son double poste de Président de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne et d'enseignant-chercheur, Monsieur Etlicher a toujours répondu à mes demandes de soutien scientifique théorique et de terrain. De la même manière, les membres de son équipe du CRENAM m'ont réservé un accueil chaleureux et m'ont témoigné confiance et amitié. Je pense tout particulièrement à Bernard Dupuis, ingénieur en informatique spécialité Systèmes d'Information Géographique. Je n'oublierai pas Ahmed Chafchafi, Docteur en Géographie.

Je remercie Didier Graillot Directeur de Recherches pour m'avoir accueillie dans son laboratoire à l'Ecole des Mines. J'y ai trouvé des conditions de travail (matériel informatique, bases de données, etc.) exceptionnelles. Roland Déchomets responsable de l'équipe Systèmes d'Information Géographique m'a apporté un soutien scientifique constant tout au long de mon travail. Je le remercie très chaleureusement pour sa gentillesse et sa disponibilité malgré ses charges en enseignement et en recherche. Certaines personnes du laboratoire : doctorants, ingénieurs de recherche ou Professeurs, se sont aussi distingués par leur gentillesse, je voudrais citer François Laurent, Alicja Tardy, Bruno Debray, Sophie Perréard, Philippe Davoine, Philippe Beaune, Hervé Vaillant et Pascal Formysin.

Je voudrais aussi remercier Georges Vitel du département de Géologie de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, qui m'a accordé sa confiance depuis la lointaine époque de mon D.E.U.G. Environnement.

Alain Barat et Franck Lanclud du Groupe Horizons m'ont confié l'ensemble des données hydrogéologiques qui m'étaient nécessaires. Leur contribution à mon travail est donc très importante. De plus, il m'ont soutenue chaque année devant le conseil Scientifique de la Région Rhône-Alpes.

Christian Vallier de la société Morillon Corvol a accordé de l'intérêt à mon travail et m'a beaucoup aidée en apportant son point de vue professionnel.

J'ai partagé de longues heures de travail avec Frédéric Crépet grâce à nos sujets de thèse complémentaires. Les données échangées, nos réflexions communes en matière de géomorphologie fluviale m'ont été d'un grand secours.

Enfin, ces remerciements seraient très injustes et lacunaires s'ils ne s'adressaient pas aussi à mes parents sans qui ces longues études n'auraient jamais pu être suivies. La dernière année ayant été particulièrement difficile, leur soutien moral fut déterminant. Merci à ma grande soeur Claire, Docteur en Traductologie Technique et experte en état d'âme de thésards. Merci à Cathy, amie fidèle dans les grandes joies comme dans les grands désespoirs. Merci à mes amis alpinistes et grimpeurs qui m'ont aidée à conserver un certain équilibre. Merci à Fripouille, chat de son état, qui a supporté mes sautes d'humeur, a renversé des hectolitres de café sur ce manuscrit, et a donc contribué à sa façon féline, ronronnante et inconsciente à la réalisation de ce travail.

Liste des abréviations et symboles

Abréviations

A.E.P.	Alimentation en Eau Potable
A.M.L.	Arc Macro Language
B.D.	Base de Données
B.M.	Bande de Méandrage
B.R.G.M.	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C.D.C.	Commission Départementale des Carrières
C.P.G.F.	Compagnie de Prospection Géophysique Française
C.R.E.N.A.M.	Centre de Recherche sur l'ENvironnement et l'AMénagement
D.R.I.R.E.	Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche et de l'Environnement
D.S.	Dynamique des Systèmes
E.M.S.E.	Ecole des Mines de Saint-Etienne
F.R.A.P.N.A.	Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature
I.C.	Installations Classées
I.G.N.	Institut Géographique National
I.O.T.A.	Installations Ouvrages Travaux et Activités
L.H.F.	Laboratoire Hydraulique de France
M.N.T.	Modèle Numérique de Terrain
N.G.F.	Nivellement Général Français
O.A.D.	Outil d'Aide à la Décision
S.A.G.E.	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
S.D.A.G.E.	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
S.D.C.	Schéma Départemental des Carrières
S.E.	Système Expert
S.E.M.C.	Sablières et Entreprises Morillon Corvol
S.I.	Syndicat Intercommunal
S.I.G.	Système d'Information Géographique
T.I.F.	Tag Image File
T.I.N.	Triangulated Irregular Network
WWF	World Wild life Funds ou encore, l'Association Internationale de Protection de la Nature - France
Z.I.	Zones Inondables
Z.N.I.E.F.F.	Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique

Symboles

K	perméabilité en m/s
S	emmagasinement en %
T	transmissivité en m^2/s
e_0	épaisseur mouillée en m
H	piézométrie en m

Glossaire

capture: mise en contact direct entre la carrière et le fleuve lors d'une crue par rupture de digue ou de berge.

découverte: sol recouvrant les gisements de sables et granulats qui doit être enlevé avant d'extraire.

hydrosystème fluvial: [Amoros C. Petts G.E., 1993] concept fondé sur la prise en considération (outre le gradient amont-aval des cours d'eau), des flux bidirectionnels au sein des plaines alluviales:

- dimension transversale des échanges entre le fleuve et les divers écosystèmes de la plaine alluviale;
- dimension verticale des échanges avec l'aquifère alluvial.

lit mineur: [Coque R., 1993] il est normalement bien délimité entre les berges abruptes, plus ou moins élevées et continues. En France, en général, le lit mineur, comme le chenal d'étiage est dépourvu de végétation aérienne.

lit d'étiage ou chenal d'étiage: [Coque R., 1993] il est étroit et compris à l'intérieur du lit mineur dans lequel il forme souvent des sinusoïdes. Son profil longitudinal est très irrégulier avec des seuils qui forment de petits rapides à la traversée de bancs d'alluvions, et des *mouilles*, mares stagnantes à très faibles écoulements. Le chenal d'étiage est utilisé pour l'écoulement des basses eaux saisonnières et peut être presque sec en été dans le domaine méditerranéen.

lit moyen ou lit majeur périodique: [Coque R., 1993] il est séparé du lit d'étiage par un bourrelet de berge. Il est couvert par une végétation hygrophile (aulnes, peupliers, saules). Il est exposé à toutes les crues, des plus fréquentes aux plus rares, est soumis aux hauteurs d'eau et aux vitesses de courant maximales.

lit majeur: [Minist. Env., 1996] correspond à l'ensemble des terrains susceptibles d'être submergés par des crues exceptionnelles, sur différentes parties du bassin versant. A l'intérieur de la courbe enveloppe donnée par la limite externe de ce lit majeur, les crues qualifiées de centennales dans l'état actuel des connaissances hydrologiques peuvent occuper des portions variables de l'espace, et quelquefois sa totalité.

mouilles : cf. lit d'étiage.

niveau de base : niveau topographique aval d'un cours d'eau, en dessous duquel il ne peut s'abaisser.

profil d'équilibre d'un cours d'eau: [Minist. Env., 1996] courbe régularisée, telle qu'en tous ses points, la vitesse du courant assure le transport de la totalité de la charge solide venue de l'amont, sans qu'il y ait ni creusement ni accumulation.

ripisilve : forêt riveraine des cours d'eau. Association à peupliers et saules.

CONTEXTE DE LA THESE ET REMERCIEMENTS	1
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	3
GLOSSAIRE	5
INTRODUCTION GENERALE	15
1. Problématique et orientations	15
1.1. Approche globale de l'hydrosystème fluvial	17
1.2. Recherche des paramètres et des outils nécessaires à la prise de décision	17
2. Déroulement du travail de thèse	18
 CHAPITRE PRÉLIMINAIRE : PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE DE SITES EXTRACTIBLES EN SABLES ET GRANULATS DANS LE LIT MAJEUR D'UN COURS D'EAU	 21
1. Contraintes réglementaires	21
1.1. Réglementation en matière de carrières	22
1.1.1. Historique	22
1.1.2. Loi du 4 janvier 1993	25
1.1.3. Etudes d'impact	26
1.2. Usages et contraintes dans la plaine du Forez	26
1.2.1. Ecopôle du Forez	28
1.2.2. Ecozone du Forez	28
1.2.3. Programme « Loire Nature »	28
1.2.4. Plan « Loire Grandeur Nature »	30
1.2.5. Contrats de rivières	30
1.2.6. Chasse et pêche	30
1.2.7. Zones inondables	30
1.3. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (S.D.A.G.E.)	31
2. Préoccupations des exploitants de carrières	33
2.1. Implications des nouvelles réglementations pour les professionnels	33
2.2. Besoins et objectifs d'un Outil d'Aide à la Décision	34
2.2.1. Planificateurs	34
2.2.2. Acteurs	35

2. Les nappes alluviales et l'aquifère	
2.1. Ressources en eau souterraine	
2.1.1. Hydrogéologie des formations cristallines (seuils du Pertuiset et de Neulise)	72
2.1.2. Hydrogéologie des formations tertiaires	72
2.2. Géométrie de l'aquifère des alluvions récentes	73
2.2.1. Le substratum	73
2.2.2. Piézométrie	74
2.2.3. Variations piézométriques: remontée de la nappe des chambons (Balbigny) d'octobre 1976 à décembre 1976	74
2.2.4. Répartition des perméabilités	75
2.2.5. Transmissivités	77
2.3. Potentialités des eaux souterraines	77
2.3.1. Rive droite	78
2.3.2. Rive gauche	79
2.3.3. Relations alluvions anciennes - alluvions récentes	79
2.4. Vulnérabilité de la nappe	80
2.5. Caractéristiques des nappes alluviales	80
3. Les changements du milieu fluvial depuis 150 ans	81
3.1. Les aménagements	81
3.1.1. Extractions de sables et graviers	81
3.1.2. Les barrages	84
3.1.3. Les captages et prises d'eau	87
3.1.4. Les digues	88
3.1.5. Le canal du Forez	89
3.1.6. Aménagement progressif du fleuve	90
3.2. Les changements du milieu naturel depuis 150 ans	90
3.2.1. Les changements du tracé en plan	91
3.2.2. L'incision du lit de la Loire	96
3.2.3. Les causes probables	103
3.2.4. Dynamique horizontale et verticale de la Loire dans la Plaine du Forez	106
LA LOIRE, UN SYSTEME COMPLEXE ET EVOLUTIF	107

DEUXIEME PARTIE: PROBLEMATIQUE « CARRIERES » : VERS UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION (O.A.D.)

1. Outils et méthodes pour l'étude des hydrosystèmes fluviaux	
1.1. Dynamique des Systèmes (D.S.)	113
1.1.1. Présentation de la D.S.	114
1.1.2. Application à la Loire et ses nappes dans la plaine du Forez	115
1.2. Modélisation hydrodynamique	125
1.2.1. Définition générale des modèles hydrodynamiques	125
1.2.2. DIFI	128
1.2.3. Apports de la modélisation hydrodynamique pour l'aménagement de carrières	129
1.3. Système d'Information Géographique (S.I.G.)	131
1.3.1. Projection cartographique	132
1.3.2. Données sous forme vecteur	132
1.3.3. Représentation des données continues	141
1.3.4. Intérêt du traitement de l'information géographique dans l'O.A.D.	144
1.3.5. Développement d'un outil spécifique	146
1.3.6. S.I.G. pour l'Aide à la Décision en matière d'extraction de sables et graviers	152
1.4. Modèles hydrodynamiques couplés à un S.I.G.	154
1.4.1. Modèles hydrodynamiques couplés à un S.I.G	154
1.4.2. Applications	157
2. Architecture de l'outil	159
3. Conclusion	161

TROISIEME PARTIE: APPLICATION DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION A LA PLAINE DU FOREZ

1. Elaboration des modèles hydrodynamiques	
1.1. Application au secteur de Balbigny (42 - Loire)	164
1.1.1. Recherche des paramètres de l'aquifère	164
1.1.2. Résultats	166
1.1.3. Réalisation du modèle mathématique	173
1.1.4. Exploitation du modèle de Balbigny	175
1.2. Application au secteur de Bonson (42- Loire)	180
1.2.1. Historique des études et travaux de reconnaissance	180
1.2.2. Caractéristiques de l'aquifère	181
1.2.3. Réalisation du modèle de Bonson	182
1.2.4. Exploitation du modèle de Bonson	184
2. Mise en oeuvre du Système d'Information Géographique	188

2.1. Base de données géographiques	188
2.1.1. Données globales sur la plaine du Forez	188
2.1.2. Base de données locale à Balbigny	192
2.1.3. Base de données locales à Bonson	195
2.1.4. Organisation des données	196
2.1.5. Base de données géographiques pour un « O.A.D. carrières »	201
2.2. Nécessité d'un « interface homme-machine spécifique » ?	202
2.2.1. Méthodologie	202
2.2.2. Réalisation de l'interface	208
2.3. Apports et limites de l'O.A.D. en général	209
2.3.1. Apports	209
2.3.2. Limites	210
3. Limites et incertitudes de résultats	211
 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	 213
 BIBLIOGRAPHIE	 216
 ANNEXES	 225

Liste des figures

Figure 1: localisation de la zone d'étude	16
Figure 2: Schéma Directeur de la Thèse	20
Figure 3: état de la réglementation relative aux carrières en 1996	24
Figure 4: zones de protection de la nature et inventaires faunistiques et floristiques dans la plaine du Forez	29
Figure 5: Zones Inondables (Z.I.), seuils et digues dans la plaine du Forez	32
Figure 6: schéma géomorphologique du Forez [Le Griel A., 1984]	
Figure 7: pluviométrie de la Loire dans la plaine du Forez	
Figure 8: hydrologie de la Loire (42) et aménagements hydrauliques principaux	
Figure 9: localisation des stations de jaugeage dans le bassin supérieur de la Loire	47
Figure 10 : le lit majeur d'après M. Derruau (1988)	57
Figure 11 : coupe transversale dans une plaine alluviale, localisation du critère « pente »	58
Figure 12 : coupe transversale dans une plaine alluviale, localisation du critère « concavité »	59
Figure 13 : Calcul en mode raster sur un environnement 3*3, d'après Cell Based Modelling with GRID. Arc/Info User's Guide - 1991	59
Figure 14: Modèle Numérique de Terrain et image raster des pentes	60
Figure 15: résultat du calcul de la concavité d'après Arc/Info	61
Figure 16: résultat du calcul des concavités verticales d'après C. Depraetere	63
Figure 17 : calcul sur deux fichiers raster, cellule par cellule	66
Figure 18 : linéarisation (a) et vectorisation (b) du fichier raster	67
Figure 19: validation de la délimitation du lit majeur	68
Figure 20 : Méthodologie de délimitation du lit majeur par analyse spatiale	70
Figure 21 : exploitation d'une gravière dans la plaine du Forez	
Figure 22 : profil en long de la Loire dans la plaine du Forez en 1856	
Figure 23 : Comparaison des profils en long de la Loire en 1856, 1970 et 1989/95	100
Figure 24 : Variation des longueurs, des pentes et des altitudes des tronçons de la Loire entre points fixes	101
Figure 25 : Variation des longueurs des sections de Loire entre 1846 et 1921	102
Figure 26 : Incision de la Loire entre 1856, 1921 et 1989/95	102
Figure 27 : zones géomorphologiquement propices aux extractions de graviers	109
Figure 29: définition des limites spatiales	
Figure 30: flux élémentaires de matière dans l'hydrosystème	

Figure 31: structure causale de l'hydrosystème naturel	119
Figure 32: structure causale de l'hydrosystème et de ses aménagements	122
Figure 33: déroulement d'une modélisation hydrodynamique	126
Figure 34: discrétisation de la zone d'étude	127
Figure 35: organisation thématique de l'information	134
Figure 36: couverture: entités graphiques et attributs thématiques	135
Figure 37: schéma directeur à Balbigny	140
Figure 38: triangulation	143
Figure 39: utilisation des modes de représentation des surfaces pour les modèles hydrodynamiques	144
Figure 40: utilisation d'AML pour l'analyse des résultats de simulations hydrodynamiques	147
Figure 41: choix du mode de représentation des données spatiales initiales.	148
Figure 42: numérisation des données	149
Figure 43: architecture générale de l'outil d'aide à la décision	160
Figure 43: épaisseur de la couverture limoneuse à Balbigny	
Figure 44: topographie du toit du substratum à Balbigny	
Figure 45: répartition des perméabilités à Balbigny	170
Figure 46: piézométries hautes et basses eaux	171
Figure 47: menu déroulant local sur Balbigny	174
Figure 48: exemple de résultat de simulation d'une carrière à Balbigny	176
Figure 49: exemple du calcul de l'impact de la carrière simulée sur la piézométrie initiale	177
Figure 50: exemple de calcul du gradient hydraulique après réalisation de la carrière	178
Figure 51: modèle hydrodynamique de Bonson	182
Figure 52: exemple de résultat de simulation de carrière à Bonson	186
Figure 53: premier niveau d'organisation de la base de données géographiques	195
Figure 54: typologie des données géographiques en fonction de leur actualisation	197
Figure 55: organisation des données géographiques pour la mise à jour	198
Figure 56: démarche de l'opérateur	202
Figure 57: analyse fonctionnelle des tâches de simulation hydrodynamique	203
Figure 58: schéma de principe de fonctionnement de l'interface homme machine	205
Figure 59: base de données de l'outil d'aide à la décision	206

Liste des tableaux

Tableau 1 : Captages dans les alluvions récentes en 1995 [SOGREAH -1995]	
Tableau 2 : références cartographiques	
Tableau 3 : paramètres géomorphologiques entre 1849 et 1991	93
Tableau 4: Points essentiels des profils en long de la Loire en 1856, 1921 et 1989/95	99
Tableau 5 : synthèse de l'importance des changements morphologiques de la Loire	110
Tableau 6: données géographiques pour un schéma directeur	
Tableau 7: bilan de l'adéquation et de l'inadéquation des outils entrant dans la composition de l'O.A.D.	153
Tableau 8: adéquation d'O.A.D. existants à la problématique « carrières »	156
Tableau 9: résultats des pompages à débits constants du 18 août 1992 [C.P.G.F. Horizon, 1992]	
Tableau 10: contraintes réglementaires	
Tableau 11: aménagements hydrauliques dans la plaine du Forez	189
Tableau 12: transports dans la plaine du Forez	190
Tableau 13: hydrologie et géomorphologie dans la plaine du Forez	191
Tableau 14: hydrodynamique	192
Tableau 15: B.D. locale (Balbigny), hydrologie	192
Tableau 16: B.D. locale (Balbigny), hydrodynamique	193
Tableau 17: B.D. locale (Balbigny), aménagements	194
Tableau 18: Base de Données hydrogéologique locale à Bonson	195
Tableau 19: répartition des couches d'information des B.D. en fonction du délai de mise à jour	201
Tableau 20: incertitudes liées à la saisie/sacnnérisation ou intégration des données géographiques	211

Liste des photos

Photo 1 : marnes vertes à l’affleurement à Villeneuve de Berg, vue d’ensemble

Photo 2 : figures polygonales dedessication dans les marnes vertes à Villeneuve de Berg

Photo 3: carrière en activité à Marclopt

Photo 4: ancienne carrière réaménagée à Feurs

Photo 5: lachure du barrage de Grangent

86

Introduction générale

1. Problématique et orientations

Ce mémoire de thèse est consacré à la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour l'implantation d'extractions de sables et graviers dans le lit majeur de la Loire (cf. Figure 1) dans la Plaine du Forez (42 - France).

Les alluvions qu'elles soient exploitées pour les granulats ou pour l'aquifère qu'elles représentent sont une ressource importante dont dépend le développement des industries et des communes:

- les matériaux alluvionnaires sont utilisés pour la construction du réseau routier et des bâtiments. Ils représentent une ressource de base indispensable à la croissance économique d'une région¹;
- la ressource en eau souterraine des alluvions récentes des grands fleuves conditionne le développement industriel et communal et justifie les projets de recherche qui lui sont associés.

Dans un contexte de durcissement législatif des conditions d'autorisation de nouveaux sites d'exploitation, notre objectif est de développer un outil informatique qui permette une vue synthétique dans l'espace et dans le temps des paramètres géomorphologiques et hydrogéologiques indispensables à la prise de décision. La variété et le nombre des données à prendre en compte, conduit à élaborer une base de données géographiques qui soit évolutive et accessible à un outil nécessaire à l'étude de la dynamique des nappes alluviales : le modèle hydrodynamique. Cet ensemble doit être regroupé dans un interface homme-machine spécifique d'utilisation aisée qui facilite l'accès à l'information et à la simulation d'ouvrages hydrauliques nouveaux : extractions de graviers, pompages.

Cette problématique s'articule autour de deux thèmes principaux, l'étude de la morphodynamique fluviale et des impacts des carrières sur le régime des eaux souterraines.

Le choix du cadre géographique repose sur plusieurs critères. Des aménagements très variés sont présents sur la Loire dans la plaine du Forez tels que des barrages, seuils, digues, carrières, pompages. La reconnaissance hydrogéologique est avancée. Surtout, les enjeux économiques et écologiques entre les différents gestionnaires de l'eau sont importants.

¹ Rhône-Alpes est la première région française productrice et consommatrice de matériaux de carrières avec 950 exploitations autorisées en 1994 représentant 2000 emplois. La production annuelle est de l'ordre de 36 millions de tonnes, soit un ratio voisin de 6 t/an et par habitant. Les matériaux alluvionnaires constituent en 1994, 60 % de la ressource en granulats [D.R.I.R.E 1995].

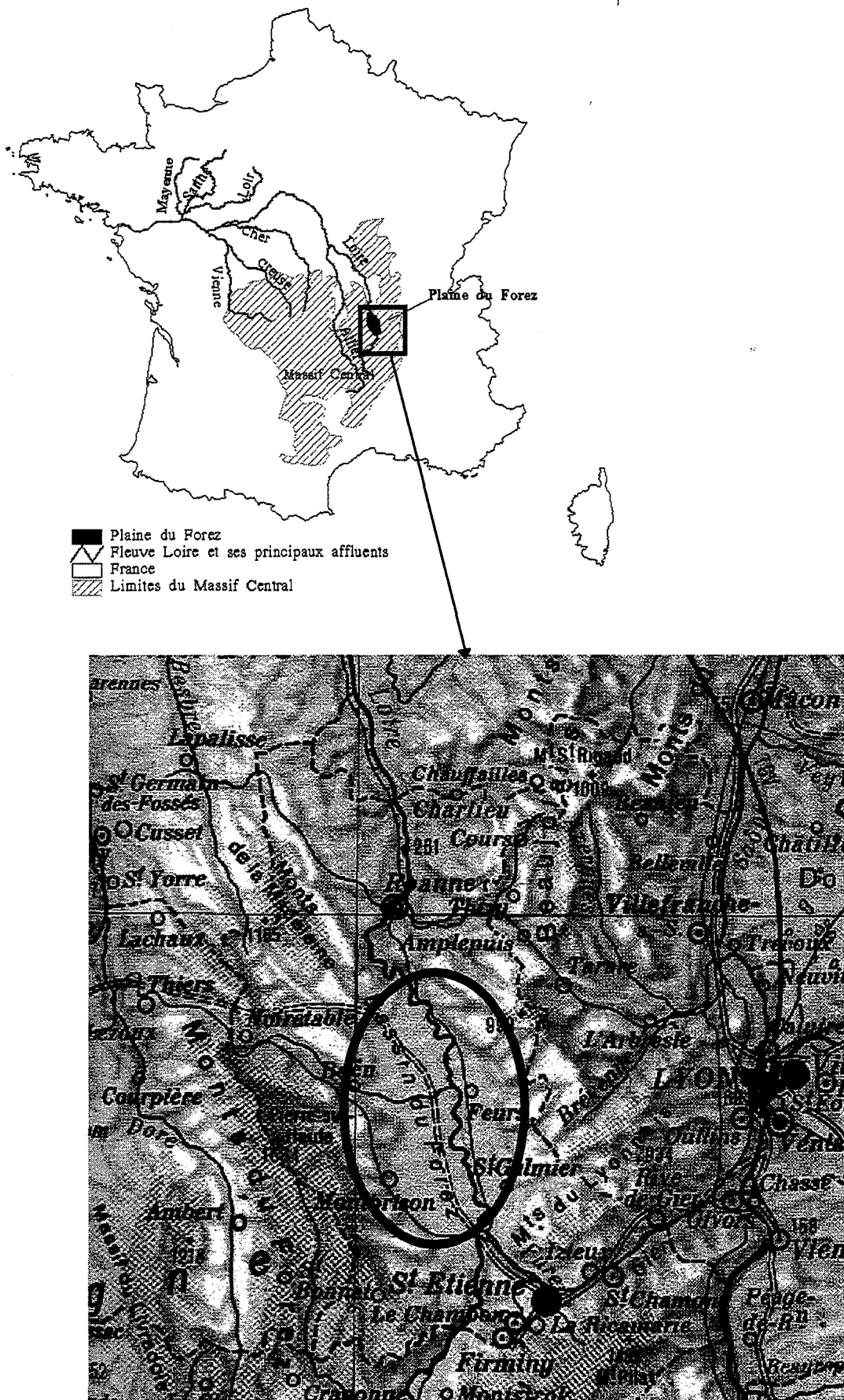


Figure 1: localisation de la zone d'étude

Nous avons mis choisi deux orientations:

- approche globale de l'hydrosystème fluvial appliquée à la recherche de nouveaux sites d'exploitations de gravières dans le lit majeur des cours d'eau;
- recherche des paramètres et des outils nécessaires à la prise de décision.

1.1. Approche globale de l'hydrosystème fluvial

Le milieu fluvial est considéré aujourd'hui comme un hydrosystème complexe à étudier dans les trois dimensions spatiales : la dimension longitudinale se réfère à tous les phénomènes résultant des flux unidirectionnels le long du gradient amont-aval ; la dimension transversale considère tous les éléments de la plaine alluviale et leurs interactions ; la dimension verticale concerne les relations entre les nappes et la rivière. La dimension temporelle est également très importante et agit sur plusieurs échelles emboîtées.

Les aménagements humains, dont les exploitations de graviers, situés à proximité des fleuves sont soumis à l'évolution naturelle des hydrosystèmes qui peut les affecter dans leurs divagations latérales et par les phénomènes de dépôt et d'incision. Réciproquement, les aménagements ont des impacts sur le milieu fluvial en modifiant les paramètres qui régissent son fonctionnement. Les perturbations engendrées affectent l'ensemble des usages de l'eau. C'est la raison pour laquelle une gestion globale des ressources minérales et des ressources en eau est aujourd'hui nécessaire. Cette gestion doit englober les phénomènes géomorphologiques et la dynamique des nappes alluviales qui sont interdépendants.

1.2. Recherche des paramètres et des outils nécessaires à la prise de décision

La conception d'un outil d'aide à la décision demande une évaluation des besoins des futurs utilisateurs, des données et des outils nécessaires pour répondre à leurs questions en accord avec la réglementation en vigueur.

L'hydrosystème a un fonctionnement particulièrement complexe. Les interactions entre l'évolution naturelle du milieu, les pressions humaines qui s'y exercent et les usages actuels (dont l'importance économique est grande) rendent difficiles la compréhension globale et la définition des limites du système à considérer dans le cadre de ce travail. C'est pourquoi nous

avons fait appel à la Dynamique des Systèmes (D.S.), une méthode qui permet de mieux appréhender théoriquement et pratiquement le comportement de systèmes techniques, économiques et sociaux complexes. La D.S. nous a permis d'établir les limites temporelles et spatiales dans lesquelles l'outil d'aide à la décision sera réalisé.

Les données pertinentes concernent aussi bien l'occupation humaine et les aménagements hydrauliques ayant un impact sur l'hydrosystème fluvial, que les phénomènes géomorphologiques et hydrodynamiques. Ces données sont de types variés, s'appliquent à des échelles spatiales différentes. Elles ne sont pas toujours utilisables dans leur aspect brut et peuvent nécessiter des analyses ou des efforts de mise en forme graphique pour être plus facilement interprétables. Les Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.) sont des outils destinés à toutes les applications qui requièrent le graphisme, la description et l'analyse de données spatiales. Mais l'aspect hydrodynamique de notre étude ne peut pas être traité par un S.I.G. Il faudra donc intégrer des modèles spécifiques dits « modèles hydrodynamiques ».

2. Déroulement du travail de thèse

Le travail de thèse s'est déroulé en quatre étapes qui s'articulent de la manière suivante (cf. Figure 2):

Un **chapitre préliminaire** expose la méthode suivie pour l'élaboration de l'outil d'aide à la décision. La problématique « carrière » découle de l'évolution récente de la *réglementation* en matière d'exploitation de sables et granulats en milieu alluvionnaire. Cette réglementation représente un ensemble de contraintes qui concerne tous les professionnels des hydrosystèmes fluviaux et auquel l'outil d'aide à la décision va tenter de répondre.

La **première partie** de cette étude est consacrée à l'étude du milieu fluvial. Elle a pour objectif la *délimitation des zones extractibles* compte tenu des paramètres physiques géomorphologiques et hydrogéologiques, et des paramètres humains qui influent sur ce milieu. Les carrières étant généralement placées à proximité des fleuves, voire même directement sur les berges, elles sont donc particulièrement concernées par la morphodynamique fluviale qui peut les affecter dans ses divagations latérales. Il s'agit de déterminer si cette dynamique est active et de rechercher les secteurs susceptibles d'en être atteints.

La **deuxième partie** développe la *conception de l'outil d'aide à la décision*. La description des techniques utilisées pour répondre aux besoins de ces professionnels est suivie par la définition des limites dans lesquelles l'outil d'aide à la décision pourra être opérationnel. Enfin une architecture globale est proposée fondée sur le couplage entre le S.I.G. et les modèles hydrodynamiques.

La **troisième partie** décrit *l'application de l'outil* dans la plaine du Forez. La mise en place d'une base de données spatiales comprend l'acquisition des données géographiques et descriptives et leur intégration dans le S.I.G. Les données hydrogéologiques permettent le calage et l'exploitation des modèles hydrodynamiques dont les résultats sont présentés sur deux secteurs, Bonson et Balbigny, respectivement au nord et au sud de la plaine. Enfin, l'interface spécifique facilite:

- l'accès à l'information géographique;
- l'accès aux fonctions d'analyse spatiale;
- l'exploitation des modèles hydrodynamiques.

La conception et la réalisation de cet interface sont détaillées.

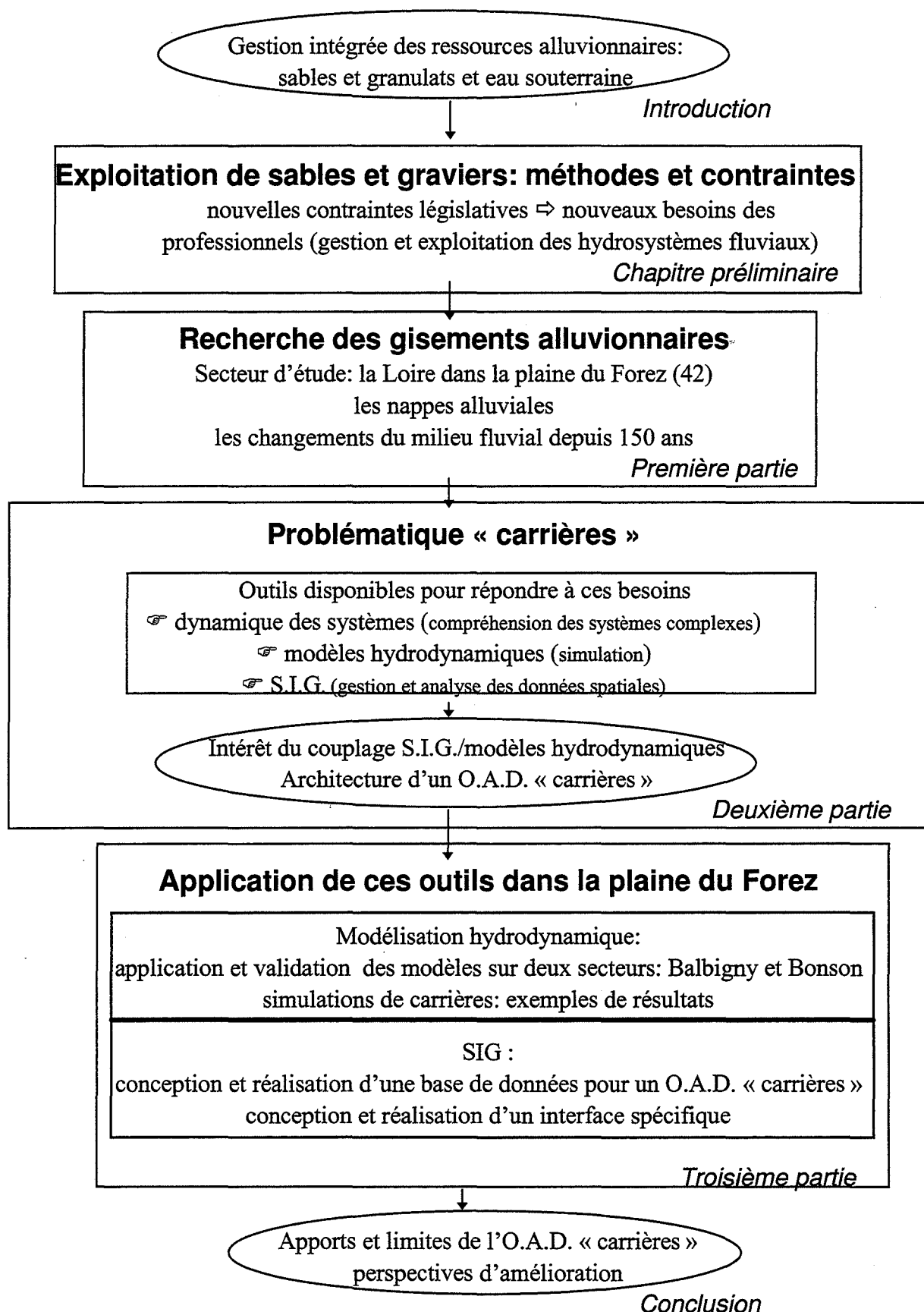


Figure 2: Schéma Directeur de la Thèse

Chapitre préliminaire

CHAPITRE PRÉLIMINAIRE : problématique de recherche de sites extractibles en sables et granulats dans le lit majeur d'un cours d'eau

Les activités des exploitants de graviers sont de plus en plus limitées, contrôlées et orientées par la réglementation qui évolue sans cesse depuis la mise en évidence des nuisances engendrées par les extractions dans le chenal actif des cours d'eau. Cette réglementation est complexe car elle s'étale sur plusieurs codes tels que le code minier, le code de l'urbanisme, le code permanent de l'environnement (et des nuisances) etc.

*La loi 93.3 du 4 janvier 1993 relative aux carrières a changé la base juridique des autorisations en transférant celle-ci du régime du code minier à celui des **installations classées pour la protection de l'environnement**. Son application est entrée en vigueur avec le décret du 9 juin 1994 inscrivant les activités d'extraction à la nomenclature des installations classées (rubrique 2510). Elle a été récemment renforcée par la création des **Schémas Départementaux de Carrières** qui doivent être en accord avec les Schémas Directeurs de Gestion et d'Aménagement des Eaux (S.D.A.G.E.).*

Pour les carrières, il ne s'agit plus seulement de rechercher de nouveaux sites physiquement exploitables, ils doivent en même temps prendre en compte ces contraintes réglementaires. Ensuite, ils doivent justifier et défendre leur choix dans le cadre des études d'impacts dont les exigences sont de plus en plus draconiennes.

1. Contraintes réglementaires

La surface des zones physiquement exploitables est conditionnée par les contraintes réglementaires auxquelles sont soumises les exploitations de graviers. Ces contraintes étant incontournables, elles représentent le premier critère de choix. L'objectif est double:

- d'une part, il s'agit d'en obtenir une représentation spatiale avec des zones strictement interdites et des zones encore « autorisables » sous certaines conditions;
- d'autre part, les nouveaux textes juridiques relatifs aux études d'impacts permettent de dégager les points précis en matière de géomorphologie fluviale et d'hydrodynamique demandant une justification qualitative ou quantitative de l'acceptabilité du projet.

Ces contraintes réglementaires sont de deux types: la réglementation commune à toutes les carrières situées sur le territoire français; et la réglementation locale protégeant certaines

zones géographiques dans la plaine du Forez en raison de leur richesse faunistique et floristique, les monuments historiques, les ondes hertziennes, les projets routiers.

1.1. Réglementation en matière de carrières

L'extraction des matériaux en milieu alluvionnaire est soumise à une réglementation complexe qui comprend simultanément le code minier, le code de l'urbanisme, le code des installations classées, le code permanent environnement (et nuisances) qui contient toutes les dispositions relatives aux études d'impact. De plus en plus cette législation qui « a beaucoup évolué depuis l'avènement de l'Europe dans l'objectif de mise en place d'un système juridique semblable dans tous les pays membres de la communauté européenne » [C. Huglo, 1993] tend vers une limitation voire une suppression de ces types d'extractions dans les lits majeurs des fleuves. Les Schémas Départementaux de Carrières sont les documents à valeur juridique qui fixent les prescriptions générales d'autorisation d'exploitation en accord avec la gestion équilibrée de la ressource en eau indiquée par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

1.1.1. Historique

Soumise à une simple déclaration en mairie jusqu'en 1970, la mise en exploitation des carrières, était assujettie depuis cette époque à une autorisation préfectorale préalable délivrée par l'application de l'article 106 du code minier dans sa rédaction issue de la loi du 2 janvier 1970. Cette loi avait en outre placé toutes les carrières, qu'elles soient souterraines ou à ciel ouvert, sous la seule tutelle du Ministère de l'Industrie [Boussageon B., Boussageon F.X., 1996].

L'assujettissement des carrières au Code minier n'a pas empêché qu'elles soient, par la suite, soumises aux obligations et contraintes résultant d'autres législations. Ainsi depuis 1973, l'article L 130.1 du Code de l'urbanisme, interdit de modifier l'affectation des terrains classés « espaces boisés » par les Plans d'Occupation des Sols (P.O.S.). De même, par l'effet de l'application de la loi du 10 juillet relative à la protection de la nature, les demandes d'ouverture et d'extension des carrières ont dû être accompagnées d'une étude d'impact et soumises à enquête publique. Enfin, les exploitations projetées en milieu forestier et nécessitant un défrichement préalable ne peuvent être entreprises (à supposer que les sols ne soient pas classés en « espaces boisés » par les documents d'urbanisme), qu'après obtention de l'autorisation de défrichement prévue par les articles 311-1 et suivants du Code forestier.

La circulaire interministérielle du 22 mai 1980 va dans le sens d'une limitation des extractions de matériaux dans le lit des cours d'eau domaniaux. Celle du 12 juin de la même année déclare que l'importance croissante des extractions est la cause essentielle des dégâts tant sur la stabilité des berges et des ouvrages d'art que sur le niveau des nappes phréatiques et la vie aquatique. Le volume prélevé est déclaré souvent supérieur à celui des apports naturels. On tend de plus en plus vers une politique de recherche de matériaux de remplacement, et vers une plus grande vigilance dans la détermination des conditions techniques auxquelles sont assujetties les autorisations. La circulaire du 15 septembre 1981 relative aux conditions d'application des textes concernant la lutte contre la pollution des eaux dans le cadre des opérations d'extraction, durcit encore ces conditions. A partir de cette date toutes les demandes d'extraction devront être soumises à enquête publique et tout demandeur d'une telle opération devra produire une étude d'impact. Enfin, la lettre circulaire n° 3679 du 29 novembre 1982 précise que les opérations de curage et d'entretien des cours d'eau ne doivent pas devenir des prélèvements déguisés de matériaux.

Cette diversité de législations ne remettait en cause ni l'assujettissement des carrières au Code minier, ni la tutelle exercée par le seul Ministère de l'Industrie. En revanche, en comprenant explicitement les installations de traitement des carrières parmi les installations classées pour la protection de l'environnement et en les soumettant par voie de conséquence, à la réglementation spécifique à ces installations, la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 a introduit une dualité d'autant plus fâcheuse que les textes d'application du Code minier relatifs aux autorisations de mise en exploitation des carrières dérogeaient sur certains points à la réglementation des installations classées.

La loi n° 93-3 du 4 janvier 1993 relative aux carrières a, dans une certaine mesure, mis un terme à la confusion ainsi créée en transférant la réglementation de leur exploitation du cadre du Code minier à celui de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

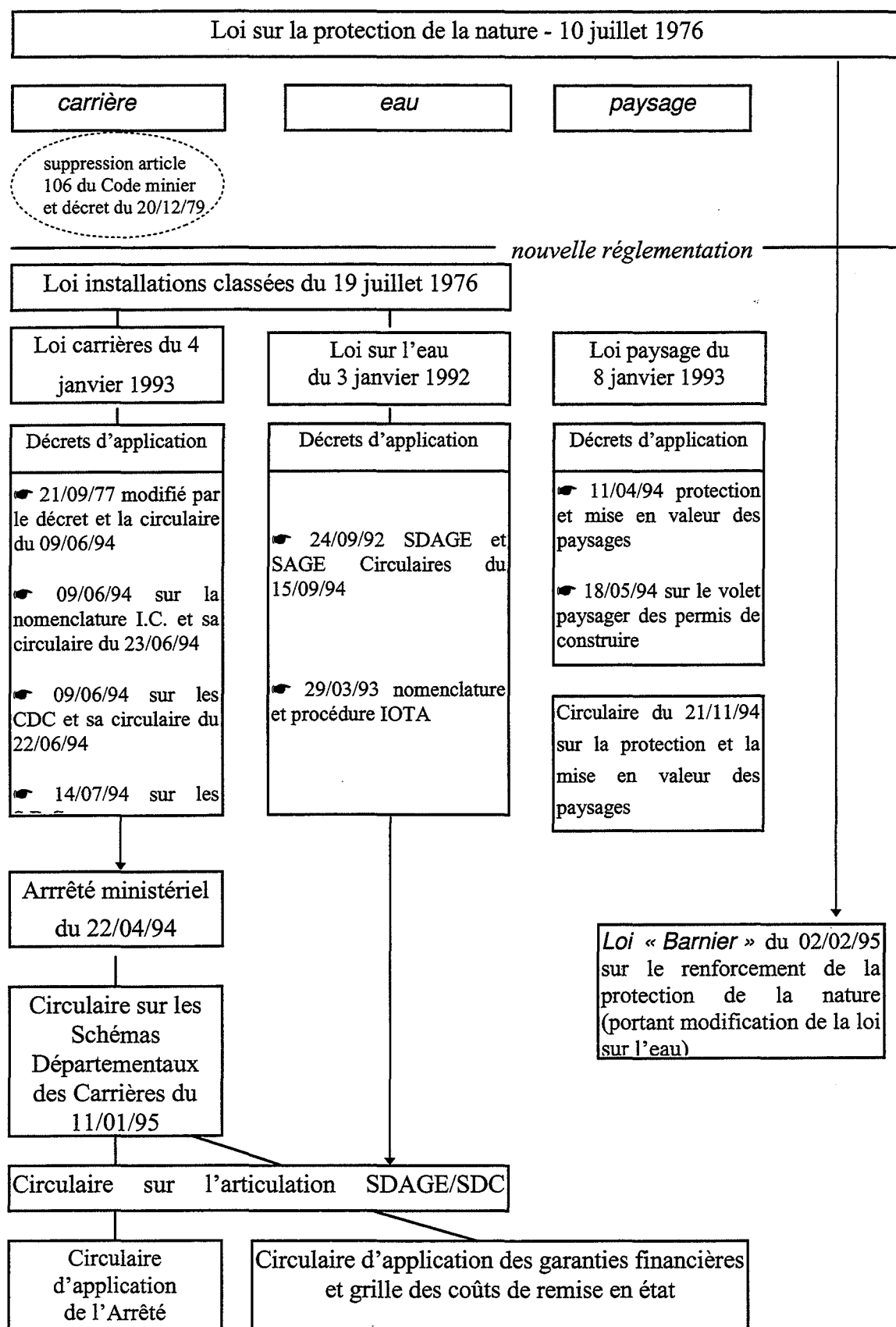


Figure 3: état de la réglementation relative aux carrières en 1996

1.1.2. Loi du 4 janvier 1993

Les points importants de cette loi dans le cadre de ce travail sont les suivants [Mat. de construction et produits de carrières, 1996]:

1 - transfert des carrières à la loi sur les installations classées;

2 - généralisation des autorisations avec étude d'impact et enquête publique:

Dans le cadre du code minier, l'autorisation d'exploiter ne pouvait être refusée que si l'exploitation était susceptible de faire obstacle à l'application d'une disposition d'intérêt général. Par contre, dans le cadre des installations classées, l'autorisation ne peut être accordée qu'à la condition que puissent être prévenus les dangers et inconvénients pour la commodité du voisinage, la santé, la salubrité publique, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement, la conservation des sites et des monuments;

4 - la Commission Départementale des Carrières (C.D.C.):

Présidée par le préfet, elle est une instance consultative puisqu'elle a pour mission d'examiner les demandes d'autorisation d'exploiter et d'émettre un avis motivé sur celles-ci. Elle a également pour mission d'élaborer le Schéma Départemental des Carrières;

6 - le Schéma Départemental des Carrières (S.D.C) qui présente notamment:

- une analyse de la situation existante concernant d'une part, les besoins du département et ses approvisionnements en matériaux de carrières, et d'autre part, l'impact des carrières existantes sur l'environnement;
- un inventaire des ressources connues en matériaux de carrière;

Des documents graphiques doivent être joints présentant « de façon simplifiée mais explicite » les principaux gisements connus, les zones à protéger compte tenu de la fragilité de l'environnement et l'implantation des carrières autorisées. Les autorisations d'exploiter doivent être compatibles avec ce schéma qui définit les conditions générales d'implantation des carrières dans le département, en tenant compte de l'intérêt économique national, des ressources et des besoins en matériaux du département et des départements voisins.

1.1.3. Etudes d'impact

L'étude d'impact présente successivement [J.O. 10 mars 1993]:

- une analyse de l'état initial du site et de son environnement portant notamment sur les richesses naturelles et les espaces naturels agricoles, forestiers, maritimes, ou de loisirs, affectés par les aménagements ou ouvrages;
- une analyse des raisons techniques et financières justifiant le choix géographique du site;
- une analyse des effets directs et indirects, temporaires ou permanents du projet sur l'environnement et en particulier sur la faune et la flore, les sites et les paysages, le sol, l'eau, et la salubrité publique;
- une analyse des mesures à prendre pour réduire les impacts des aménagements et des ouvrages sur l'état initial du site;
- un projet de remise en état du site après exploitation dans le cas des carrières.

L'état initial décrit les éléments physiques du site en matière de géographie, géologie, hydrogéologie, hydrologie et climat. Les éléments biologiques concernent la flore, la faune et les sols. Les paysages sont aussi étudiés. Les éléments humains rassemblent les Plans d'Occupation des Sols, les servitudes, loisirs et patrimoines culturels. Ces descriptions aboutissent à la définition d'un état zéro à partir duquel les impacts de l'aménagement projeté seront estimés. Les effets directs sont ceux de l'ouvrage et les effets indirects sont ceux des autres interventions destinées à prolonger ou corriger les conséquences directement imputables à la réalisation des travaux. Ces effets sont généralement différés dans l'espace et dans le temps souvent de quelques années voire quelques décennies. L'étude d'impact distinguera les impacts selon leur durée. Elle traitera aussi bien les impacts temporaires liés au chantier, que les impacts plus durables mais dont les effets s'atténuent progressivement ainsi que les impacts permanents que le projet doit s'efforcer d'éliminer, de réduire ou à défaut de compenser [Circ. Minist. 27 sept 1993].

1.2. Usages et contraintes dans la plaine du Forez

La plaine du Forez a fait l'objet d'inventaires scientifiques sur les milieux, les espèces animales et végétales depuis 1979 dans le cadre d'une volonté nationale. Ces inventaires ont pour objectif:

- de mieux connaître le patrimoine naturel;
- de mettre ces inventaires à la disposition des gestionnaires et des utilisateurs de l'espace;
- de sensibiliser les acteurs de l'environnement à l'importance des richesses naturelles et assurer leur meilleure prise en compte dans l'aménagement du territoire.

L'inventaire des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (Z.N.I.E.F.F.) est un outil de dialogue et d'alerte qui n'a pas de portée juridique directe. Par contre, c'est un inventaire scientifique qui constitue un élément d'expertise, sert à l'appréciation de la qualité des études d'impact et des documents d'urbanisme, et à programmer des mesures de protection spécifiques dans le cadre des directives européennes de protection de la nature. Il permet de nombreuses négociations avec les décideurs de l'aménagement du territoire. L'inventaire Z.N.I.E.F.F. est consulté en amont d'études d'impact et d'études d'environnement, de plans d'occupation des sols, de schémas directeurs d'aménagement et d'urbanisme, etc.

La plaine du Forez est répertoriée comme Z.N.I.E.F.F. de type 1, c'est à dire comme grand ensemble naturel pour la diversité de ses milieux et pour la grande richesse écologique qui la caractérise. Elle comporte aussi de nombreuses Z.N.I.E.F.F. de type 2 (cf. Figure 4) qui correspondent à des sites remarquables. C'est le cas de la plupart des étangs², des bords de fleuve, du lit majeur de la Loire de Montrond à Feurs et de la Loire en aval de Feurs en raison de leur diversité botanique et écologique et de la présence de plantes protégées telle que *Pulicaria vulgaris*. Certaines anciennes extractions de graviers sont aussi reconnues en Z.N.I.E.F.F. de type 1 pour leur intérêt botanique et floristique lié en particulier aux oiseaux aquatiques telles que les gravières de Veauchette, Unias et Rivas.

² Un étang est un plan d'eau artificiel réalisé dans des zones imperméables. Dans la plaine du Forez, il a pour vocation la culture piscicole, en conséquence il est alimenté en eau et subit des vidanges qui permettent le prélèvement total de la production avant d'être remis en eau et réensemencé.

1.2.1. Ecopôle du Forez

A partir de 1987, la F.R.A.P.N.A. - Loire acquiert d'anciennes gravières situées en bords de Loire sur les communes de Chambéon, Magneux-Haute-Rive, grâce à un don en terrains de la société Morillon Corvol et à l'aide financière du WWF. Actuellement, un réaménagement en partenariat entre la F.R.A.P.N.A. et Morillon Corvol, portant sur 5 km de rives et sur une surface de 150 ha, a été effectué pour une mise valeur écologique du site, la restauration de l'écosystème fluvial, et l'accueil du public. Ce site dit « l'Ecopôle » est une réserve privée.

1.2.2. Ecozone du Forez

L'Ecozone du Forez est un projet de réserve naturelle de l'Etat conforme à la loi du 10 juillet 1976 qui sera plus vaste que l'Ecopôle. Il s'étendra entre le Sud de Marclopt et Cleppé sur 15 km de berges et sur 500 m de large soit 750 hectares. Il comprendra une vingtaine de gravières réaménagées ou en cours d'aménagement totalisant une centaine d'hectares avec pour objectif la mise en place d'un espace cohérent de milieux diversifiés: étangs, bras morts, fleuve, grèves, marais, ripisilve.

1.2.3. Programme « Loire Nature »

« Loire Nature » est le nom du programme donné aux actions concernant la Loire et l'Allier, signé en 1992 pour 5 ans entre l'Etat français, Espaces Naturels de France, le WWF et l'Union Européenne. Il s'inscrit dans la dynamique du « plan Loire ». Il est coordonné à l'échelle du bassin par les Espaces Naturels de France. Il est financé par l'Union Européenne grâce au programme « LIFE », et pour 25 % par l'Etat.

Ce programme d'actions a pour objectif la préservation du patrimoine naturel de la Loire, LIFE étant un instrument financier européen dont la vocation est de contribuer à la mise en oeuvre de la législation communautaire dans le domaine de l'environnement. Les actions vont de la définition préalable des priorités, la maîtrise foncière des sites, les conventions de gestion, les travaux d'amélioration ou de restauration écologique à la sensibilisation du public. L'Ecozone de la Loire est le premier site inauguré dans le cadre du programme LIFE concernant la Loire.

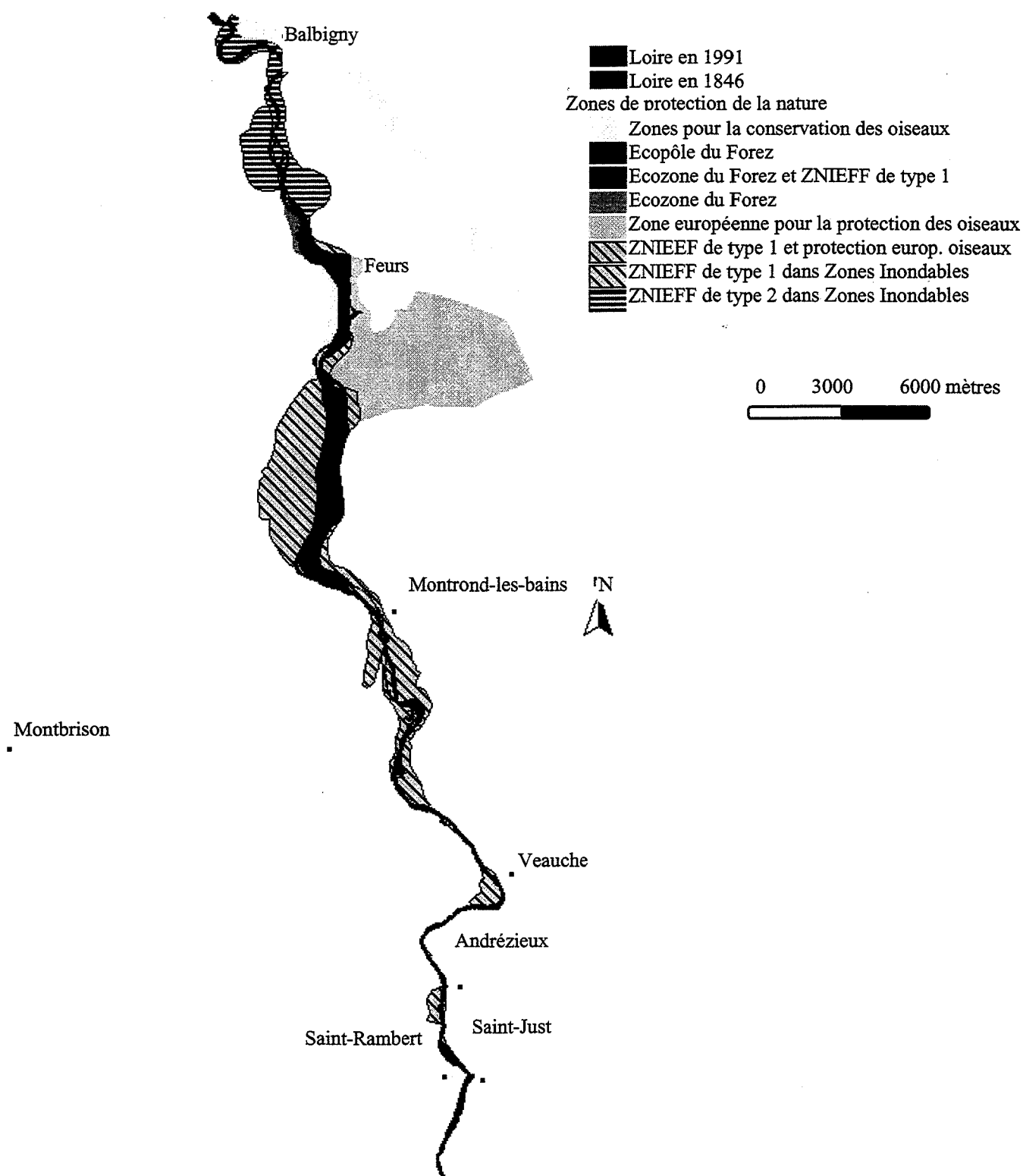


Figure 4: zones de protection de la nature et inventaires dans la plaine du Forez

1.2.4. Plan « Loire Grandeur Nature »

L'Etat a décidé le 4 janvier 1994, par un comité interministériel, d'un plan global de dix ans d'aménagement de la Loire, de la source à l'estuaire. Il vise à concilier la sécurité des personnes face au risque d'inondation, avec la protection des paysages, la satisfaction des besoins en eau, le développement économique. Ce plan est d'un coût de 2 milliards de francs. Il prévoit entre autres l'identification des zones inondables, des mesures d'aménagement spécifiques à la haute Loire (aménagement et protection du lit), le relèvement de la ligne d'eau etc. Des méthodes de restauration et d'entretien du lit seront définies. En l'absence de précédents et compte tenu de la sensibilité particulière du milieu, des chantiers expérimentaux seront réalisés. Toute intervention ultérieure sur le lit de la Loire devra respecter les types de méthodes préconisées grâce aux enseignements tirés des résultats obtenus sur ces chantiers. Sur la Loire forézienne en l'absence de mesures spécifiques, des travaux d'arasement d'îles et d'entretien du lit ont été entrepris.

1.2.5. Contrats de rivières

La Coise, le Lignon font l'objet d'études préalables à la signature d'un contrat de rivière. Le projet concernant le contrat de rivière du Rhins a été accepté.

1.2.6. Chasse et pêche

Depuis 1992, le domaine public fluvial est en réserve nationale de chasse. Le site de l'Ecozone est aussi une réserve nationale de chasse mais seulement sur 350 ha. La pêche sur la Loire et ses affluents est réglementée par un arrêté préfectoral permanent. La gestion piscicole et halieutique des cours d'eau du département de la Loire est assurée par des associations pour la pêche et la protection du milieu aquatique, et par une association de pêcheurs amateurs au filet et aux engins. La Loire est classée en deuxième catégorie piscicole du domaine public et est accessible à tout détenteur d'une carte de pêche. Environ 15 000 à 20 000 personnes peuvent fréquenter régulièrement le fleuve.

1.2.7. Zones inondables

Le décret relatif aux zones inondables date de 1947. Toute la plaine du Forez a alors été cartographiée en deux types de zones: inondables ou non inondables. Un autre décret a vu le jour en 1972, adapté à de nouvelles techniques qui différencie trois types de zones: zones inondables à fort et à faible courant et les zones non inondables. Compte tenu des dépenses

financières engendrées par l'application de ce dernier décret, seules certaines communes ont été mises à jour dans le nord et plus récemment dans le sud de la plaine du Forez (cf Figure 5).

1.3. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (S.D.A.G.E.)

La loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 stipule dans son article 3 que le S.D.A.G.E. fixe les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau. Il est élaboré par le Comité de Bassin qui associe à sa réflexion et consulte les représentants de l'Etat et des collectivités territoriales. Le projet du S.D.A.G.E. du bassin de la Loire est prévu pour le 3 janvier 1997. Le document de premières orientations a fait l'objet d'un constat des principales caractéristiques du bassin et a déterminé les objectifs prioritaires du bassin. Les principaux dysfonctionnements sont dus à des pratiques agricoles insuffisamment respectueuses de l'environnement, à des équipements insuffisants et à mieux gérer, et à une forte pression sur les espaces en relation avec l'eau. Les objectifs proposés par le comité de bassin sont: « gagner la bataille de l'A.E.P., poursuivre l'amélioration de la qualité des eaux de surface, retrouver des rivières vivantes, sauvegarder et mettre en valeur les milieux naturels exceptionnels, réussir la concertation avec l'agriculture, et mieux vivre les crues » [Comité de Bassin Loire Bretagne, 1995].

Enfin, la loi de 1993 précise que toute décision administrative dans le domaine de l'eau doit être compatible ou rendue compatible avec le S.D.A.G.E.. Cela concerne notamment les autorisations d'exploitation de carrières en nappes alluviales. Le S.D.A.G.E. doit donc définir les prescriptions générales que devront suivre les schémas départementaux des carrières pour que ces documents soient cohérents entre eux au sujet des extractions en granulats ayant un impact notable sur les intérêts visés par la loi sur l'eau (extractions en nappes alluviales).

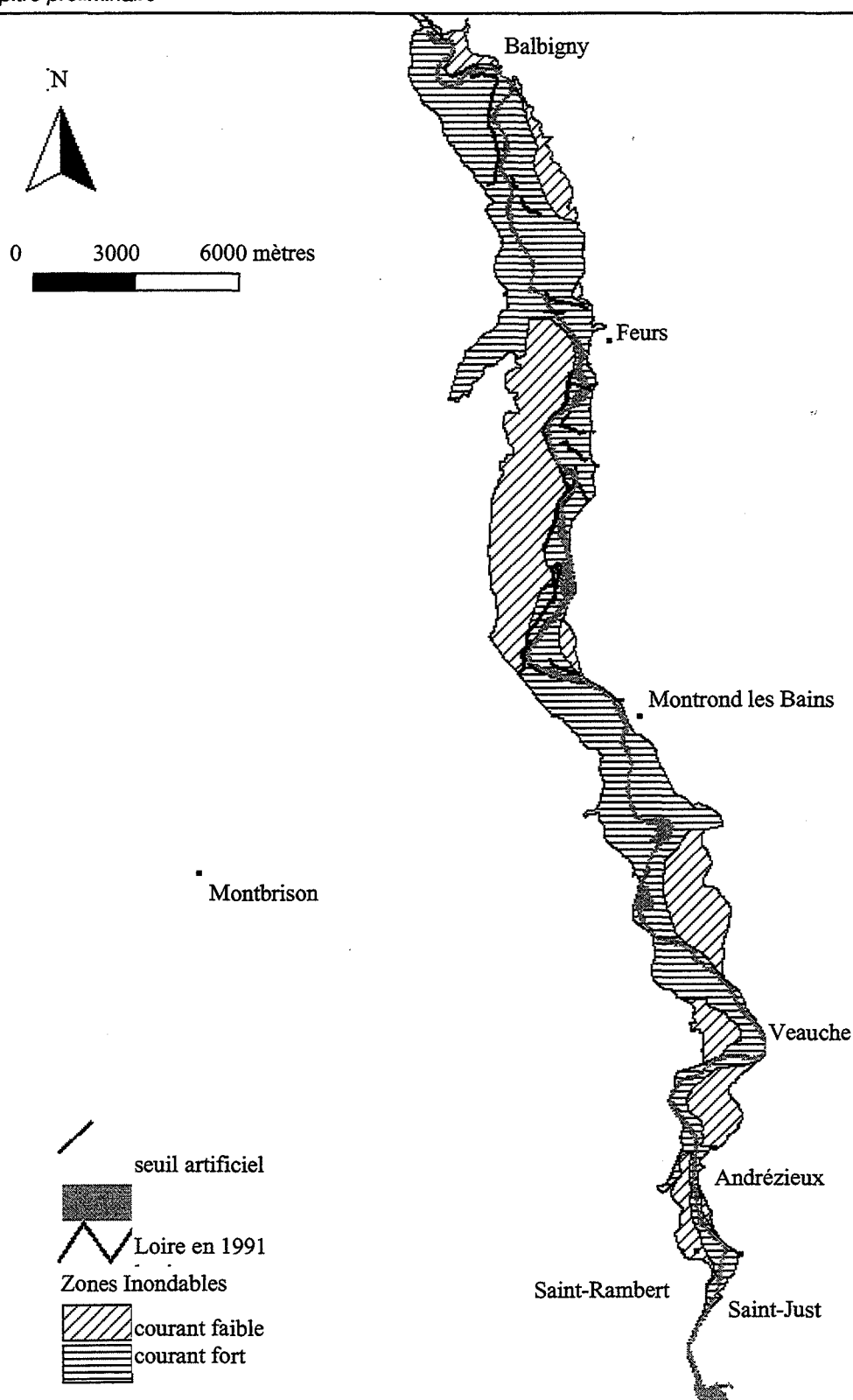


Figure 5: Zones Inondables seuils et digues dans la plaine du Forez

2. Préoccupations des exploitants de carrières

Les carrières sont au carrefour de toutes ces contraintes et réglementations. La problématique « carrières » est née de la prise de conscience de leur impact sur l'environnement fluvial. L'évolution des textes réglementaires est le reflet de cette prise de conscience mais souvent avec un décalage dans le temps. Les textes parus depuis 1992 ont des conséquences pour tous les acteurs de l'eau. Face à cette « avalanche » de nouveaux objectifs, de nouvelles contraintes, les professionnels ont besoin d'un outil qui leur permette de s'adapter plus rapidement.

2.1. Implications des nouvelles réglementations pour les professionnels

La politique de limitation des extractions en lit mineur peut se résumer par les prescriptions suivantes:

- il n'y aura plus d'autorisation dans les lits endigués;
- les zones de vallées ayant subi une très forte exploitation ne seront plus exploitées, sauf si un réaménagement le justifie;
- les protections réglementaires préexistantes (P.O.S., périmètres de protection des captages, Z.N.I.E.F.F. etc.) seront respectées;
- les nouvelles carrières seront suffisamment éloignées du lit mineur pour éviter toute capture. L'étude d'impact doit le démontrer. La distance minimale réglementaire qui était de 11,70 m est portée à 35 m. D'une manière générale, l'exploitation en lit majeur ne doit pas nécessiter de mesures compensatoires (digues, protection des berges);
- en fin d'exploitation, le régime d'écoulement des eaux souterraines ne doit pas être dégradé. L'étude d'impact doit le démontrer. Les apports extérieurs de matériaux de remblais sont contrôlés;
- les zones de vallées qui sont des sites remarquables mais non protégés par des mesures juridiques doivent être définies. Afin de ne pas être exploitées, leur protection sera assurée par la mise en place d'un instrument juridique (procédures d'arrêté de biotope, de réserve naturelle, etc.);
- les zones représentant une ressource d'eau potable exploitable dans l'avenir seront définies afin que les exploitations soient limitées ou interdites. Les études d'impact devront prouver que les extractions n'auront pas d'incidences négatives sur les captages non munis de protections réglementaires.

La tendance actuelle est d'inciter à limiter les autorisations d'extractions dans tous les lits majeurs des cours d'eau français. Elles doivent être remplacées par des carrières en roches

dures (formations cristallines dans la Loire) dont le coût d'exploitation est nettement supérieur et dont la nature et la qualité des produits est différente. En outre, les carrières en roches dures posent d'autres problèmes qui leur sont propres:

- transports allongés (trafic routier perturbé, poussières);
- nuisances paysagères de grande ampleur, plus difficilement réhabilitables dans des zones comportant un relief significatif (monts du Pilat ou du Forez);

Les exploitants seront contraints à une reconversion de leurs activités. Actuellement, ils cherchent à augmenter leurs moyens de défense face à la somme de nuisances retenues contre leur profession essentiellement depuis les années 1980. La législation évolue vers des restrictions croissantes sur les demandes d'extractions et vers la réhabilitation des sites existants. Les études d'impacts renouvelées par le décret du 25 février 1993 sont plus efficaces, plus complètes. La définition de l'état zéro est difficile dans le cadre d'un hydrosystème dynamique. Les évolutions du milieu observées actuellement sont le résultat de variations des paramètres naturels, mais aussi des impacts cumulés de plusieurs générations d'ouvrages hydrauliques disparus ou non. Il faut donc, soit introduire cette notion de milieu initialement « non stable » et définir un état zéro dynamique à l'échelle de l'étude d'impact d'une carrière; soit définir un état zéro historique dépourvu d'aménagements qui serait seulement « naturellement dynamique ».

2.2. Besoins et objectifs d'un Outil d'Aide à la Décision

Les objectifs de l'O.A.D. sont définis en fonction des besoins des planificateurs de l'espace alluvial et des acteurs qui interviennent sur cet espace.

2.2.1. Planificateurs

Suite aux décrets d'application de la nouvelle loi carrières du 4 janvier 1993, et à la loi Barnier du 02 mars 1995, les membres de la Commission Départementale des Carrières dont les représentants de la DRIRE, de la DDE et de la DIREN, des professionnels, (etc.) sont chargés d'élaborer un Schéma Départemental des Carrières au sein d'une commission constituée d'acteurs et de gestionnaires du département. L'O.A.D. a pour objectif de s'intégrer dans la réalisation des Schémas Départementaux des Carrières en répondant aux besoins des membres de la C.D.C. à deux niveaux:

- *en intervenant dans l'analyse de la **situation initiale** et dans l'étude de l'impact des carrières existantes, surtout d'un point de vue **hydrodynamique**;*

- *en aidant à localiser les **zones à protéger**, compte tenu de la fragilité de leur environnement, et les **carrières existantes**.*

L'approbation du SDAGE du bassin Loire-Bretagne en date du 26 octobre 1996 a fixé les grandes lignes directrices de gestion de l'Eau qui vont permettre l'élaboration des SAGE à l'échelle de sous bassins-versants. L'O.A.D. doit pouvoir s'intégrer à deux niveaux dans l'initiation du SAGE :

- *en contribuant à la connaissance de l'hydrosystème fluvial;*
- *en devenant un outil de **concertation** et de **communication** au sein de la commission locale de l'eau.*

2.2.2. Acteurs

Cet outil doit répondre aux besoins des acteurs que sont les carriers et les bureaux d'études chargés de la confection des études d'impact.

1 - les carriers: dans un premier temps, l'O.A.D. doit apporter la connaissance des gisements en sables et granulats exploitables et des contraintes réglementaires sur ces sites. Dans un deuxième temps il doit permettre de suivre la procédure légale d'obtention de l'autorisation préfectorale, c'est à dire la réalisation de cartes et de plans de la future carrière et de son projet de remise en état, et une étude d'impact qui sera obligatoirement réalisée par un organisme indépendant.

2 - les bureaux d'études chargés des études d'impacts de carrières: l'O.A.D. doit permettre l'analyse du site initial et de son environnement, du potentiel de la ressource, et de l'impact de la carrière sur l'hydrodynamique souterraine.

Première partie

PREMIERE PARTIE : Morphodynamique de la Loire et de ses nappes d'accompagnement

La morphodynamique fluviale est l'ensemble des changements qui affectent le lit fluvial situé au sein des alluvions récentes. Ces transformations sont provoquées par des modifications des paramètres physiques qui régissent l'équilibre dynamique du système. Ainsi, les contraintes hydroclimatiques, géomorphologiques, humaines, sont-elles primordiales pour comprendre le fonctionnement du fleuve et de ses nappes d'accompagnement. Le niveau de l'eau dans la Loire étant une condition aux limites des nappes alluviales, le comportement hydrodynamique de ces deux entités est intimement lié.

Nous aborderons dans un premier temps, les aspects climatiques et hydrologiques. Dans un deuxième temps, nous analyserons la morphodynamique de la Loire dans la Plaine du Forez. Dans un troisième temps nous verrons l'ensemble des aménagements présents qui jouent un rôle dans la dynamique depuis un siècle et demi (date des premières informations). Enfin, nous synthétiserons l'ensemble des données disponibles sur les nappes alluviales du lit majeur qui représentent la ressource en graviers exploitable par les carriers.

L'*objectif* est double:

- d'une part, il s'agit de déterminer si la Loire possède actuellement une dynamique fluviale et quels sont les paramètres anthropiques et naturels qui influent. Compte tenu des mesures réglementaires en matière d'exploitations de graviers, il faut analyser les impacts géomorphologiques de ces dernières dans les zones où elles sont encore autorisées, c'est à dire hors du domaine public fluvial.
- d'autre part, il faut délimiter les alluvions récentes qui correspondent aux matériaux d'une qualité recherchée.

1. Dynamique et morphologie de la Loire dans la Plaine du Forez

Les paramètres physiques qui régissent le fonctionnement du système nappe/rivière sont essentiellement des paramètres géologiques qui ont été mis en place à l'échelle du million d'années, et des paramètres climatiques qui ont une variabilité à l'échelle humaine. Si ces deux types de paramètres sont naturels, ils n'ont pas la même fonction temporelle. Les conditions géologiques peuvent être considérées comme constantes à l'échelle de notre étude. Cependant, elles sont importantes car responsables des caractéristiques du substratum sur lequel repose le matériel alluvionnaire. De plus, ce sont les événements climatiques du Quaternaire qui ont mis en place les différents niveaux de terrasses alluviales qui offrent aujourd'hui des potentialités en eau et en ressources minérales. Les climats influent directement sur les débits fluviaux et sur l'alimentation des nappes alluviales, c'est pourquoi ils représentent une phase importante de l'étude.

1.1. Les paramètres physiques

1.1.1. Géologie

La plaine du Forez s'inscrit dans l'histoire des limagnes de la partie orientale du Massif Central. Elle est actuellement enclavée au sein de reliefs taillés dans les terrains métamorphiques et plutoniques appartenant à la chaîne varisque. Les modalités et les conditions de remblaiement de ces fossés d'effondrements ont modelé l'actuel substratum des différents niveaux d'alluvions de la Loire.

a. Le substratum

Globalement la plaine du Forez ou bassin de Montbrison est un fossé d'effondrement dans le socle hercynien aplani, partiellement remblayé par des sédiments tertiaires continentaux fluviaux-lacustres. La puissance maximale de ces formations est, d'après les sondages de la COGEMA, de 800 m au sud de Feurs.

Les premières études sur la géologie de la plaine du Forez datent de 1857 avec les travaux de L. Gruner qui introduit la notion d'étage et en définit trois, le plus récent correspondant au Miocène supérieur. U. Le Verrier en 1889 modifie complètement la stratigraphie du bassin en déterminant quatre étages distincts. Il est le premier à décrire les « grès et calcaires de Veauche » et les « marnes vertes », termes qui seront repris par ses successeurs. Il faut attendre ensuite les travaux de Duclos en 1967 qui conserve les quatre étages définis par Le

Verrier mais en modifie les limites. Il établit la première synthèse structurale de la plaine en proposant une cartographie des accidents tectoniques. P. Larqué (1969) et M. Schüller (1969) définissent seulement deux séquences sédimentaires grâce à une étude approfondie géochimique, minéralogique, palynologique et écologique d'un sondage C.E.A. F. Tomas (1971) distingue un cycle Oligocène et un cycle Miocène séparés par une surface d'érosion aquitanienne. En 1975, A. le Griel modifie le schéma stratigraphique et paléogéographique du fossé du Forez. Il individualise quatre formations dont il précise l'âge en 1981. Ce sont, de la formation la plus ancienne à la plus récente :

- les argiles sableuses de base (Bartono-Ludien) ;
- les argiles sables et grès de Veauche (Ludien supérieur-Sannoisien) ;
- les argiles vertes (Stampien) ;
- les sables et argiles bariolés du NW (Oligocène inférieur).

Par ailleurs, A. le Griel en 1975 est le premier à faire une étude détaillée des terrasses fluviales de la Loire et de ses principaux affluents. Des divergences très nettes opposent ces auteurs sur la succession des formations et sur leur âge. Les interprétations paléogéographiques qui en découlent sont aussi différentes. Les travaux les plus récents sont ceux de D. Ech-Cherif El Kettani (1996) qui a disposé des sondages COGEMA sur l'ensemble de la plaine du Forez. Il propose une nouvelle série lithostratigraphique constituée par la superposition de trois mégaséquences fluvio-lacustres ainsi qu'une interprétation paléogéographique.

Les bordures est et ouest de la plaine sont commandées par des accidents tectoniques qui se succèdent suivant des orientations différentes de nord 125° à 180° est et qui mettent en contact les formations cristallines des massifs des Monts du Forez et des Monts du Lyonnais avec les sédiments tertiaires du bassin d'effondrement. Ces accidents tectoniques se sont mis en place en plusieurs phases [F. Bergerat, 1983]. Une première compression NW-SE datée tardi-hercynienne dont certains des accidents ont joué durant la phase alpine (Miocène). Une deuxième compression nord-sud datée de l'Eocène met en place un jeu senestre d'accidents NE-SW et un jeu dextre d'accidents SSE-NNW. Une troisième phase compressive ENE-WSW correspond à la phase alpine au Miocène. Deux phases distensives se sont produites, l'une de direction nord-sud au Jurassique supérieur/Crétacé [F. Bergerat, 1983], et l'autre de direction est-ouest à l'Eocène supérieur (Ludien) est nettement liée à la subsidence saccadée mais régulière du bassin de Montbrison [Ech-Cherif El Kettani D., 1996]. Ce bassin a été remblayé au Ludien supérieur dans une ambiance chaude et humide par des sédiments fluviaux et palustres caractérisés par des rudistes à ciment calcaire. L'Oligocène inférieur est marqué par une surélévation des reliefs bordiers plus importante qu'au Ludien. Un vrai bassin sédimentaire endoréique commence à s'individualiser avec une sédimentation en cônes détritiques en provenance de l'ouest, et des dépôts lacustres à l'est et au sud [Ech-Cherif El Kettani, 1996]. C'est à l'Oligocène supérieur que se produit la plus importante surrection des Monts du Forez et du Lyonnais. Elle provoque le dépôt de conglomérats à blocs passant latéralement à des faciès de chenaux anastomosés puis à des faciès lacustres et palustres. D'après D. Ech-Cherif El Kettani (1996) l'intense activité tectonique de cette période aurait

provoqué l'érosion totale de la formation précédente. Ce même auteur caractérise le Miocène forézien par un basculement de l'ombilic de subsidence vers le nord à la suite d'un basculement général du fossé dans cette direction. Les dépôts sédimentaires évoluent des conglomérats et sables dans les faciès de cônes à des argiles et sables de plaines d'inondation et de débordement, puis à des faciès lacustres argilo-dolomitiques. Le lac est très peu profond, d'ordre décimétrique, soumis à une subsidence régulière. Un soulèvement dans les régions nord (seuil de Neulise) a provoqué la mise en place d'un éventail deltaïque d'une formation dite de Ponçins. Une activité tectonique et volcanique synsédimentaire ont également marqué cette période.

Le substratum sur lequel la Loire coule du sud vers le nord est constitué par les roches plutoniques du seuil du Pertuiset qui affleurent jusqu'à Saint-Just-Saint-Rambert en rive droite. L'ensemble de la plaine est constituée par les formations détritiques qui sont représentées par les faciès lacustres de Chalain le Comtal qui passent au nord aux « marnes vertes » puis au delta de Ponçins. Il est difficile d'en estimer la résistance à l'érosion qui est conditionnée par leur compactage et leur cimentation. Cependant, ce sont des formations classiquement considérées comme tendres en géomorphologie [Archambault M., Vanney R., et Vanney J.-R., 1990]. Enfin, les roches plutoniques affleurent à l'extrémité nord de la plaine sur les deux rives près de Balbigny, à l'entrée du seuil de Neulise.

Les ensembles de Chalain le Comtal, les marnes vertes et le delta de Ponçins ont été décrits par D. Ech-Cherif El Kettani :

- la formation de Chalain le Comtal est une formation à prédominance sablo-argileuse. Elle est constituée par des alternances de bancs de sable et d'argile réguliers et horizontaux ;
- les marnes vertes sont constituées par des argilites indurées vertes ou grises, localement noirâtres et marron ou ocre-rouges. Parfois, elles s'enrichissent en carbonates et passent à des marnes calcaires vertes claires ou à des marnes dolomitiques gris foncés ;
- la formation de Ponçins est essentiellement déritique grossière, caractérisée par l'alternance d'épaisseurs importantes de sable grossier propre (2 à 15 m) et de niveaux argileux fins (4 à 5 m au maximum).

b. Les alluvions de la Loire

La physionomie de la basse vallée a été remodelée par le fleuve depuis la dernière crise climatique froide, seule capable d'avoir apporté l'énorme quantité d'alluvions qu'on y rencontre.

Les alluvions de la Loire ont été décrites par A. Le Griel en 1984, puis reprises par D. Ech-Cherif El Kettani en 1996. Ces auteurs distinguent sept niveaux étagés (cf. Figure 6).

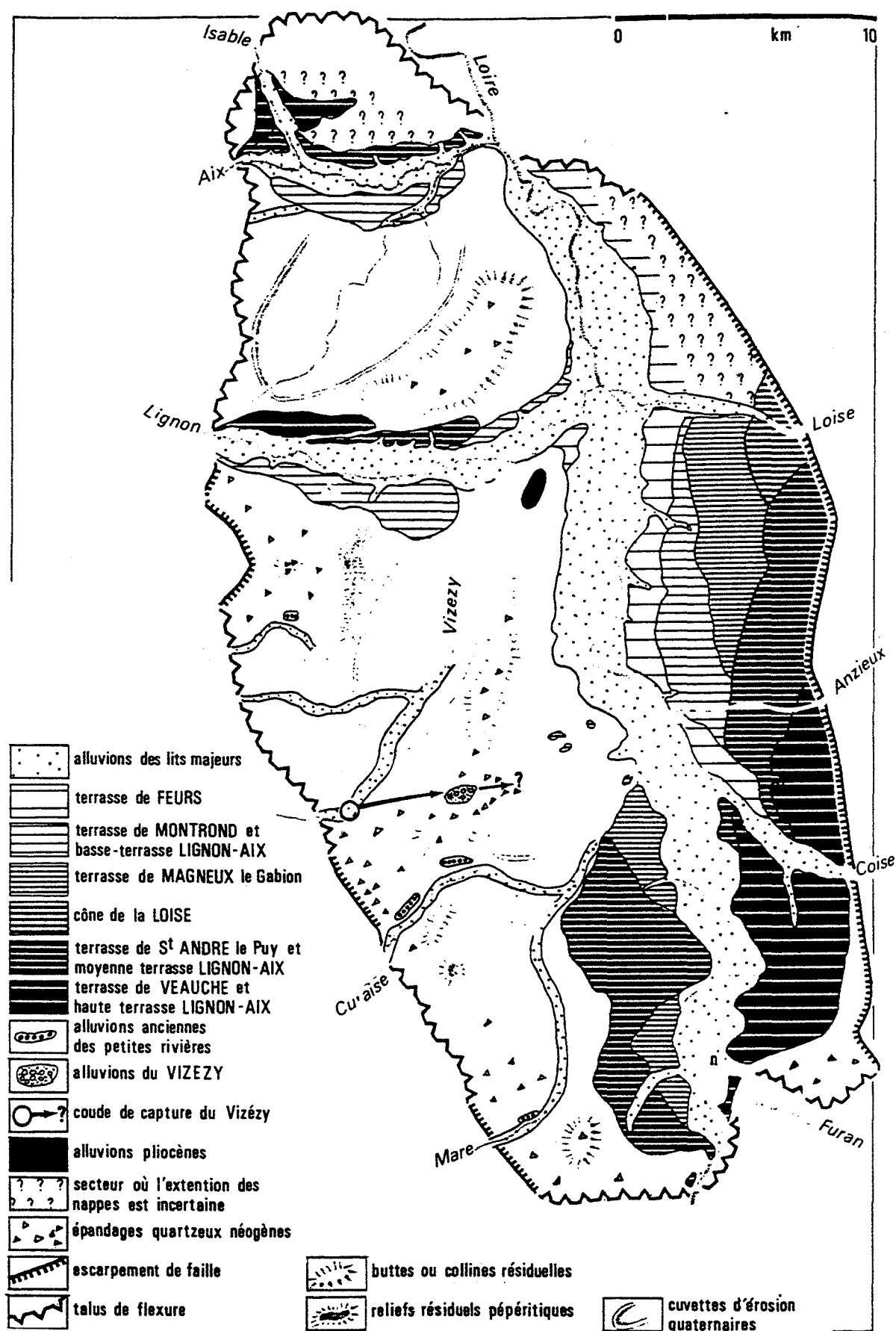


Figure 6: schéma géomorphologique du Forez [Le Griel A., 1984]

La première terrasse de la Loire est la terrasse de Feurs. Elle est séparée de la basse vallée par une dénivellation de 2 m. Cette balme est assez reconnaissable dans la topographie de la rive droite de la Loire, où elle peut être suivie de Montrond-les-Bains à Balbigny. La terrasse de Feurs ne forme qu'un lambeau de 1 km de large, relayé à l'est par une deuxième terrasse.

La deuxième terrasse de la Loire ou terrasse de Montrond-les-Bains débute au SE de cette localité, et remonte jusqu'à Pouilly-les-Feurs après avoir été interrompue par la vallée de la Loire.

La troisième terrasse de la Loire se présente sous la forme de trois lambeaux. Les deux lambeaux les plus méridionaux sont compris respectivement entre Saint-Rambert-sur-Loire et Saint-Cyprien sur la rive gauche de la Loire et entre Craitilleux et Boisset-les-Montrond sur la rive droite. Ce sont deux replats intermédiaires entre les alluvions du lit majeur et la quatrième terrasse. Le troisième lambeau est le plus important en superficie. Il commence au nord de Saint-André-le-Puy et se poursuit en aval jusqu'à la Loire.

La quatrième terrasse en partant du lit majeur, dite de Saint-André-le-Puy, est composée de deux parties d'importance égale situées respectivement en rive gauche, entre Saint-Rambert-sur-Loire et Boisset-les-Montrond, et en rive droite entre la Loire et la Coise, le long du versant occidental des monts du Lyonnais.

La cinquième correspond au substratum du plateau de Veauche. Elle est coupée en deux par la Coise. Un lambeau dit de la Tuilerie lui correspond à Saint-Rambert 35 m au dessus de la Loire actuelle.

La sixième terrasse identifiée par D. Ech-Cherif El Kettani est située au Sud de Saint-Rambert. Elle domine la Loire de 65-70 m.

*Seule la **basse vallée**, (ou septième terrasse) qui est occupée par les **alluvions récentes**, fait l'objet de l'étude. Ces alluvions reposent directement sur le substratum tertiaire. Elles se composent de **sables, graviers et galets**. Elles ont une épaisseur de 3 à 6 m et sont partiellement recouvertes par les champons. Elles sont étudiées en détail dans l'étude hydrogéologique de la plaine. Elles sont exploitées par les carriers et certaines communes riveraines s'y alimentent en eau potable. Selon certaines définitions (cf. p 57), elles correspondent au lit majeur.*

1.1.2. Le climat

Les conditions climatiques actuelles et historiques dans l'ensemble du bassin versant de la Loire représentent les entrées de l'hydrosystème fluvial, le débit du fleuve en représente les

sorties. Le régime est directement lié à la pluviométrie qui est donc un des paramètres importants pour comprendre la dynamique fluviale.

Bien que la Loire dans la plaine du Forez ne représente qu'une faible part du cours supérieur du fleuve, il est important de traiter rapidement les conditions climatiques qui règnent sur le haut bassin jusque dans sa partie ardéchoise. En effet, les conséquences sur le régime hydrologique sont considérables, surtout au niveau des épisodes exceptionnels.

a. Le climat du haut bassin versant de la Loire

La majeure partie du bassin reçoit des pluies de saison chaude. C'est le domaine continental ou médian du Massif Central [Dacharry M., 1974]. Des variantes saisonnières partagent en quatre ce vaste domaine :

- sur une grande partie du Velay, le maximum pluvial est printanier et les mois les plus arrosés sont mai ou juin, les mois les moins arrosés sont en moyenne janvier et février;
 - sur la Loire non vellave, dans sa traversée du Forez, le régime pluviométrique est voisin du précédent mais le maximum est plus tardif, décalé vers l'été ou le début de l'automne. Le trimestre de concentration des pluies s'étale de juin à août entre Saint-Etienne et Balbigny.
 - dans les Monts du Forez, le maximum et le minimum pluvieux sont difficiles à déterminer. La station de Verrières en Forez, située sur la bordure est de la plaine montre une remarquable régularité de répartition mensuelle des pluies [Suchel J.B., 1990]. Cependant, elles sont d'origines diverses : violents orages d'été, influences océaniques en automne.
 - la partie la plus méridionale du bassin est caractérisée par un maximum accentué d'automne (septembre, octobre, novembre) notamment en amont de Rieutord. Cette abondance pluviale d'automne est incontestablement un trait méditerranéen du climat. La limite de l'influence méditerranéenne est difficile à déterminer à cause des remontées cévenoles. D'après Starron seuls deux petits secteurs sont réellement affectés par les pluies méditerranéennes extensives, principalement le bassin de la Loire ardéchoise qui est très arrosé (plus de 1500 mm/an à Sagnes-et-Goudoulet) et de manière secondaire la région du haut Lignon vellave.
- La sécheresse d'été est un autre trait singulier de ce climat.

b. Le climat dans la plaine du Forez

Par rapport à l'ensemble du bassin versant amont de la Loire, la plaine du Forez se caractérise par un climat à dominante continentale dû essentiellement au rôle de barrière des reliefs qui la ceinturent de toutes parts. En effet, située au coeur d'une circulation générale d'ouest en est, la plaine est abritée par les Monts du Forez et se singularise par des totaux pluviométriques relativement faibles partout inférieurs à 700 mm, sauf sur la bordure orientale. La saison la plus pluvieuse s'étend de mai à septembre avec des moyennes mensuelles variant de 70 à 100 mm (cf. Figure 7). Le mois de juillet marque généralement un creux assez net, ainsi que les mois de décembre à mars où les moyennes descendent en dessous de 50 mm. Les précipitations tombent souvent en été sous la forme de violents orages.

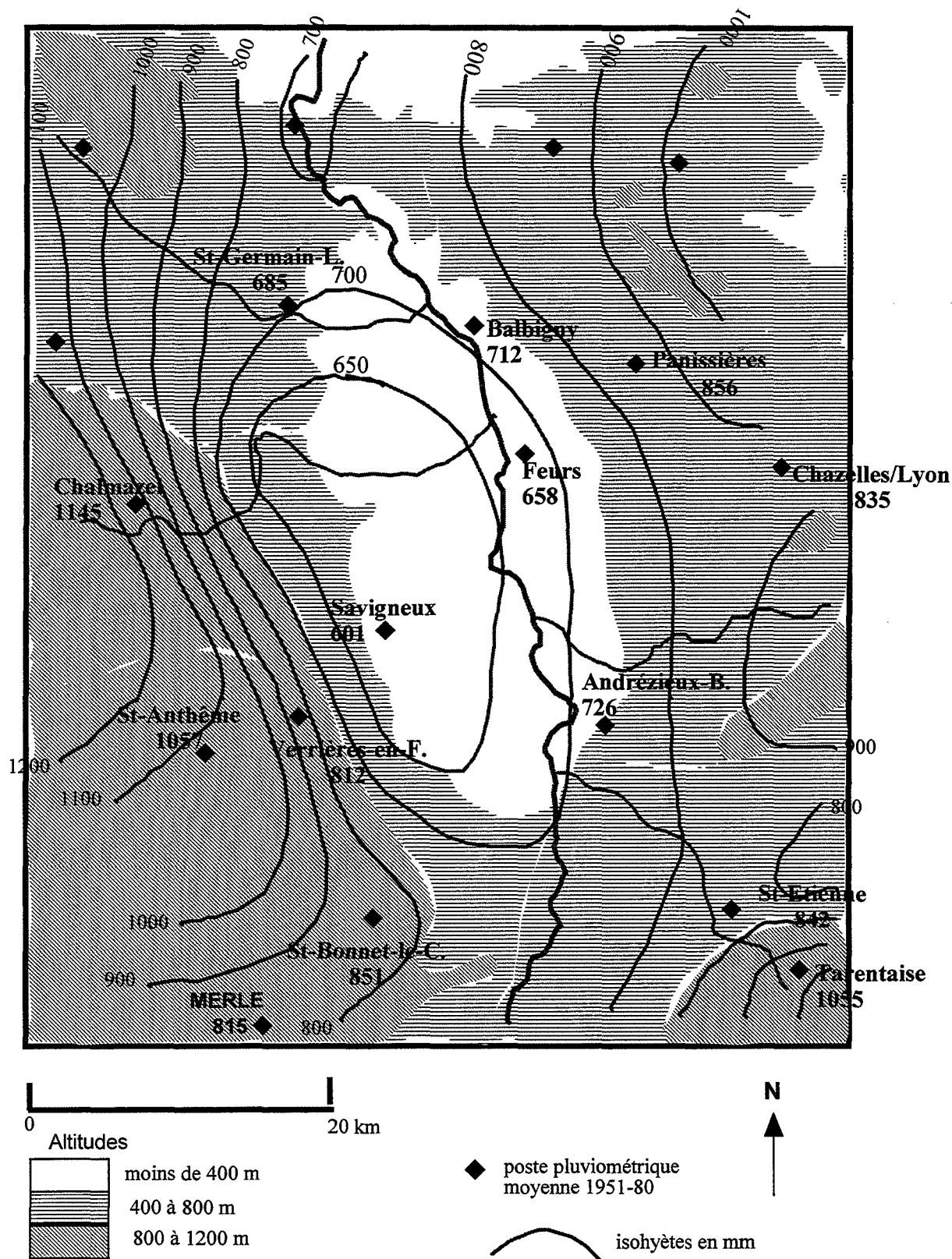


Figure 7: pluviométrie de la Loire dans la plaine du Forez

1.1.3. Hydrologie de la plaine du Forez

La plaine présente, de part et d'autre de la Loire, une dissymétrie de type morphologique qui est due à des bassins versants plus importants en rive gauche qu'en rive droite (cf. Figure 8).

En rive gauche, la Loire recueille trois cours d'eau venus des Monts du Forez : la Mare, le Lignon et l'Aix. Ces rivières au module modeste (aux alentours de 2 m³/s à 10 m³/s) connaissent parfois des crues violentes. Le régime de ces trois rivières est de type pluvio-nival peu marqué selon l'enneigement variable en fonction des années. Elles subissent les influences de la rétention nivale, puis de la fonte des neiges parfois très brutale au printemps (maximum secondaire) ; leur maximum principal se produit soit en automne (novembre - décembre) à la suite de pluies orageuses d'origine méditerranéenne, soit au début de l'hiver. Les deux maxima sont séparés par un léger minimum aux mois de février - mars [A. Le Griel, 1975].

Ces rivières sont encaissées de deux à trois mètres dans leurs alluvions. A chaque crue importante, elles modifient le tracé de leur cours. Ainsi, le Lignon dont le cours a été dessiné au début du XIX^{ème} siècle (cadastre Napoléon) avait tellement changé de situation lors de la révision cadastrale de 1936, qu'on a dû renoncer à l'utiliser comme limite administrative.

En rive droite, les affluents descendus des monts du Lyonnais sont beaucoup moins importants du fait d'un bassin versant de superficie et d'altitude plus faible. Ils connaissent donc des crues moins puissantes et ont un tracé beaucoup plus stable, sauf pour la Coise qui a le bassin versant le plus élevé en altitude et le plus vaste.

1.1.4. Le régime de la Loire

Le régime des plus irréguliers de ce fleuve capricieux, est une de ses caractéristiques essentielles. "Roulant en crue à pleins bords des eaux jaunâtres pour se chercher, quelques semaines plus tard, dans un extraordinaire déploiement de grèves, la Loire évoque tour à tour, dans sa démesure outrancière, l'idée d'une puissance invincible autant que celle d'une rare indigence" [Babonaux Y., 1970]. En effet le débit peut varier de quelques mètres cubes/seconde en étiage à l'entrée du seuil de Neulise, à plus de 5000 m³/s estimés (SOGREAH) en crue centennale.

Actuellement il existe une soixantaine de stations hydrométriques réparties sur le bassin de la Loire en amont de Villerest, dont les données commencent pour la plupart dans les années 60. Quinze stations sont implantées sur le fleuve lui-même.

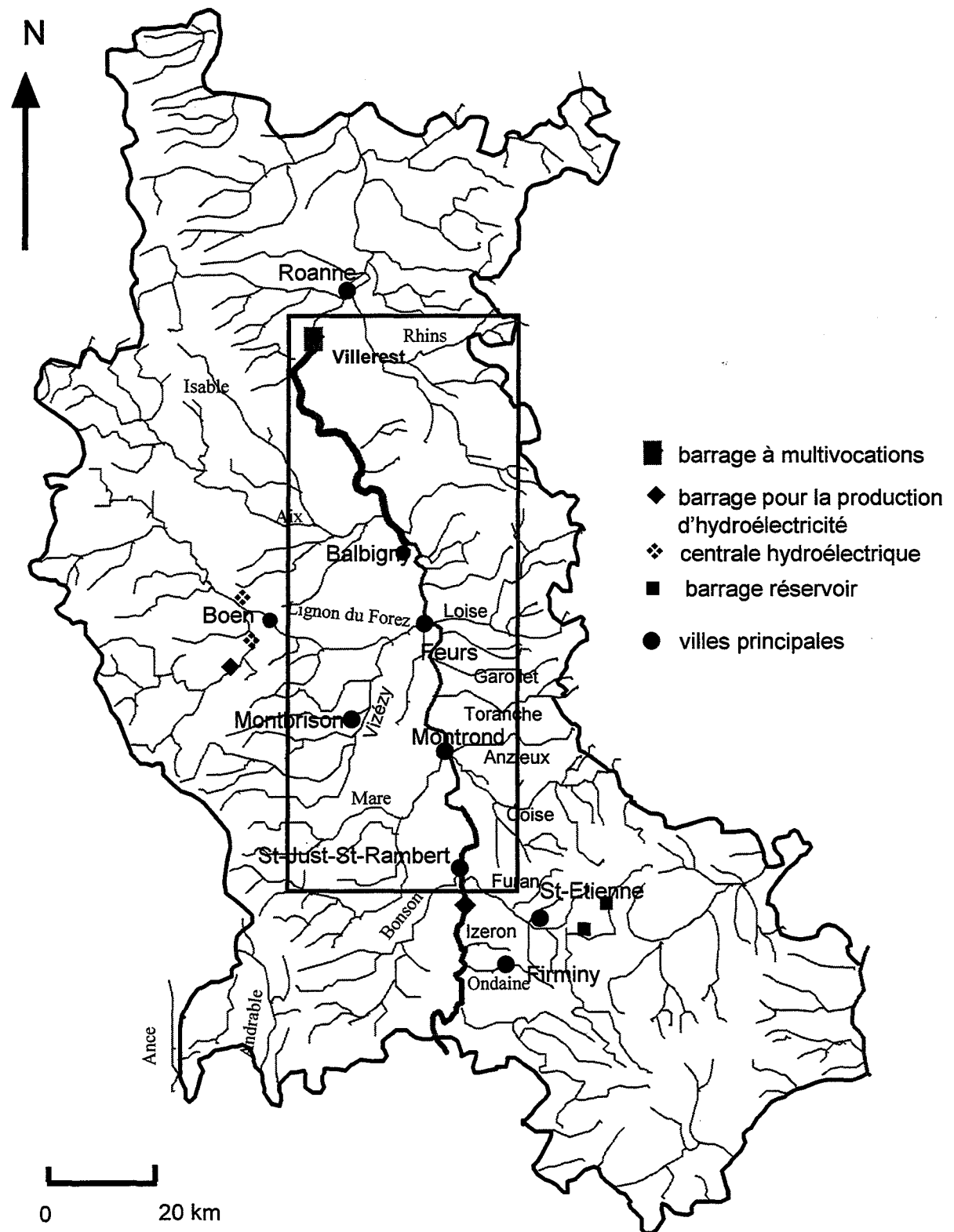


Figure 8: hydrologie de la Loire (42) et aménagements hydrauliques principaux

Dans le haut bassin, en amont de Bas-en-Basset, sept stations sont implantées : Usclade-et-Rieutord, Issarlès, Arlempdes (1946-80), Goudet, Coubon (1946-80), Brives-Charensac et Chadrac (cf. Figure 9). Les débits naturels reconstitués sont calculés par les gestionnaires (lorsqu'il s'agit d'EDF). Ces débits représentent ceux qui coulent normalement dans le fleuve en l'absence de l'influence amont des aménagements hydroélectriques. Plus en aval se situe la station de Bas-en-Basset qui offre des débits journaliers depuis 1918, puis celles de la plaine du Forez : Montrond, Feurs, et enfin celle de Villereest.

Bas-en-Basset apporte des renseignements à un endroit crucial du fleuve, où convergent le Lignon Vellave, l'Ance du nord et la Loire.

a. Les principales caractéristiques de la Loire en amont de Villereest

D'après F. Crépet (1992), la Loire supérieure peut se résumer à une confluence d'influences :

- l'altitude en raison de la neige ;
- l'océan par les pluies d'hiver et de fin d'automne ;
- la Méditerranée par l'intervention des averses cévenoles.

Le régime de la Loire est des plus variable : les dates d'occurrence des maxima et des minima sont différentes d'une année sur l'autre, et les débits moyens d'un mois sont très irréguliers. D'après M. Dacharry (1974) les modules de la Loire et de ses affluents sont parmi les plus irréguliers de la zone tempérée, plus variables que ceux même de rivières méditerranéennes en dépit d'une variabilité de la pluviosité exactement du même ordre.

L'influence méditerranéenne est très nette sur le plateau ardéchois. Plus en aval, avant même le bassin du Puy, les influences océaniques et continentales sont sensibles. Pourtant à Grangent, les influences cévenoles sont toujours présentes en novembre. D'après Staron (1981) la zone capable de recevoir les excès méditerranéens s'arrête à Bas-en-Basset.

Le régime complexe de la Loire est dû à l'alternance d'influences climatiques qui règnent tour à tour sans partage sur la majeure partie du bassin [Crépet F., 1992]. Ces alternances rendent compte de l'extrême variabilité des débits d'une année sur l'autre.

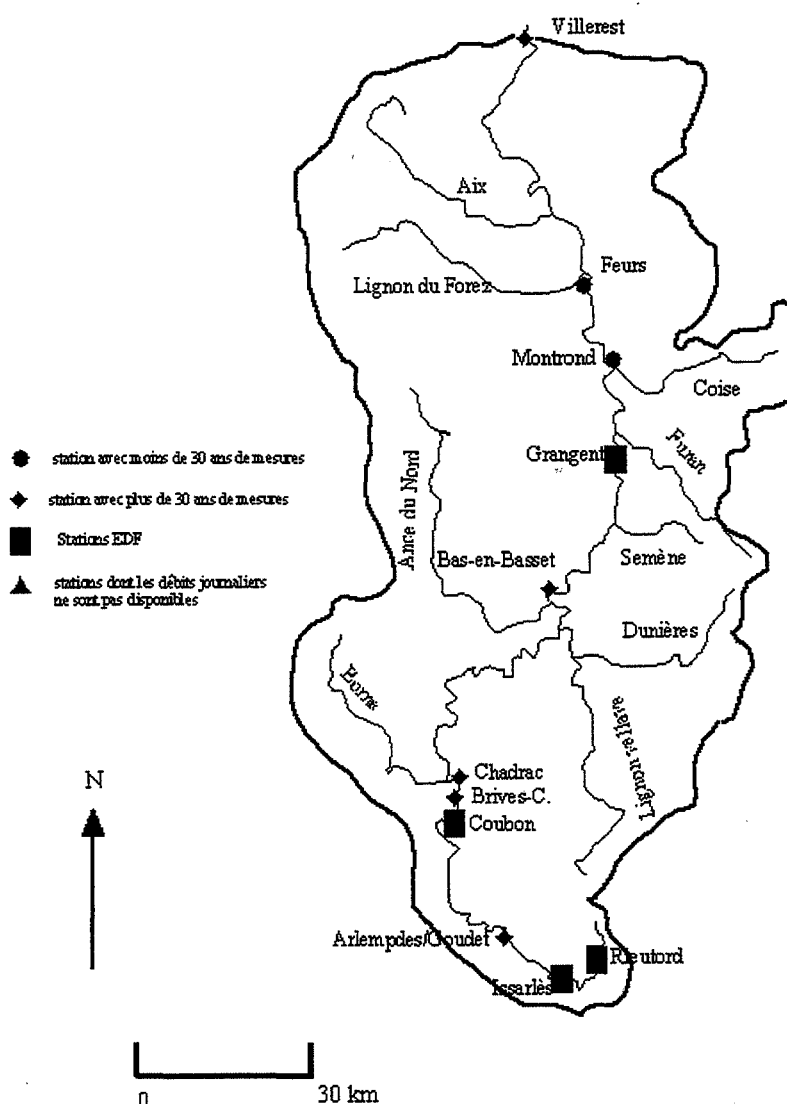


Figure 9: localisation des stations de jaugeage dans le bassin supérieur de la Loire

b. Les crues de la Loire

Les crues de la Loire réputées pour leur ampleur ont une action morphologique importante mais rare dans le temps. Il est nécessaire d'en connaître les paramètres essentiels (durée de retour, débits, hauteur d'eau) mais il faut relativiser leur rôle dans l'évolution géomorphologique.

Le débit le plus efficace (débit dominant) est celui le plus proche de la capacité d'écoulement à pleins bords plutôt que le débit maximum. « L'efficacité géomorphologique » évalue le travail accompli par une crue par rapport à son potentiel géomorphologique. En effet, les crues de magnitude similaire ne réalisent pas toujours la même quantité de travail, selon les conditions prévalant avant la crue.

La signification hydrologique du concept de débit dominant [Gilvear D.J. et Bravard J.P., 1993] est que les rivières ajustent leur forme pour accommoder des crues de taille modeste contenues entre leurs berges. L'ajustement du chenal à la variation de débit n'est cependant pas instantané. L'inondation du lit majeur permet la dissipation de l'énergie ce qui contribue à l'inefficacité relative de ce type d'épisode.

La caractéristique majeure de la Loire supérieure est la triple origine des crues.

Trois grands types de crues ont été distinguées par Staron (1981) sur la Loire supérieure en fonction de leur origine :

- les crues d'origine méditerranéenne sont très marquées en Loire supérieure. Elles sont caractérisées par une montée des eaux subite et une décroissance presque aussi rapide. La zone la plus sensible est située en amont de Bas-en-Basset. Elles se subdivisent en trois sous-types :

- * les pénétrations méditerranéennes de sud-ouest, "confuses", rares, générales et peu violentes, donnant naissance à des crues moyennes sur la Loire;

- * les crues méditerranéennes de "franc sud", très peu extensives, et engendrant des crues peu abondantes, sporadiques et violentes;

- * les pluies de sud-est génératrices des grandes crues.

- les crues océaniques pures influencent peu la Loire supérieure, par contre elles jouent un grand rôle dans le régime de la Loire inférieure;

- les crues mixtes résultent de la conjonction des pluies océaniques et des pluies cévenoles, ou des pluies océaniques et de la fonte des neiges.

La crue de 1980 a égalé ou dépassé les niveaux de débordement les plus fameux laissés par l'histoire (crues d'octobre 1907, septembre 1866, octobre 1846 et octobre 1878). Le bilan des dégâts a été très lourd. Les plus importants ont été enregistrés près du Puy, mais ce sont tous les bords du fleuve jusqu'à Roanne qui ont été affectés avec notamment la rupture de digues à Nervieux causant une mort accidentelle. Des données statistiques sur les périodes de retour des crues sont synthétisées dans l'annexe 1.

Pour chacune des grandes crues historiques, le débit à la sortie de la plaine du Forez a été estimé aux alentours de 4500 m³/s. La SOGREAH a proposé le chiffre de 5000 m³/s pour la crue centennale.

c. Les étiages

Les étiages de la Loire sont un problème pour les gestionnaires de l'eau. La Loire possède des étiages très bas, le record appartenant à l'année 1919 avec un débit spécifique de 0,36 l/s/km² à Bas-en-Basset. En effet, le haut bassin de la Loire constitué essentiellement de massifs

cristallins fissurés ou de massifs volcaniques, ne comporte pas de réserves souterraines facilement mobilisables; les réserves alluviales sont très pauvres.

Certaines années le fleuve ne connaît pas de véritable étiage, l'écoulement restant toujours supérieur à 2 l/s/km^2 à Bas-en-Basset. Par contre pendant les années de sécheresse la Loire peut avoir un débit très bas pendant plus de trois mois. Ce fut le cas pendant l'année 1949 où le débit n'a pas dépassé 2 l/s/km^2 pendant 140 jours avec un écoulement inférieur à 1 l/s/km^2 pendant 60 jours [F. Crépet 1992].

Sur la période de 1958-91 le débit moyen a été de $41,1 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un débit minimum moyen mensuel de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ en août à Grangent (bassin versant de 3850 km^2).

Le débit minimum mensuel à Villerest (bassin versant de 6520 km^2) (1921-1975) était de $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en août. En août 1974, le débit minimum a été de $3,52 \text{ m}^3/\text{s}$. En juin 1976 lors de l'étiage sévère, le débit serait tombé entre 1 et $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (conditionné par le fonctionnement de Grangent).

Dans la plaine du Forez, les étiages prennent un caractère anthropique marqué, entre le débit sortant de Grangent et celui réservé au canal du Forez.

Ces chiffres comparés à ceux de Grangent fournissent pour le bassin versant compris entre ces deux points de mesure (2670 km^2) :

- un débit spécifique moyen annuel de $9,47 \text{ l/s/km}^2$
- un débit spécifique moyen pour le mois d'août : $6,75 \text{ l/s/km}^2$ alors que pour Grangent cette valeur est de 3,1.

Si généralement l'étiage annuel se situe du 15 juillet au 15 août, il peut tout aussi bien survenir en septembre - octobre, et quelques fois dès le mois d'avril.

Des données statistiques complémentaires sur les étiages sont synthétisées en annexe 1.

d. Relation côte-débit

D'après l'étude CPGF 1734c :

- un relèvement de 50 cm du niveau de l'eau dans la Loire se produirait pour une augmentation de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ du débit avec un débit initial de $100 \text{ m}^3/\text{s}$;
- un relèvement de 30 cm se produirait pour une augmentation de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un débit initial de $250 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ce sont des estimations car la cote de la Loire est très mal connue.

1.1.5. La Loire, un fleuve au débit extrêmement variable

Les paramètres physiques géologiques, climatiques et hydrologiques permettent de mettre en évidence la situation suivante :

La Loire arrive dans la Plaine du Forez à l'issue d'un parcours en régime torrentiel dans des gorges cristallines. Au cours du Quaternaire, elle y a déposé sept niveaux étagés de terrasses. Les plus anciennes ne subsistent plus qu'à l'état de lambeaux épars. La plus basse est constituée par les alluvions récentes qui reposent directement sur le substratum tertiaire, représenté par des sédiments meubles (essentiellement des marnes vertes). Les influences météorologiques méditerranéennes, océaniques et la rétention nivale [Dacharry M., 1974] donnent à la Loire un débit d'une extrême variabilité à l'échelle intermensuelle, saisonnière et interannuelle. De même, les crues sont rapides, violentes, et les étiages inconstants, parfois très bas.

1.2. Lit mineur et lit majeur

Il s'agit de déterminer si la Loire a conservé une dynamique fluviale naturelle, malgré les nombreux aménagements qui jalonnent son tracé. Si c'est le cas, il est important de délimiter les surfaces riveraines concernées qui pourront être considérées comme des zones sensibles, susceptibles de subir des phénomènes d'érosion ou de remaniement en période de crue.

Une rivière est classiquement caractérisée par ses différents lits : lit mineur, lit majeur et par son profil en long [J.P. Bravard, Gilvear, 1993]. Ces paramètres sont le reflet des dynamiques passées et actuelles, mais aussi de paramètres physiques indépendants du fleuve tels que la structure géologique régionale (lithologie, tectonique). Après avoir précisé les limites actuelles du lit mineur, une mise au point sur la notion de lit majeur est indispensable avant de proposer une méthodologie de cartographie.

1.2.1. Le lit mineur actuel

a. Définition

Il existe différentes définitions du lit mineur d'un cours d'eau. La plus couramment utilisée est celle de Derruau (1988): « Le lit mineur est l'alvéole comprise entre les berges, occupé par des matériaux roulés par les eaux et peu masqués, à l'inverse du lit majeur, par la végétation ou l'occupation humaine; mais en temps ordinaire, ce lit « ordinaire » n'est pas toujours occupé, puisque des bancs de sable et de graviers y apparaissent ». Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Loire-Bretagne cite la définition donnée par l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux: « le lit mineur est le lit mouillé plus de dix jours par an, soit le terrain recouvert par les eaux coulant à plein bord avant tout débordement (le débordement commence lorsque le débit continue de croître alors que le niveau de l'eau marque un palier prolongé dans sa montée) ».

Babonaux (1970) en décrit les spécificités en aval de Roanne. En période d'étiage, le lit mineur trace de grandes sinuosités visibles surtout sur le cours rectiligne. C'est le long des berges que le fleuve trouve ses plus grandes profondeurs au niveau des mouilles qui peuvent atteindre 4 m de puissance sous l'étiage et ne désemplissent jamais. Elles représentent une forme essentielle du lit mineur. De longueur variable (de 800 à 2000 m), leur profil en long est dissymétrique avec une forte pente de 30 à 40 % en amont et une pente contraire en aval de 0,2 à 0,7 %. Elles ne mesurent guère plus de 100 m de large, et ont un profil transversal plus

symétrique avec le talus plus raide se plaquant néanmoins à la berge à laquelle un matériel plus fin, plus argileux, plus tassé assure une meilleure tenue. Les mouilles présentent une position alternante comme si elles se relayaient d'une rive à l'autre.

Aux formes en creux des mouilles s'associent complémentirement les formes en relief des sables, les grèves. Elles ont une répartition inverse de celle des mouilles qu'elles séparent. Comme la mouille amont à laquelle elle fait suite, la grève élève son profil vers l'aval pour se briser d'un coup dans la mouille aval. Le talus terminal est le cul de grève qui peut atteindre 4 ou 5 m de commandement. Les petits cols par lesquels les basses eaux vont de mouille en mouille sont les seuils. Prenant en écharpe le lit, les seuils sont en oblique par rapport à l'axe longitudinal.

Le lit mineur comporte des îles qui sont généralement boisées, allongées selon l'axe du lit, ovoïdes ou lenticulaires, elles présentent une grande variété de contours et de tailles. Elles ont une position latérale qui divise le lit en deux bras inégaux, dont un seulement sera drainé en période d'étiage.

b. Objectif

L'étude puis la cartographie du lit mineur actuel de la Loire permet de délimiter les zones inexploitable par les carriers d'un point de vue législatif.

c. Etude sur documents

– Documents utilisés

L'étude du tracé en plan de la Loire repose sur 2 types de documents :

- photos aériennes IR noir et blanc au 1/17 000 mission 1991
- photos aériennes IGN noir et blanc au 1/25 000 mission 1954
- les cartes topographiques :I.G.N. de 1990 au 1/25 000 ont constitué le document de base pour l'étude actuelle de la Loire.

L'étude du profil en long de la Loire actuelle se fonde sur les résultats des mesures de 1989 pour la partie amont de la Plaine et ceux des mesures de 1995 pour la partie aval réalisées par la SOGREAH dans le cadre d'une étude géomorphologique sur la Loire dans le département de la Loire (à paraître).

– Traitement des informations par S.I.G.

Les cartes I.G.N. ont été numérisées (digitalisées), pour être ensuite exploitées sur S.I.G. Cet outil d'analyse spatiale est présenté dans la deuxième partie (Cf. &2). Les photographies aériennes ont été scannées, puis rectifiées pour minimiser les distorsions qui augmentent en s'éloignant du centre de la photo, et recalées. Pour rendre leur superposition possible, ces

données ont été mises dans un système unique de projection (Lambert II étendu) qui est utilisable sur tout le territoire français.

La superposition du tracé de la Loire et des photographies aériennes permet localement la correction de la carte I.G.N. en fonction de notre objectif de cartographie du lit mineur. Les limites de berges sont redigitalisées sans englober la végétation rivulaire. Le résultat est un fichier vecteur qui représente des surfaces ou polygones. Il est alors possible d'en obtenir la superficie, et de calculer certains paramètres géomorphologiques :

<i>Paramètres calculés</i>	<i>Chenal actif</i>	<i>Lit mineur</i>	<i>Longueur du chenal actif</i>	<i>Indice de sinuosité</i>
1991	5,31 km ²	6,45 km ²	53,5 km	1,31

L'indice de sinuosité correspond à la longueur réelle du lit mineur entre deux points (respectivement entrée et sortie de la Loire de la Plaine du Forez à Saint-Just-Saint-Rambert et Balbigny), divisée par la distance en ligne droite séparant ces deux points. Il permet de mesurer l'importance du méandrage sur un cours d'eau.

– Le profil en long actuel

D'après J.P. Bravard et Gilvear (1993) le profil en long est important car il affecte les forces de cisaillement, la puissance fluviale, la nature des ajustements géomorphologiques et le développement de la plaine alluviale vers l'aval.

<i>Point kilométrique (m)</i>	<i>Bornes repaires nivellement</i>	<i>1989</i>	<i>1995</i>	<i>Ruisseaux ouvrages communes</i>
181 884	Zéro	363,70		Echelle Pont de St Just
	Echelle			
198 239	416	347,90		
217 039	Zéro		326,85	Echelle Pont de Feurs
	Echelle			
227 269,00	Zéro		315,70	Echelle Pont de Balbigny
	Echelle			

D'après ces chiffres la Loire dénivelé de 48 mètres en 53,5 km, ce qui correspond à une pente moyenne de 0,89‰. SOGREAH met en évidence des maxima locaux (Marclopt) de 1,8 ‰. Le profil en long est irrégulier et doit s'adapter aux ouvrages construits pour le régulariser, tels que le barrage de Feurs, ou les seuils disposés tout au long du cours de la Loire.

d. Apports du travail de terrain

Le travail de terrain a été effectué essentiellement en période d'étiage afin d'être dans les meilleures conditions d'observation du lit mineur. En août 1994, le débit moyen de la Loire était de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Photo 1 : marnes vertes à l'affleurement à Villeneuve de Berg, vue d'ensemble

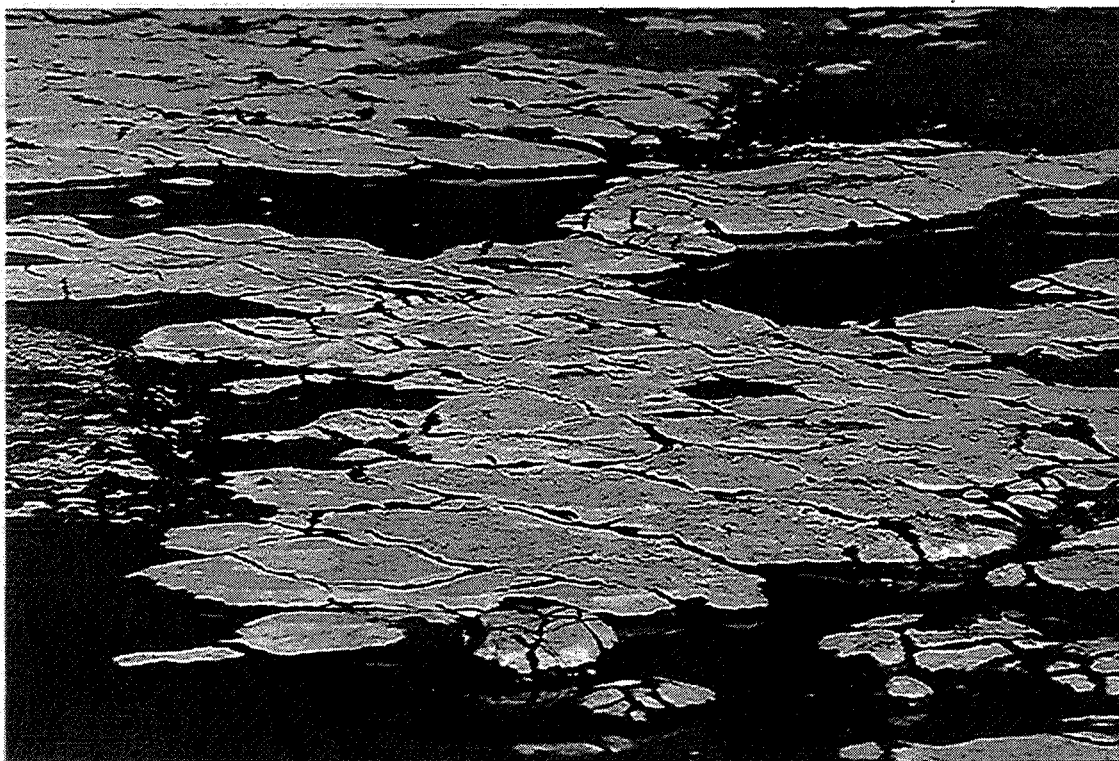


Photo 2 : figures polygonales dedessication dans les marnes vertes à Villeneuve de Berg

– *Le lit de la Loire*

De nombreux sites d'observation montrent des affleurements importants du substratum tertiaire dans le lit du fleuve.

Dans la boucle de Marclopt, de longs bancs de marnes vertes apparaissent à l'affleurement dans le lit de la Loire parsemés, ça et là, de gros galets pluridécimétriques. Les mêmes observations se renouvellent à Feurs, en aval du barrage. La Loire coule dans la même direction que le pendage des marnes, et recoupe régulièrement les bancs décimétriques qui apparaissent ainsi à l'affleurement (cf. Photo 1). A Magneux Haute Rive, près de Villeneuve en aval de l'Ecopole, de très vastes étendues de marnes apparaissent dans le lit. Il serait presque possible de traverser la Loire à sec. Les marnes des berges sont partiellement revégétalisées. Dans les secteurs encore nus, l'absence prolongée d'humidité entraîne la formation de polygones de dessiccation (cf. Photo 2) dans les marnes dont la partie supérieure se décolle pour devenir une sorte de "copeau" facilement entraînable par le premier écoulement de surface (immersion par la Loire, ou pluies).

A Balbigny, nous constatons le même phénomène d'affleurement du substratum, même s'il s'agit ici de la formation des sables consolidés de Ponçins.

L'observation du lit de la Loire en période d'étiage met en évidence la mise à nu du substratum sur l'ensemble du lit de Saint-Just-Saint-Rambert à Balbigny, seuls quelques secteurs sont épargnés mais il n'en existe aucune cartographie. Le Bonson, affluent en rive gauche montre

une adaptation à l'évolution du niveau de base local. Les marnes affleurent aussi dans son lit au niveau de la confluence avec la Loire. Ces observations vont dans le sens des déclarations du service d'annonce des crues de la DDE Loire: le lit de la Loire se serait localement enfoncé de 2,50 m, notamment au pont d'Andrézieux Bouthéon.

*Cette constatation de l'érosion des marnes est très importante car elle va à l'encontre du schéma classique de "blocage de l'érosion sur le substratum". En fait, dès que la Loire atteint le substratum, l'enfoncement est beaucoup plus **rapide** que dans les alluvions.*

– Les berges

Les berges du fleuve apparaissent globalement stables. Pourtant des érosions ponctuelles et sporadiques se produisent. Ainsi en aval de Feurs pour un débit de 600 m³/s, qui correspond au débit plein bord d'après le service de la navigation de la DDE de Saint-Etienne, l'intérieur d'un méandre est emporté. L'érosion latérale est estimée à 20 m maximum sur 200 m de longueur. Les berges sont fragilisées sur les deux rives. Le profil est nettement concave, affecté par des écroulements ponctuels amenés à évoluer par la formation de fissures parallèles à la ligne de berge. Cette évolution brutale serait due à la chute d'un arbre rivulaire dans le lit de la Loire lors de la montée des eaux, après un sapement régulier de la berge où il était enraciné. L'alvéole dégagée est aussitôt agrandie par des courants turbulents qui provoqueraient l'érosion en amont et en aval de cette berge.

Cette hypothèse est corroborée par l'observation d'arbres fortement penchés au dessus de l'eau, voire même d'arbres morts complètement couchés. La difficulté de maintien des arbres sur les berges montre une stabilité médiocre et une fragilité non négligeable.

– Stabilité trompeuse du lit mineur

Le lit mineur de la Loire dans la Plaine du Forez semble globalement stable à l'échelle pluriannuelle. Pourtant, dans les formes de détail, les études de terrain montrent une dynamique active aussi bien dans le plan horizontal que vertical. Un enfoncement du lit mineur dans le substratum est mis en évidence par les affleurements du substratum tertiaire. Cet « auto-endiguement » n'empêche pas des divagations latérales même pour des débits qui restent modestes (de 200 à 600 m³/s) et correspondent au débit plein bord selon les différentes sources : DDE 42, SOGREAH (1995). La Loire possède donc une dynamique à l'échelle annuelle, par conséquent il faut éviter tout aménagement hydraulique à proximité du lit mineur car toute divagation pourrait lui porter préjudice. Dans le cas d'une gravière située trop près de la berge cela se traduirait par une capture dont les conséquences sur la géomorphologie fluviales sont controversées. Les captures sont de plus en plus utilisées pour écrêter les crues de fréquence biannuelles à décennales, ou pour donner aux fleuves de nouveaux secteurs d'alimentation en matériaux solides. Dans le cas d'une série de gravières alignées le long du fleuve à l'intérieur d'un méandre, cela pourrait provoquer un déplacement latéral du lit et par suite des phénomènes morphologiques de réajustement de la rivière en réponse à ce changement brutal.

1.2.2. Le lit majeur

a. Objectif

La détermination des limites latérales du lit majeur vise à cartographier les zones potentiellement exploitables par les carriers.

b. Définitions du lit majeur

Derruau (1988) définit le lit majeur comme étant le lit d'inondation, soit toute la zone que le fleuve inonde et qu'il peut recouvrir des alluvions modernes. Il est limité de part et d'autre de son axe par les talus qui le séparent des alluvions anciennes ou hautes terrasses (Cf. Figure 10 : le lit majeur d'après M. Derruau (1988)).

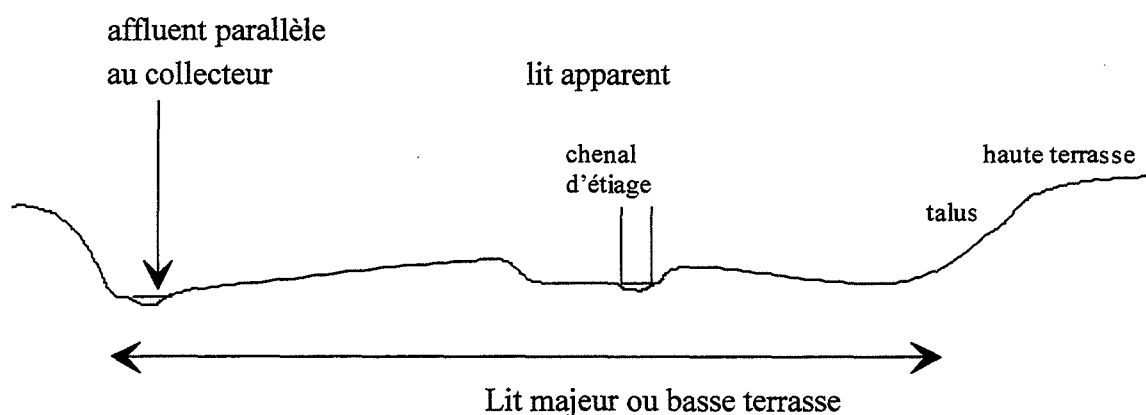


Figure 10 : le lit majeur d'après M. Derruau (1988)

Larras (1977) propose la même définition mais souligne la part de subjectivité qu'elle comporte. En effet, si le débordement d'un fleuve ou d'une rivière est une notion parfaitement objective lorsque le cours d'eau comporte des bords bien marqués, elle est très nettement subjective lorsqu'il n'existe pas de changements brusques de pente des berges au-delà desquels on puisse parler de débordement, et par suite d'inondation ; tout au plus peut-on dire que les largeurs se mettent à augmenter très vite pour de faibles variations de la hauteur d'eau.

C'est la topographie des lieux qui fixe la forme et l'étendue du lit majeur qui est souvent héritée d'une dynamique fluviale plus ancienne, et qui se présente sous la forme de grandes plaines. Larras distingue donc les champs d'inondation ou surfaces inondables, du lit majeur. Le débit de crue s'écoule dans les champs d'inondation qui ne sont qu'une partie du lit majeur.

Nous retiendrons cette conception du lit majeur, qui permet de s'affranchir des débits. Elle permet en outre de réaliser une cartographie des alluvions récentes du fleuve et donc de déterminer les surfaces éventuellement exploitables par les carriers, avant de considérer les contraintes d'occupation du sol.

L'ensemble des cartographies du lit majeur proposées est basée sur la notion de lit d'inondation. Elles sont donc variables selon les auteurs, les données historiques disponibles (souvent insuffisantes en quantité et en qualité) et les débits estimés. A. Le Griel (1975) a travaillé sur les terrasses alluviales et les résultats de ses travaux sont intéressants, mais il propose une cartographie au 1/200000. Cette échelle est bien trop petite pour notre problématique qui nécessite une approche au 1/25000.

Il apparaît donc nécessaire de proposer une nouvelle carte des alluvions récentes, assimilée au «lit majeur topographique» ou « lit majeur géologique ».

c. Méthode de détermination du lit majeur

Si la surface inondable est à déterminer en fonction d'un certain débit de crue (décennal, centennal, millénaire), le lit majeur est cartographié en fonction de critères uniquement topographiques, grâce à la localisation des talus qui séparent les basses des hautes terrasses. Les critères retenus pour la délimitation du lit majeur sont les suivants :

- la pente du talus est supérieure aux pentes des basses et des hautes terrasses (cf. Figure 11);
- le pied du talus est souligné par une concavité dans le sens de la plus grande ligne de pente. Cette concavité marque la limite en aval du talus (cf. Figure 13).

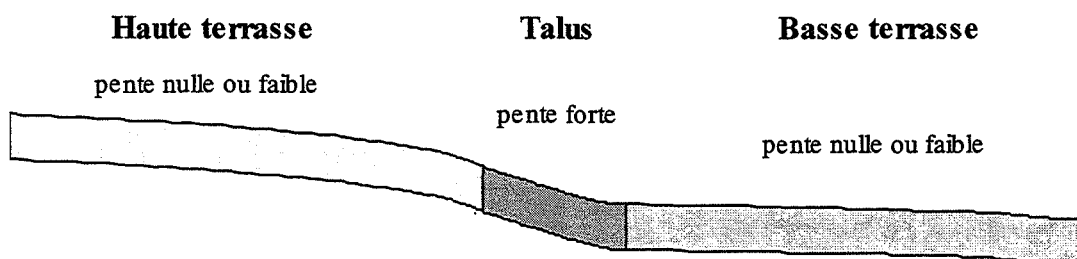


Figure 11 : coupe transversale dans une plaine alluviale, localisation du critère « pente »

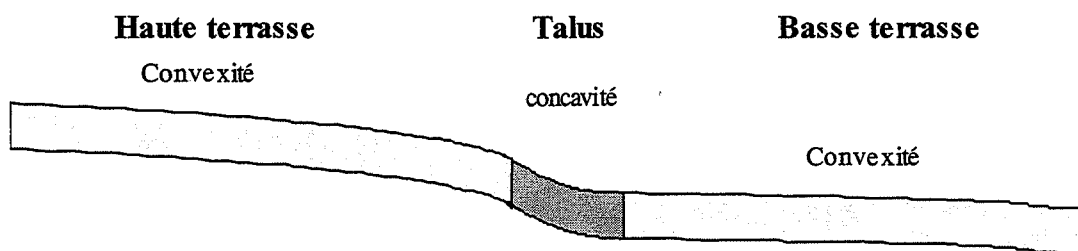


Figure 12 : coupe transversale dans une plaine alluviale, localisation du critère « concavité ».

Si la pente fait apparaître le corps du talus, la concavité en fait apparaître le pied. D'un point de vue spatial ces deux données doivent se chevaucher partiellement.

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) rend possible la délimitation automatique partielle du lit majeur à partir des critères précédemment définis si le Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) de la plaine alluviale considérée est disponible et suffisamment précis. Un M.N.T. peut être défini comme un fichier d'altitudes connues au centre de chaque cellule carrée d'une grille régulière (image raster du relief). Sa structure est donc semblable à celle des images de télédétection. Il est possible d'obtenir ces données à l'Institut Géographique National (I.G.N.) avec une précision équivalente à celle des cartes topographiques au 1/50 000 : au centre de chaque maille carrée de 50 mètres de côté (soit le « pas » du maillage), une valeur d'altitude est donnée avec une précision de ± 2 mètres (cf. Figure 14).

Ces données de base permettent de calculer des données dérivés. Ils représentent une mesure locale des propriétés morphologiques du champ d'altitudes telles que les pentes, les formes de terrain, les propriétés du drainage. Le calcul se fait sur un environnement local soit une maille et ses 8 voisines (cf. Figure 13).

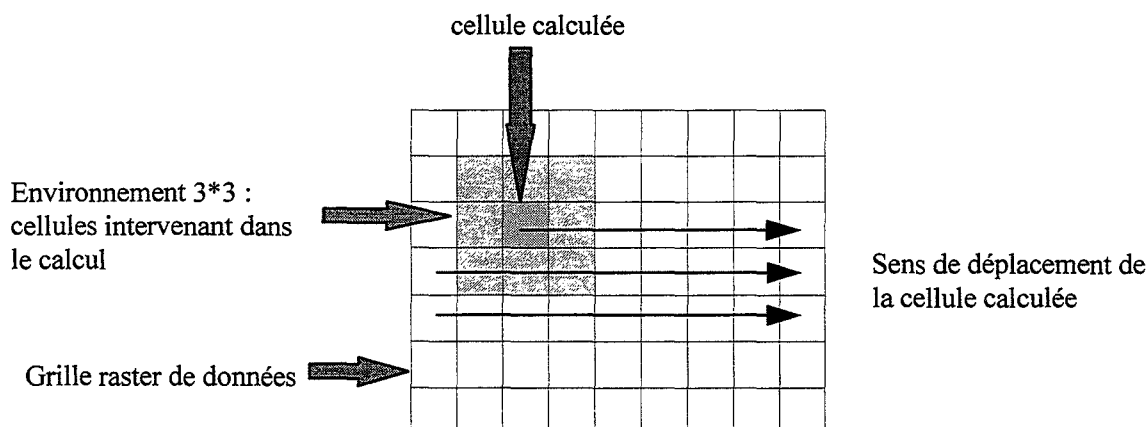


Figure 13 : Calcul en mode raster sur un environnement 3*3, d'après Cell Based Modelling with GRID. Arc/Info User's Guide - 1991

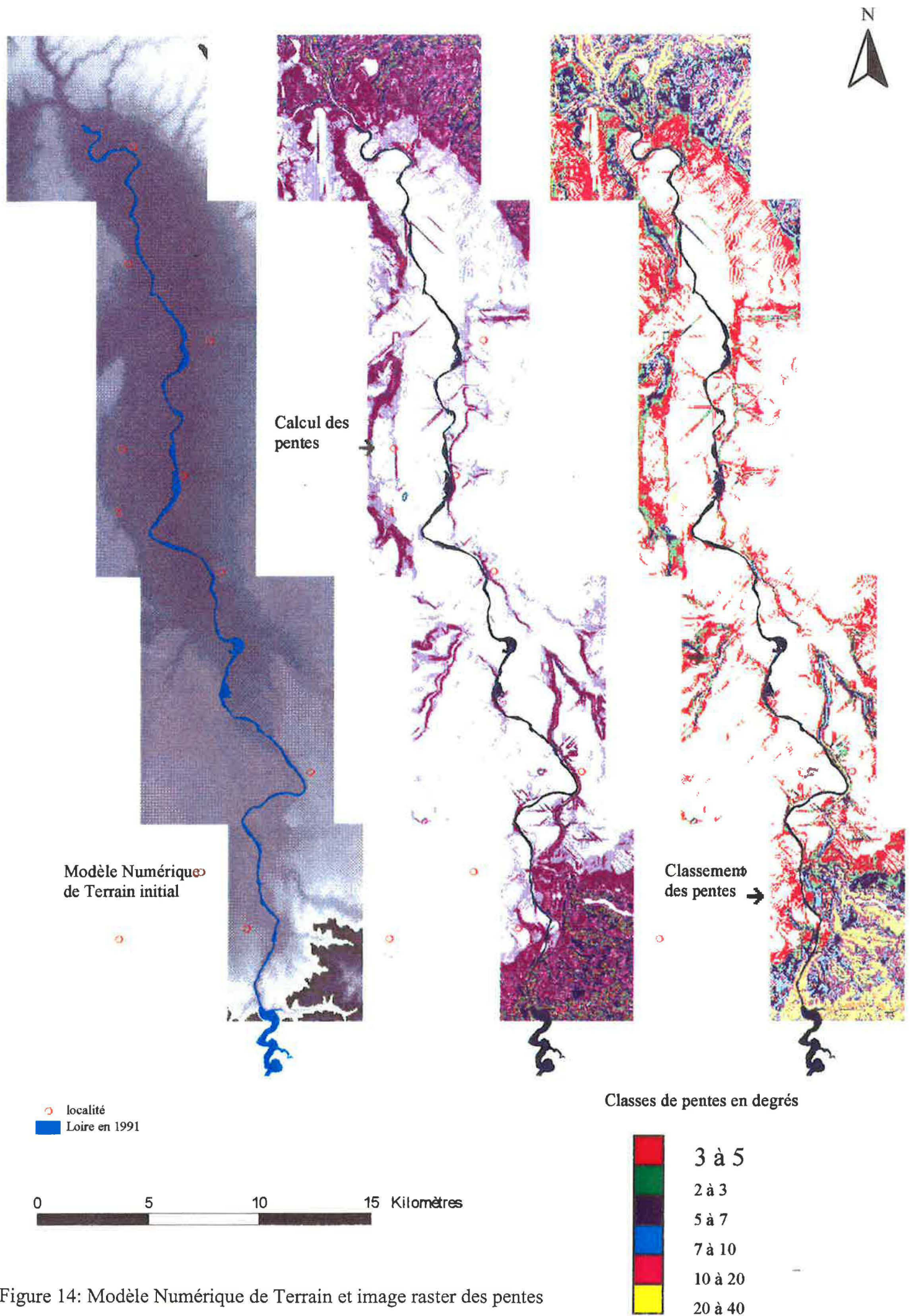


Figure 14: Modèle Numérique de Terrain et image raster des pentes

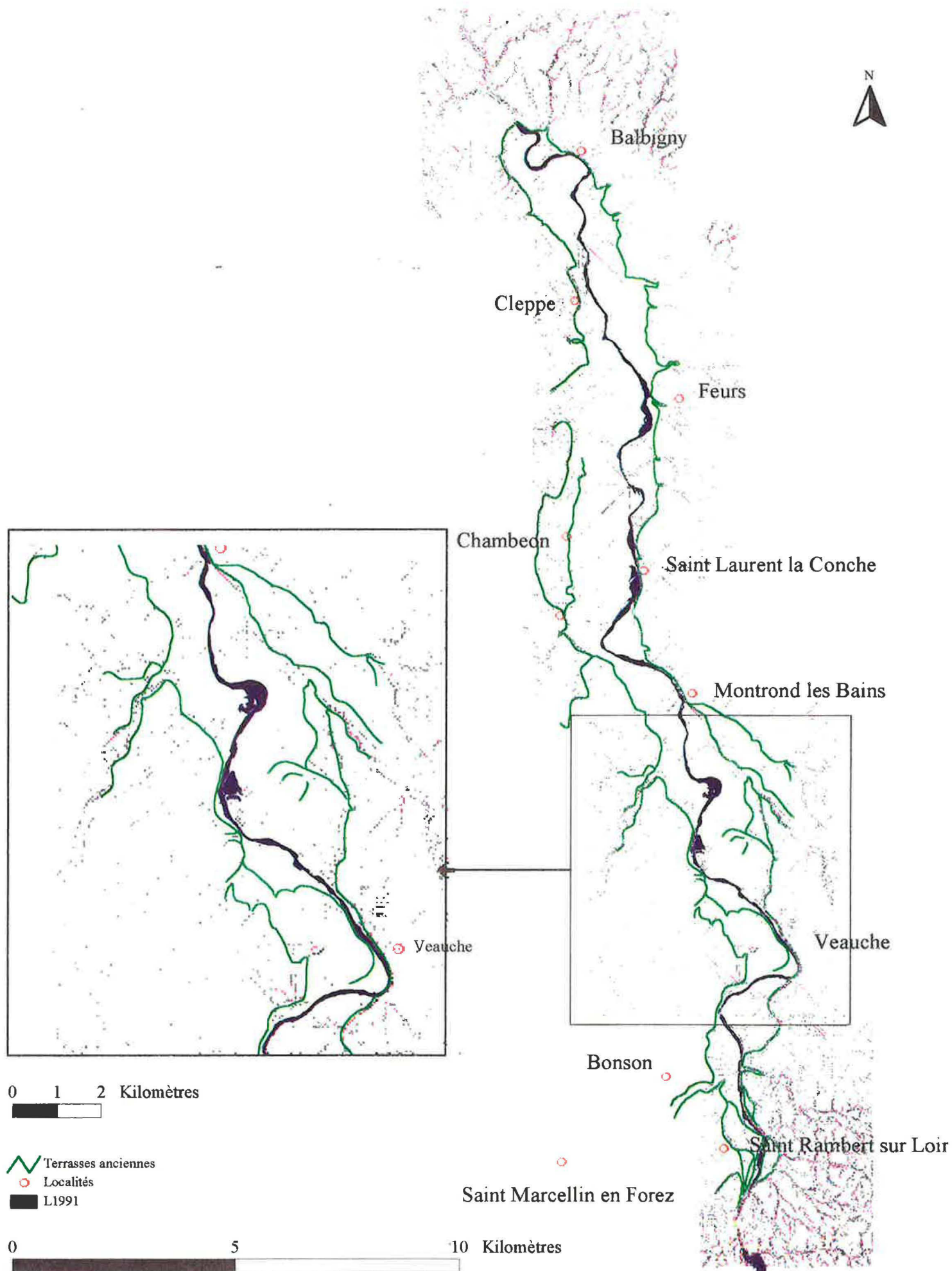


Figure 15: résultat du calcul de la concavité d'après Arc/Info

Arc/Info propose des fonctions de calcul automatique des courbures. Il existe aussi d'autres méthodes utilisant des algorithmes différents. Nous verrons leurs avantages et leurs limites respectives.

– *Calcul de la courbure (concavité/convexité)*

a - Méthode utilisée par Arc/Info (cf. Figure 15)

D'après I.D. Moore, R.B. Grayson, A.R. Landson (1991) et L. W. Zevenbergen, C.R. Thom (1987), la courbure ou concavité/convexité d'une surface est calculée sur une fenêtre 3*3 pour chaque cellule centre. Un polynôme du 4ème degré de la forme :

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \dots\dots\dots(1),$$

décrit la surface.

Les unités de la représentation raster de la « courbure » sont données en 1/100. Les valeurs raisonnables pour des zones de montagne se situent entre -4 et 4 et -0.5 et 0.5 en relief collinéen.

Les relations entre les coefficients et les 9 valeurs d'altitude pour chaque cellule sont :

$$A = ((Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5)/L_4 \dots\dots\dots(4)$$

$$B = ((Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2)/L_3 \dots\dots\dots(5)$$

$$C = ((-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 - Z_6)/2)/L_3 \dots\dots\dots(6)$$

$$D = ((Z_4 + Z_6)/2 - Z_5)/L_2 \dots\dots\dots(7)$$

$$E = ((Z_2 + Z_8)/2 - Z_5)/L_2 \dots\dots\dots(8)$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L_2 \dots\dots\dots(9)$$

$$G = (-Z_4 + Z_6)/2L \dots\dots\dots(10)$$

$$H = (Z_2 - Z_8)/2L \dots\dots\dots(11)$$

$$I = Z_5 \dots\dots\dots(12)$$

La courbure est la dérivée seconde de la pente :

$$\text{courbure} = 2D + 2E$$

Il s'agit d'une courbure moyenne qui représente l'ensemble des courbures dans toutes les directions de l'espace.

b - Calcul des convexités d'après C. Depraetere (cf. Figure 16)

C. Depraetere distingue de nombreux types de calcul de convexité, qui peuvent être classés en deux grandes familles. Les convexités de ligne (courbes de niveau, lignes de pente) se distinguent des convexités de surface.

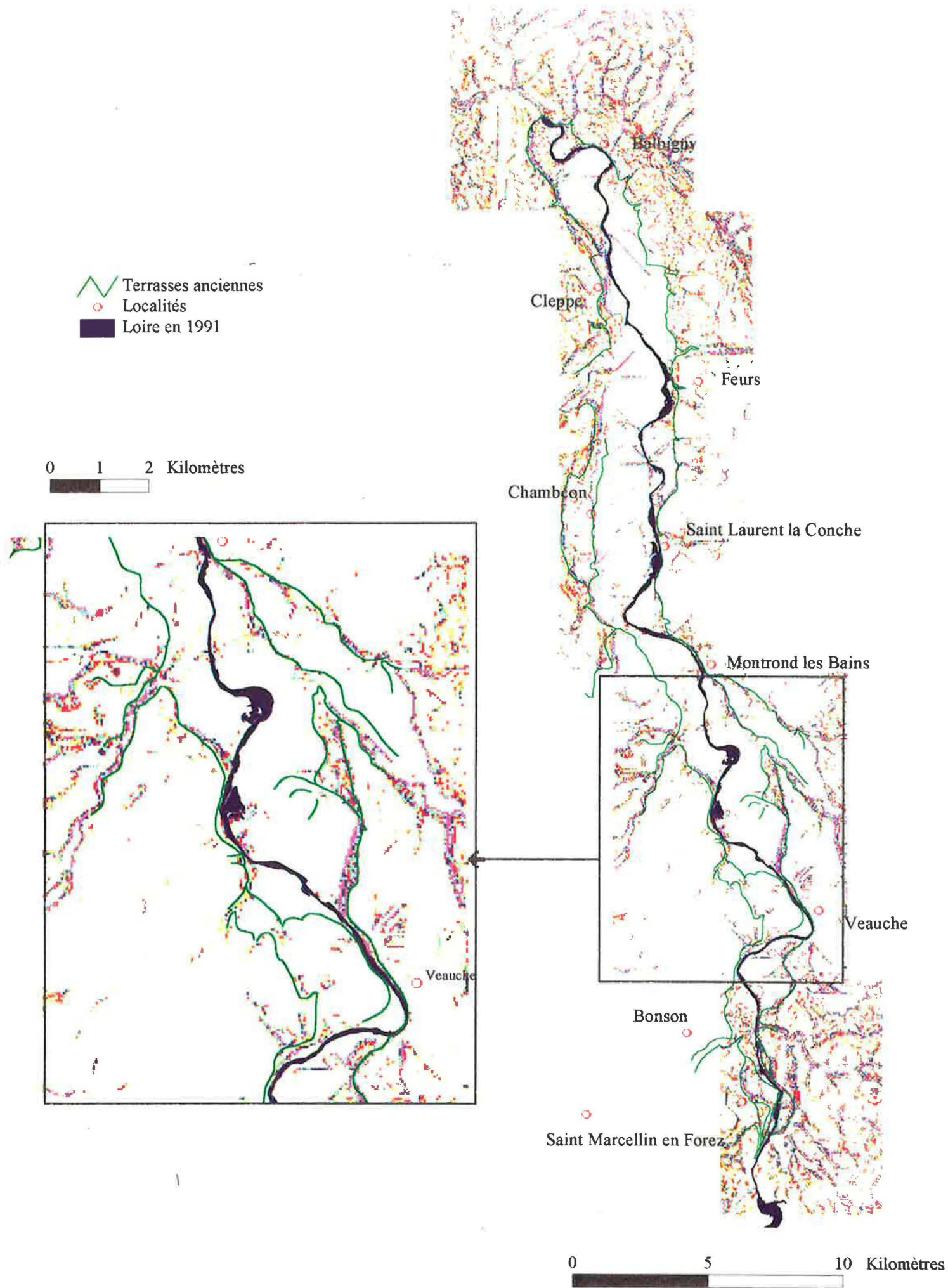


Figure 16: résultat du calcul des concavités verticales d'après C. Depraetere

Les convexités horizontales représentent une mesure de la courbure des courbes de niveau.

Les convexités transversales mesurent la courbure du terrain perpendiculairement à la ligne caractéristique locale. Dans le cas d'un site encaissé, il s'agit de la ligne de talweg alors que dans le cas inverse, c'est la ligne de crête qui est considérée. Les convexités directionnelles rendent compte de la direction vers laquelle tend la ligne de plus grande pente, soit vers la droite (dextrogyre) soit vers la gauche (lévogyre). Les courbures moyennes correspondent à la somme des courbures en X(c) et Y(e). La courbure moyenne quadratique correspond à l'énergie mécanique de tension d'une plaque mince dont la déformation est la configuration locale des altitudes.

Les convexités verticales représentent une mesure de la courbure de la ligne de plus grande pente.

Pour la détermination des pieds de talus, certaines courbures ne sont pas nécessaires voire même diminuent la sensibilité du résultat en ce qui concerne la courbure horizontale. La plus adaptée à notre objectif semble être cette courbure verticale. Elle est calculée en fonction de la pente de la droite de régression des pentes, et en fonction des altitudes sur une fenêtre de 3*3.

Soient :

VarZ : variance des altitudes sur la fenêtre 3*3

VarP : variance des pentes sur la fenêtre 3*3

CoVarZP : covariance des altitudes et des pentes

La pente α de la droite de régression $Y = \alpha X + B$ des pentes (en Y) en fonction des altitudes (en X) sera:

Si $\text{VarZ} > 0$ alors $\alpha = \text{CoVarZP} / \text{VarZ}$

Sinon $\alpha = 0$

La valeur de la convexité verticale exprimée en degrés pour 100 m en aval sera : $\text{CV} = -100 * \alpha$

Une valeur de $-10^\circ/100$ m exprime que la pente décroît de 10° lorsque l'on descend de 100 m en aval

Un programme en A.M.L. a été réalisé dans Arc/Info pour tester la courbure verticale d'après C. Depraetere. Les résultats obtenus sont bien meilleurs que ceux issus de la méthode Arc/Info, car ils permettent de détecter des concavités très faibles. Ainsi, les talwegs en zones montagneuses et les pieds de talus du sud de la plaine en rive droite ne sont plus les seuls à apparaître. Une grande partie des limites des talus au sein même de la plaine alluviale est détectée.

Cependant, cette méthode dont les résultats sont très satisfaisants pose des problèmes de fond en matière de statistiques. Les séries traitées comportent toujours seulement neuf valeurs (une maille et ses huit voisines), ce qui est très peu pour un échantillon. Pour les altitudes, dans les zones de plaine rigoureusement planes le calcul d' α est mathématiquement impossible (diviseur nul). Dans le cas où le diviseur tend vers zéro, α tend vers l'infini de même que la convexité, ce qui n'a aucune réalité physique.

D'autre part, à l'échelle des neuf mailles considérées pour le calcul de la maille centrale, la distribution spatiale des valeurs n'est pas prise en compte. Néanmoins, le calcul maille par maille permet d'obtenir une représentation spatiale de la courbure de l'ensemble à étudier.

c - Traitement des données de pente et de courbure

La zone d'étude qui comprend initialement des secteurs montagneux au sud de la plaine du Forez près du barrage de Grangent, et au nord près du seuil de Neulise montre une palette de pentes comprises entre 0 et 40°. Pour déterminer les valeurs caractéristiques des talus, nous procédons par des interrogations et des visualisations successives de différentes valeurs de pentes. Il apparaît que :

- les valeurs les plus fortes de la plaine alluviale sont de 20°, il est donc inutile de conserver les valeurs supérieures ;
- les valeurs proches de zéro, caractéristiques des terrasses peuvent être éliminées ;
- les valeurs de pente très faibles sont très représentées et caractérisent la majeure partie des talus de la plaine alluviale.

Ces interrogations et visualisations successives des valeurs de pente ont permis de déterminer le nombre optimal de classes et leurs limites les plus pertinentes.

<i>Pentes en degrés</i>	<i>Classes</i>
0-2	0
2-3	1
3-5	2
5-7	3
7-10	4
10-20	5
20-40	0

La même méthode est utilisée pour traiter les données de courbure. La détermination du nombre de classes et de leurs limites est réalisée par interrogations et visualisations successives de différentes valeurs de concavité. Les résultats obtenus sont les suivants :

- tous les secteurs plans (nuls) et les secteurs convexes (positifs) sont éliminés ;
- seules les valeurs (négatives) indiquant des concavités sont conservées, afin de localiser les pieds de talus, et transformées en valeurs positives pour des raisons de confort de travail ;
- les valeurs de concavité les plus fortes correspondent aux massifs montagneux où les talwegs sont souvent encaissés. Ces valeurs ne sont pas représentées dans la plaine du Forez, elles sont donc éliminées ;
- les valeurs les plus représentatives des pieds de talus sont voisines de 2 à 5. Les valeurs allant de 5 à 15 sont de moins en moins représentées.

Aussi, comme pour les pentes, un reclassement des valeurs en 5 classes tendant à mettre en exergue les valeurs de concavité les plus faibles, est réalisé en éliminant les valeurs supérieures à 30 et les valeurs nulles respectivement caractéristiques des reliefs et des zones planes.

<i>Concavités</i>	<i>Classes</i>
0-2	0
2-3	1
3-4	2
4-5	3
5-10	4
10-15	5
15-30	0

Une analyse de sensibilité montre que la pente est un indicateur de meilleure qualité que la concavité. Aussi, des facteurs respectivement de 2 et de 1 sont empiriquement attribués à ces 2 indicateurs. Les deux matrices de données résultantes sont additionnées, cellule par cellule pour créer une autre matrice raster prenant en compte simultanément les deux critères pondérés.

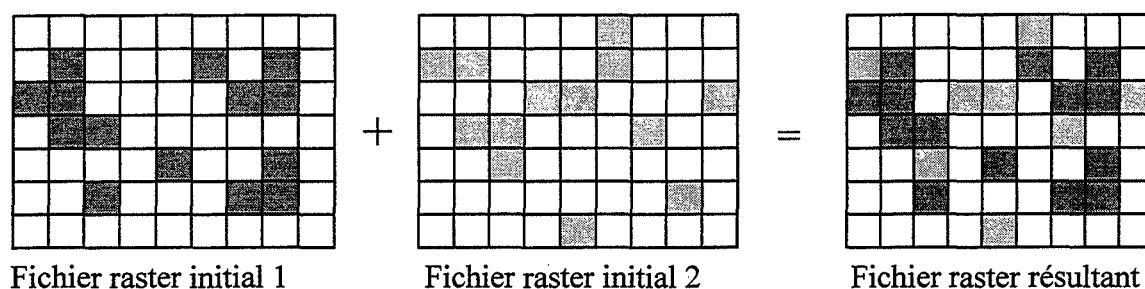


Figure 17 : calcul sur deux fichiers raster, cellule par cellule

Le fichier raster résultant met en évidence des linéaments de mailles jointives qui limitent le lit majeur de part et d'autre de son axe. Pour transformer ces surfaces en éléments linéaires (arcs), il faut sélectionner les mailles centrales et éliminer les mailles voisines (linéarisation), Cf. Figure 17. Enfin, la dernière phase automatique du traitement consiste à vectoriser ce fichier raster. Une phase manuelle est encore nécessaire pour éliminer les arcs parasites à l'intérieur de la plaine et tout ceux situés à l'extérieur. Des raccords permettent de rendre jointifs certains arcs interrompus (Cf. Figure 18).

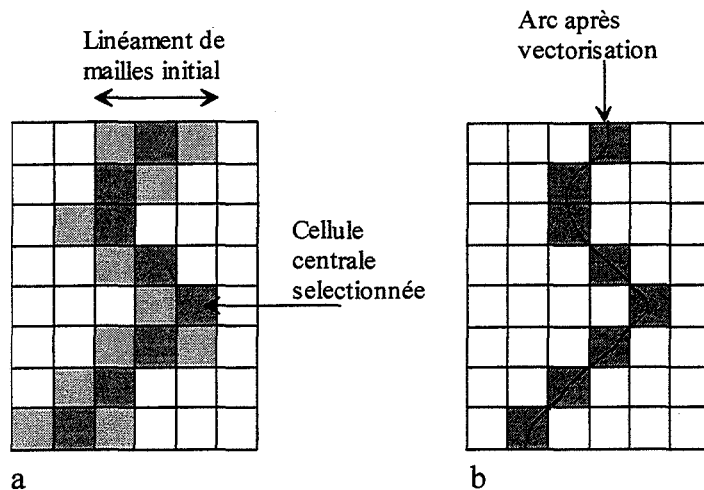


Figure 18 : linéarisation (a) et vectorisation (b) du fichier raster

Un secteur en rive gauche au sud de la plaine ne montre aucune organisation particulière. Il correspond à une zone à la topographie très plane où l'érosion a presque éliminé les talus de terrasses. Pour ce type de secteurs, deux choix sont possibles :

- * ne tracer aucune limite précise mais faire figurer une surface dans laquelle le contact a pu se situer ;
- * tracer une limite précise sur la base d'une expertise sur le terrain, ou d'une étude complémentaire.

Les secteurs pour lesquels l'analyse topographique ne donne aucun résultat, permettent de localiser immédiatement les sites litigieux où un complément d'étude est nécessaire.

Le résultat final est une couverture d'arcs qui délimitent de part et d'autre de la Loire les alluvions récentes.

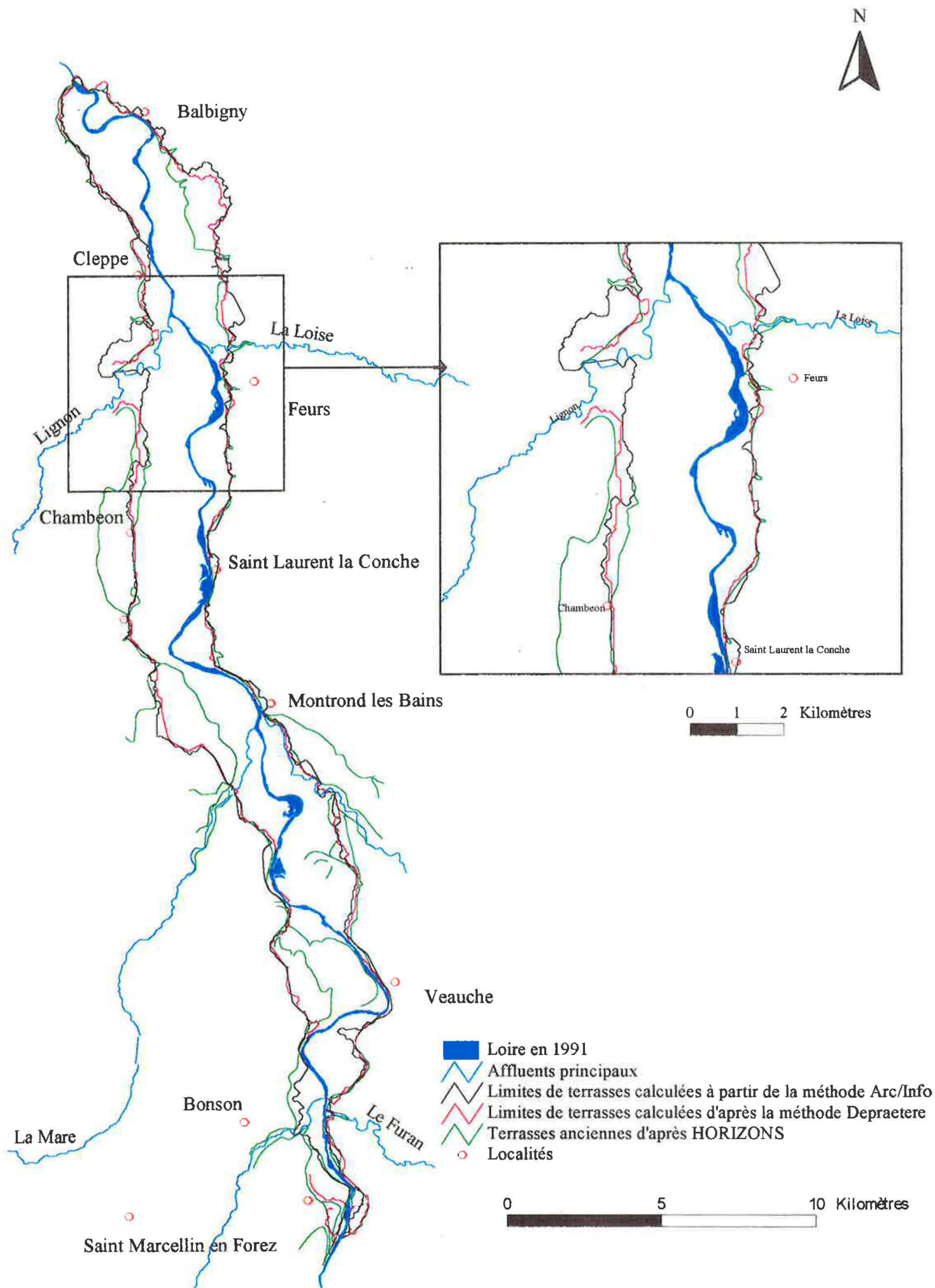


Figure 19: validation de la délimitation du lit majeur

– *Validation et incertitude de la méthode*

La validation de la méthode est réalisée à partir de la cartographie de la limite des alluvions récentes réalisée par CPGF sur la base de profils géophysiques.

La concordance globale entre les deux tracés est bonne, localement elle est excellente dans les secteurs où les talus sont les plus marqués. En d'autres secteurs, la concordance est moins bonne. Par exemple, en rive droite, au sud de Balbigny, l'analyse topographique place une limite qui forme une excroissance par rapport au tracé de CPGF (cf. Figure 19).

Les résultats sont satisfaisants dans l'ensemble. La méthode proposée est applicable à toutes les plaines alluviales, et permet de tracer rapidement et sans aucune donnée historique de débit, sans analyse de photographies aériennes, les limites des alluvions récentes. Ces limites permettent donc de cerner les zones à priori les plus favorables aux extractions de graviers car la granulométrie des matériaux y est plus élevée que dans les alluvions anciennes, l'épaisseur de découverte y est plus faible, et la teneur en argile moins forte.

Cependant, des problèmes ont été rencontrés à toutes les phases du traitement :

- *Incertitudes liées aux données initiales*

Les données initiales d'altitude achetées à l'I.G.N. sont localement erronées. Des artefacts apparaissent à l'intérieur de la plaine qui n'ont pas pu être éliminés. Des méthodes sont proposées pour lisser les valeurs d'altitude d'un fichier qui comporte des erreurs, mais lorsqu'on travaille sur une zone au modelé très faible comme celui d'une plaine alluviale, un lissage pourrait faire disparaître le faible relief existant. La méthode du lissage n'a donc pas été retenue. Les erreurs sont de deux types :

- * des valeurs très faibles provoquent l'apparition de dépressions ;
- * des erreurs linéaires créent des talus parasites dont la longueur peut atteindre 3 kilomètres à Feurs.

Ainsi, les données initiales ne sont pas fiables. Si l'IGN donne une précision de ± 2 m, ces erreurs locales, voire même ponctuelles sont bien supérieures à 2 mètres. Dans le cas hypothétique où elles seraient localisées près des limites des alluvions récentes, elles fausseraient les résultats.

- *Incertitudes liées au calcul des concavités*

La méthode statistique de LAMONT sur une fenêtre 3*3 a été retenue car elle donne des résultats satisfaisants. Cependant, dans le cas d'une plaine alluviale avec des surfaces planes importantes des problèmes apparaissent puisque la moyenne des pentes peut être nulle ou proche de zéro. En effet, sur une fenêtre 3*3 si l'ensemble des valeurs de pente est nul, la moyenne est nulle. Les variances sont alors calculées avec des diviseurs nuls ou proches de zéro ce qui perturbe grandement la répartition statistique.

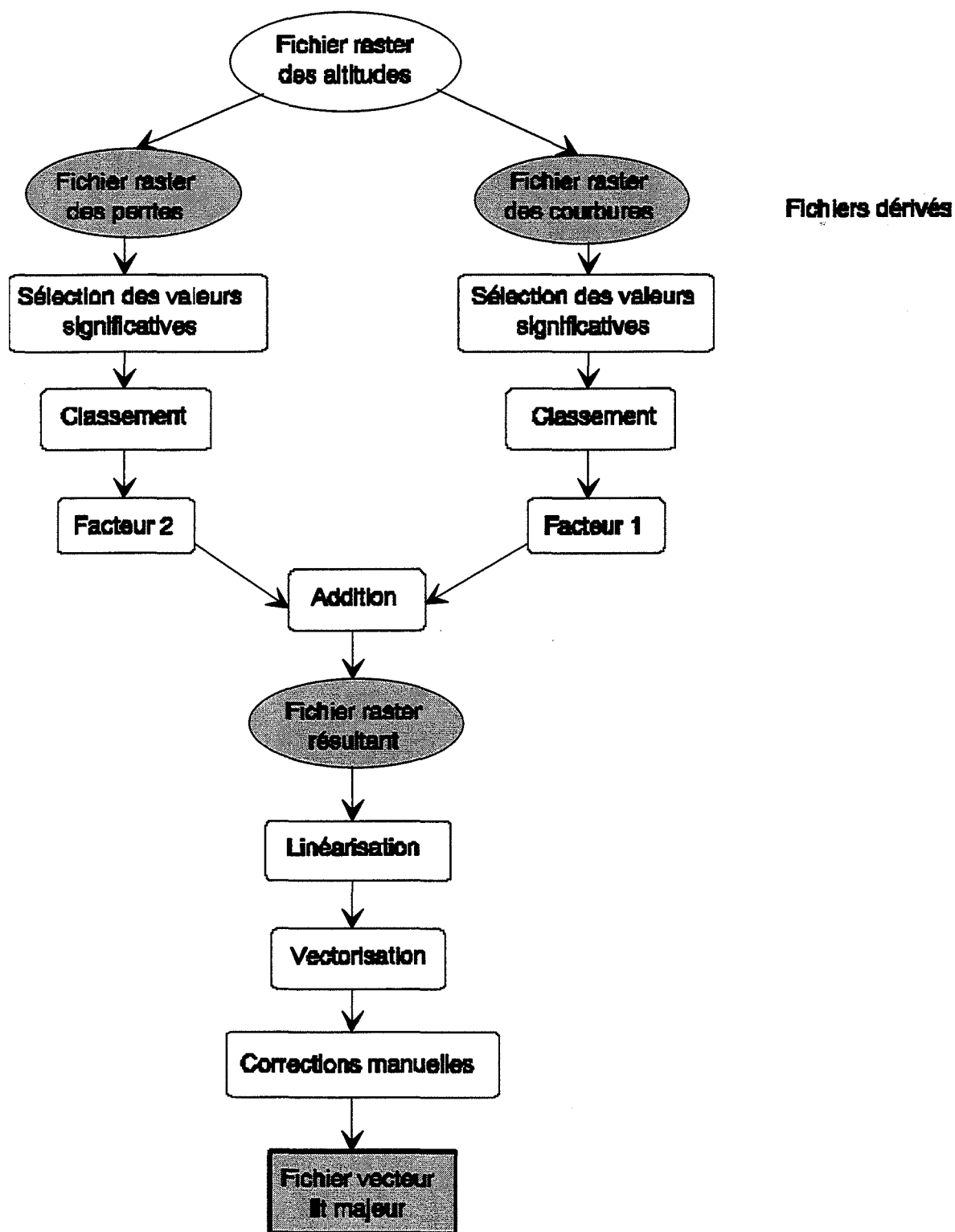


Figure 20 : Méthodologie de délimitation du lit majeur par analyse spatiale

- *Incertitudes liées au choix des classes et au choix des poids*

Le choix des limites de classes est empirique. Les classes ont été déterminées après le repérage par interrogation des fichiers raster de pente et de concavité, des valeurs les plus significatives. Des choix différents auraient donné des limites de talus différentes.

- *Incertitudes liées à la linéarisation et à la vectorisation.*

Plutôt qu'incertitude, le terme adéquat semble être « perte de précision ». Un talus a une extension géographique, c'est une bande de terrain. Le fait de vouloir linéariser cette bande induit une perte de précision plus qu'une incertitude. La largeur maximale est de 4 à 5 mailles, soit 250 mètres qui seront réduits à une ligne avec, dans le cas le plus défavorable une perte de précision de 150 m.

- *Incertitude globale*

Certaines des incertitudes évoquées ci-dessus sont difficiles à quantifier, comme celles inhérentes aux données de l'I.G.N. Par contre, la précision globale verticale qu'ils donnent à ± 2 mètres implique que seules les terrasses avec un dénivelé supérieur à 4 m seront sûrement détectables.

Les autres types d'incertitudes ont des impacts sur le tracé latéral des alluvions récentes, que ce soit le choix des limites de classes de pente et de concavité, qui favoriseront certaines valeurs au détriment des autres, la linéarisation ou la vectorisation. Un corridor de cellules jointives contenant des valeurs proches sera réduit à un linéament de cellules avec une valeur unique. La précision du tracé dans le cas le plus défavorable est de 150 m.

d. Cartographie du lit majeur géologique

Le **résultat** de cette méthode de délimitation du **lit majeur** est la **cartographie** de ce dernier, qui met en évidence un corridor de 50 km de long et de 2 à 3 km de large. Il est hérité et limité par les **talus des terrasses anciennes**. La **précision** du tracé est liée aux **données initiales** et aux **traitements** effectués. Les talus sont détectés à partir d'un dénivelé supérieur à **quatre mètres** et avec une imprécision de **150 m en latéral**. Compte tenu d'une part, de l'objectif poursuivi qui est de déterminer les zones potentiellement extractibles par les carriers, et d'autre part de la largeur moyenne du lit majeur, l'incertitude est ramenée de 5 à 8 % ce qui est largement acceptable.

2. Les nappes alluviales et l'aquifère

La cartographie du lit majeur permet de localiser les zones extractibles par les carriers. Un gisement potentiel, économiquement rentable, est constitué par des *sables* (au maximum 70 % du volume) et des *graviers*. Il ne doit pas contenir plus de 10 % d'argile et le ratio découverte/gisement doit être inférieur à 1. Enfin, le volume de matériaux extractibles doit être suffisant. Les *alluvions récentes* sont les plus susceptibles de répondre à ces critères techniques. Elles constituent le lit majeur. Il est donc nécessaire de les étudier afin de connaître les caractéristiques de ces matériaux dans la plaine du Forez mais aussi de l'aquifère qu'ils contiennent.

2.1. Ressources en eau souterraine

La plaine du Forez, de part son occupation humaine importante, a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien géologiques qu'hydrogéologiques ou hydrologiques.

Le réservoir aquifère principal de la plaine est constitué par les dépôts quaternaires qui sont les plus perméables. C.P.G.F. a beaucoup travaillé sur ces nappes alluviales, ce sont leurs résultats qui seront essentiellement présentés ici.

2.1.1. Hydrogéologie des formations cristallines (seuils du Pertuiset et de Neulise)

Les terrains du socle sont peu perméables mais une ressource en eau au sein des fractures est possible. Ce potentiel est très mal connu et son accès est difficile.

La partie superficielle des terrains du socle est arénisée (2 à 3 m d'épaisseur maximum), et peut renfermer des nappes localisées délivrant des sources de faible débit. Les colluvions d'arènes peuvent s'accumuler dans les dépressions et augmenter leur capacité de réservoir.

2.1.2. Hydrogéologie des formations tertiaires

Les *sables de Ponçins* sont la seule formation tertiaire pouvant être considérée comme potentiellement aquifère. Elle correspond à des horizons sableux intercalés dans des séries argileuses. Elle affleure en une large bande en rive gauche de la Loire au nord de Grézieux le Fomental et Boisset, puis disparaît en profondeur vers l'est. Son épaisseur à Magneux Haute Rive est de 115 m, mais elles sont globalement discontinues. Ce sont des sables grossiers,

feldspathiques, propres, lenticulaires et de puissance pouvant varier de quelques décimètres à quelques mètres. Ils renferment une nappe faiblement artésienne (0,8 m³/h à Magneux Haute Rive). Les eaux captées sont de type bicarbonaté sodique, peu minéralisées.

2.2. Géométrie de l'aquifère des alluvions récentes

L'aquifère est constitué par les alluvions modernes (sables, graviers et galets à éléments grossiers à la base, blocs, reposant sur des dépôts tertiaires à dominance argileuse) de la Loire qui, dans la plaine du Forez, constituent une bande de 50 km de longueur et de 1 km de largeur.

2.2.1. Le substratum

Les profondeurs auxquelles le substratum a été rencontré lors des sondages de reconnaissance sont variables, comprises généralement entre 1,80 et 8,80 m. Cependant, un alluvionnement exceptionnel à Chalais-le-Comtal place le substratum à 18,40 m.

Le substratum est légèrement plus profond en rive gauche qu'en rive droite.

Sur l'ensemble de la plaine du Forez, la pente moyenne serait de 1,2⁰/₀₀. Le substratum passe de la cote 358 au niveau de Saint-Just-sur-Loire, à 311 à l'entrée des gorges de Villereest.

Le substratum affleure dans le lit de la Loire en de nombreux endroits :

- Montrond-les-Bains;
- Unias;
- Feurs en aval du barrage;
- Magneux-Haute-Rive;
- CRAINTILLEUX.

Le secteur de Veauchette à Magneux-Haute-Rive-Chambéon correspond à de fortes pentes pour un cours d'eau de plaine dans le profil de la Loire (Veauchette-Unias: 1,71⁰/₀₀; Unias-Magneux: 1,12⁰/₀₀; Magneux-Chambéon: 1,22⁰/₀₀). Le substratum n'affleure pas en amont de Saint-Just-Saint-Rambert malgré une pente supérieure à 2⁰/₀₀. Si le barrage de Grangent ne constituait pas un piège à sédiments, l'alluvionnement de la Loire au débouché de ses gorges serait logique. Mais la présence du barrage rend nulle cette hypothèse.

Le substratum qui apparaît à l'affleurement est essentiellement de nature marneuse dans la partie centrale de la plaine. En amont de Feurs, ce sont uniquement des marnes ; en aval de Feurs, des passées sableuses apparaissent au sein des marnes. Ce sont des lentilles pouvant receler des nappes captives. Lorsque ces lentilles arrivent à affleurement elles peuvent constituer un apport complémentaire pour les nappes des alluvions récentes ou pour la Loire.

2.2.2. Piézométrie

La ligne d'eau de la Loire constitue une condition aux limites pour la nappe, elle représente le niveau de base de cette dernière. Le niveau statique est très variable dans le temps comme en témoignent les mesures de C.P.G.F. [étude 1734 C, 1979]. La moyenne pondérée de la tranche mouillée (e_0) : 2,72 m, calculée par C.P.G.F., ne reflète pas la réalité. Il faut plutôt utiliser le rapport hauteur d'eau/profondeur du substratum pour estimer le rôle joué par le niveau statique. Si on se réfère au sondage moyen, la limite nappe libre-nappe captive serait atteinte pour une valeur du rapport de 0,68.

Les valeurs de rapport hauteur d'eau/profondeur du substratum les plus basses sont à Bonson et à Veauche (respectivement 0,05 et 0,04) et correspondent à des forages situés sur les bords de Loire. Les valeurs les plus élevées ($>0,68$) sont essentiellement localisées sur la rive gauche et sont atteintes pour la plupart seulement en période de hautes eaux (Bonson, Craintilleux, Unias, Chalain, Cleppé), seul le secteur de Magneux semble être captif toute l'année hydrologique.

En rive droite, aucune zone n'est captive toute l'année et seuls les secteurs d'Andrézieux, Saint-Just et Feurs atteignent un rapport de 0,68.

Les études réalisées par C.P.G.F. de 1976 à 1978 ne proposent aucune carte de piézométrie globale sur l'ensemble de la plaine alluviale. Il faut attendre 1995 avec l'étude géomorphologique de SOGREAH sur la Loire pour qu'une carte soit réalisée en mai. D'après l'étude C.P.G.F. N° 1569 (1976), la piézométrie basses eaux correspondrait à l'automne, d'octobre à novembre selon la situation pluviométrique de l'été. D'après l'étude C.P.G.F. N° 1612 qui réalise cinq campagnes de mesures du 20 décembre 1976 au 7 mars 1977, la piézométrie hautes eaux serait réalisée en février. En retenant ces deux périodes significatives de hautes eaux (février) et de basses eaux (automne), il est impossible de retenir la piézométrie de mai 1995 comme représentative d'une situation caractéristique de la nappe. Nous la considérerons comme une photographie de l'état du niveau statique à un instant intermédiaire entre les deux pôles extrêmes de hautes et de basses eaux avec lesquels les études et les bilans sont généralement réalisés.

2.2.3. Variations piézométriques: remontée de la nappe des Chambons (Balbigny) d'octobre 1976 à décembre 1976

Le secteur des deux derniers méandres de la Loire avant les gorges du seuil de Neulise (entre Cleppé et Balbigny), a fait l'objet de cinq études de C.P.G.F. (numéros: 1438, 1569, 1746, 1979, 1612) qui visent à modéliser l'impact du barrage de Villerest sur la nappe des Chambons.

La Loire draine nettement sa nappe alluvionnaire, comme en témoigne la carte piézométrique [C.P.G.F., 1979] de l'étiage du 29 août 1978. La carte de battement de la nappe entre les mois d'octobre et de décembre 1976 met montre des zones où la remontée de la nappe atteint 3 m. Les valeurs les plus fortes sont situées en rive gauche, à la limite ouest de l'aquifère.

Cette valeur de 3 m en trois mois est à retenir, mais elle n'exprime malheureusement pas le battement total de la nappe au cours de l'année hydrologique. Il ne faut pas oublier non plus que l'année 1976 a été marquée par une redoutable sécheresse, qui s'est certainement traduite par un étiage sévère en août et donc une remontée du niveau statique anormalement importante d'octobre à décembre.

2.2.4. Répartition des perméabilités

Aucune étude géophysique n'a été réalisée depuis celle de 1979 par C.P.G.F. La résistivité étudiée ici n'étant pas un facteur dépendant du temps à l'échelle annuelle ou décennale, mais à l'échelle des temps géologiques car elle caractérise les formations alluviales, les résultats de 1979 sont tout à fait utilisables actuellement.

Dans le cas des alluvions de la Loire, les différents horizons sont électriquement caractérisés comme suit :

- couverture argilo-limoneuse : conducteur;
- alluvions hors nappe : résistant à très résistant.
- alluvions sous nappe : résistant;
- substratum :
 - argilo-marneux : conducteur
 - sablo-marneux : moyennement conducteur ou résistant.
 - cristallin : résistant

La résistivité d'un horizon dépend non seulement de sa nature mais aussi de la minéralisation de l'eau qu'il contient. Il pourra donc y avoir des différences de qualité entre les alluvions situées en bord de Loire (dont l'eau est peu minéralisée) et celles situées près des versants dont l'eau est plus minéralisée.

Dans le cas précis des alluvions de la Loire, les courbes caractéristiques sont toutes représentatives de quatre terrains :

- couverture de surface argilo-sableuse de 20 à 100 Ω m;
- alluvions sèches de 500 à 8000 Ω m, la résistivité dépend de la qualité du matériel alluvial (présence de lentilles sablo-argileuses) et de son taux d'humidité, en période de forte pluviométrie la résistivité des alluvions hors nappe peut être égale à celle des alluvions sous nappe;

- alluvions mouillées de 100 à 1000 Ωm , cette résistivité est conditionnée par la qualité des alluvions et par la minéralisation des eaux. Pour un matériel homogène le rapport entre le sec et le mouillé varie de 4 à 6;
- substratum argilo-marneux entre 10 et 30 Ωm , le substratum plus ou moins résistant (de 150 à 500 Ωm) correspond au primaire cristallin, ou au tertiaire sableux (Cuzieux).

Les alluvions sèches posent problème pour l'interprétation, car leur résistivité très élevée masque celle des alluvions mouillées.

C.P.G.F. a donc décidé de représenter sur ses cartes au 1/25 000 les différentes résistivités au moyen de 5 classes qui donnent une idée globale des variations de la qualité des alluvions :

- $R < 100 \Omega\text{m}$
- $100 < R < 150 \Omega\text{m}$
- $150 < R < 250 \Omega\text{m}$
- $250 < R < 400 \Omega\text{m}$
- $R > 400 \Omega\text{m}$.

a. Relation perméabilité-résistivité

Des distorsions peuvent apparaître selon le type d'alluvionnement et les variations de la résistivité de l'eau. Il avait été établi pour les alluvions de la Loire entre Marcigny et Vitry Cronat (Saône et Loire) la relation suivante :

$$K = 2,36 \times 10^{-7} \times F^{2,86}$$

où K est la perméabilité et F le rapport $\frac{\text{résistivité des alluvions sous nappe}}{\text{résistivité de l'eau}}$

C.P.G.F. a supposé pour cette relation diverses résistivités de l'eau et si on l'applique à la zone d'étude il s'avère que les résultats enregistrés sur la plaine du Forez sont cohérents. Les faibles valeurs de perméabilité sont souvent associées à une eau relativement minéralisée (versant) alors que les valeurs les plus fortes coïncident avec une eau résistante.

b. Répartition des résistivités

Les résistivités les plus élevées ($> 400 \Omega\text{m}$) se rencontrent tout au long de la plaine alluviale avec une extension plus importante en aval de Feurs.

La bordure immédiate du fleuve est caractérisée par des résistivités élevées qui traduisent une perméabilité plus forte et/ou une minéralisation plus faible.

La proximité du versant est caractérisée par des résistivités faibles sauf en rive gauche entre Chalain et le nord de Chambéon et entre Saint-Cyprien et CRAINTILLEUX.

2.2.5. Transmissivités

La perméabilité des alluvions récentes est globalement comprise entre 1.10^{-3} et 5.10^{-3} m/s [C.P.G.F. Horizons, 1979]. Les valeurs les plus fortes sont situées sur les bords de Loire. En bordure de versant (Magneux, Chalain) les valeurs les plus élevées sont moyennes.

$$T = K \cdot e_0$$

Equation 1: transmissivité

avec : T transmissivité en m^2/s
 K perméabilité en m/s
 e_0 épaisseur mouillée en m

La transmissivité dépend de la perméabilité mais aussi de la tranche d'eau et donc de l'époque des mesures. Les contrastes entre les valeurs extrêmes sont variables, par rapport à ceux de la perméabilité. Ils peuvent être :

- supérieurs si les zones perméables sont surcreusées avec une tranche d'eau plus grande (par exemple Veauche, Cleppé), ou avec une couverture moindre.
- inférieurs s'il n'y a pas de surcreusement et si les zones perméables sont drainées.

Les valeurs supérieures à 10.10^{-3} m^2/s sont exceptionnelles.

2.3. Potentialités des eaux souterraines

Les potentialités ou débits disponibles sont dépendants de plusieurs facteurs :

- les captages existants ou raisonnablement envisageables;
- le mode d'exploitation;
- l'alimentation sollicitée, Loire (rivière) ou versant, ou les deux à la fois;
- l'époque considérée.

L'alimentation par la Loire est examinée à titre théorique par C.P.G.F. en 1979. Si nous considérons les caractéristiques moyennes suivantes: $e_0 = 3$ m et $K = 10^{-3}$ m/s; avec pour hypothèses: un plan d'eau stable, une berge non colmatée et une ligne de puits à 50 m du fleuve avec un écartement de 50 m, le débit de chacun de ces puits serait alors de 50 l/s/km, en faisant abstraction de l'apport de versant.

Celui-ci pour les mêmes caractéristiques et une pente de la nappe de $3^0/000$ (valeur assez couramment rencontrée), n'est que de 9 l/s/km.

<i>Hauteur d'eau e_0</i>	<i>débit en l/s/km</i>
5	150
4	94
3	50
2	25
1	6

Nous mesurons toute l'importance du rôle joué par le niveau de l'eau. Mais à l'étiage il n'est pas le seul à être en cause, le déplacement du lit intervient aussi car un doublement de la distance captage-front d'alimentation correspond à une perte de débit de 40 à 50 %.

Les apports de versant comprennent :

- les apports de versants stricto-sensu, dépendants de la nature même de ce versant (perméable et imperméable);
- de la relation versant-alluvions (souvent mal connue, les études portant essentiellement sur le réservoir alluvial);
- du drainage éventuel, fréquent en pied de terrasse;
- des apports par les alluvions elles-mêmes (impluvium et réserves). L'épaisseur de l'aquifère étant faible (phénomène encore accentué par le drainage de la nappe) et la pluviométrie à l'étiage étant réduite, le débit propre des alluvions récentes sera faible.

Les apports de versants vont en croissant du versant vers le fleuve. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 10 ± 10 l/s/km alors que les valeurs les plus faibles (Unias) sont de 1,5 à 3 l/s/km.

2.3.1. Rive droite

Les zones favorables à un apport de versant sont limitées :

- entre Feurs et Balbigny , sur 7 km, des relations avec la terrasse sont possibles.
 - * estimation à partir de l'impluvium propre (9 km^2) : 20 ± 10 l/s ;
 - * estimation à partir de la piézométrie : 50 ± 20 l/s.
- entre Feurs et Montrond, il existe deux plages alluviales non reconnues.
- entre Cuzieu et Rivas les caractéristiques moyennes sont médiocres ; pour 6 km^2 l'estimation conduit à 10 ± 5 l/s.
- la zone de Bouthéon-Andrézieux n'est favorable qu'à proximité de la Loire mais au droit des gravières.

2.3.2. Rive gauche

- entre les gorges de la Loire et Cleppé, l'apport strictement de versant est estimé à $5 \pm 2,5$ l/s/km et, en bordure du fleuve, on peut espérer 10 ± 5 l/s/km soit, pour 5 km : 50 ± 25 l/s;
- le confluent Lignon-Loire est mal connu ; il présente vraisemblablement un potentiel intéressant;
- Magneux-Chambéon, pour 4 km l'apport est de 32 ± 16 l/s, les relations avec le versant graveleux ou le tertiaire sont envisageables ainsi qu'à Chalain;
- Chalain (1,5 km) : 9 ± 3 l/s/km;
- Unias (1,5 km) : 1,9 à 3,5 l/s, drainage important;
- Craintilleux-terrasses, potentiel inconnu;
- Craintilleux-Saint-Cyprien, le potentiel est inconnu mais un apport d'un versant graveleux est possible;
- Saint-Cyprien-Bonson (1,5 km) : 20 ± 10 l/s;
- Bonson (nappe propre) : 20 ± 10 l/s drainage par gravières;
- Saint-Rambert (1 km) : 10 ± 4 l/s relations possibles avec la terrasse.

2.3.3. Relations alluvions anciennes - alluvions récentes

Sur la rive droite, les relations entre alluvions récentes-terrasses ne semblent possibles qu'à l'aval de Feurs. La rive gauche est plus favorable que la rive droite notamment au droit :

- des confluent du Lignon et du Bonson;
- des zones où le versant sableux ou graveleux est bien représenté (Chambéon, Magneux, Chalain).

Les potentialités dites de versant sont aussi tributaires de la cote du fleuve :

- les apports peuvent être drainés plus ou moins rapidement;
- les captages sont nettement moins efficaces avec une hauteur d'eau faible.

L'aspect qualité des eaux de surface et des eaux souterraines n'est pas abordé dans le cadre de ce travail axé sur les impacts hydrodynamiques des extractions de graviers sur les nappes alluviales. Cependant, des données sur la qualité des eaux sont synthétisées en annexe 1.

2.4. Vulnérabilité de la nappe

Cette ressource est extrêmement vulnérable à deux points de vue :

- du point de vue *qualitatif* par pollution directe à partir des infiltrations ou par pollution indirecte à partir des eaux de la Loire qui alimentent la nappe localement (Balbigny) ou temporairement en période de crue, soit naturellement soit indirectement.
- du point de vue *quantitatif*, tous les phénomènes naturels ou artificiels qui ont pour conséquence d'abaisser le lit du fleuve, entraînent l'augmentation du drainage de la nappe et par suite, diminuent son épaisseur mouillée et ses capacités d'exploitation. C'est en particulier les effets des extractions qui étaient implantées dans le lit mineur de la Loire.

D'autre part, tout colmatage du lit de la Loire a pour effet de diminuer les alimentations parfois possibles de la nappe et par suite les débits d'exploitation.

2.5. Caractéristiques des nappes alluviales

L'alluvionnement est hétérogène avec cependant des caractéristiques moyennes:

- couverture argilo-sableuse : 1,70 m d'épaisseur;
- alluvions sablo graveleuses sous nappe : 2,80 m d'épaisseur;
- substratum tertiaire rencontré à moins 5,70 m par rapport à la cote topographique.

Les paramètres hydrauliques sont très variables :

- la hauteur d'alluvions mouillées à l'étiage est fréquemment inférieure à 2 m avec une diminution consécutive à l'enfoncement du lit de la Loire;
- la perméabilité varie de 0,2 à 5.10^{-3} m/s, les valeurs les plus élevées étant rencontrées près du fleuve;
- la transmissivité est le plus souvent comprise entre 1 et 10.10^{-3} m²/s avec des valeurs exceptionnelles à plus de 15.10^{-3} m²/s;

Sur le plan chimique, l'eau est fréquemment douce et peu minéralisée, elle est du type bicarbonaté calcique et magnésien.

Les alluvions récentes de la Plaine du Forez associées au fleuve sont sollicitées par dix zones de captages d'inégale importance qui prélèvent annuellement plus de 3 millions de m³ d'eau.

3. Les changements du milieu fluvial depuis 150 ans

Les changements intervenus sur le milieu fluvial depuis 150 ans concernent les aménagements hydrauliques mis en place par les organismes d'état et les riverains, mais aussi toutes les modifications morphologiques provoquées par ces aménagements ou par des variations des paramètres naturels qui régissent la morphodynamique.

3.1. Les aménagements

Au XVIIIème siècle, la plaine de Chambéon était "humide et malsaine, hérissée de forêts et de broussailles, et semée de quelques rares domaines" [Broutin A., 1867]. Après la crue de 1846, un canal fut creusé et la plaine de Chambéon "se couvrit bientôt de riches moissons et rivalisa en fertilité avec le petit territoire de Bigny" [Broutin A., 1867]. A la fin du XIXème siècle, la plaine du Forez ressemble à une mosaïque de lande et de marais [Degorce J.N., 1991]. Les politiques de drainage et d'irrigation successives, sans surmonter tout à fait l'humidité des sols, ont permis l'assainissement d'un tiers de la plaine, jusque là insalubre.

Les aménagements hydrauliques mis en place dans la Plaine du Forez sont variés. Les plus importants pour notre étude sont les extractions de graviers, mais sont aussi présents des barrages et des seuils, des digues et le canal du Forez.

3.1.1. Extractions de sables et graviers

L'exploitation des alluvions de la Loire a débuté au XIXème siècle, au début du XXème siècle des prélèvements à l'aide de dragues mécanisées étaient effectués [Crepet F. 1992] le développement industriel n'a été effectif que dans les années 1960. On prélève deux tiers de la production départementale dans le Forez contre un tiers dans le Roannais [Degorce J.N., 1991], les matériaux y étant beaucoup plus sableux.

La géographie des extractions de la Loire forézienne se concentre sur deux secteurs:

- de Saint-Just à Veauche, l'exploitation est ancienne. De nombreuses extractions dans le lit mineur ont causé le surcreusement de la Loire.
- depuis 1970, les gravières se sont étendues sur un second secteur, de Veauche à Feurs. Cette exploitation s'est propagée dans la zone des petits Chambons à Montrond et sur les berges de Marclopt. Cette dernière zone ainsi que la rive droite juste en amont de Feurs devraient être encore exploitées dans 20 ans.

A la suite des dispositions réglementaires (cf. chapitre préliminaire), les extractions alluvionnaires dans les lits mineur et majeur de la Loire dans le département de la Loire ont régulièrement diminué. De 1981 à 1993, les volumes extraits passent de 2330 à 1241 milliers de tonnes. Le total sur 13 ans est de 21 856 milliers de tonnes, avec des moyennes annuelles de 1981 à 1990 et de 1991 à 1993 qui sont respectivement de 1784 et 1340 milliers de tonnes [Conseil Général des Ponts et Chaussées, rapport 93 232 - 1995].

a. Mode d'exploitation

Le mode d'exploitation des gravières est important pour comprendre les relations hydrauliques qui peuvent exister entre les nappes et la gravière.

Le mode d'exploitation le plus fréquent est le décapage de la découverte puis l'exploitation au chargeur d'une première tranche à petite granulométrie (1 m d'épaisseur environ), ensuite l'exploitation à la pelle mécanique de la deuxième tranche à la granulométrie plus importante. Dans la plaine du Forez, il n'y avait pas de contrôle de la qualité de l'eau ni de piézomètre jusqu'en 1996 où la société Morillon Corvol a installé des piézomètres sur un de ses sites. Le contact entre la Loire et la gravière est généralement nul compte tenu du drainage de la nappe par la Loire sur l'ensemble de la Plaine. L'alimentation en eau de la gravière est souvent uniquement due à la nappe.

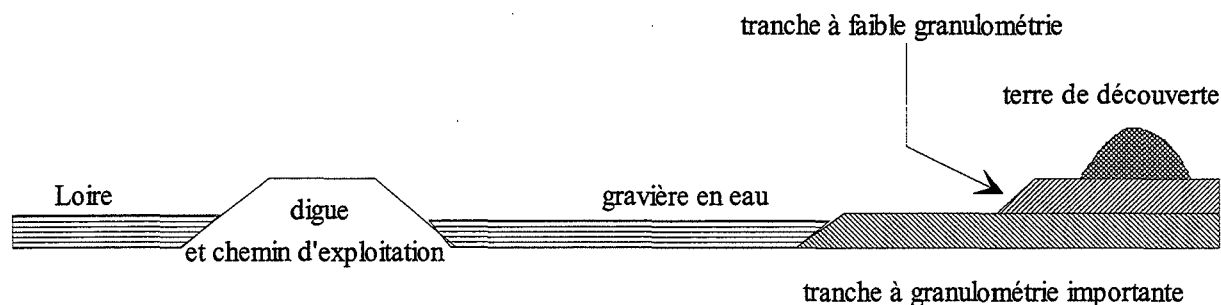


Figure 21 : exploitation d'une gravière dans la plaine du Forez

Les gravières situées à l'intérieur d'un méandre, sont séparées de la Loire par une digue qui constitue le chemin d'exploitation (cf. Figure 21). Le réaménagement des berges se fait au fur et à mesure de l'exploitation par nivellement de la pente de manière à ce que les végétaux puissent s'y installer et les fixer.

Le système de tri des graviers est très développé (cf. Photo 4). Le matériau brut est monté en haut de cribles calibrés qui séparent les granulométries en plusieurs classes différentes, ces classes sont transportées par des bandes transporteuses, passent dans de nouveaux tamis jusqu'à obtention de la qualité désirée. Le dernier tapis roulant amène les matériaux triés vers le sol. Un système de pompage permet de les laver sur les cribles. Selon les installations, l'eau

de lavage retombe directement sur le sol sans système d'évacuation, ou est recyclée dans un circuit fermé de lavage et de décantation des boues. Cette eau provient de prises directes dans la Loire ou de pompages dans la nappe.

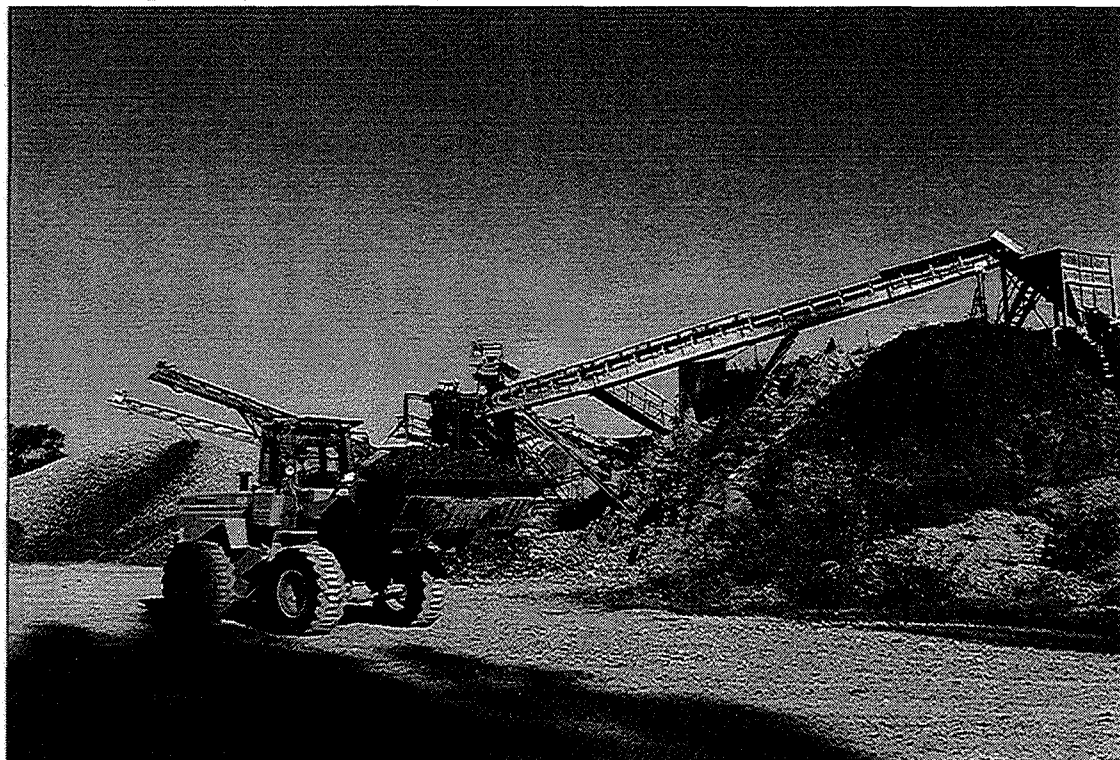


Photo 3: carrière en activité à Marclopt

b. Réaménagement des extractions

L'exploitant est tenu de remettre en état le site affecté par son activité, compte tenu des caractéristiques essentielles du milieu environnant. La remise en état du site doit être achevée au plus tard à l'échéance de l'autorisation. Elle comporte au minimum les dispositions suivantes:

- la remise en état des fronts de taille;
- le nettoyage de l'ensemble des terrains et, d'une manière générale, la suppression de toutes les structures n'ayant pas d'utilité après la remise en état du site;
- l'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation dans le paysage, compte tenu de la vocation antérieure du site.

A Feurs, au lieu dit Fond Fenouillet (cf. Photo 4), il y a environ 1 m d'eau. 4 m d'épaisseur de granulats ont été exploités, et 1 m de terre végétale a été enlevée. L'essentiel des travaux s'est réalisé entre 1982 et 1989. Il n'y a pas de renouvellement d'eau, les gravières sont alimentées par la nappe. Le niveau de l'eau est généralement supérieur à celui de la Loire. Un seul gourd

est réalimenté occasionnellement par les eaux de la Loire, grâce à une vanne de fond et à une pompe.

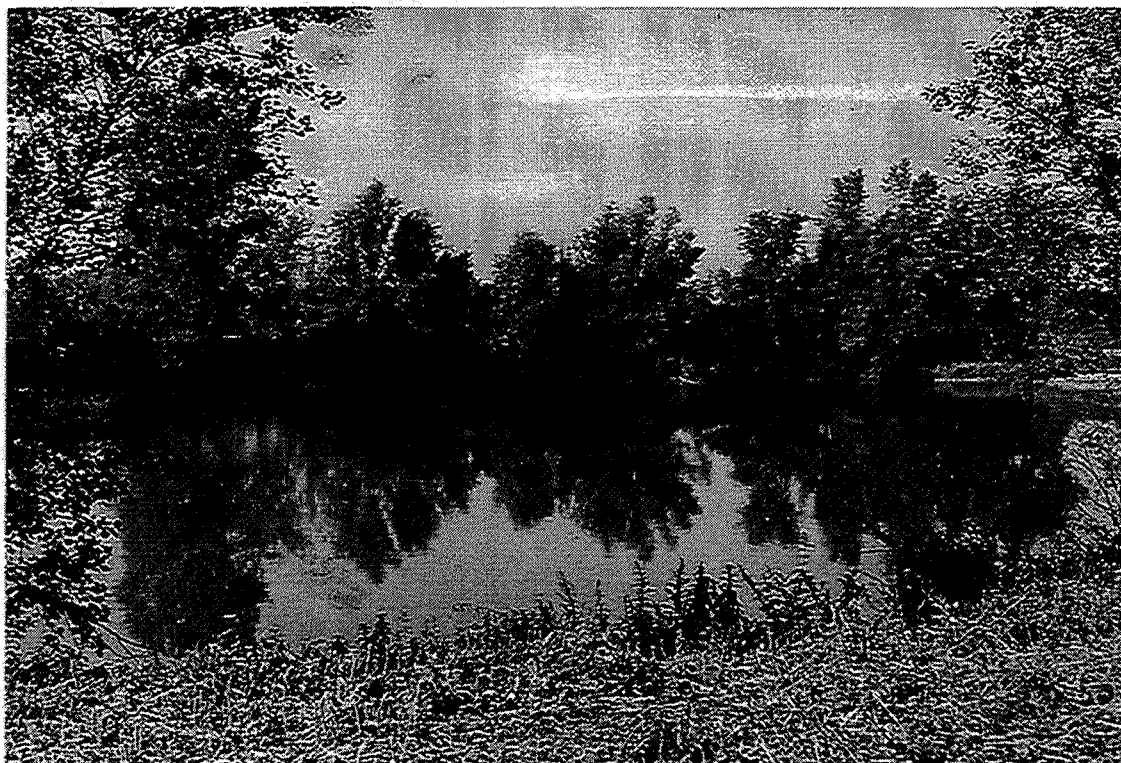


Photo 4: ancienne carrière réaménagée à Feurs

Le site de l'ancienne décharge de Feurs est situé en rive gauche de la Loire en aval du pont, directement sur les berges. Il contenait des ordures ménagères. Tout a été enfoui sous de la terre végétale. Des arbres ont été plantés, des tables et des bancs ont été installés en zone de loisir qui s'agrandit au fur et à mesure du comblement d'un gourds par des encombrants. Certains gourds sont entièrement recouverts par des lentilles d'eau, et en phase avancée d'eutrophisation. Tous les gourds avoisinants sont peu profonds. L'absence de renouvellement de l'eau les condamne au comblement à plus ou moins long terme si une crue ne les réalimente pas.

3.1.2. Les barrages

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques majeurs, ils ont des impacts sur le milieu fluvial (essentiellement par le blocage de la charge de fond) qui sont variables selon leur mode d'exploitation et qui peuvent se combiner avec les effets d'autres aménagements tels que les extractions de graviers. Les barrages construits sur la Loire supérieure sont nombreux et doivent être cités car ils conditionnent les débits du fleuve tout au long de l'année

hydrologique. Les plus importants dans le cadre de la plaine du Forez sont Grangent en amont, construit dans le seuil du Pertuiset, et Villereest en aval, construit dans le seuil de Neulise.

Les barrages construits sur le haut bassin de la Loire sont dans l'ordre chronologique : La Valette sur le Lignon vellave, le complexe de Montpezat, Grangent puis Villereest sur le fleuve. Les débits journaliers et les valeurs moyennes mensuelles sont les plus perturbés mais la vocation hydroélectrique de ces ouvrages implique qu'ils soient pleins de manière à répondre à la demande d'énergie quand elle se manifeste et leurs effets sur l'écêtement des crues sont quasiment négligeables.

Les prélèvements d'eau en amont ont aussi des influences sur les débits. Les aménagements de Montpezat détournent vers l'Ardèche (par l'intermédiaire de son affluent la Fontaulière) une grande partie des eaux précipitées sur les 200 km² du haut bassin de la Loire et accumulées dans les trois réservoirs du lac d'Issarlès, du Gage et de Lapalisse dont la capacité totale utile est de 42,6 millions de m³.

Montpezat a été mis en service en 1955-56, le fonctionnement de cette centrale comme celle de Grangent, est programmé depuis la ville de Lyon. L'énergie est produite essentiellement en hiver, mais aussi pour des appoints éventuels à la production d'électricité. Le remplissage s'effectue avant le 15 avril, en dehors de la période d'étiage. Il n'y a pas de contrainte de soutien d'étiage de la Fontaulière, et la centrale ne turbine pas de la mi-juin à la mi-septembre.

a. Le barrage de Grangent

Le barrage de Grangent a été mis en eau en 1957. Avec ses 57,4 millions de m³ de capacité totale et ses 28,6 millions de m³ de capacité utile, c'est un ouvrage majeur qui pose de sérieux problèmes à ses gestionnaires en matière de qualité de l'eau, et en matière de vidanges. La dernière a eu lieu il y a 20 ans, le comblement partiel par les sédiments rendant les vidanges totales suivantes délicates. Une vidange partielle est actuellement en cours.

Grangent a une triple vocation d'hydroélectricité, d'équipement de détente à proximité de l'agglomération stéphanoise, et d'alimentation du canal du Forez pour l'irrigation. Par les lâchures et les retenues, il modifie les écoulements du fleuve en aval. Le barrage doit garantir un débit de 5 m³/s pour le canal du Forez dont l'embranchement est situé directement à sa sortie. En étiage 2 m³/s doivent être assurés pour la Loire, le surplus allant dans le canal. Durant cette période le barrage est plein et ne peut assurer un rôle d'écêteur de crues, qui se produisent pourtant surtout de fin août à octobre.

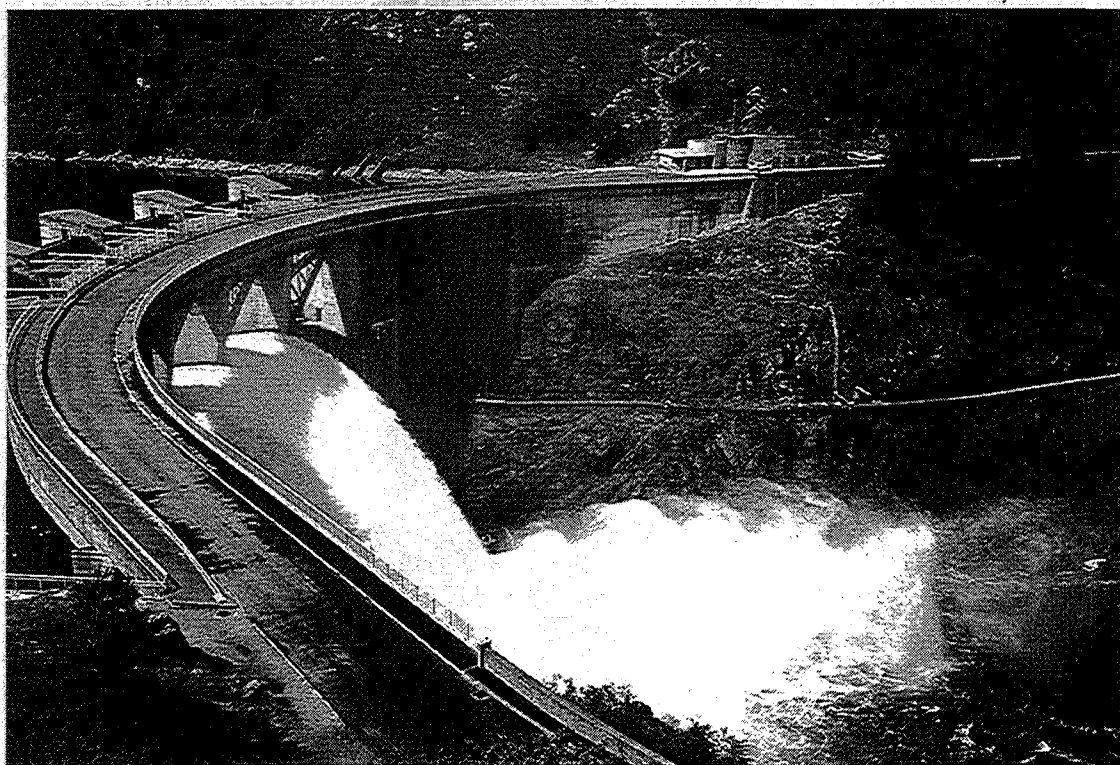


Photo 5: lâchure du barrage de Grangent

Ce type d'aménagement hydraulique a des conséquences en amont et en aval, à cause de la modification de la charge solide et du débit. La vidange de Grangent réglementairement tous les dix ans permet la vérification de l'ouvrage et le curage de la retenue. L'effet de chasse est le plus sûr moyen de chasser les fines, cela augmente la turbidité de l'eau et son débit pendant plusieurs jours.

b. Le barrage de Villerest

Le barrage de Villerest a été édifié en 1983, à la suite de la concertation des collectivités locales ligériennes regroupées au sein de l'Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents (E.P.A.L.A.). Il retient 138 millions de m³ et peut en contenir 235 en tout. Il est destiné à écrêter les crues, à soutenir les étiages, à produire de l'électricité et à supporter des activités de loisirs. Il s'intègre dans un schéma global d'aménagement de la Loire.

En conditions normales d'exploitation (soutien des étiages et production d'électricité), la retenue varie entre quatre niveaux en fonction des priorités saisonnières :

- la production d'électricité prime du 1er décembre au 1er avril. La cote du barrage est fixée à 314 m NGF à partir du 15 février afin de limiter la submersion des terres;
- à partir de la fin avril, la cote remonte à 315 m NGF pour reconstituer la réserve d'étiage,
- du 1er au 15 septembre, le niveau descend jusqu'à 304 m et reste stable jusqu'en décembre.

En cas de crue, la cote du réservoir est à 324 m, ce qui fait passer la surface en eau de 770 ha à 2330 ha et entraîne la submersion des chambons jusqu'à Nervieux et Balbigny.

3.1.3. Les captages et prises d'eau

Les captages prélèvent des volumes d'eau souterraine dans les nappes alluviales. Ils provoquent des rabattements locaux du niveau piézométrique qu'il faut prendre en compte si d'autres aménagements hydrauliques sont envisagés dans la même zone géographique. Tout aménagement entraînant une baisse piézométrique supplémentaire pourra diminuer le rendement des captages et éventuellement poser des problèmes pour l'Alimentation en Eau Potable (A.E.P.) des communes concernées. Si les prises d'eau qui prélèvent directement dans la Loire sont suffisamment importantes elles peuvent perturber le débit, surtout en étiage, abaisser la ligne d'eau et rabattre à leur tour le niveau piézométrique des nappes.

La ressource en eau souterraine de la nappe des alluvions récentes était utilisée en 1981 pour l'A.E.P. des communes de Saint Just sur Loire, Saint Rambert sur Loire, Bonson (syndicat), Veauche, Unias, CRAINTILLEUX, Veauchette, Montrond les Bains, Feurs, Sat du Lignon et Balbigny. Le débit moyen prélevé sur douze stations de pompage était de 100 l/s soit 3,15 millions de m³ annuels. Les ouvrages les plus sollicités ont fait l'objet de travaux particuliers :

- Feurs: barrage pour relever ponctuellement le niveau de base de la nappe;
- Balbigny et Saint-Just: tranchée drainante;
- Veauche: tranchée d'alimentation.

Actuellement, neuf captages sont en service pour l'A.E.P. dans les alluvions récentes, complétés par une prise d'eau dans la Loire à Andrézieux, par un ouvrage dans les passées sableuses du substratum tertiaire à Magneux-Haute-Rives, et par un captage sur la haute terrasse à Balbigny.

Une augmentation de 250 000 m³ annuels prélevés par an entre 1981 et 1995, s'est accompagnée d'une diminution du nombre d'ouvrages qui ont donc vu leur productivité augmenter. Les captages de Saint-Just-sur-Loire et de Saint-Rambert-sur-Loire sont correctement alimentés même en étiage. Ils font appel à une alimentation par les eaux de la Loire et sont donc particulièrement vulnérables à toute propagation de pollution dans le fleuve. Le captage du S.I. de Bonson est soumis à un risque de pollution accidentelle dans les gravières existantes de part et d'autre de la voie ferrée le long de la rive gauche de la Loire. Le captage subit des étiages sévères et doit être réalimenté artificiellement grâce au canal du Forez. Le captage de Veauche, à quelques mètres de la berge de la Loire est très vulnérable car il prélève essentiellement les eaux de la Loire et est donc tributaire de leur qualité. En étiage, il doit être réalimenté artificiellement. Le puits du syndicat d'Unias-CRAINTILLEUX-VEAUCHETTE est situé à 500 m des bords de Loire et exploite la nappe des alluvions récentes. En étiage, certains puits ne peuvent pas fonctionner en raison de l'abaissement excessif du niveau piézométrique.

ouvrages	communes d'implantation	prélèvements
puits de la Merlée puits des Girandières puits du S.I. de Bonson	Saint-Just - Saint-Rambert Saint-Just - Saint-Rambert Bonson	1,5 millions de m ³ /an
puits de Veauche puits du syndicat d'Unias-Craintilleux-Veauchette	Andrézieux Unias	0,5 millions de m ³ /an
captage du syndicat intercommunal des Petites Varennes champ captant de Feurs	Chalain le Comtal Feurs	1 million de m ³ /an
captage du syndicat intercommunal du Lignon	Cleppé	0,4 million de m ³ /an

Tableau 1 : Captages dans les alluvions récentes en 1995 [SOGREAH -1995]

A ces captages importants destinés à l'A.E.P. s'ajoutent des prises d'eau directes dans la Loire, utilisées pour l'irrigation. Toutes ces prises d'eau correspondent à une facturation de 10 m³/h, 5 heures/jour et 6 mois/an ce qui est loin d'être la réalité qui serait d'après la D.D.E. nettement inférieure. Quinze prises d'eau sont réglementées sur la Loire dans la Plaine du Forez :

- Epercieux : 1
- Balbigny : 7
- St Just - St Rambert : 2
- Andrézieux : 2
- St Cyprien : 3

3.1.4. Les digues

Les digues sont construites pour différents objectifs (navigation, protection contre les crues, soutien des berges) mais lorsqu'elles sont mises en place près du lit mineur elles chenalisent le fleuve. Il s'agit donc d'une contrainte à laquelle la morphodynamique de la Loire doit s'adapter. D'autre part, les ouvrages bétonnés imperméabilisent les berges et peuvent perturber les relations nappes-rivière.

Les premières digues furent construites au XVIII^{ème} siècle pour la navigation [Degorce J.N., 1991] ou pour l'extension des chambons par les grands propriétaires [Tomas F., Degorce J.N.,

1984]. Les petits travaux ont été emportés par les crues, jusqu'à celle de 1907, et seules subsistent les levées majeures. Des digues visant à protéger les chambons, seules celles situées au nord de Montrond sont encore visibles et forment un cordon continu plus ou moins parallèle au cours de la Loire. De Saint-Just à Montrond elles sont difficiles à repérer dans la mesure où elles se présentent comme de simples « bourrelets » du terrain naturel.

Les digues ont été édifiées pour palier aux situations les plus délicates. Aussi, elles n'enserrent pas la Loire de part et d'autre de son cours puisque les terrasses les plus proches, ou le bourrelet tertiaire, constituent une protection naturelle. C'est la raison pour laquelle les digues les plus importantes se situent en rive gauche de la Loire [Degorce J.N., 1991]. On retrouve la même configuration en amont/aval.

En 1978 l'objectif des travaux de la DDE de la Loire était de contenir le débit en un chenal unique tant pour les étiages que pour les crues. Ces « recalibrages », des enrochements de berges pour l'essentiel, assuraient :

- un « reprofilage » transversal afin de faciliter l'écoulement des flux les plus importants. Le biseautage et la consolidation des berges évitent le sapement, la compacité des ouvrages réduit les aspérités du terrain ;
- un recalibrage du lit dans son profil en long. Les enrochements sont placés sur des zones sensibles à l'érosion, notamment à l'aval hydraulique des gravières ou des terrains agricoles proches du fleuve.

Sur une trentaine de km les digues gérées par le Syndicat des Dignes de la plaine sont situées en aval de Feurs. En amont de Feurs, les digues existantes sont essentiellement des levées de terre anciennes ou des digues privées dont il n'existe pas de cartographie exacte. La position des digues actuelles donne des renseignements sur les zones morphologiquement les plus actives depuis une dizaine d'années. Par exemple à Balbigny, au niveau du coude situé en amont des Grands Chambons, la digue a été brisée deux fois :

- en 1976 (débit de crue $1600 \text{ m}^3/\text{s}$);
- en 1980 (débit de crue $3000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Ces travaux sont réalisés par les carriers ou par la DDE.

3.1.5. Le canal du Forez

Le canal du Forez est alimenté à la sortie du barrage de Grangent, longe la bordure est de la plaine avant de rejoindre la Lignon. Le débit qui lui est réservé est prélevé sur celui de la Loire qui est ainsi diminué de moitié en période d'étiage. Cet ouvrage a un impact sur le régime du fleuve qui s'ajoute à celui lié au fonctionnement hydroélectrique de Grangent. Ce volume d'eau prélevé ne peut pas réalimenter la nappe par infiltration et rejoindre la Loire, car le canal effectue son parcours en dehors des alluvions récentes.

Le canal du Forez est le plus ancien des ouvrages implantés. Il a été construit il y a plus d'un siècle par les gentilshommes agriculteurs pour faire de la plaine un pays d'herbe [Tomas F., 1984] puis il a été plus ou moins abandonné. Il a été ensuite remis en état et voué à l'irrigation, mais il sert maintenant également à l'A.E.P. pour deux communes de la plaine. Il est assujéti au fonctionnement du barrage de Grangent qui lui fournit entre 59 et 61 millions de m³ pour l'irrigation selon les années. Il constitue un système de plus de 300 km d'artères pour une surface de 29 000 ha. Il s'agit du plus septentrional système d'irrigation de France à cause des faibles totaux pluviométriques de la plaine (650 mm/an près de Montbrison).

3.1.6. Aménagement progressif du fleuve

Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, la Loire considérée comme impétueuse et nuisible a été progressivement aménagée. Le canal du Forez et les levées de terre sont les ouvrages pionniers suivis en 1957 par le premier élément majeur : le barrage de Grangent. Des seuils et le barrage de Feurs sont construits pour palier à certains phénomènes naturels comme l'enfoncement du lit de la Loire. Enfin, le barrage de Villers est mis en eau en 1983. Parallèlement, les extractions de graviers, après avoir pris une importance industrielle dans le lit mineur du fleuve vers les années 1960, sont interdites dans les années 1980 et se déplacent dans le « lit majeur ».

La Loire, comme l'ensemble des fleuves et rivières européens [Peiry J.L. et al., 1994] [Bravard J.P., 1994] a considérablement changé de morphologie depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. Ces changements ont été longtemps imputés aux seuls aménagements hydrauliques qui, pendant la même période augmentaient en nombre et en importance. Actuellement [Cubizolle H., 1994] les auteurs s'interrogent d'une part, sur l'évolution naturelle ayant trait à des variations climatiques, et d'autre part sur l'influence anthropique.

Avant de proposer de nouveaux sites pour des aménagements tels que des extractions de graviers, il faut dans un premier temps évaluer l'importance des changements morphologiques de la Loire et leurs impacts sur les activités humaines. Dans un deuxième temps il faut estimer la responsabilité des ouvrages déjà réalisés dans ces changements morphologiques, afin d'éviter toute nouvelle implantation qui pourrait accélérer les phénomènes observés.

3.2. Les changements du milieu naturel depuis 150 ans

Pour faire la part des changements morphologiques naturels et la part de ceux provoqués par les aménagements humains, il faut répondre à la question suivante : "que reste-t-il de la

dynamique naturelle de la Loire dans la plaine du Forez ?". La dynamique doit être considérée dans ses dimensions latérales (divagation) mais aussi dans ses dimensions verticales (érosion/incision) ainsi qu'à plusieurs échelles de temps : historique (150 ans) et actuelle (annuelle, et pluriannuelle).

Le bilan historique de la mobilité de la Loire est réalisé ici sur la base de la superposition de documents qui mettent en évidence les tracés successifs de la Loire dans la plaine du Forez. La dynamique actuelle est étudiée sur le terrain et grâce aux témoignages des riverains et de notre collaboration avec la D.D.E. (service de la navigation).

3.2.1. Les changements du tracé en plan

La mobilité latérale de la Loire est importante pour la détermination de nouveaux sites d'extraction de graviers. En effet, s'ils sont placés trop près du fleuve dans un secteur à forte mobilité, ils seront soumis à des érosions qui pourront endommager les digues de protection, voire même à l'occasion d'une crue importante être submergés, les digues brisées et le matériel emporté. La carrière est alors dite « capturée » et dans un cas extrême, la Loire peut choisir comme nouveau lit cette dépression déjà formée, ce qui entraînerait d'autres réajustements morphologiques éventuellement néfastes aux pompages.

Tomas et Degorce (1984) ont montré l'inconstance extrême du cours de la Loire dans la Plaine du Forez par une étude historique débutant au XV^{ème} siècle. La crue des 17 et 18 octobre 1846, particulièrement ravageuse détruisit tant de parcelles qu'il fallut réviser entièrement le cadastre des communes riveraines. Depuis cette date, les inondations de septembre 1866, octobre 1907 et septembre 1980 représentent les événements marquants des 150 dernières années. La mobilité de la Loire à l'échelle annuelle a été montrée. Quel bilan est-il possible de proposer depuis 1846 ?

Le tracé en plan de la Loire est considéré selon deux aspects essentiels : la mobilité du lit apparent et sa réduction surfacique.

a. Mobilité du lit apparent

L'étude de la mobilité du lit apparent se base sur la superposition de tracés successifs du cours d'eau.

– Documents utilisés

Les documents cartographiques utilisés sont décrits dans le Tableau 2. Les cartes des Ponts et Chaussées, de la Direction des Voies Navigables et du Ministère des Armées et Cadastre, sont

toutes réalisées sur le même fond de carte hachuré. Seule la précision accordée dans le tracé du lit de la Loire varie. L'ensemble de ces cartes permet de faire un état des lieux en 1849.

<i>Auteurs</i>	<i>date d'édition</i>	<i>échelle</i>	<i>zone couverte</i>
IGN	1990	1/25 000	plaine du Forez
Ponts et Chaussées	post 1910	1/20 000	Chambles à Montrond
Direction des Voies Navigables	1946	1/20 000	Plaine du Forez
Ministère des Armées et cadastre	1849	1/20 000	Marclopt à Feurs

Tableau 2 : références cartographiques

La précision maximale revient à la Direction des Voies Navigables, les figurés différencient les grèves nues des grèves légèrement végétalisées. Une cartographie géomorphologique de la Loire, qui distingue le chenal actif du lit mineur est donc possible.

La carte de la Direction des Voies Navigables répertorie en outre toutes les levées de l'époque.

• *Apports de la carte post 1910 des Ponts et Chaussées :*

Différents niveaux de crue sont reportés sur la carte : 1846, 1906, 1907, 1910.

La crue la plus importante est celle de 1846. Elle a servi de base à la cartographie des zones inondables réalisée par la Direction des Voies Navigables en 1946.

La Direction Régionale de l'Environnement (Service de Bassin Loire-Bretagne) nous a communiqué les hauteurs d'eau et les débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest en 1846 :

- Bas-en-Basset : $H = 7,10 \text{ m}$; $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ environ ;

- Villerest : $H = 6,94 \text{ m}$; $Q = 4500 \text{ à } 5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette crue peut être considérée comme une "grande crue", avec un très fort potentiel érosif. Cependant la fréquence de ce type de crue étant minime, elles ne sont pas représentatives du travail géomorphologique global du fleuve. D'autre part, l'inondation du lit majeur permet une dissipation de l'énergie ce qui contribue à l'inefficacité relative de ce type d'épisode [J.P. Bravard et D.J. Gilvear, 1993]. La crue de 1910 est intéressante car elle a occupé l'intégralité du lit mineur de la Loire. Son débit pourrait être perçu comme étant "le débit dominant" ou "débit plein bords" considéré en géomorphologie comme responsable de la genèse des formes majeures du lit.

La Direction Régionale de l'Environnement (DIREN, Service de Bassin Loire-Bretagne), nous a communiqué les hauteurs d'eau et les débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest en 1910 :

- Bas-en-Basset : $H = 3,20 \text{ m}$; $Q = 1000 \text{ à } 1200 \text{ m}^3/\text{s}$;

- Villerest : $H = 3,22 \text{ m}$; $Q = 1180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Actuellement, le débit plein bord se situerait (Service d'Annonce des Crues, Saint-Etienne juillet 1994) entre 500 et 600 m^3/s . Cette diminution s'explique partiellement par la réduction du lit mineur et aussi par la baisse de fréquence et d'intensité des crues depuis une centaine d'années.

- *Apports de la carte de 1946 réalisée par la Direction des Voies Navigables*

Cette carte couvre l'ensemble de la plaine du Forez. Elle permet donc de compléter la cartographie partielle du cours de la Loire réalisée avec la carte précédente. Elle n'est cependant pas aussi précise :

- pas de distinction entre les grèves végétalisées et celles qui ne le sont pas ;
- seules les digues principales sont représentées.

– *Exploitation et superposition des documents sur S.I.G.*

Les tracés du lit apparent et du chenal actif de la Loire en 1990 et 1846 sont recalés dans un système unique de projection, puis digitalisés pour être analysés sur S.I.G. Le calage des documents papier de 1846 a posé des problèmes dus à leur état délabré. A chaque pliure de la carte, l'usure induit au minimum une perte d'information. Une déchirure est encore plus gênante car elle provoque des distorsions.

Si l'incertitude de la digitalisation sur un document récent peut être facilement estimée à 1 mm variable selon l'opérateur (pour la Loire en 1990, cela représente 25 m sur la carte I.G.N. au 1/25 000), sur un document usé et déchiré cette incertitude est beaucoup plus importante mais très difficilement quantifiable. Cependant, elle est très légèrement compensée par l'échelle (1/20 000) supérieure à celle de la carte I.G.N.

A l'issue de ce travail, la possibilité de superposer les différentes couvertures, et les fonctions d'analyse spatiale du S.I.G. facilitent le calcul des paramètres simples qui permettent de caractériser la rivière :

<i>Paramètres calculés</i>	<i>Chenal actif surface</i>	<i>Lit mineur surface</i>	<i>Longueur du chenal actif</i>	<i>indice de sinuosité¹</i>
1849	6,22 km ²	16,24 km ²	54 km	1,33
1991	5,31 km ²	6,45 km ²	53,5 km	1,31
<i>Bilan</i>	<i>-14,63 %</i>	<i>-60,28 %</i>	<i>-1 %</i>	<i>-1,5 %</i>

Tableau 3 : paramètres géomorphologiques entre 1849 et 1991

– *Sectorisation et comportement du chenal pour une période de 150 ans*

L'analyse des tracés superposés de la Loire en 1849 et en 1991 permet d'étudier le comportement du chenal dans la Plaine du Forez. Trois secteurs s'individualisent (cf. **Erreur! Source du renvoi introuvable.**):

- *au sud de Saint-Laurent-la-Conche*, le tracé de la Loire comporte de nombreuses portions rectilignes de 1,5 à 3,5 km de longueur, entre lesquelles la Loire décrit de larges méandres à

¹ L'indice de sinuosité est le rapport entre la longueur totale d'un tronçon de rivière et sa longueur en ligne droite sur ce même tronçon. Il permet de quantifier l'importance du méandrage.

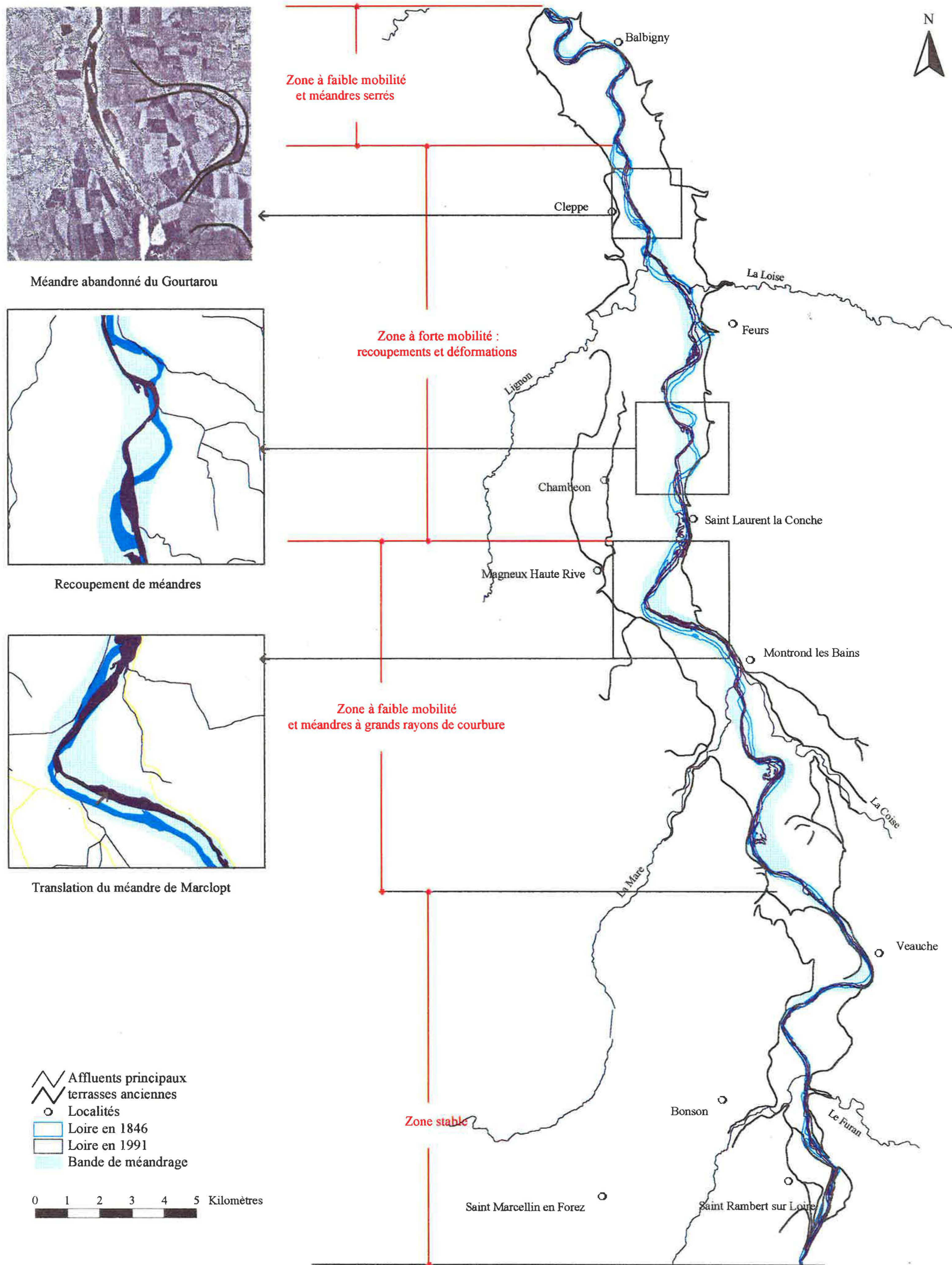


Figure : Mobilité de la Loire entre 1849 et 1991

grand rayon de courbure et faible amplitude. La mobilité du tracé est faible à l'échelle du siècle.

Plus précisément, ce secteur peut être divisé en deux :

- la stabilité maximale se situe au sud de CRAINTILLEUX.
- entre CRAINTILLEUX et SAINT-LAURENT-LA-CONCHE, la situation est intermédiaire entre une forte mobilité et la stabilité amont. La Loire a effectué des déplacements latéraux jusqu'à 50 à 100 m, mais en conservant sa forme initiale (translation). Ainsi, le méandre de MARCLOPT est remonté vers le nord d'une cinquantaine de mètres.

- entre SAINT-LAURENT-LA-CONCHE et NACONNE, les méandres sont serrés (longueur d'onde comprise entre 1,4 et 2,4 km) et les lignes droites inexistantes. Le tracé de ces méandres est très mobile. Au cours du siècle dernier, les boucles ont changé de tracé, de géométrie, de dimension par déformation et parfois même par recoupement, il y a eu des inversions de méandres. .

- au nord de BALBIGNY, les méandres sont les plus serrés de l'ensemble de la Plaine, mais leur tracé n'a presque pas changé à l'échelle du siècle. Ce troisième secteur montre des traces d'anciens méandres qui ont été recoupés dans sa partie amont. Les limites administratives gardent le souvenir de ces anciens lits de la Loire. La stabilité du troisième secteur est donc pour partie, une stabilité récente mais anté-centennale.

b. La réduction du lit apparent

Il y a 150 ans, la Loire seulement limitée dans ses déplacements par quelques levées de terre placées en bordure du lit apparent, méandrait au milieu de vastes grèves. Son tracé entre Montrond et Feurs évoquait alors un style en tresses.

Le plus frappant lors d'une première observation est la réduction de la largeur du lit mineur de la Loire. Si on considère le lit mineur comme étant l'espace non végétalisé situé de part et d'autre du chenal actif, il se réduit aujourd'hui à une bande étroite.

Les surfaces données par le S.I.G. montrent que le lit apparent est diminué de 60 % environ par rapport à sa surface initiale. En effet, des champs et la ripisilve ont remplacé les grèves. Le paysage des rives est marqué par la présence des gravières anciennes ou en activité. Leurs vastes plans d'eau semblent prolonger le fleuve. Cette réduction du lit apparent accompagnée d'une diminution de longueur du fleuve dans la Plaine traduit une chenalisation qui s'est accompagnée d'une incision verticale.

Figure 22 : mobilité de la Loire entre 1849 et 1991

3.2.2. L'incision du lit de la Loire

La première étude qui a mis en évidence l'enfoncement du lit de la Loire sur son cours moyen, date du milieu du XIX^{ème} siècle [S.H.C. 1979]. Les valeurs maximales d'enfoncement sont enregistrées près des grandes villes comme à Ancenis avec 3 m depuis 1856. En 1970, Y. Babonaux signale sur la Loire inférieure une tendance à l'enfoncement qu'il attribue à la canalisation du fleuve par les endiguements, aux exploitations de graviers en lit mineur et aux dragages pour la navigation.

Les études sur la Loire supérieure sont plus tardives. Il faut attendre 1975, et A. Le Griel qui estime à un mètre l'enfoncement du lit au cours du XIX^{ème} siècle. C'est le secteur en amont de Veauche qui a connu le plus fort creusement. Pour cette affirmation Le Griel s'est basé sur les témoignages des carriers. Jusqu'à la dernière guerre, les entreprises prélevaient les graviers et les sables par dragage dans le lit même du fleuve. Depuis les années 1950, cela est devenu impossible car la Loire coule directement sur son substratum tertiaire sur la plus grande partie de son lit.

L'enfoncement du fleuve dans son lit est visible entre autres en aval de Veauche, à Feurs, à Balbigny où le substratum tertiaire affleure largement en période de basses eaux.

Cependant, la Loire qui s'est encaissée peu à peu dans ses alluvions, est tout à fait capable d'éroder le substratum en profondeur. La dynamique actuelle de la Loire est donc très différente de celle qui a présidé à l'encaissement de la vallée. En accord avec le schéma classique de l'érosion régressive, le fleuve a exercé sa puissance de creusement à l'aval, dans le nord de la plaine. Actuellement, la dynamique est à l'équilibre en aval et présente une tendance érosive en amont. L'action de l'homme est venue renforcer cette tendance, rendant bien difficile l'estimation des responsabilités respectives des facteurs naturels et anthropiques.

a. Profil en long de la Loire en 1856

L'analyse des profils en long des cours d'eau fait partie de leur étude géomorphologique et sert en particulier à localiser les phénomènes d'érosion (incision) et de dépôt (élévation). Lorsque ces phénomènes sont particulièrement actifs, cela indique que l'équilibre entre le débit, la vitesse et la charge n'est pas réalisé [Derruau M., 1988]. Le fleuve est alors à la recherche d'un nouvel équilibre en jouant sur la seule variable qu'il est en mesure de modifier directement : la vitesse qui est fonction de la pente. La pente tend donc à s'établir par remblaiement ou creusement de manière à ce que la vitesse assure l'équilibre entre la puissance (débit-vitesse) et la charge. Les phénomènes d'incision posent de sérieux problèmes, notamment les affouillements des piles de ponts qu'il faut renforcer ou

l'abaissement de la ligne d'eau qui entraîne un rabattement des nappes alluviales à proximité du fleuve.

Le profil de 1856 est particulièrement important pour l'analyse des impacts des aménagements hydrauliques car il a été établi à une époque sans gravières, sans le barrage de Grangent, alors que les versants étaient dominés par les terres labourables et les herbages. Il représente donc vraiment le profil, et les pentes d'une Loire "originelle". La différence de ce profil avec le profil de 1921 et pour certaines zones avec celui de 1989/95 donne une vision exacte de l'enfoncement du lit de la Loire en 150 ans.

Le profil en long de la Loire en 1856, depuis sa source jusqu'à la limite des départements de la Loire et de la Saône et Loire, a été établi par les Ponts et Chaussées du département de la Loire. Ce document d'archives comporte l'altitude du talweg et de la ligne d'eau à l'étiage, quelques hauteurs de crues et un descriptif des repères utilisés. L'échelle des longueurs est au 1/40 000. Les cotes étaient dans le repère dit « la Bourdaloue » alors en vigueur. Le recalage au niveau de la mer actuel revient à retrancher 6,9 m à chaque valeur. Pour effectuer des comparaisons avec les profils plus récents, il faut seulement tenir compte des points de repère sur le terrain qui sont conservés. Les crues en ont éliminé une grande partie dont le pont de Feurs, c'est pourquoi il ne figure pas sur le schéma proposé ici (Cf. Figure 23). Ce travail a été réalisé par la DDE de la Loire (service d'annonce des crues).

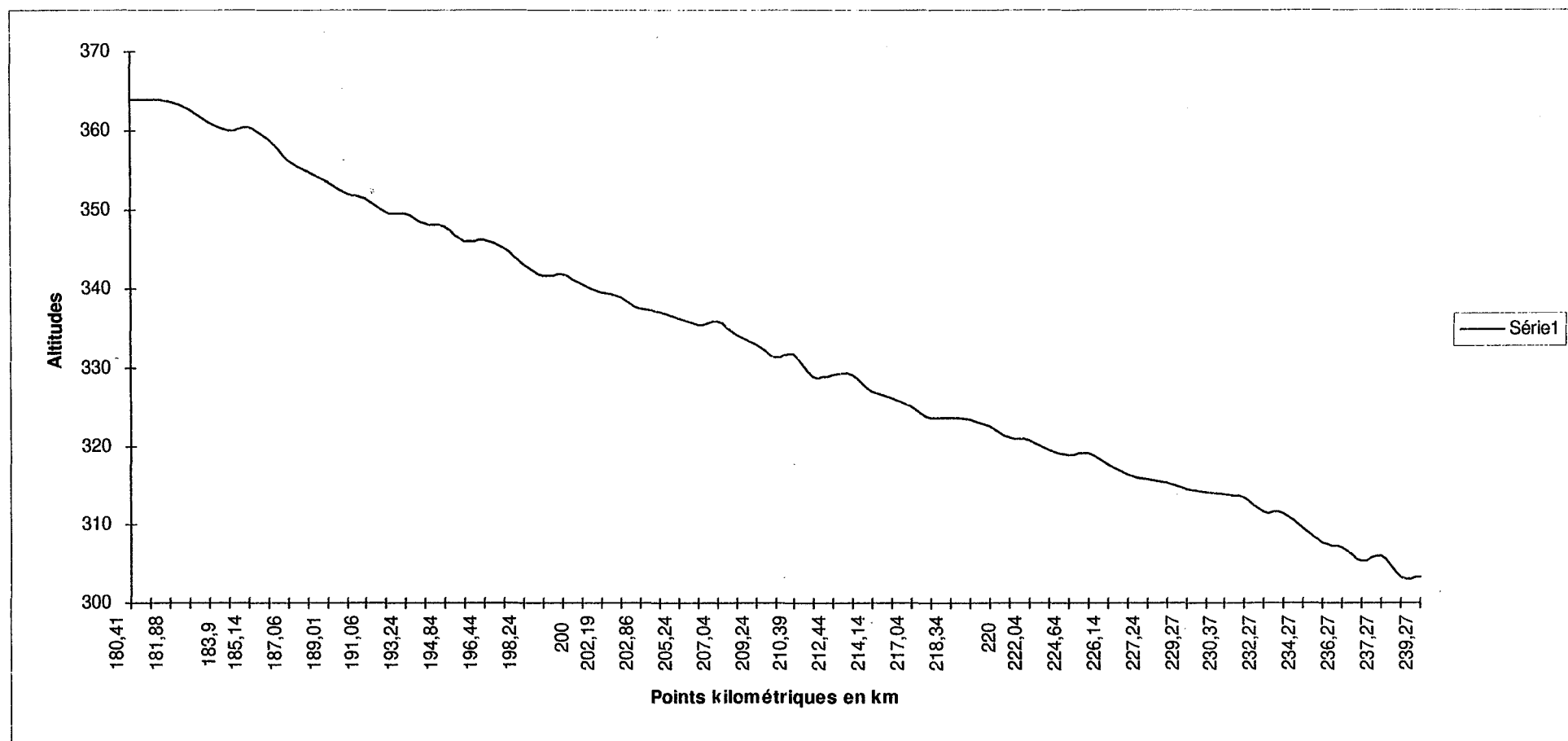


Figure 23 : profil en long de la Loire dans la plaine du Forez en 1856

b. Comparaison des profils de 1846, 1921 et de 1989/1995

Le profil de 1921 a été établi par l'I.G.N. au 1/50 000. Les données actuelles de 1989 à 1995 proviennent de sources différentes selon les secteurs. Des plans au 1/2 000 ou au 1/1 000 datent des années 89/90 à l'amont de Rivas et au niveau de Villeneuve (Ecopole), des levés complémentaires ont été réalisés par la D.D.E. dans le cadre d'une étude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire en 1995.

S'il est assez aisé de comparer les tracés en plan de la Loire en 1849 et en 1990, il est beaucoup plus délicat de comparer les profils en long qui leur correspondent car nous manquons de points de repère fiables. Les points cotés sont repérés par rapport aux ouvrages principaux tels que les ponts qui peuvent être considérés comme des points fixes (hormis pour Montrond où le pont a été détruit lors d'une crue puis reconstruit), mais aussi par rapport aux points kilométriques calculés en fonction de la source (profil de 1856) ou en fonction de la limite départementale Loire-Saône et Loire (profil 1921). L'ajustement des distances est impossible. Entre les différents points fixes la Loire a vu la longueur de son cours varier.

<i>Localisation</i>	<i>Pt Km</i>	<i>1856</i>	<i>distance</i>	<i>1921</i>	<i>distance</i>	<i>1989/95</i>	<i>distance</i>
Pont de Saint-Just sur Loire	181.88	363.74		364.1		363,7	
Pont d'Andrézieux	185.24	359.78	3.36	359.2	3.28	357	3,22
Pont de Rivas	194.3	349.11	9.06	348.8	9.13	348	9,26
La Mare	202.24	340.48	7.94	339.9	7.79	340	7,57
Le Gand	206.26	336.63	4.02	335.9	4.04	336,79	4,07
Le Garollet	215.04	329.69	8.78	328.7	6.78	327,08	8,29
Pont de Feurs	217.08	325.72	2.04	324.8	4.13	326,85	2,62
Loise	218.32	324.5	1.24	324.4	0.27	322,60	1,67
Le Lignon	219	323.69	0.68	322.3	2.18	321,06	0,66
Pont de Balbigny	227.28	317.04	8.28	316.6	7.42	315,69	7,27
Le Bernand	230.36	314.1	3.08	314.2	3.1	314,40	2,76
Bilan			48,48		48,12		47,39

Tableau 4: Points essentiels des profils en long de la Loire en 1856, 1921 et 1989/95

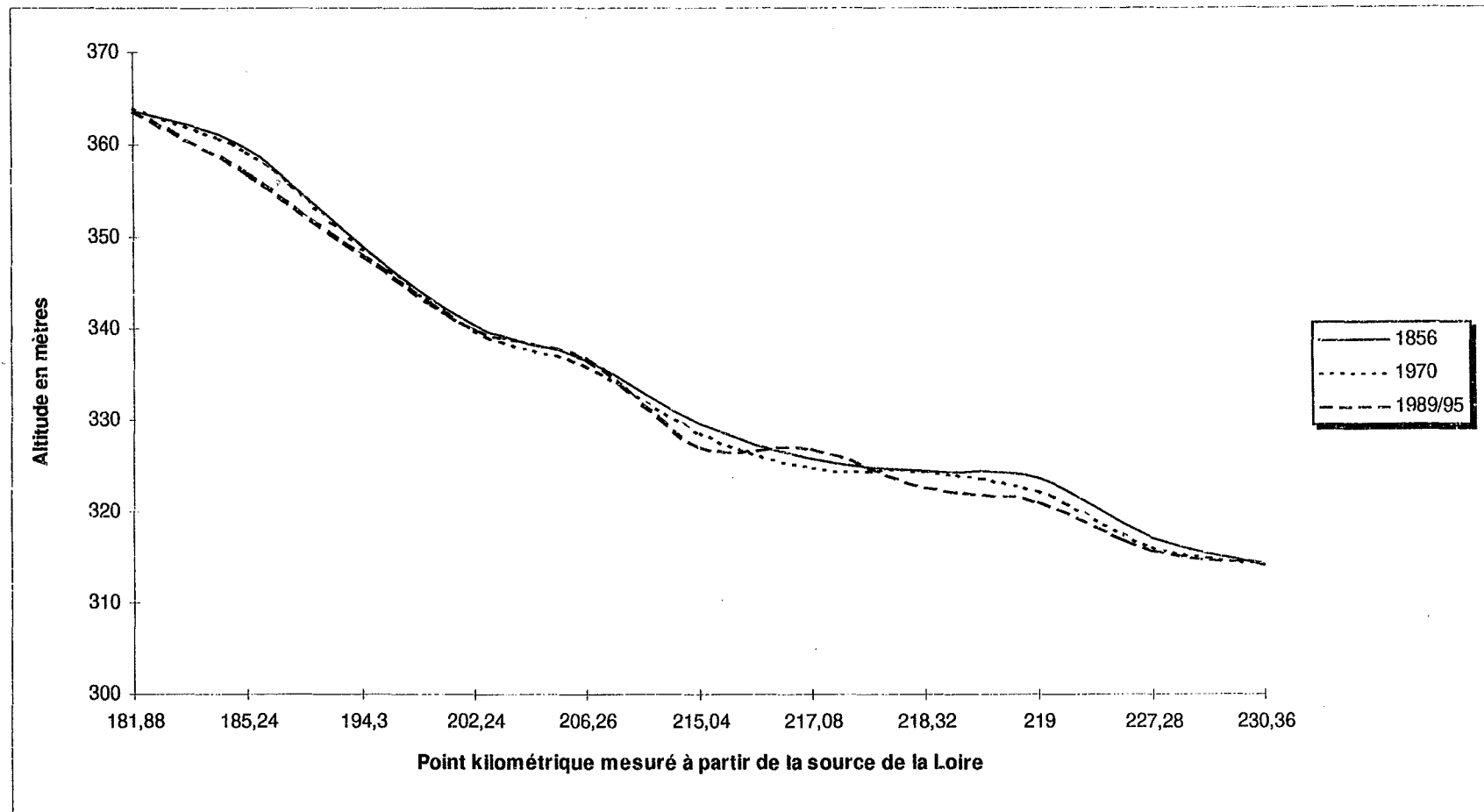
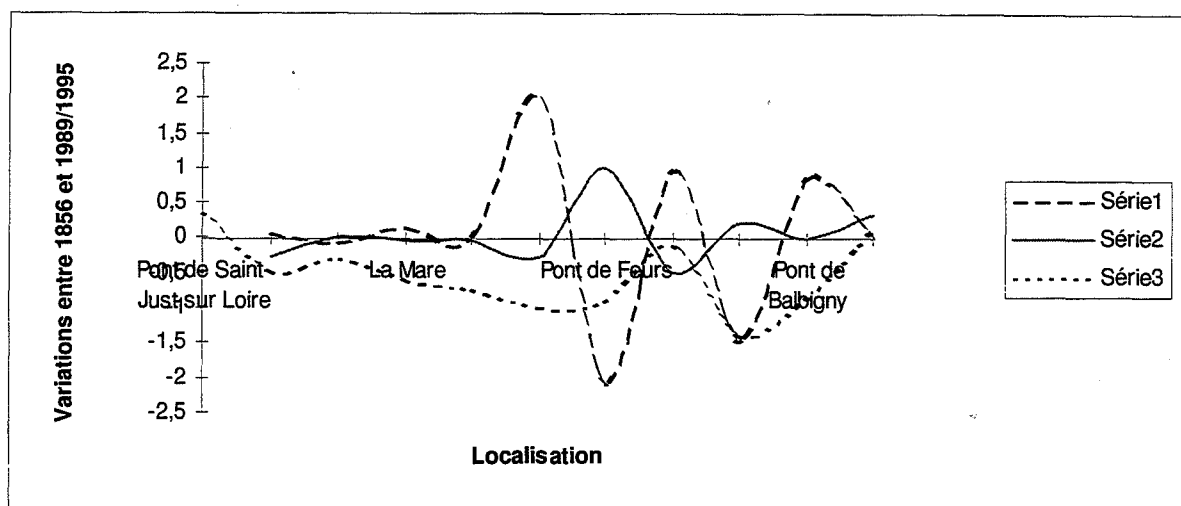


Figure 24 : Comparaison des profils en long de la Loire en 1856, 1970 et 1989/95



Série 1 : Variation des longueurs des tronçons de la Loire

Série 2 : Variation des pentes des tronçons de la Loire

Série 3 : Variation de l'altitude du fil de l'eau à l'étiage

Figure 25 : Variation des longueurs, des pentes et des altitudes des tronçons de la Loire entre points fixes

Comme le montrent la Figure 25 et la Figure 26, les modifications principales de la Loire se situent en aval de la confluence avec la Mare. Les tronçons qui ont connu un allongement du cours correspondent à ceux dont la pente a diminué, et réciproquement. Cet allongement est très important entre la Loire et le Lignon, avec un doublement de la distance. La Figure 25 met en évidence qu'en amont du Garollet, compte tenu de la longueur initiale, ces changements sont peu importants. L'enfoncement du lit augmente vers l'aval pour atteindre le maximum de 1,36 m entre le Lignon et la Loire pour la période 1856 à 1921. La rectification du profil près de la confluence avec la Loire ne peut pas s'expliquer géologiquement. En effet, le substratum de marnes vertes est homogène. L'hypothèse la plus probable est un ancien aménagement.

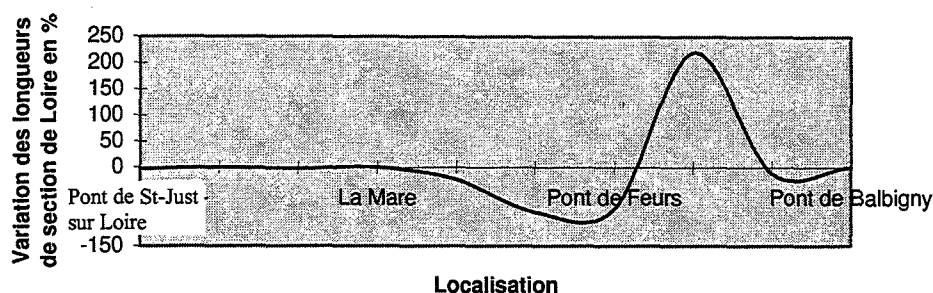


Figure 26 : Variation des longueurs des sections de Loire entre 1846 et 1921

Ces observations peuvent être corrélées avec les modifications du tracé en plan. Elles confirment que les sections rectilignes en amont sont les moins perturbées.

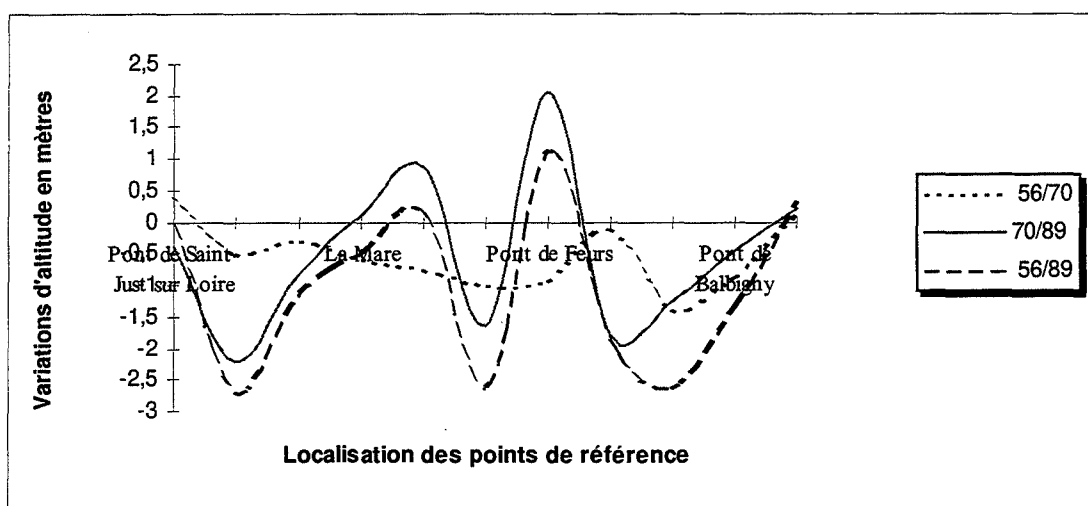


Figure 27 : Incision de la Loire entre 1856, 1921 et 1989/95

La Figure 27, montre que la dynamique a été totalement modifiée entre les trois dates des profils en long. Certains secteurs initialement peu affectés par l'incision ont connu un très fort creusement (1,50 m en aval de Saint-Just-sur-Loire, 2 m à la confluence avec la Loire). D'autres secteurs ont vu la tendance s'inverser, l'incision est remplacée par le dépôt (Pont de Feurs et confluence avec le Gand). Ceci témoigne de modifications de la dynamique de la Loire entre les deux périodes 1856-1921 et 1921-1989/95.

c. Bilan des changements

Entre 1856 et 1921, la Loire peut être schématisée par deux tronçons. Le premier tronçon en amont de la Mare est constitué par des sections rectilignes qui ne sont pas affectées de divagations latérales mais par une incision régulière qui va en croissant vers l'aval. En aval de la Mare, l'enfoncement est moins régulier et devient presque nul à la confluence avec la

Loire. La pente maximale du profil en long est d'environ 2 ‰ à Feurs en 1856 pour une moyenne de 1,1 ‰. Le maximum se déplace vers l'amont en 1921, et n'est plus que d'environ 1,5 ‰. La moyenne sur l'ensemble de la Plaine en 1921 est d'environ 1,1 ‰. Sans disposer de cartographie en plan de la Loire en 1991, les dilatations et raccourcissements des différentes sections du cours mettent en évidence des divagations latérales.

Entre 1921 et 1989/95, le même phénomène de stabilité latérale en amont et de divagations en aval est constaté. L'évolution du profil en long est modifiée avec une accélération générale de l'incision principalement en amont. Au niveau de la confluence avec le Garollet et surtout à Feurs (2,05 m), des dépôts exhausent le lit. Partout ailleurs, l'incision se traduit par la disparition des alluvions et l'enfoncement du lit de la Loire dans le substratum tertiaire. L'adaptation des affluents à ce nouveau niveau de base local est observé sur le Bonson où les marnes affleurent en étiage au niveau de la confluence.

Parallèlement nous constatons la réduction en surface du lit mineur entre 1849 et 1991 sans avoir de documents intermédiaires qui permettraient d'évaluer la dynamique de ce phénomène.

3.2.3. Les causes probables

L'incision du lit des cours d'eau est un phénomène très fréquemment rencontré, les causes invoquées sont toujours assez semblables.

Par exemple, J.P. Bravard *et Al.* (1989) mettent en évidence un basculement du profil en long du canal du Rhône à Miribel-Jonage avec un surcreusement amont de 4 m et un exhaussement aval de 5,5 m. Ce phénomène est lié à la disparition de la concavité du profil. Ils imputent ces changements à l'endiguement, à la diminution de la fréquence des grandes crues, à la mise en place du barrage de Jons, et aux gravières en lit mineur.

Pour l'Ain, Bravard J.P., Malavoi J.R. et Amoros C. (1989) signalent la disparition du style en tresses et son remplacement par un style à méandres, accompagné d'une végétalisation importante de l'ancienne bande de tressage (bande active). Les causes en sont le blocage de la charge de fond par les barrages, la construction de digues latérales, de ponts, de digues obliques. La régularisation du débit implique la diminution de la fréquence et de l'intensité des crues, et donc une diminution de la dynamique fluviale.

Cette incision se développe soit de manière régressive par abaissement du niveau de base ou augmentation de la pente par réduction de la longueur du cours d'eau ; soit à cause d'une diminution du débit solide ou d'une augmentation des débits assurant le transport de la charge de fond.

Les principales explications possibles peuvent être naturelles (climatiques) ou anthropiques.

a. Les causes naturelles

La partie amont de la Loire dans la Plaine du Forez qui comporte des portions rectilignes s'oppose à la zone médiane à méandres serrés. Pourtant, en examinant les cartes I.G.N. au 1/25 000, ou les photos aériennes, il est clair que le lit apparent actuel recoupe de nombreux méandres. Les plus visibles sont à la hauteur de Cleppé où la limite communale suit encore l'ancien tracé de la Loire. Ce changement se serait produit, d'après A. Le Griel (1975) au Moyen Age, puisque la carte de Cassini (1760) ne comporte aucun méandre à Cleppé. D'après Tomas et Degorce (1984) les morphologies actuelles méandriformes et "rectilignes" du cours de la Loire correspondent à sa pente. Mais le profil de 1989/95 met en évidence des pentes très fortes en aval et en amont du pont de Feurs, dans des zones à forte mobilité latérale. D. Ech-Charif El Kettani (1996) démontre par l'analyse de sondages COGEMA la présence de *fractures récentes qui peuvent guider localement le cours de la Loire*. Cette hypothèse est la plus plausible compte tenu de l'homogénéité du substratum tertiaire jusqu'à Balbigny où des lentilles sableuses apparaissent dans les marnes. Leur résistance à l'érosion n'est pas supérieure à celle des marnes car ce sont des formations non consolidées.

– Entre 1856 et 1921

Dans l'hypothèse climatique, une *période humide* peut favoriser la végétalisation des pentes et la réduction de *l'apport en sédiments fins*. Mais les cours d'eau acquièrent alors une capacité d'écoulement accrue par l'incision et la remise en mouvement de la charge de fond qui devient le mode de transport dominant [G. Pickup, 1976]. Les périodes de 30 à 50 ans qui sont dominées par les crues se traduisent par un ajustement du lit qui augmente sa capacité de transport par élargissement et incision des fonds [Warner, 1994]. Dans le cas de la Loire, la fin du XIXème siècle est précisément marqué par des crues fréquentes et importantes. Ceci pourrait expliquer cette incision précoce mais va à l'encontre du phénomène de rétrécissement du lit mineur. Cependant, sans document cartographique de la Loire en 1921, rien ne prouve que ce phénomène a commencé dans la période 1856-1921.

– Entre 1921 et 1989/95

Les crues diminuent sensiblement en fréquence et en intensité. Des reboisements dans le bassin versant amont à la suite de la déprise agricole *diminuent le ruissellement*, favorisent l'infiltration de l'eau dans les horizons superficiels du sol, et une évapotranspiration accrue par le couvert végétal. Ceci entraîne une baisse des apports dans les cours d'eau et une réduction de la dynamique fluviale qui favorise la colonisation du lit apparent par la ripisilve. Ces reboisements ont commencé avant 1921 mais ils étaient peu significatifs. De plus, compte tenu de l'effet retard constaté entre chaque changement dans le bassin versant et les

conséquences sur le fleuve, il n'est pas raisonnable de les prendre en compte entre 1856 et 1921.

b. Les causes anthropiques

Dans l'hypothèse anthropique, plusieurs causes sont généralement invoquées :

- la revégétalisation des têtes de bassins versants après des siècles de surexploitation pastorale qui a entraîné un *tarissement des apports sédimentaires*. Dans les secteurs montagneux, le reboisement volontaire destiné à stabiliser les versants et ainsi à réduire les crues et les effets négatifs de l'érosion, est devenu l'un des facteurs important de la déstabilisation des lits fluviaux en Europe [Bravard J.P., 1991].
- les aménagements hydrauliques tels que les *barrages* qui bloquent la charge de fond.
- Les corrections des lits fluviaux réalisées au XVIII et XIXème siècle ont modifié localement les forces tractrices et ont imposé des redistributions spatiales de la charge de fond. L'endiguement des secteurs de tressage empêche la recharge latérale des rivières dans la situation actuelle de pénurie sédimentaire. Le système ne peut plus dissiper l'énergie de ses crues que sur le plan vertical. [Bravard J.P. et Peiry, 1993].
- Plus que ces trois facteurs, *l'exploitation des granulats en lit mineur* est généralement reconnue comme le principal agent de l'incision des cours d'eau, « phénomène qui a atteint une ampleur d'échelle géologique en une quarantaine d'années » [Bravard J.P., 1994].

– Entre 1856 et 1921

Les *travaux réalisés au début du XVIIIème siècle* peuvent être rendus responsables pour partie de l'évolution morphologique de la Loire. Pour les besoins de la navigation et pour faciliter la descente des barques et des radeaux de troncs d'arbres, on a fait sauter des rochers qui entravaient le cours du fleuve à l'entrée du seuil de Neulise. L'accélération du débit qui en résulte, a provoqué une reprise de l'érosion et donc l'ablation d'une partie des alluvions en amont du seuil. L'absence de ces rochers fut aussi rendue responsable de dégâts causés en aval jusqu'à Nantes et ils furent remplacés par deux digues de pierres, digue de Pinay et digue de la Roche, sorte de barrages à pertuis ouvert. .

La construction des premières digues a commencé en 1790 et s'est poursuivie jusqu'en 1850. Sur la Loire, les levées de terre maintenant entretenues par le Syndicat des Dignes de la Plaine, sont mises en place sur les limites latérales du lit mineur de l'époque.

La conjonction de l'élimination des rochers du lit mineur et de la construction des digues peut expliquer l'incision du lit entre 1856 et 1921 malgré la fréquence et l'importance des crues. Ce phénomène d'incision au début du XXème siècle a été mis en évidence sur divers cours d'eau sans que puisse être avancée une explication significative [Bravard J P, 1994].

– Entre 1921 et 1989/95

Dans la deuxième partie du XXème siècle, les rivières à fond mobile sont considérées comme des réserves inépuisables en granulats et sables. Depuis les années 1950 l'essor de la construction est responsable de prélèvements excessifs dans les lits mineurs. Les conséquences classiquement reconnues de ces travaux sont :

- la *déstabilisation du substrat* et l'écroulement de berges ;
- le *surcreusement de fosses* où l'eau est désoxygénée en période d'étiage (hostile à la faune);
- la mise en suspension des sédiments fins entraînant une perte de transparence et une réduction de la photosynthèse ainsi que le *colmatage des fonds* ;
- l'abaissement des fonds (irréversible) provoque l'abaissement de la nappe phréatique et l'assèchement des milieux aquatiques abandonnés par le fleuve et des biocénoses aquatiques et terrestres.

A la fin des dragages en lit mineur, le phénomène aurait dû ralentir, mais la construction du barrage de Grangent qui piège les sédiments grossiers et l'implantation de gravières qui élargissent le lit et suppriment des îles, contribue à diminuer la charge du fleuve et à augmenter sa vitesse, paramètre essentiel du contrôle de l'*érosion*.

3.2.4. Dynamique horizontale et verticale de la Loire dans la Plaine du Forez

La Loire possède une dynamique à l'échelle centennale, décennale et même annuelle. Cette dynamique s'exerce aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Cependant la partie amont de la Plaine du Forez jusqu'à Saint-Laurent-la-Conche, et la partie en aval près de Balbigny ne sont affectées que par l'incision. Seule la partie médiane connaît une dynamique latérale et verticale.

La part respective des causes naturelles et anthropiques est bien difficile à cerner. Si l'importance des aménagements était faible entre 1856 et 1921, se résumant à des rochers ôtés et à des levées de terre, l'analyse des profils en long montre que l'incision de la Loire était déjà commencée. Entre 1921 et 1989/95 les barrages de Grangent et de Feurs sont construits, les gravières prennent une dimension industrielle et l'incision s'accélère. Elle est localement corrigée par des seuils et surtout par le barrage de Feurs dont la construction se traduit par un exhaussement de 2 m. La tendance de la Loire à l'incision due à des phénomènes naturels a donc été aggravée par la superposition de générations d'aménagements hydrauliques dont les impacts se sont cumulés. C'est pourquoi la délimitation de nouvelles zones propices à de nouvelles implantations d'extractions de graviers est délicate. L'équilibre dynamique de la Loire est actuellement perturbé par des ouvrages anciens, des ouvrages nouveaux peuvent contribuer à la déstabiliser un peu plus sans quantification spatiale et temporelle possible.

La Loire, un système complexe et évolutif

L'étude des paramètres physiques qui régissent le fonctionnement morphodynamique de la Loire démontre l'importance de l'extrême variabilité des débits à l'échelle intermensuelle, annuelle et interannuelle. Les conditions climatiques particulières du haut bassin versant de la Loire situé au carrefour entre des influences méditerranéennes, océaniques et de rétention nivale en sont responsables.

Les formations géologiques les plus favorables pour les granulats sont les alluvions récentes qui reposent directement sur le substratum tertiaire, représenté par des sédiments meubles (essentiellement des marnes vertes). Ces alluvions correspondent à la plus basse terrasse de la Loire qui possède six autres niveaux supérieurs hérités des crises climatiques froides. La basse terrasse est considérée dans cette étude comme le « lit majeur topographique » afin de s'affranchir de la notion très subjective de « plaine d'inondation ». En effet, la superficie des zones inondables est variable en fonction des débits considérés, et donc sujette à caution. La délimitation de la basse terrasse sur des critères topographiques est réalisée par une méthode d'analyse automatique à partir du M.N.T. en mode raster. Cette méthode pose des problèmes d'incertitude quant à la localisation latérale des limites, mais sa validation sur la base de la cartographie issue de profils géophysiques montre une bonne concordance entre les deux tracés. Les résultats de cette méthode d'analyse automatique sont donc retenus comme la plus favorable à la production de granulats.

Les alluvions récentes constituent une ressource aquifère importante car elle est utilisée pour l'A.E.P. de nombreuses communes riveraines. La nappe est libre sur l'essentiel de sa surface. La Loire draine la nappe de Saint-Just-Saint-Rambert à Balbigny où un seul méandre occupé par un ancien chenal du fleuve draine très localement la nappe. L'épaisseur de la formation alluviale est comprise entre 1,80 m et 8,80 m avec des perméabilités de 1.10^{-3} à 5.10^{-3} m/s. L'alimentation de l'aquifère est assurée pour l'essentiel par les apports des terrasses anciennes et par l'impluvium. Localement au nord de la Plaine, des passées sableuses au sein des marnes tertiaires peuvent permettre un apport supplémentaire. Les conditions aux limites de la nappe sont donc induites par les apports latéraux et par la cote de la Loire. L'enfoncement du fleuve dans le substratum provoque une baisse du niveau piézométrique et donc une diminution de l'épaisseur mouillée ainsi que de la productivité des captages. Les divagations latérales, si elles augmentent la distance entre la Loire et les ouvrages, ont la même conséquence. *Il y a un lien très étroit entre la morphodynamique fluviale et la dynamique de ses nappes d'accompagnement.*

L'étude de la morphodynamique du lit mineur de la Loire entre 1849 et 1991 montre que malgré une apparente stabilité, il possède une dynamique active à l'échelle centennale, décennale et même annuelle aussi bien sur le plan horizontal que vertical. L'étude de l'évolution des formes montre une variabilité des processus de l'amont vers l'aval. L'incision domine au nord et au sud de la Plaine, les divagations sont observées seulement en aval de Saint-Laurent-la-Conche jusqu'à Naconne et correspondent aux plus courtes longueurs d'onde des méandres. L'enfoncement du lit mineur atteint la valeur maximale de 2,68 m au pont d'Andrézieux. Mis à part des exhaussements très localisés en raison d'aménagements de barrages ou de seuils, l'incision est générale. Elle a débuté avant la mise en place des aménagements hydrauliques et semble avoir pour origine des processus naturels essentiellement climatiques. Cette tendance a été aggravée par la superposition ultérieure de plusieurs générations d'aménagements hydrauliques dont les impacts se sont cumulés. La bande de méandrage qui représente la somme des différents tracés de la Loire depuis 1856 peut être considérée comme sensible, potentiellement soumise à l'érosion et donc déconseillée aux carriers.

Les futurs projets d'implantation de gravières doivent donc être localisés à l'intérieur du lit majeur défini par l'analyse topographique automatique et à l'extérieur de la bande de méandrage, illustrée par la Figure 28. Le Tableau 5 montre un essai de synthèse des impacts de chaque type de période climatique et de chaque type d'aménagement sur la géomorphologie de la Loire, les nappes alluviales et les gravières. Cependant, un tableau à deux entrées ne peut pas refléter une réalité complexe. Les barrages n'ont par exemple, aucun impact direct sur les gravières. Ils retiennent seulement la charge de fond de la Loire, et déclenchent une « réaction en chaîne » : impossibilité de réalimenter en graviers le lit mineur, incision du lit de la rivière, rabattement des nappes, diminution de la rentabilité des captages. Si les barrages n'ont aucun impact direct sur les gravières, ils ont un impact indirect sur les nappes qui se cumule avec celui des anciennes gravières situées dans le lit mineur. Il faut donc prendre en compte la somme des impacts des aménagements anciens et actuels, les différents usages du milieu fluvial (exploitation des nappes, des gravières) aujourd'hui. Les dimensions temporelles et spatiales sont importantes pour comprendre l'extension des phénomènes observés, leur évolution probable.

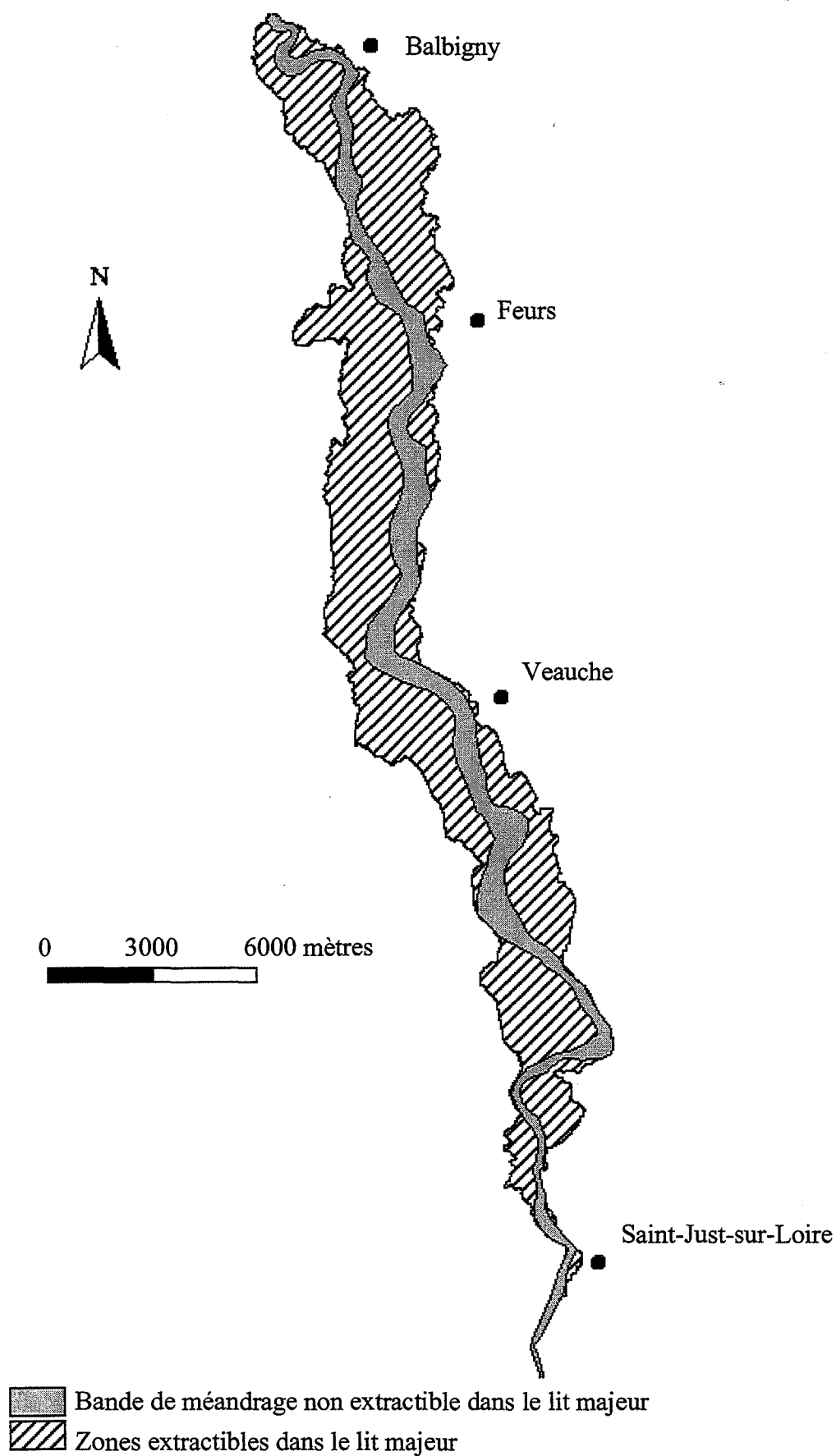


Figure 28 : zones géomorphologiquement propices aux extractions de graviers

Causes		conséquences sur la géomorphologie de la Loire	conséquences sur l'implantation de gravières	conséquences sur les nappes	paramètres à considérer	outils
anthropiques	naturelles					
digues		chenalisation, rectification ⇒ <u>réduction du lit mineur</u>	rôle protecteur	imperméabilisation des berges ⇒ perturbation des directions d'écoulement et diminution des échanges nappes/rivière	localisation des digues	S.I.G.
barrages		blocage de la charge de fond, régulation des débits ⇒ <u>incision</u> en aval, érosions de berges ⇒ <u>divagations</u>	déconseillées dans les zones à forte mobilité : entre St-Laurent-la- Conche et Naconne, conseillées dans les zones à faibles mobilité : au nord de St-Laurent-la-Conche	rabattement du niveau piézométrique, augmentation de i (gradient hydraulique)	profil en long piézométrie gradient hydraulique	S.I.G.
captages		diminution des apports par les nappes	interdites dans les périmètres de protection	rabattements piézométrique	localisation, périmètres de protection, zone d'influence	S.I.G. modèles hydrodynamiques
prises d'eau		diminution théorique du débit, mais les prélèvements ici sont faibles	aucune conséquence	aucune conséquence percevable	aucun	aucun
gravières		dans le lit mineur : <u>incision</u> dans le lit majeur : risque de <u>divagation</u>	interdites dans le lit mineur limitées dans le lit majeur	dans le lit mineur : rabattement du niveau piézométrique, augmentation de i dans le lit majeur : perturbations locales des écoulements souterrains	localisation des gravières existantes, modifications des écoulements souterrains, zones interdites, déconseillées, conseillées.	S.I.G. modèles hydrodynamiques
canal du Forez		diminution du débit surtout en période d'étiage	aucune conséquence	abaissement de la ligne d'eau de la Loire en étiage, soit une des conditions aux limites	profil en long	S.I.G.
	période humide ⇒ crues fréquentes et importantes	<u>incision</u> et augmentation de la capacité d'écoulement, <u>divagations latérales</u>	vulnérables aux divagations latérales	rabattement des nappes, augmentation de i	zones sensibles aux divagations latérales	S.I.G.
déprise agricole ⇒ reboisement ⇒ diminution ruissellement	période sèche crues peu fréquentes, moins importantes	diminution des débits, dynamique fluviale peu active ⇒ <u>réduction du lit mineur</u>	accès à des alluvions récentes végétalisées depuis peu de temps	?	lit mineur actuel lit majeur	S.I.G.

Tableau 5 : synthèse de l'importance des changements morphologiques de la Loire

Deuxième partie

DEUXIEME PARTIE: Problématique « carrières » : vers un Outil d'Aide à la Décision (O.A.D.)

Les outils d'aide à la décision existent depuis de nombreuses années et s'appliquent à des domaines variés tels que l'économie, la géologie, l'ingénierie etc. Chargés directement ou indirectement d'opérations d'aménagement, les décideurs du développement local ont une approche nouvelle des problèmes de gestion des ressources naturelles, approche qui doit être à la fois globale et prospective sur un territoire donné. Ils sont à la recherche d'outils qui leur éclairent la réalité complexe dans laquelle ils travaillent et qui rationalisent leurs décisions en raison du niveau des enjeux en cours, économiques, protection des ressources, compatibilité et compétition des usages.

La deuxième partie de ce travail a pour *objectifs* :

- de parcourir les outils existants pouvant de répondre à ces besoins;
- de sélectionner les plus adaptés;
- de les architecturer ensemble pour aboutir à un OAD le plus complet possible.

Après avoir identifié les gisements les plus favorables à priori (alluvions récentes du lit majeur), les exploitants doivent prendre en compte les contraintes anthropiques que sont la législation en vigueur et l'occupation du sol ; les contraintes naturelles telles que les inondations. Ensuite ils doivent défendre leur projet devant les administrations compétentes, les élus locaux et les riverains, dans une étude d'impact qui comporte des thèmes imposés que nous présenterons. La première étape est d'identifier les méthodes et les outils qui permettront la réalisation de l'outil d'aide à la décision. Dans une deuxième étape, chacun d'entre eux sera décrit et son adéquation avec le but poursuivi sera discutée.

1. Outils et méthodes pour l'étude des hydrosystèmes fluviaux

Les outils d'aide à la décision développés en matière d'environnement font appel à diverses techniques informatiques. Les études de Dynamique des Systèmes, par la mise en évidence de structures causales et de liaisons causales permettent la simulation du comportement de systèmes complexes dans des domaines très larges, de la sociologie à la technique. Les modèles mathématiques de simulation de phénomènes physiques sont surtout utilisés en ingénierie et entrent difficilement dans la composition des outils d'aide à la décision car leur mise en oeuvre et leur intégration dans ces outils reste trop souvent l'affaire de spécialistes. Les Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.) connaissent un essor constant depuis une dizaine d'années. Destinés à traiter des données spatialement référencées et à les analyser, ils s'appliquent à tous les domaines qui nécessitent comme données d'entrée des informations cartographiques, et comme résultat d'analyse d'autres rendus graphiques. C'est le cas des travaux d'aménagement et de gestion du territoire, de protection d'environnement etc. Ce sont par essence des outils fortement intégrateurs, capables de gérer des paramètres très variés.

Par rapport à la problématique « carrières », nous définissons trois besoins principaux:

1 - Vue globale du fonctionnement de l'hydrosystème fluvial

La sensibilisation des utilisateurs de l'outil à l'aspect global de l'hydrosystème demande une formalisation claire des relations de causes à effets qui unissent les variables. La Dynamique des Systèmes est une méthode d'analyse des systèmes complexes qui permet cette formalisation.

2 - Quantification de l'impact des carrières sur les l'hydrodynamique souterraine

La piézométrie de la nappe des alluvions récentes est perturbée par les excavations des carrières. La nouvelle réglementation en vigueur demande une évaluation de cet impact qui était jusqu'alors donnée de manière qualitative. Les modèles hydrodynamiques conçus et mis en oeuvre depuis plusieurs dizaines d'années sont capables de prévoir quantitativement la réponse de la nappe à ces aménagements.

3 - Traitement de données spatiales

De nombreux types d'informations sont indispensables au décideur. La plupart sont caractérisées par l'importance prédominante de leur répartition spatiale précise. Ces données concernent tous les paramètres du système naturel (données hydrogéologiques, géomorphologiques, hydrologiques), mais aussi ceux de l'occupation humaine. Seuls

ont été abordés jusqu'à présent les aménagements hydrauliques ayant une incidence sur l'hydrosystème fluvial. Il faut maintenant élargir à l'occupation des sols, les contraintes, sites classés etc. qui sont finalement les premiers critères de choix. L'ensemble de ces données a une base cartographique. Elles sont spatialement référencées et toutes superposables. Leur gestion et d'éventuelles analyses spatiales demandent un outil spécifique. Les différentes applications réalisées dans ce domaine montrent l'excellente adéquation des S.I.G. pour cet objectif.

En réponse à ces trois besoins, trois réponses sont apportées en terme d'outils et de méthodes et techniques qui sont retenues pour réaliser l'outil d'aide à la décision. La *Dynamique des Systèmes* est utilisée pour formaliser les conclusions de l'étude géomorphologique de la Loire et de ses alluvions récentes. Les *modèles hydrodynamiques* ont prouvé leur valeur dans tous les projets d'aménagements situés dans un contexte hydrogéologique. Enfin, les *Systèmes d'Information Géographique* ont déjà servi de base à de nombreux outils d'aide à la décision dans des domaines variés. Leur capacité à gérer et à traiter l'information spatiale est leur apport essentiel dans tous les problèmes en matière d'environnement puisqu'il s'agit justement de gérer un territoire.

1.1. Dynamique des Systèmes (D.S.)

« Sans aucune structure organisée, la connaissance n'est qu'une collection d'observations, d'actes et d'incidents conflictuels » [J.W. Forrester, 1971]. Inventée au début des années 60 par le Professeur Forrester, la Dynamique des Systèmes (D.S.) est une discipline qui se propose de mieux comprendre théoriquement et pratiquement le comportement des systèmes économiques, techniques et sociaux complexes. Elle a effectivement été appliquée dans de nombreux domaines depuis plus de trente ans.

Les objectifs sont multiples:

- définition du système et de ses limites spatiales et temporelles;
- énoncer les relations de cause à effet entre les paramètres naturels et les aménagements hydrauliques;

La formalisation des connaissances sur le fonctionnement global de l'hydrosystème fluvial doit permettre à l'utilisateur de prévoir qualitativement les réponses de ce dernier à un futur aménagement, et les éventuelles nuisances pour les gestionnaires d'un autre type de ressource.

1.1.1. Présentation de la D.S.

Si nous considérons un système dynamique, c'est à dire un système qui évolue dans le temps, comme une unité, nous émettons l'hypothèse qu'il existe des frontières séparant cette unité de l'environnement global auquel elle est intégrée [Aracyl J., 1984]. Les relations de cause à effet entre l'environnement et le système sont unidirectionnelles alors que les éléments situés à l'intérieur du système sont structurés par des boucles de rétroaction déterminant une forte interaction entre eux. L'environnement est constitué par l'ensemble des éléments situés à l'extérieur des frontières du système de sorte que:

- des changements dans certains de ses attributs affecte le système;
- d'autres éléments sont affectés par le comportement du système.

Un modèle en tant que représentation symbolique d'un système réel, est composé d'un ensemble de définitions permettant d'identifier les éléments qui constituent le modèle et d'un ensemble de relations spécifiant les interactions entre les éléments qui apparaissent dans le modèle [Karsky M., 1993]. Les différents éléments ou variables qui constituent le système peuvent être classés en endogènes ou exogènes. Les variables exogènes servent à décrire les effets sur le système qui peuvent être modifiés à l'extérieur de celui-ci (par exemple le blocage de la charge de fond d'un cours d'eau en amont de la plaine alluviale qui constitue la zone d'étude). Les variables endogènes caractérisent tous les éléments dont le comportement est complètement déterminé par la structure du système.

Diagramme causal

La compréhension du comportement d'un système complexe demande la mise en évidence d'une *structure causale*, ce qui revient à se demander « qu'est-ce qui agit sur quoi ? ». Parmi les éléments qui constituent le système, le *diagramme causal* est une esquisse schématique de ceux qui sont en relation entre eux par des *liaisons causales*. Il comporte les noms des éléments reliés par des flèches et permet de connaître la structure du système dynamique. Cette structure est donnée par la spécification des variables qui apparaissent dans le système, et par l'établissement de l'existence ou non des relations positives ou négatives:

A → + B: si A augmente alors B augmente, relation positive;

A → - B: si A augmente alors B diminue, relation négative.

Le diagramme causal fait apparaître des phénomènes de feed-back ou boucles de rétroaction qui représentent la capacité qu'a un élément de s'influencer lui-même par une suite de causalités.

Les boucles de rétroaction positive

La variation d'un élément se propage tout au long de la boucle de sorte que la variation initiale est renforcée. Le comportement est alors explosif caractérisé par un auto-renforcement des variations. La rétroaction est dite positive si elle contient un nombre pair de relations négatives.

Les boucles de rétroaction négative

Une variation sur un élément se transmet tout au long de la boucle de sorte qu'elle détermine une variation de signe opposé sur l'élément lui-même. Le comportement de ces boucles est caractérisé par une autorégulation qui tend vers un équilibre. Une boucle de rétroaction est dite négative si elle contient un nombre impair de relations négatives.

Ces deux sortes de boucles sont souvent imbriquées dans les systèmes et provoquent des comportements inattendus.

Simulation

La simulation sur ordinateur est construite sur les bases du diagramme causal. Un tel modèle permet d'appréhender le comportement du système en faisant varier les valeurs des différents paramètres [B. Braunschweig, 1985].

La simulation demande la réalisation de diagrammes de Forrester qui représentent les différents éléments du diagramme causal par:

- des variables de niveau dont l'évolution est significative. Ces grandeurs accumulent les résultats d'actions prises dans le passé, par exemple le niveau atteint par l'eau dans un réservoir (barrage);
- des variables de flux déterminent les variations dans les niveaux du système. Elles caractérisent les actions décidées dans le système, lesquelles restent cumulées dans les niveaux correspondants. Elles ne sont pas mesurables en soi, sauf par les effets qu'elles produisent dans les niveaux avec lesquels elles sont en relation. Aux variables de flux sont associées des équations mathématiques définissant le comportement du système;
- des variables auxiliaires représentent les étapes par lesquelles le calcul d'une variable de flux est décomposé à partir des valeurs prises par les niveaux.

Les liens entre les variables de niveau et les variables de flux sont des canaux matériels, représentant des flux matériels alimentant les niveaux, ou des canaux d'information représentant des flux d'information alimentant des variables de flux.

Le processus de modélisation d'un système peut être résumé à une démarche séquentielle et progressive qui établit:

- les limites du système: variables endogènes et exogènes;
- des boucles de rétroaction en tant qu'éléments structurels de base à l'intérieur des limites;
- des variables de niveau représentant les accumulations à l'intérieur des boucles de rétroaction;
- des variables de flux représentant l'activité dans les boucles de rétroaction.

Essai de modification du système

Le système est modifié de manière à en obtenir le comportement désiré, proche des objectifs de l'étude. La structure causale est changée et les résultats doivent correspondre aux attentes, il est alors possible d'appliquer les modifications sur le système réel.

1.1.2. Application à la Loire et ses nappes dans la plaine du Forez

La Dynamique des Systèmes permet de définir avec précision les limites spatiales et temporelles du système à étudier. Dans le cadre de l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour la réalisation d'extractions minérales dans le lit majeur de la Loire, cela conduit à cerner le domaine de validité optimal pour cette problématique. Les limites spatiales considérées sont celles de la géométrie de la formation des alluvions récentes qui correspondent au lit majeur géologique. La limite temporelle correspond à « l'instant zéro » des années 1850 jusqu'à nos jours. La prévision de l'évolution du système est qualitative et s'applique à l'échelle annuelle voire décennale. La réalisation des diagrammes causals enrichit énormément la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème fluvial. D'aspect complexe et peut-être un peu rebutant, ils ont le mérite de sensibiliser d'emblée leur lecteur aux interactions qui existent entre toutes les variables du système, tout en générant une impression de plus en plus forte de la

complexité des phénomènes. Ainsi, en comprenant que l'équilibre dynamique naturel du milieu est déjà très perturbé par des ouvrages anciens, il sera plus prudent dans ses décisions futures en matière d'aménagements.

L'application de la D.S. à la Loire et ses nappes dans la plaine du Forez a pour objectif la détermination des éléments et des limites du système, des liaisons causales qui relient ces éléments entre eux pour une meilleure compréhension du comportement de l'hydrosystème fluvial. Il s'agit d'un modèle conceptuel qui relève les causes et les conséquences élémentaires du processus d'évolution géomorphologique de la Loire, de manière à ce que ces processus puissent être facilement compris, et à ce que les politiques d'aménagement susceptibles de les influencer puissent être réfléchies.

a. Définition des différents éléments du système

Les limites du système sont définies dans l'espace et dans le temps, en fonction des réponses que le modèle donnera à la question: « quel sera l'impact de futures extractions de graviers dans le lit majeur d'un fleuve ? ». L'échelle de temps considérée doit être de l'ordre de la centaine d'années pour conserver la distinction entre évolution naturelle et anthropique de l'hydrosystème. Nous ne pouvons cependant pas négliger les effets d'événements ponctuels (journaliers) telles que les crues exceptionnelles en raison de la pérennité de leurs impacts sur la géomorphologie fluviale. De même, les variations de morphologie (faibles mais continues) dues au débit plein bord peuvent être amplifiées par le modèle et entraîner des conclusions erronées si elles sont négligées.

Pour déterminer les impacts des aménagements hydrauliques sur un fleuve, il faut disposer d'un état de référence ou « instant zéro » à partir duquel les impacts seront mesurés. L'instant zéro choisi est l'année 1846, car elle correspond à un état du système presque vierge. Les seuls équipements présents sur la Loire sont des levées de terre globalement placées hors du chenal actif, dans le lit apparent. D'autre part, les données disponibles sont suffisantes pour réaliser un bilan géomorphologique: tracé en plan, profils en travers et profil en long (cf. première partie).

Le contexte géographique sur lequel nous appliquons le modèle est la plaine du Forez en raison des enjeux économiques en matière d'extraction minérale et de gestion de l'eau. La situation géomorphologique de la plaine complètement ceinturée par des reliefs, et l'enserrement de la Loire entre deux ouvrages hydrauliques majeurs (barrages de Grangent et de Villerest) font du système un système « clos » qui favorise l'application raisonnable de la Dynamique des Systèmes. Les limites du système incluent les variables, et seulement celles-ci, qui sont nécessaires pour apporter une réponse à la question principale. Le système est donc constitué par les éléments suivants (cf. Figure 29):

- le fleuve depuis son entrée dans la plaine (en aval du barrage de Grangent) à sa sortie (extrémité amont du barrage de Villerest);
- les alluvions récentes qui constituent le lit majeur géologique;
- les aménagements hydrauliques à l'intérieur du système qui ont une influence sur le fleuve et les nappes;
- les aménagements hydrauliques à l'extérieur du système en amont et en aval qui modifient les variables du système;
- l'impluvium constitué par la plaine;
- les apports des affluents;
- les apports des nappes des alluvions anciennes.

Les failles récentes dans la plaine qui expliquent, au moins partiellement, la stabilité de la Loire dans son cours amont de la plaine ne sont pas des variables mais des éléments fixes. Cependant, elles bloquent les divagations latérales et doivent donc être prises en compte. Elles constituent une sorte de « condition imposée » à l'intérieur du système.

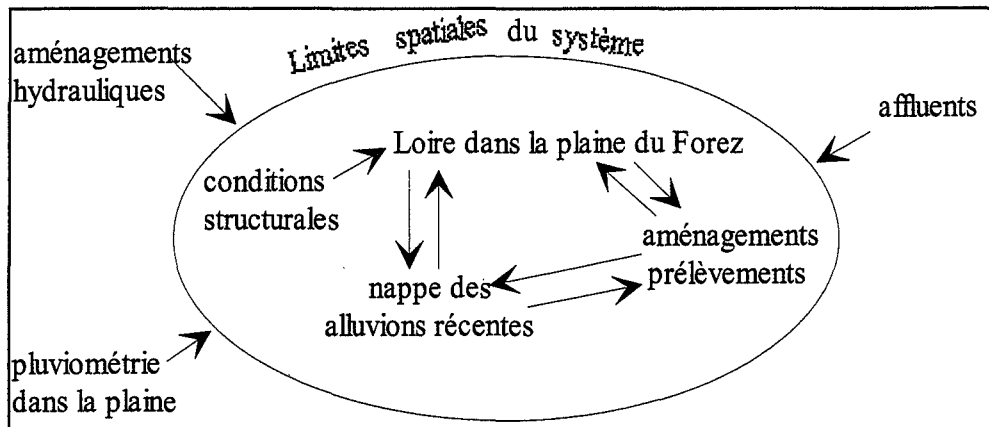


Figure 29: définition des limites spatiales

Le système est considéré en trois dimensions. Sa limite inférieure correspond à la topographie du substratum tertiaire entaillé par la Loire. Les limites latérales sont celles des alluvions récentes, et la limite supérieure est la topographie de surface du site. L'ensemble des aménagements localisés à l'intérieur de ces limites spatiales agit sur la Loire et la nappe.

Après avoir défini les limites du système, nous identifions les flux de matière et les relations de cause à effet qui modifient ces flux.

b. Identification de la structure causale

Nous commençons par déterminer une structure simple des flux de matière dans l'hydrosystème, ensuite nous l'élargissons aux phénomènes morphodynamiques et

hydrodynamiques. Enfin, nous introduisons les aménagements pour mettre en évidence les liaisons causales du système naturel qui sont perturbées par ces derniers.

– Le cycle de base

Le cycle de base est celui des flux de matière qui transitent par la Loire et ses nappes (cf. Figure 30). Le débit total dans la Loire représente la somme des débits liquides et solides. Ceci est une boucle fermée mettant en évidence que la disponibilité en eau de surface et en eau souterraine est limitée par les apports en eau en amont, latéralement (affluents sur la section du fleuve considérée) et directement (impluvium). Elle est aussi conditionnée par la dynamique interne du système. La ligne d'eau étant une condition aux limites du niveau piézométrique, elle agit sur le gradient hydraulique. Dans le cas particulier de la Loire, le fleuve draine la nappe en étiage comme en hautes eaux sur l'ensemble géographique considéré sauf localement à Balbigny dans la boucle des grands Chambons, et ponctuellement en période de crue. Une part du débit total provient donc des eaux souterraines.

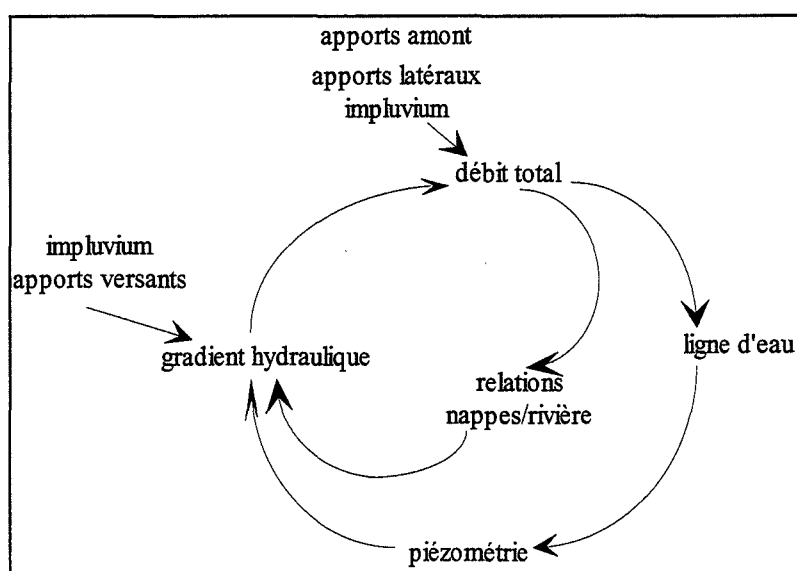


Figure 30: flux élémentaires de matière dans l'hydrosystème

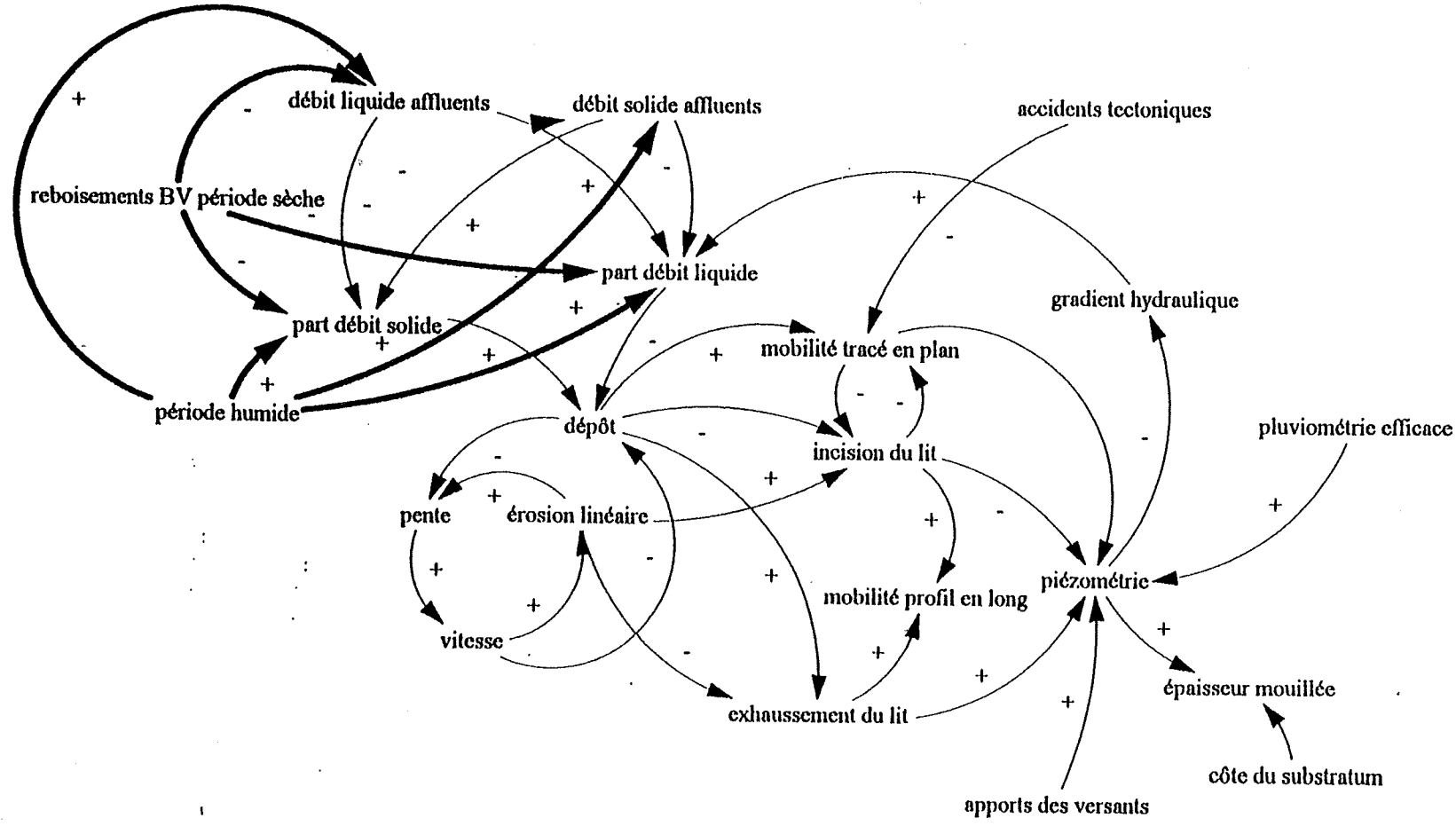


Figure 31: structure causale de l'hydrosystème naturel

– La structure causale de l'hydrosystème naturel

L'hydrosystème est constitué par deux sous-systèmes principaux (cf. Figure 31): le *fleuve* et la nappe des *alluvions récentes*. Les variables principales qui les caractérisent ont été identifiées dans la première partie. Pour le fleuve, le *débit solide*, le *débit liquide* et la *vitesse* conditionnent la *pente* par les phénomènes de *dépôt* et *d'érosion linéaire*. A chaque confluence, les apports latéraux des affluents en *débit liquide* et *solide* viennent modifier ces mêmes paramètres dans la Loire. Dans le bassin versant, les périodes climatiques sèches ou humides vont respectivement diminuer ou augmenter les débits liquides et solides de la Loire et de ses affluents. La réduction des débits solides peut être aggravée par le *reboisement* consécutif à la *déprise agricole*. Les débits liquides sont susceptibles d'augmenter à cause du reboisement, en effet les apports de versant sont plus faibles sur pelouse que sous la forêt en climat tempéré [B. Etlicher, 1984]. Ceci se traduit par un *profil en long* et un *tracé en plan* (lit mineur) plus ou moins mobile, et partiellement stabilisé par les *accidents tectoniques*. Le profil en long mesuré est celui de la ligne d'eau qui correspond à l'une des *conditions aux limites des nappes*, l'autre condition aux limites est celle des *apports des versants*, c'est à dire des hautes terrasses des alluvions anciennes. La *pluviométrie efficace* sur l'*impluvium* représenté par la surface géographique des alluvions récentes, est le dernier mode d'alimentation de l'aquifère. La variable principale de l'hydrodynamique souterraine est la *piézométrie* qui relie ces deux conditions aux limites en une surface à la mobilité annuelle. Cette surface se traduit par le *gradient hydraulique* (*i*) qui en représente la *pente* en chaque point. L'augmentation de *i* se traduit par un drainage accru de la nappe donc de l'alimentation de la Loire. L'épaisseur mouillée de la nappe dépend de la piézométrie et de la cote du substratum qui (compte tenu de l'incision du lit de la Loire) diminue.

– Structure causale de l'hydrosystème et de ses aménagements

La structure causale de l'hydrosystème naturel est reprise intégralement. Les liaisons causales ne s'appliquent que sur les variables perturbées par ces aménagements. La propagation des effets de la modification d'un seul des paramètres à l'intérieur du système montre leur étroite interdépendance (cf. Figure 32).

Les aménagements qui agissent sur les variables du système sont considérés, selon leur situation géographique, à l'extérieur du système ou à l'intérieur.

- les trois aménagements situés en dehors des limites de l'hydrosystème sont les *barrages de Grangent*, de *Villerest* et le *canal du Forez*. Le réservoir hydroélectrique amont bloque la charge de fond, il réduit la part du débit solide de la Loire à son entrée de la plaine. Corrélativement, la part du débit liquide est augmentée. Il régule

annuellement et journallement les débits liquides en fonction de la saison et de la demande en électricité. Le débit réservé pour le canal du Forez diminue le débit de la Loire en période d'étiage. La ligne d'eau du barrage de Villerest arrive à Balbigny lorsque la cote est fixée à 315 m ou 314 m, à partir du 15 février. Ceci impose une zone temporaire de vitesses quasiment nulles qui entraîne une diminution de l'érosion linéaire et une augmentation des dépôts donc une réduction de la pente. Les dépôts exhausent le lit (ligne d'eau) et rehaussent le niveau piézométrique.

- les aménagements situés à l'intérieur du système sont plus nombreux et plus variés:

- les *pompages* provoquent des cônes de rabattement de la piézométrie;
- les extractions de graviers doivent être divisées en deux catégories: les *anciennes gravières* situées dans le chenal actif (maintenant interdites) et les *gravières actuelles* localisées dans le lit majeur. Les premières ont diminué la charge alluviale qui n'a pas pu être reconstituée: le blocage de la charge de fond par le barrage de Grangent se combine avec cette réduction. Ce d'autant plus que l'absence de divagation (cf. partie 1) limite la mobilisation des matériaux de la nappe. Les secondes perturbent la piézométrie et sont éventuellement un facteur de divagation de la Loire si elles sont proches du lit mineur actuel;
- les *seuils* ont pour vocation de diminuer la pente. Ils provoquent ainsi une diminution de la vitesse en amont et donc le dépôt de fines qui colmate localement les berges, perturbant les relations nappes/rivière. Par conséquent le blocage du débit solide en amont augmente la part de débit liquide en aval, réduit les dépôts, augmente la pente et la vitesse;
- les *digues* bloquent la mobilité latérale du fleuve et augmentent la connectivité longitudinale. La recharge en débit solide ne peut plus être réalisée par l'érosion des berges, mais par l'érosion linéaire ce qui entraîne l'incision du lit et la baisse du niveau piézométrique. Les digues peuvent aussi imperméabiliser les berges ce qui diminue les relations nappes/rivière.

c. Faisabilité de la simulation

Pour réaliser une simulation à partir de ce diagramme causal, il faut déterminer les différents types de variables (niveau, flux, auxiliaires) selon leur nature exogène ou endogène.

– Variables exogènes

Il n'existe qu'une variable de niveau: les cotes 314 et 315 m du barrage de Villerest. Les variables de flux correspondent aux débits liquides et solides, et à la vitesse de la Loire à son entrée et à sa sortie (en dehors de périodes de hautes eaux imposées dans le barrage de Villerest) des alluvions récentes. Les débits liquides, solides et la vitesse des affluents sont aussi requis, de même que la pluviométrie efficace sur l'impluvium

constitué par les alluvions récentes, les apports latéraux des nappes des alluvions anciennes.

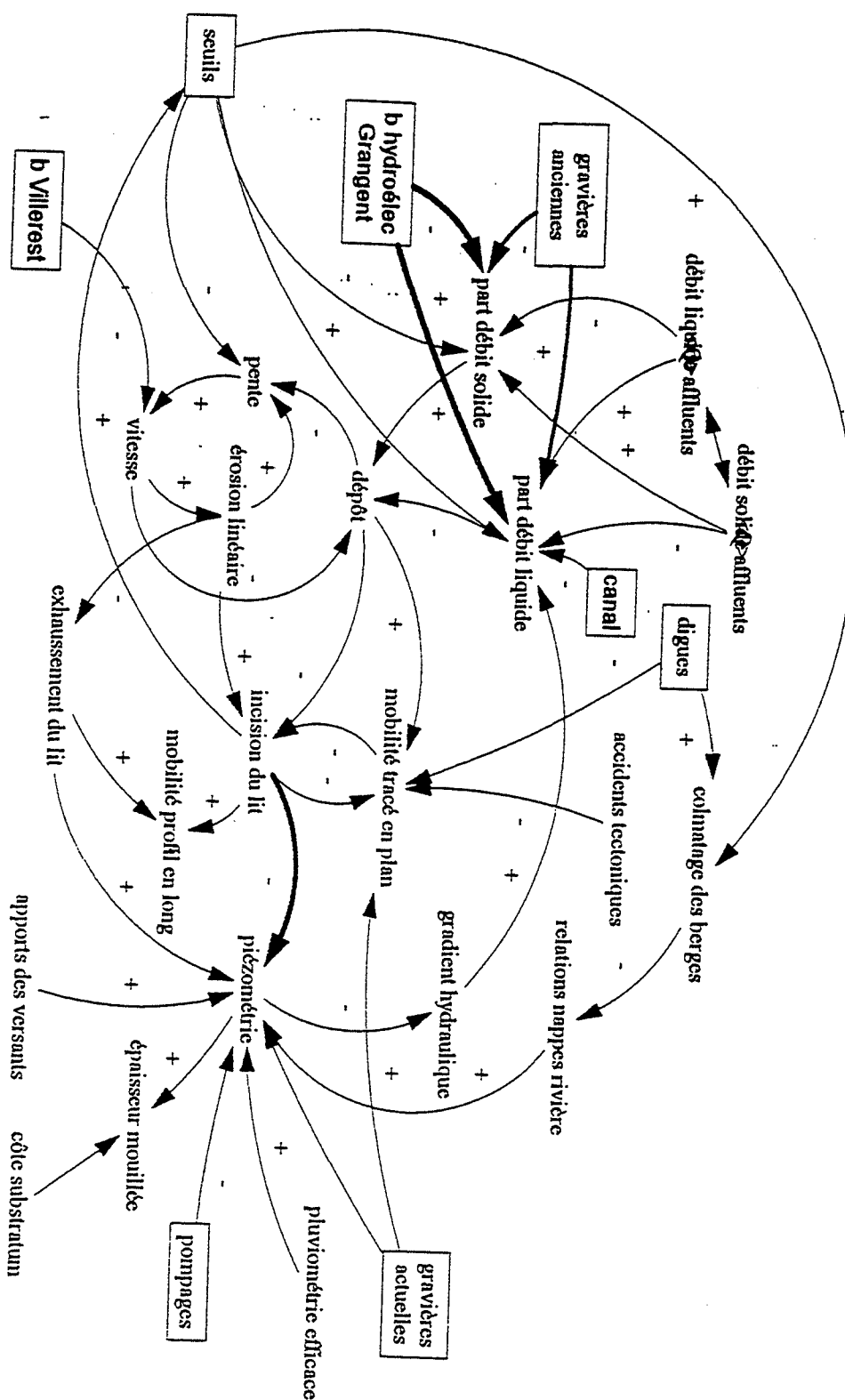


Figure 32: structure causale de l'hydrosystème et de ses aménagements

La variable de niveau est connue seulement pour une partie de l'année hydrologique. Les débits de la Loire en aval de Grangent peuvent être demandés à EDF mais ils ne fournissent que les débits naturels reconstitués (sans le barrage). De tous les affluents du fleuve, seul le Lignon est équipé d'une échelle limnimétrique, tous les autres débits sont inconnus. La pluviométrie efficace dans la plaine peut être calculée à partir des formules d'évapotranspiration. Le débit global de la Loire en sortie du système peut être approximé par ceux mesurés à Balbigny. Malheureusement, aucune distinction entre débit solide et liquide n'est jamais faite. Le débit solide qui est un des paramètres fondamentaux de la morphologie fluviale est totalement inconnu sur la Loire supérieure.

– Variables endogènes

Les variables de niveau sont le profil en long, la pente, la piézométrie et le tracé en plan. Toutes les quatre sont connues sur l'ensemble de la plaine du barrage de Grangent à celui de Villerest entre 1989 et 1995.

Les variables de flux sont:

- le débit liquide de la Loire entre chaque confluence. Il peut être approximé par les débits totaux (liquide et solide) calculés à partir des mesures des limnigraphes.
- le débit solide de la Loire entre chaque confluence. Le débit solide à la sortie de Grangent est très faible puisque le barrage bloque les sédiments. Mais chaque affluent est susceptible d'apporter des éléments solides qui s'ajoutent à ceux prélevés sur les berges et sur le lit. Le débit solide de la Loire dans la plaine du Forez n'a jamais été mesuré ni calculé, il est totalement inconnu.
- le débit de l'eau souterraine dans la nappe des alluvions récentes;
- les apports de versant;
- la pluviométrie efficace.

Les variables auxiliaires, qui correspondent aux différentes étapes de calcul pour obtenir la valeur d'une variable de flux qui alimente une variable de niveau sont, pour l'hydrosystème fluvial:

- la vitesse de l'eau dans la Loire qui dépend du débit, de la section en travers, du coefficient de rugosité (K) du fond;
- les phénomènes de dépôt, d'incision linéaire;
- la mobilité du tracé en plan, l'exhaussement ou l'incision du lit;
- le colmatage des berges et les relations nappes/rivière;
- l'épaisseur mouillée de la nappe qui dépend de la cote du substratum;
- la cote des marnes dans le chenal actif de la Loire.

Enfin, les accidents tectoniques sont des constantes du système à l'échelle de validité temporelle (150 ans). La topographie des marnes tertiaires n'est pas connue.

– Inconnues du système

Une grande majorité des variables sont inconnues, les plus importantes sont les débits liquides et solides de la Loire et de ses affluents. Le problème essentiel est que l'ensemble des paramètres et des phénomènes sont spatialement distribués et cette dimension ne peut pas être facilement prise en compte par la Dynamique des Systèmes. Cependant, le fonctionnement global de l'hydrosystème est explicité à travers les deux diagrammes causals.

Compte tenu du nombre important de données manquantes, de l'importance vitale de la variabilité spatiale de leur distribution de leur évolution dans le temps qui reste du domaine de l'expertise et ne peut pas être formalisée, il apparaît hasardeux de proposer un modèle de simulation. En effet, les résultats ne pourraient en aucun cas être validés et ceci pour deux raisons:

- la formulation par des équations mathématiques de ces phénomènes spatiaux en trois dimensions n'est pas encore réalisée;
- aucun hydrosystème fluvial perturbé dans son fonctionnement par des aménagements hydrauliques n'a retrouvé un état d'équilibre car la surimposition de plusieurs générations d'ouvrages continue encore aujourd'hui.

Il paraît donc pertinent d'arrêter l'application de la Dynamique des Systèmes au stade des diagrammes causals.

La Dynamique des Systèmes permet de mieux comprendre le comportement dynamique des systèmes complexes, d'en fixer les limites spatiales et temporelles. Lorsque le système est bien connu et que les données sont toutes disponibles, il est possible de quantifier les échanges de matière entre les différentes variables qui constituent le système. Mais dans le cas de l'hydrosystème fluvial de la Loire dans la plaine du Forez, les données sont insuffisantes pour aller au delà de l'élaboration des diagrammes causals qui formalisent la compréhension de la dynamique de l'hydrosystème fluvial. Il est donc nécessaire de faire appel à un autre type d'outil:

- qui s'applique localement de manière à ce que l'acquisition des données soit possible;
- qui soit plus spécialisé en matière d'hydrodynamique souterraine;
- qui permette de quantifier l'impact des carrières sur la nappe des alluvions récentes.

1.2. Modélisation hydrodynamique

Les modèles hydrodynamiques modélisent le comportement des nappes face à des actions extérieures à partir des lois physiques de l'écoulement en milieu poreux. Les simulations couramment réalisées avec ces modèles sont l'optimisation de l'implantation de zones de captages, les débits d'exploitation de ces captages pour une utilisation domestique, industrielle ou agricole. Il est aussi possible de simuler d'autres aménagements tels que les extractions de graviers [Launay P., 1981] qui nous intéressent en tout premier lieu. Tout ceci ne peut être réalisé qu'à la condition que ces modèles soient calés sur des situations réelles en fixant des conditions aux limites et en réalisant des tests de sensibilité.

1.2.1. Définition générale des modèles hydrodynamiques

Le lecteur qui connaît déjà les modèles hydrodynamiques peut aller directement au paragraphe 1.2.3. Nous les présentons ici rapidement mais ils sont développés plus en détail dans l'annexe 3.

Un modèle mathématique hydrodynamique est l'ensemble constitué par les différents fichiers décrivant les nappes et les programmes de calcul permettant d'en représenter le fonctionnement hydraulique. Ils sont destinés à simuler diverses conditions d'exploitation nouvelles à mettre en oeuvre telles que l'emplacement et le débit d'exhaure d'un pompage, ou la surface et la géométrie d'une carrière.

La démarche peut être schématisée de la manière suivante:

- le modèle mathématique avec ses algorithmes spécifiques;
- des entrées: les débits d'alimentation de la nappe;
- des sorties: les prélèvements dans la nappe;
- un facteur d'ajustement mal connu dans la pratique: la perméabilité.

Des approximations successives du facteur d'ajustement permettent de restituer par un calcul un état des potentiels aussi cohérent que possible avec la réalité, tenant compte des débits à l'entrée et à la sortie de la nappe. Les données d'entrée et de sortie sont connues avec une précision très faible. En conséquence, il est important de recourir à des tests de sensibilité pour ne pas sortir des limites de cohérence du système.

La simulation des écoulements en régime permanent et transitoire est maintenant bien connue [Dassonville G., 1978]. Dans un modèle de nappe calé en régime permanent, la simulation portera par exemple sur les effets à long terme d'un pompage sur la répartition des potentiels. En régime transitoire le temps intervient comme variable

supplémentaire. La réalisation d'une simulation hydrodynamique se déroule comme le montre la Figure 33).

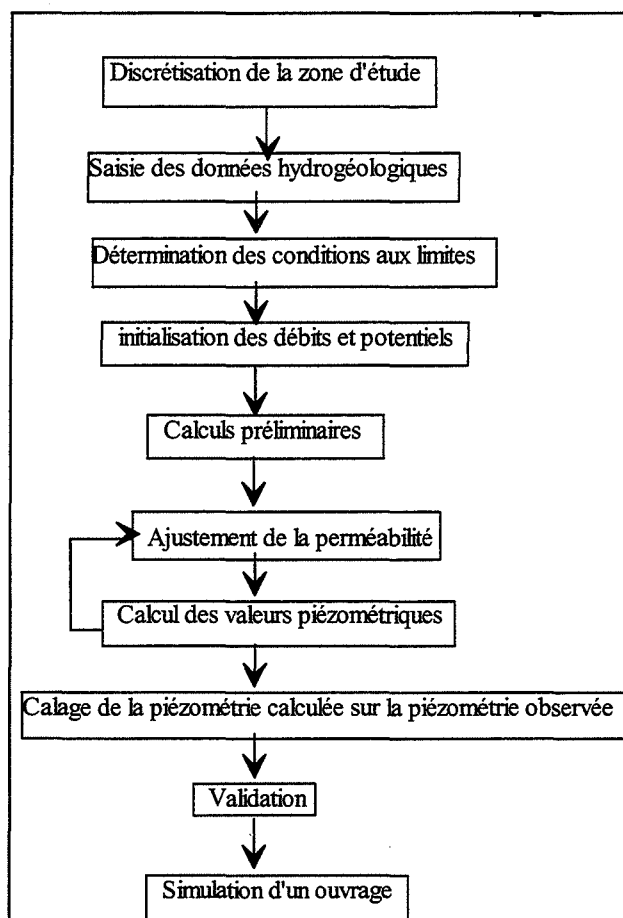


Figure 33: déroulement d'une modélisation hydrodynamique

a. Discretisation de l'espace

Discretiser une zone géographique consiste à l'inclure dans un rectangle puis à découper ce rectangle en un quadrillage régulier de n mailles. L'ensemble du quadrillage est le maillage. Chaque maille est repérée dans l'espace par ses coordonnées en ligne (I) et en colonne (J) et caractérisée par ses dimensions x et y . Les équations des écoulements en milieux poreux sont appliquées sur le noeud de chaque maille situé en son centre. Chaque maille est affectée d'un indicateur de reconnaissance de localisation. Elle peut être à l'intérieur du domaine, sur ses limites géographiques ou à l'extérieur. Ceci est valable lorsque le milieu est relativement homogène, ce qui est le cas des alluvions par opposition à des milieux fissurés.

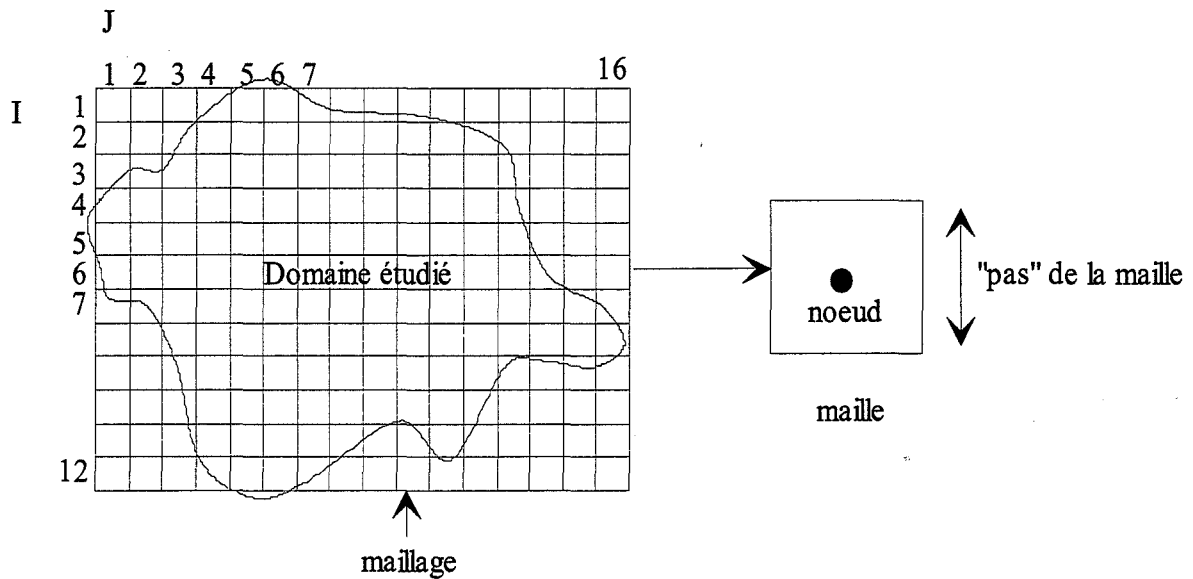


Figure 34: discrétisation de la zone d'étude

b. Equations de base des modèles hydrodynamiques

Les équations des écoulements en milieu poreux sont bien connues. Il s'agit d'un rappel utile pour mieux appréhender la « spatialisation » des données d'entrée des modèles hydrodynamiques. Ces équations s'expriment par l'équation de continuité. Considérant la masse volumique de l'eau ρ comme indépendante du temps, la somme des débits entrants et sortants dans un volume fermé de milieu poreux est nulle en régime permanent. En régime transitoire, la différence entre les débits entrants et sortants est égale à la quantité d'eau emmagasinée ou produite dans le volume élémentaire considéré, dans l'unité de temps.

$$v = -K \text{grad}(h)$$

Equation 1: équation de Darcy

Les équations de continuité et de Darcy, avec $T_i = bK_i$ (b : épaisseur de l'aquifère) permettent d'obtenir:

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} = S \frac{dH}{dt} + q$$

Equation 2: équation de diffusivité (modèle bidimensionnel)

$$\text{qui peut encore s'écrire: } \text{div}(T \text{grad} H) = S \frac{dH}{dt} + q$$

où q représente le débit échangé avec le milieu extérieur par unité de surface.

T et S sont les paramètres hydrauliques de l'aquifère: transmissivité (intégrale de la perméabilité sur l'épaisseur de la couche) et emmagasinement.

L'inconnue est donc H , (la hauteur piézométrique ou potentiel fonction de l'espace plan et du temps) $H = h(x, y, t)$.

L'équation de diffusivité est une « équation aux dérivées partielles » et l'intégrer revient à rechercher une fonction quelconque de x, y qui en soit la solution exacte dans le cas considéré. Ceci est généralement impossible dans notre cas ; il faut recourir à des techniques d'intégration approchée: les méthodes de discrétisation. Le problème posé, connaître H en tout point est remplacé par un problème simplifié. H est connue seulement en quelques points sur un maillage. De même, H n'est recherchée qu'aux noeuds du maillage et doit être représentative de la charge moyenne à l'intérieur d'une maille carrée ou rectangulaire entourant le noeud considéré. T, S et q sont aussi discrétisés. L'équation sur un tel domaine est écrite sur chacun des noeuds du maillage. L'inconnue est la piézométrie H recherchée à chaque noeud sauf sur ceux où il y a une condition aux limites. Ces méthodes de résolution sont les « éléments finis » ou les « différences finies ». Le terme « différences finies » donné à cette méthode vient de l'approximation d'une dérivée par le quotient de la différence de la valeur de la fonction entre deux points voisins, par la distance entre ces deux points. Une telle équation peut être écrite en chaque noeud du maillage considéré et en quatre noeuds voisins sauf sur ses limites où des paramètres de disposition de ces limites sont utilisés. Le procédé des « différences finies » est basé sur une discrétisation du domaine étudié en mailles carrées ou rectangulaires de taille constante ou variable selon la densité d'informations (perméabilité, altitude du substratum etc.). Ces procédés sont généralement appliqués à des milieux poreux, relativement homogènes tels que les aquifères en nappes alluviales.

L'Equation 2 en régime permanent devient:

$$T_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} = q(x, y)$$

1.2.2. DIFI

DIFI ou Différences Finies est le modèle hydrodynamique développé à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne dans les années 70 en langage Fortran. Il a été réécrit en langage C en 1994 et s'applique à des nappes libres. Le calcul est ici toujours réalisé en régime permanent.

a. Base de données hydrogéologiques

La discrétisation du domaine étudié est sous forme d'un maillage à mailles carrées. Pour chaque maille on renseigne H_0 le potentiel initial, K la perméabilité, Z l'altitude du substratum, A l'altitude de la surface du sol et Q les débits entrants ou sortants (respectivement positifs ou négatifs). L'ensemble de ces données sont entrées pour chaque maille d'abord par extraction à partir du Système d'Information Géographique (S.I.G., cf. 1.3) puis modifié localement si nécessaire à l'aide d'un fichier texte qui décrit aussi les caractéristiques générales du modèle.

- nombre de lignes et colonnes;
- longueur et largeur des mailles;
- epsilon: précision du calcul imposée par l'utilisateur;
- maximum d'itérations: nombre d'itérations à partir duquel le calcul est arrêté.

Les conditions aux limites peuvent être imposées:

- sur H (potentiel imposé ou conditions de Dirichlet) par l'intermédiaire d'une valeur négative interprétée par le programme comme fixe mais utilisée en valeur absolue;
- sur Q (conditions de Neumann) en valeurs négatives (pompages) ou positives (injections).

Ces conditions aux limites sont équivalentes, elles ne peuvent donc pas être imposées simultanément sur la même maille. En fonction du problème posé et des données disponibles, il faut choisir entre les deux types de conditions.

b. Convergence

La précision du calcul s'affine à chaque itération, des tests de sortie sont nécessaires. Le premier test est un nombre maximal d'itérations. Il est aussi possible d'imposer une valeur de fin de calcul qui corresponde à une réalité satisfaisante sur le terrain, compte tenu des incertitudes sur les données initiales. Le choix se porte généralement sur le décimètre ou le centimètre. Dès que $\max.(h_n - h_{n-1}) \leq \varepsilon$ est vérifié, avec ε la précision admise, le calcul est terminé. $(h_n - h_{n-1})$ est calculé en tout point du maillage.

1.2.3. Apports de la modélisation hydrodynamique pour l'aménagement de carrières

Extraire des graviers dans le lit majeur d'un fleuve revient à enlever à une formation alluviale une partie de ses matériaux. Cette intervention a des conséquences sur la souille elle-même et sur son environnement. Elle modifie notamment les profils hydrodynamiques souterrains et peut influencer la géomorphologie fluviale par « capture » lors d'événements climatiques exceptionnels.

a. Simulations d'implantation de carrières

Les extractions de graviers réalisées dans les lits majeurs provoquent en amont hydraulique un rabattement du toit de la nappe risquant d'entraîner une diminution sensible des débits d'exploitation des puits d'alimentation en eau potable éventuellement situés à proximité de la ballastière[P. Launay, 1981]. La position de la souille vis à vis du sens d'écoulement de la nappe est donc un facteur très important. L'impact est maximum lorsque la plus grande dimension de la gravière correspond à la direction d'écoulement. Après exploitation, dans le cas où la réhabilitation de la carrière est prévue par remblaiement, cela revient à remplacer le matériel alluvionnaire initial à perméabilité élevée par un autre matériau. Lorsqu'il s'agit d'un remblaiement partiel, la découverte (sol) est généralement utilisée. Sa perméabilité peut-être jusqu'à dix fois inférieure à celle des alluvions récentes. Dans le cas d'un remblaiement total, il faut utiliser d'autres matériaux inertes d'un point de vue chimique (par exemple: gravats, béton de démolition, produits de terrassement) dont la perméabilité est difficilement maîtrisable.

Les simulations de l'impact hydrodynamique de la carrière pouvant être réalisées par DIFI sont:

- le rôle de l'excavation elle-même, en imposant des perméabilités très fortes sur les mailles concernées par le projet. Cela revient à n'opposer « aucune » résistance à

l'écoulement de l'eau sur ces mailles, qui deviennent alors un plan d'eau libre. A l'intérieur, le niveau de l'eau dépend des caractéristiques de « l'encaissant »: piézométrie, géométrie de l'excavation et il peut évoluer en fonction d'un éventuel colmatage des berges;

- la géométrie de la carrière pour une surface constante, par rapport à la direction des écoulements souterrains et au gradient hydraulique;
- la réhabilitation par remblaiement en imposant sur les même mailles une perméabilité correspondant à celle du matériau utilisé;
- dans le cas d'une réhabilitation de la carrière sous la forme d'un plan d'eau, en imposant la hauteur d'eau aux limites de ce dernier (conditions de potentiel).

Les carrières influent sur la dynamique des nappes pendant et après l'exploitation. La modélisation hydrodynamique permet de prévoir et de quantifier cet impact. Mais les carrières sont des ouvrages de surface modeste en comparaison avec la Loire qui joue un rôle essentiel comme condition aux limites. Il est donc primordial de tenir compte aussi de la dynamique du fleuve.

b. Simulations appliquées à l'évolution géomorphologique fluviale

Lorsqu'un fleuve divague latéralement (comme la Loire entre Saint-Laurent-la-Conche et Naconne) cela peut provoquer, dans le cas où il draine la nappe des alluvions récentes, un déplacement équivalent de l'axe de drainage. S'il s'éloigne d'une zone de captages, une diminution des débits d'exhaure de ces ouvrages est constatée [C.P.G.F., 1979]. Ce phénomène est aggravé par l'incision générale observée sur les fleuves européens, y compris sur la Loire, qui provoque un rabattement des niveaux piézométriques et par conséquence une diminution de la puissance des nappes. En choisissant comme condition aux limites le niveau de l'eau dans la Loire, l'incision du lit est simulée en diminuant ce niveau dans chaque maille correspondant au cours d'eau. Pour cela il faut avoir à sa disposition deux profils en long et deux états piézométriques à deux époques suffisamment éloignées compte tenu de l'évolution décennale du phénomène d'incision.

Les modèles hydrodynamiques apportent une estimation quantitative de l'impact des carrières sur la nappe des alluvions récentes, pendant l'exploitation et après la réhabilitation. Il peuvent aussi prendre en compte les divagations latérales et l'incision du fleuve.

Pour effectuer des simulations, ces modèles nécessitent en entrée, des données géographiques (perméabilité, altitude du substratum, potentiel imposé, débits etc.). En sortie, le résultat est une répartition spatiale des piézométries calculées. Si les modèles

hydrodynamiques utilisent et restituent des données géographiques, ils ne gèrent pas d'autres données spatiales que celles dont ils ont besoin. Pourtant, l'utilisateur doit pouvoir replacer ces résultats dans leur contexte général qui intègre aussi l'occupation humaine et les contraintes réglementaires. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil spécialisé notamment dans la gestion et l'analyse des données géographiques.

1.3. Système d'Information Géographique (S.I.G.)

Il existe plusieurs définitions d'un S.I.G. Pour M. Didier, (1990) «un Système d'Information Géographique est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision». Pour d'autres auteurs, il comprend aussi le matériel informatique, les logiciels et le personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations spatialement référencées [De Blomac F. et al, 1994]. Quelles que soient les différentes définitions retenues qui correspondent à des approches complémentaires, «le S.I.G. a pour but d'améliorer la connaissance d'un milieu géographique et d'en permettre une meilleure gestion» [Pornon H., 1992]. Ces distinctions sont néanmoins importantes car dans le premier cas, une carte routière (par exemple) peut être considérée comme un S.I.G., dans le deuxième cas elle n'en représente qu'une infime partie. Nous ne retiendrons pas la première définition qui nous semble trop restrictive, la deuxième définition est beaucoup plus large et inclure le personnel est un concept important compte tenu du temps nécessaire à l'apprentissage du maniement des logiciels qui sont très complexes. Cependant, pour des commodités de langage nous opterons pour l'assimilation logiciel/S.I.G. Dans notre cas spécifique de l'outil d'aide à la décision, le S.I.G. en représentera seulement une partie. Si nous avons retenu la définition de F. de Blomac *et al*, l'O.A.D. (y compris les données, le logiciel et les modèles) n'aurait constitué qu'une partie du S.I.G.

Arc/Info, mis au point par ESRI (Etats Unis) est un S.I.G. qui peut fonctionner dans un environnement compatible PC ou dans notre cas, dans un environnement de station de travail sous Unix. Il a été choisi pour ces capacités à traiter indifféremment des données en mode vecteur, raster, en maillage triangulaire. Surtout, il peut exécuter des programmes externes écrits en C tels que des modèles hydrodynamiques, et permet par le biais d'un macro langage interne de créer des applications et des interfaces spécifiques.

L'ensemble des données géographiques nécessaires à la réalisation de l'O.A.D. sont généralement sous la forme de cartes en papier, bien que depuis les années 70 se soient

développés des logiciels d'aide à l'établissement de cartes. Il est donc aussi possible d'obtenir des données numérisées. Les informations géographiques quelle que soient leur forme, leur date de création, leur échelle et leur nature doivent pouvoir être exploitées ensemble. Pour cela, la première étape est de leur choisir un référentiel cartographique commun.

1.3.1. Projection cartographique

Les cartes localisent des objets géographiques sur la surface du globe. Ces objets sont référencés par rapport à un système de coordonnées variables (cartésiennes, géographiques et en projection) adapté à la zone étudiée. Dans le cadre du département de la Loire, c'est le système de projection de Lambert 2 étendu qui a été choisi car il est applicable sur l'ensemble du territoire français. Toutes les couches d'informations spatiales saisies ou importées sont géoréférencées dans ce système.

L'information spatiale contenue dans une carte est décrite en couches de points, lignes, aires ayant des caractéristiques homogènes (pays, parcelle etc.), surfaces qui représentent des valeurs continues (la topographie correspond à une infinité d'altitudes en valeur et en localisation). Dans le cadre de notre application, comme dans beaucoup d'autres, il faut donc considérer simultanément:

- des données vectorielles;
- des données continues.

1.3.2. Données sous forme vecteur

Les objets géographiques qui doivent entrer dans la composition de la base de données de l'O.A.D. sont de types variés: puits, sondages, profils en travers, réseau hydrographique, réseau routier ou encore les carrières, le bâti, les Z.N.I.E.F.F. etc.

Ces différents types d'objets de la surface de la terre sont représentés en deux dimensions par des points, des lignes et des surfaces ou polygones qui correspondent au « mode vecteur » aussi appelé modèle filaire [R. Laurini, F Milleret Raffort, 1993]. Les points définissent la localisation discrète d'entités géographiques trop petites pour être modélisées par des lignes ou des surfaces. Ils représentent par exemple des puits d'alimentation en eau potable. Les lignes ou arcs symbolisent des éléments trop fins pour être modélisés par des surfaces, tels que des routes, des ruisseaux ou des courbes de niveau. Les aires ou polygones correspondent à des entités homogènes comme le bâti, les communes, les parcelles, l'utilisation du sol ou un fleuve.

Le mode de stockage de ces données vecteur dans l'O.A.D. doit permettre:

- de donner des attributs aux entités graphiques, par exemple chaque maille (considérée ici comme un polygone) du maillage d'un modèle hydrodynamique doit comporter des informations de types variés: condition aux limites, paramètres hydrodynamiques, etc.
- de réaliser des analyses spatiales, par exemple rechercher des gisements extractibles sur la base de critères juridiques de distance minimale entre la future carrière et le fleuve (soit 35 m), de non proximité d'habitations, d'absence de périmètre de protection d'un captage, etc.

a. Couvertures, topologie et analyse spatiale

Certaines des données géographiques à intégrer dans l'O.A.D. peuvent être représentées sous mode vecteur. Ce mode de représentation demande une technique particulière de stockage sous la forme de couvertures qui va permettre la réalisation des analyses spatiales utiles à l'utilisateur. La recherche de sites extractibles sur le plan législatif ou d'un point de vue du gisement en est un exemple.

Une couverture est une version digitale d'une carte simple et ne décrit généralement qu'un seul type d'entités graphiques telles que, dans le cadre de notre application, le réseau hydrographique, les captages ou les périmètres de protection des captages. Les couvertures organisent l'information en couche thématiques. Une carte de base peut être "organisée" à partir d'une carte administrative ou autre (cf. Figure 35).

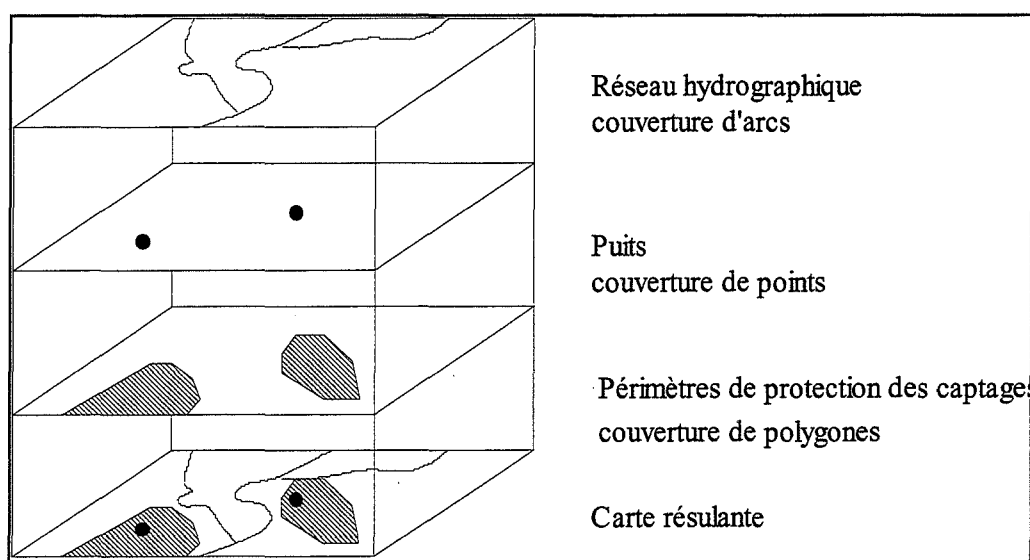


Figure 35: organisation thématique de l'information

La carte résultant de la superposition de plusieurs couvertures monothématiques contient les données graphiques et leurs attributs thématiques dans une surface donnée (cf. Figure 36).

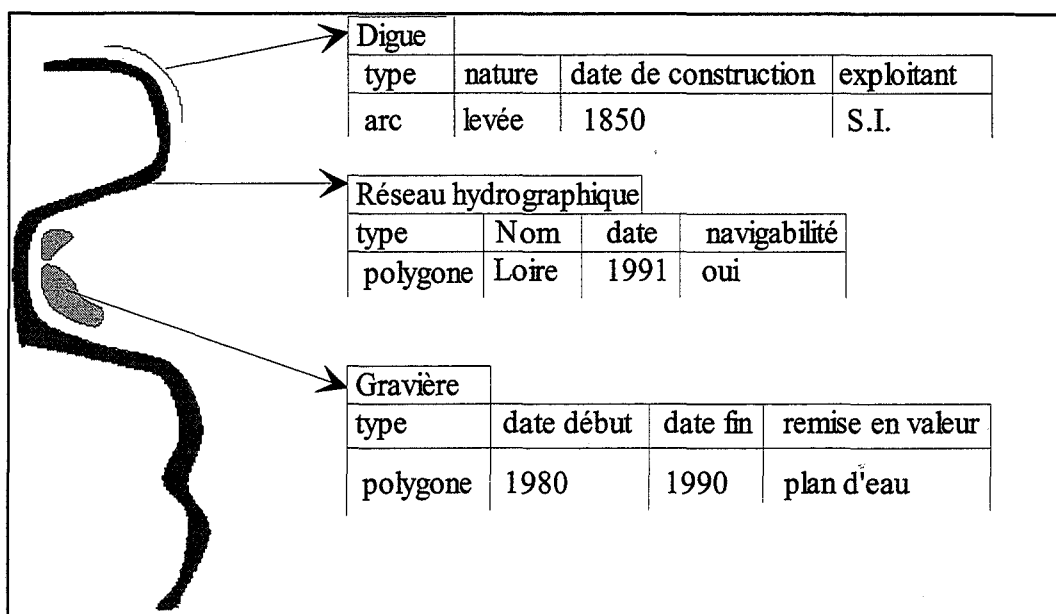


Figure 36: couverture: entités graphiques et attributs thématiques

Les attributs ou caractéristiques thématiques des entités graphiques sont stockés sous la forme de nombres et de caractères, par exemple pour le réseau hydrographique:

Type d'hydrographie:

1 = tronçon d'axe de cours d'eau naturel
2 = tronçon d'axe de canal

type d'écoulement:

1 = temporaire
2 = permanent

largeur: 65 mètresnom: Loire

Les descriptifs pour chaque segment de rivière sont stockés comme une série de valeurs ayant un format prédéfini tel que:

type d'hydrographie	navigabilité	type d'écoulement	largeur	nom
1	oui	2	65	Loire
2	non	2	5	Lignon
3	non	2	2	La Coise



ITEM

ENREGISTREMENT ↙

Une série de données est dite "table d'attributs". Chaque ligne d'une table est un *enregistrement*, chaque colonne est un *ITEM*. Un nombre associe les attributs avec les entités graphiques, une fois cette connexion établie il est possible de faire des requêtes sur la carte pour obtenir des informations, ou créer une carte basée sur les attributs stockés dans la table d'attributs. Un modèle hybride de données dit "modèle géorelationnel" est utilisé pour maintenir la connexion entre entités graphiques et leurs

données descriptives. Il est possible à tout moment d'importer de nouvelles cartes, de détruire ou modifier une couche et ses attributs. Un S.I.G. permet à chaque type d'information d'être gérée indépendamment.

Dans le cadre de la réalisation d'un O.A.D. pour des carrières cela permet de sélectionner les gisements potentiellement les plus intéressants à partir de critères attributaires tels que:

- épaisseur de découverte minimale (inférieur à 2 m);
- épaisseur de matériel alluvionnaire maximal (supérieur à 4 m).

De plus, la gestion indépendante des informations permet la mise à jour d'une seule couverture sans affecter la pérennité de l'ensemble de la base de données géographiques. Cette mise à jour peut concerner uniquement les attributs (date de fin d'autorisation d'exploiter d'une carrière dans le cas de l'acceptation d'une prolongation), ou alors les éléments graphiques (modification du polygone représentant une carrière).

La topologie est une procédure mathématique utilisée pour représenter ou modéliser des relations spatiales dans une base de données géographiques [P.A. Burroughs, 1993]. Elle permet de stocker ses données beaucoup plus facilement, et en plus grand nombre. Ceci se réalise par le biais du codage des relations entre entités spatiales et par leur organisation dans la base de données. Les concepts majeurs de la topologie sont:

- la connectivité: les arcs sont connectés entre eux par des « noeuds »;
- définition de surface: les arcs sont connectés pour entourer une surface définissant un polygone;
- contiguïté: les arcs ont une direction, un côté droit et un côté gauche.

La construction de la topologie est l'élément clé pour réaliser des analyses spatiales telles que la modélisation de flux dans un réseau, la combinaison des polygones adjacents ayant une caractéristique commune ou encore la superposition de couvertures, la création de « zones tampons » autour de points, arcs ou polygones. La géométrie concerne la taille, la forme, la position des entités géographiques. Elle complète la topologie.

Ces deux notions sont fondamentales, car ce sont elles qui permettent la réalisation des analyses spatiales en mode vecteur. L'application la plus directe dans le cadre de l'O.A.D. est la recherche de sites extractibles, non plus seulement d'un point de vue du gisement, mais en accord avec les contraintes juridiques actuelles.

b. Application à la prospection de carrières

L'analyse spatiale peut permettre la recherche de sites physiquement disponibles pour l'implantation de carrières, compte tenu des aménagements humains existants et des zones géologiquement et géomorphologiquement propices.

La recherche de sites d'exploitation de graviers demande une analyse préalable des données géographiques en vue de la réalisation d'un « schéma directeur » des activités d'extraction. Les informations nécessaires sont de nature hydrologique (réseau hydrographique, plans d'eau), géomorphologique (lit majeur et bande de méandrage) et humaine (occupation des sols). Le type de couverture choisi pour les représenter est fonction de leur nature. Les affluents de la Loire ne sont pas des rivières très larges, ils sont symbolisés par des arcs. Par contre la Loire atteint 100 m de largeur sur certains tronçons, la meilleure représentation du fleuve est une couverture de polygones de manière à prendre en compte cette vaste extension spatiale. Les données multicritères proviennent d'une série d'analyses spatiales sur chaque thème dont l'acquisition est issue de sources distinctes. Après avoir été saisies ou importées, la topologie est construite selon le type adéquat de couverture (cf. Tableau 6).

<i>Thème</i>	<i>composant</i>	<i>mode d'obtention</i>	<i>source</i>	<i>couverture</i>
hydrologie réseau hydro. plans d'eau	Loire	digitalisation	cartes I.G.N. 1/25000	polygones
	affluents	investissement	B.D. carto I.G.N.	arcs
géomorphologie	plan d'eau	digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	polygones
	lit majeur	analyse spatiale	M.N.T. I.G.N. 1/50 000	polygones
occupation hum. occupation du sol contraintes	B.M.	analyse spatiale	tracés historiques de la Loire	polygones
	bâti	digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	polygones
	routes nationales	digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	arcs
	routes dept.	digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	arcs
	voie ferrée	digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	arcs
	périmètres de protection des captages cimetières	digitalisation	carte technique	polygones
		digitalisation	carte I.G.N. 1/25000	points

Tableau 6: données géographiques pour un schéma directeur

Deux types de requête spatiale sont nécessaires dans notre cas: « à l'intérieur ou à l'extérieur de » et « proche de ».

Pour le premier type, il s'agit du lit majeur à l'intérieur duquel les futures extractions doivent être envisagées de par les caractéristiques géotechniques des alluvions récentes, propices à cette activité. La B.M. (bande de méandrage) a été déclarée inapte à cause des risques de divagation de la Loire, les sites doivent donc être localisés à l'extérieur de cette dernière. Ceci n'est pas un impératif car il n'existe aucune contrainte réglementaire en ce sens. Il s'agit plutôt d'une recommandation à l'issue de l'analyse géomorphologique (cf. première partie). Les périmètres de protection rapprochés et éloignés des captages

sont des sites protégés de toute source potentielle de pollution. Les carrières impliquent des affleurements de nappes, elles représentent donc une de ces sources potentielles par déversement accidentel de substances polluantes. Par conséquent, les sites sont à rechercher à l'extérieur des périmètres de protection des captages.

Pour le deuxième type, (« proche de ») il importe de ne pas chercher à placer une carrière trop près d'un aménagement existant dont la présence même est prohibitive. C'est le cas de tous les autres composants du schéma directeur. Il faut rechercher les:

- aires situées à plus de 35 m (distance minimale prévue par la loi) du réseau hydrographique;
- aires situées à plus de 50 m d'une voie de communication et de la voie ferrée;
- aires situées à plus de 200 m (distance habituelle mais sans valeur juridique pour éviter les problèmes de nuisances tels que les bruits et la poussière) des zones bâties et des cimetières ces derniers étant des sources potentielles de pollution bactérienne.

Ces valeurs sont indicatives (sauf pour le réseau hydrographique [Loi carrières, 1993]) et vont au-delà des prescriptions réglementaires actuelles. Cependant, compte tenu du durcissement législatif relatif aux carrières, il paraît prudent d'anticiper de manière à proposer des sites non litigieux. Enfin, les surfaces d'une superficie inférieure à 3 hectares ne sont pas prises en compte car elles restent du domaine artisanal et ne font pas l'objet d'une exploitation industrielle pour laquelle une étude d'impact est obligatoire.

L'analyse spatiale se déroule en quatre étapes:

1. recherche des *zones tampons* de 35 m autour des arcs et des polygones du réseau hydrographique, zones tampons de 50 m autour du réseau routier et ferroviaire et enfin des zones tampons de 200 m autour des polygones du bâti et des points des cimetières. Chacun de ces composants possède alors une « couverture tampon » de polygones qui lui est associée, utilisable pour l'élaboration du schéma directeur;
2. indépendamment des renseignements déjà présents dans la base de données attributaire de chacun des composants et qui sont conservés à l'issue de la création des zones tampons (cf. p. 134), un item « aptitude » leur est ajouté symbolisé par les valeurs 0 (interdit), 1 (déconseillé) et 2 (possible). La valeur 1 est donnée seulement à la B.M. qui représente l'unique critère d'expertise sans fondement réglementaire;
3. *superposition* de toutes les couvertures sur la base de l'item « aptitude » en crée une nouvelle qui comporte des polygones en 0, 1 et 2. Des priorités absolues sont imposées, quelques soient les couvertures, de la valeur 0 sur 1 et 2, et de 1 sur 2;
4. *sélection* de tous les polygones avec la valeur 2 et dont la superficie est inférieure à 3 hectares. Ils sont alors éliminés.

Le résultat de ces analyses spatiales et de ces requêtes est un schéma directeur pour la recherche de sites physiquement disponibles aux extractions de graviers (cf. Figure 37). Ce schéma directeur a été réalisé et inclu dans la base de données géographiques. Il correspond à des données de 1991 et nécessiterait une mise à jour de chaque couverture s'il devait être utilisé « demain ». L'organisation de la base de données géographiques en couches d'informations monothématiques, rend cette opération réalisable facilement d'un point de vue pratique, et ne dépend que de la disponibilité des données.

Mais toutes les données nécessaires dans l'O.A.D. ne sont pas vectorielles. Il faut également intégrer dans la B.D. géographique des données continues telles que la topographie, qui demandent un mode de représentation différent et autorisent des traitements spécifiques utiles à la résolution de notre problème.

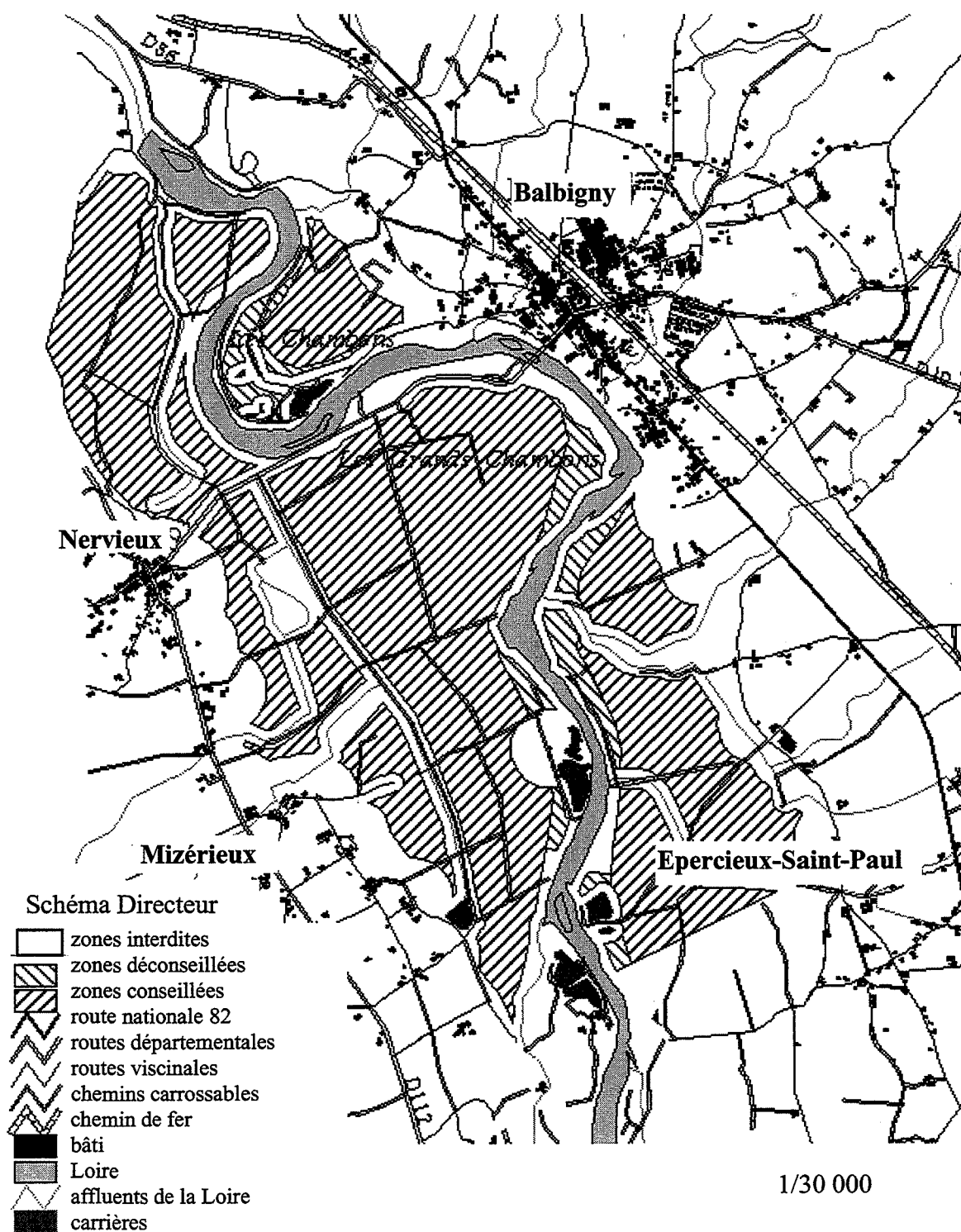


Figure 37: schéma directeur à Balbigny

1.3.3. Représentation des données continues

Les données continues sont des données surfaciques, sous forme raster appelées aussi modèle matriciel ; ou encore sous forme de maillages triangulaires.

Les données continues décrivent une entité géographique qui peut posséder une valeur différente en chacun des points qui la représentent sur la surface de la terre. La topographie, la pluviométrie en sont des exemples. Les courbes de niveau sont une technique classique pour les modéliser, utilisée dans les cartes topographiques (altitude). Il existe deux autres types de représentation des données continues, en mode raster (discrétisation de l'espace grâce à un maillage à mailles carrées) ou par triangulation (discrétisation de l'espace grâce à un maillage à mailles triangulaires). La taille des mailles est choisie en fonction du problème à résoudre et en fonction de la densité spatiale d'informations disponibles.

a. Mode raster

La grandeur continue est discrétisée en une matrice de cellules. Cette grille est organisée en colonnes et en lignes. Les cellules contiennent une valeur représentant un paramètre géographique unique tels que le type de sol ou l'orientation des pentes. Les données raster sont géoréférencées par le système de coordonnées dans lequel la grille a été saisie et par la taille des cellules en distances réelles. Ces coordonnées en x, y ainsi que la taille des cellules peuvent être utilisées pour déterminer la localisation géographique de chaque cellule. Les données raster peuvent être organisées en couches monothématiques comme les couvertures pour la modélisation géographique et l'analyse. De nombreux S.I.G. possèdent un module raster. Celui d'Arc/Info utilise un modèle géorelationnel combinant un modèle raster avec un modèle relationnel pour les attributs. Une matrice raster est similaire à une couverture. Les données des différents thèmes sont stockées dans des matrices différentes.

Deux types principaux de problèmes sont particulièrement appropriés au traitement en mode raster dans le cadre de notre application:

- problèmes locaux, la valeur des cellules de la matrice raster initiale conditionne celles de la matrice raster finale (réalisation de classes);
- problèmes de voisinage comme la modélisation de données continues (calculs de pentes, d'orientations ou de concavités;

Le premier type de données traitées en mode raster sont celles qui sont déjà sous cette forme tels que les Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.) fournis par l'I.G.N. Toutes les couvertures en mode vecteur peuvent aussi être transformées en matrices pour être

analysées, combinées avec des données continues. Le choix de la taille de la maille est alors un paramètre important qui conditionne la précision du résultat, mais une résolution trop fine implique des fichiers volumineux et un temps de réponse à l'analyse important. Réciproquement, les matrices raster sont convertibles en mode vecteur. Les images scannées et les surfaces modélisées par triangulation peuvent être transformées en données raster.

Les données raster ont déjà été abondamment utilisées dans l'étude géomorphologique de la Loire pour la délimitation du lit majeur. *Mais, dans le cadre de la simulation hydrodynamique, ils ont aussi un rôle important à jouer. **La discrétisation en mailles carrées de la zone d'étude revient à créer une matrice de données raster.** A chaque maille correspond une valeur de perméabilité, altitude du substratum, piézométrie, conditions initiales. Le résultat du calcul est une matrice de la piézométrie simulée qui peut être combinée à celui de la piézométrie initiale. Ainsi une simple soustraction maille par maille (piézométrie initiale - piézométrie calculée) donne une représentation de l'extension de l'impact de l'aménagement sur la nappe.*

Mais dans le cadre de notre application, il est nécessaire de pouvoir passer d'une représentation classique de la piézométrie sous forme de couverture d'arcs à une représentation en mode raster. Ceci peut être réalisé en passant par un stade intermédiaire de triangulation. En effet, triangulation et données raster sont utilisés indifféremment pour modéliser des données continues, mais la triangulation possède plusieurs avantages. Il est possible de générer des surfaces à partir de couvertures de points, d'arcs et de polygones. Ceci est particulièrement intéressant s'il est nécessaire, par exemple, d'utiliser des courbes isopièzes pour créer une carte de gradient hydraulique. Il faut alors construire un M.N.T. puis faire un calcul de pentes. De même, à partir du résultat en mode raster d'une simulation hydrodynamique, la transformation de la matrice en TIN permet ensuite de générer des courbes isopièzes.

b. Triangulation

La triangulation est un autre mode de représentation d'une surface appelé TIN (Triangular Irregular Network) pour des commodités de langage. Il est constitué par des points irrégulièrement distribués chacun avec des coordonnées en x, y, z. Idéalement, ces points sont localisés de manière à saisir les variations importantes de la morphologie. Ils sont reliés entre eux par des segments de manière à obtenir une mosaïque de triangles (cf. Figure 38).

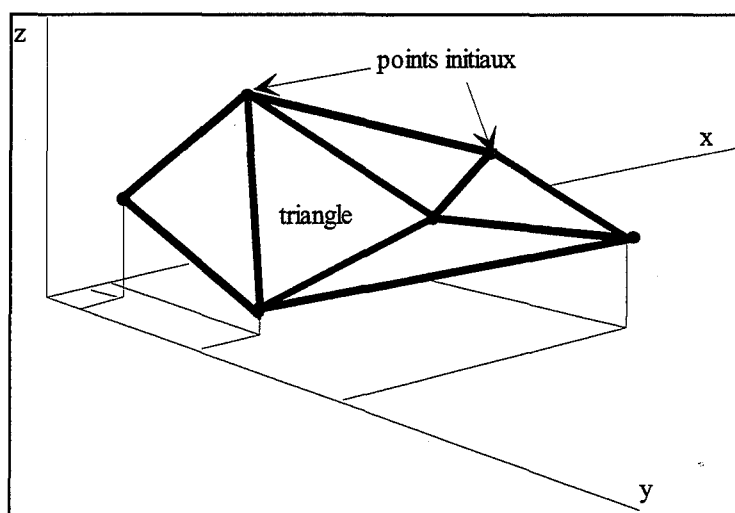


Figure 38: triangulation

Les données initiales à partir desquelles un TIN est réalisable sont:

- couvertures de points, arcs (courbes de niveau) et polygones;
- points dans des fichiers texte (ASCII);
- données raster;
- TINs existants.

Il est particulièrement intéressant d'utiliser conjointement des données raster ou des couvertures d'arcs avec leur représentation sous forme de TIN. Cela peut permettre, par exemple d'obtenir de résultat matriciel (raster) d'une simulation sous la forme d'une couverture vectorielle de la piézométrie calculée.

c. Utilisation conjointe des TINs et des données en mode raster dans la modélisation hydrodynamique

Pour faciliter l'interprétation des résultats des modélisations hydrodynamiques, il est nécessaire d'utiliser simultanément les deux modes de représentations de surfaces et leurs fonctionnalités spécifiques (cf. Figure 39). La piézométrie de calage est une couverture d'arcs qui est la seule représentation proposée puisqu'elle est la plus classiquement utilisée pour l'analyse. A partir de cette couverture, nous créons un TIN qui en modélise la surface. Ce TIN est à son tour transformé en représentation raster. Les piézométries initiales et calculées sont alors toutes les deux en mode raster. La matrice issue de la simulation est alors transformée en TIN à partir duquel une couverture d'arcs représentant la piézométrie calculée est générée. Les deux piézométries sont alors sous des modes de représentation homogènes. Leur superposition permet de visualiser rapidement les modifications de la nappe prévus par le calcul hydrodynamique. Ceci n'est cependant qu'une représentation graphique. Pour quantifier l'impact de l'aménagement sur la piézométrie, les deux matrices des piézométries de calage et

calculée sont soustraits pour proposer une cartographie d'impact. La matrice résultante possède dans chaque maille une valeur en mètre de cette différence.

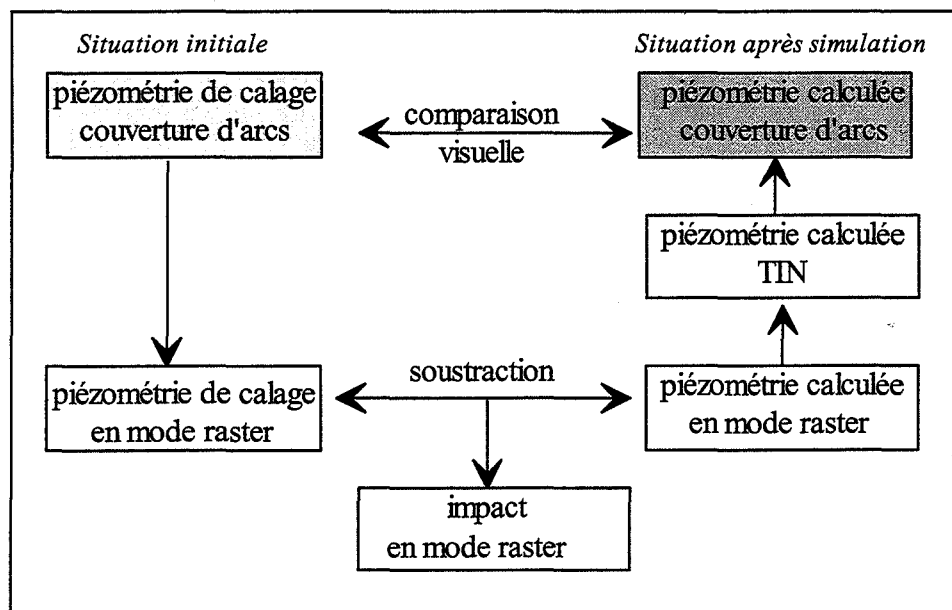


Figure 39: utilisation des modes de représentation des surfaces pour les modèles hydrodynamiques

Pour l'utilisateur final, seuls les résultats de la simulation sous forme de couverture d'arcs, la forme raster du résultat du calcul des impacts et la piézométrie de calage sont nécessaires.

1.3.4. Intérêt du traitement de l'information géographique dans l'O.A.D.

L'élaboration de l'O.A.D dans le domaine traité peut bénéficier de tous les types de représentation de l'information géographique. En effet, l'exemple de l'élaboration du schéma directeur fait apparaître l'importance de l'ensemble des données en mode vecteur (points, arcs et polygones), celle des analyses spatiales (zones tampons, superposition) et celle de la base de données attributaire (interrogation, sélection et suppression des entités « indésirables »). L'exemple de l'utilisation conjointe des modes raster et de la triangulation pour la représentation des surfaces à partir de matrices (représentation raster) ou de couvertures d'arcs, montre l'apport de ces traitements pour aboutir à une visualisation graphique des résultats d'une simulation hydrodynamique. Selon l'objectif poursuivi lors de la saisie d'une couche d'information, celle-ci pourra être stockée sous une seule forme (bâti - couverture de polygones) ou sous plusieurs formes.

Par exemple, la piézométrie est saisie par des arcs, elle est conservée ainsi pour la visualisation. Mais elle est aussi indispensable sous la forme raster. Le TIN

intermédiaire qui a servi à construire cette matrice, n'ayant plus aucune utilité peut être supprimé de la base de données. De la même manière les « couvertures tampons » du schéma directeur sont éliminées.

Toutes ces opérations de traitement de l'information spatiale sont nécessaires mais elles n'intéressent pas directement l'utilisateur final. Il est donc indispensable de développer un outil spécifique à la problématique carrière qui propose seulement les résultats des simulations hydrodynamiques et des analyses spatiales.

1.3.5. Développement d'un outil spécifique

Il faut créer une application qui soit l'adaptation du S.I.G. aux besoins particuliers des planificateurs et des acteurs de la problématique « carrières ». Il s'agit:

- de créer des menus spécialisés dans lesquels l'utilisateur aura accès seulement aux commandes qui l'intéressent à partir de mots correspondant à son vocabulaire courant;
- de regrouper dans des « macro-commandes » des fonctions que l'utilisateur enchaîne souvent;
- de définir un modèle de données correspondant aux carrières à leur environnement par exemple une classe d'objets avec une symbologie et des attributs;
- de préécrire des requêtes d'interrogation permettant l'exploitation des données.

Ceci peut être réalisé grâce à des programmes écrits en AML (cf. annexes 4) et en langage C à côté et dans le S.I.G. de façon à le masquer complètement pour un environnement de travail personnalisé. Il sera nécessaire de développer la fonction de simulation hydrodynamique qui n'existe pas dans le noyau de base du S.I.G. Finalement, notre application finale regroupera à la fois un modèle de données, de traitement de ces données, un ensemble de requêtes, de menus, de fonctions additionnelles, de macro-commandes englobées dans un applicatif complet.

a. Utilisation du langage AML pour la visualisation et l'analyse des résultats d'une simulation hydrodynamique

Si nous reprenons l'exemple de la visualisation du résultat d'une simulation hydrodynamique et du calcul des impacts d'un aménagement sur la nappe (cf. p. 143), le langage AML permet d'automatiser les opérations et d'autoriser seulement la visualisation des données initiales ou calculées nécessaires à l'analyse. Ces données sont:

- la piézométrie de calage (couverture d'arcs);
- la piézométrie calculée (couverture d'arcs);
- les impacts (mode raster).

Un premier programme décrit la base de données sollicitée et initialise les variables (couvertures, modes raster ou TINs) nécessaires. Ce programme 1 appelle un menu spécifique qui assure la visualisation et le calcul. Le menu est lui-même un programme AML décrivant les outils utilisés, les données et les actions à entreprendre. Dans cet exemple, il doit proposer les trois données ci-dessus et pour être complet, l'interrogation cellule par cellule des valeurs de la matrice des impacts. La simple visualisation de cette matrice demande l'exécution d'un programme 2 qui va chercher dans la base de données

s'il existe déjà une forme raster de la piézométrie calculée (texte conditionnel). Dans ce cas, elle résulte d'une simulation précédente et doit être supprimée (manipulation de variable). Ensuite, il effectue la soustraction des deux matrices piézométrie initiale - piézométrie calculée. Le menu en assure la visualisation. En sélectionnant la cellule désirée de la matrice des impacts, la valeur s'affiche (cf. Figure 40). La seule opération informatique de l'utilisateur est de lancer le premier programme grâce à une commande très simple. Il n'en voit pas le contenu, mais uniquement le menu qui s'affiche directement à l'écran. Après exécution du programme 1, le programme 2 est lancé et permet de voir directement la représentation raster des impacts.

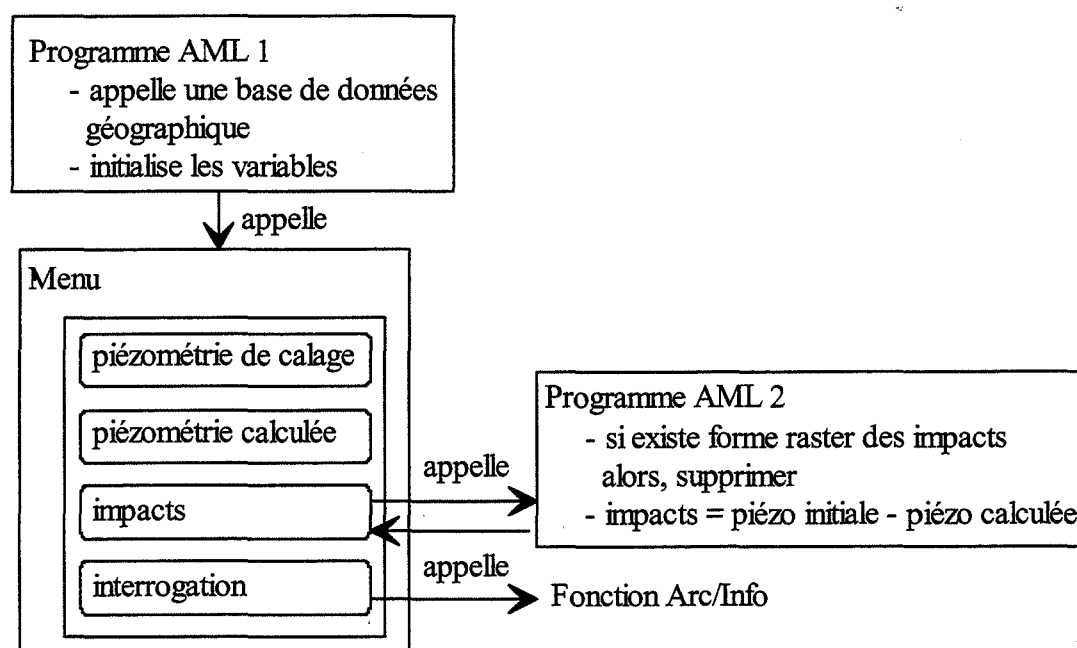


Figure 40: utilisation d'AML pour l'analyse des résultats de simulations hydrodynamiques

En généralisant cette démarche à l'ensemble des données et des traitements, le langage AML permet de poser les bases conceptuelles d'un outil d'aide à la décision interactif. L'interface homme-machine est un des éléments essentiels, il appelle les programmes de calcul qui s'exécutent en arrière plan et assure principalement la visualisation des résultats. Mais l'efficacité de l'outil dépend surtout de l'organisation de la base de données spatiales.

b. Base de données spatiales

L'organisation de la base de données spatiales doit satisfaire les objectifs fixés pour l'outil d'aide à la décision tout en répondant au mieux à l'architecture informatique de cet outil. Pour cela elle doit comprendre toutes les données nécessaires mais sans redondance bien qu'une même information puisse être utile sous deux formes

graphiques différentes. En amont de ces préoccupations qui sont déjà directement appliquées à l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision, des étapes intermédiaires sont indispensables qui identifient les sources, la numérisation, la pérennité et la qualité des données. La structure de la base de données n'est élaborée qu'à l'issue de toutes ces étapes.

– Les sources de données

Une grande variété de données est nécessaire d'une part pour alimenter les modèles hydrodynamiques, et d'autre part pour avoir une vision globale du milieu. Ces informations ont trait à l'hydrodynamique, l'hydrologie, la géomorphologie et l'occupation humaine. Il s'agit:

- de documentations techniques sur support papier (études C.P.G.F. sur les alluvions récentes de la Loire);
- de documents historiques (anciens tracés de la Loire);
- de photographies aériennes;
- de sources informatiques externes: en provenance de l'I.G.N. (BD Carto) directement en format Arc/Info, ou de la DDE (profils de la Loire) sous Excel.

En fonction des informations à extraire de ces sources, le meilleur mode de représentation en données discrètes (points, arcs ou polygones) ou continues (mode raster, TIN, image) est choisi (cf. Figure 41).

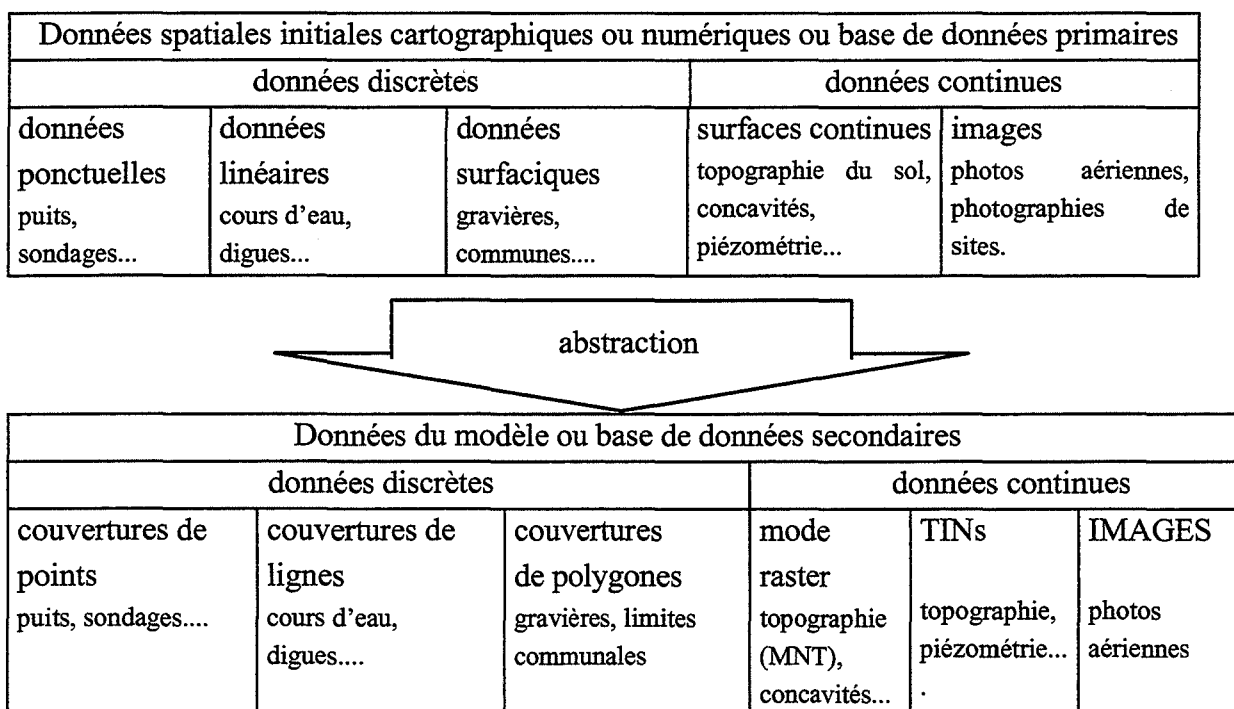


Figure 41: choix du mode de représentation des données spatiales initiales.

– Numérisation

Selon leur nature les données sont digitalisées, scannées, importées ou directement intégrées dans la base de données lorsque leur format le permet (cf. Figure 42).

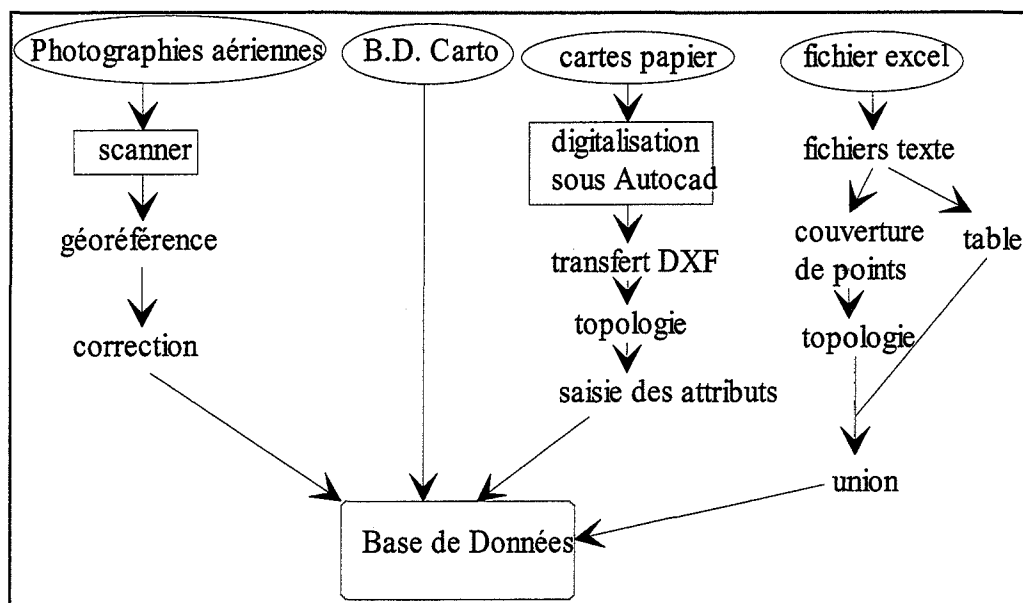


Figure 42: numérisation des données

Toutes les données discrètes sont digitalisées en points, lignes et polygones sous AutoCad. Le format d'échange DXF permet de les intégrer dans Arc/Info. Grâce à la construction de la topologie (cf. p. 134), les données numérisées sont structurées spatialement et sont intégrées dans la base de données géographiques. Selon l'utilisation qui en sera faite (simple visualisation d'un objet informatif, objet d'analyse spatiale ou de calcul) les champs d'attributs adéquats sont ajoutés à leurs tables initiales. Les attributs sont saisis manuellement. Les couvertures deviennent alors complètement opérationnelles.

Les photographies aériennes sont scannées en format TIF (Tag Image File) classique. Elles sont géoréférencées à l'aide de couvertures existantes d'objets qui apparaissent sur la photographie. Le calage de points caractéristiques (carrefours, ponts etc.) aboutit à une rectification indispensable à cause des distorsions qui augmentent en s'éloignant du centre de la photographie. Les photographies aériennes utilisées dans le cadre de notre application ont subi ces traitements.

Les données externes en format Excel demandent un effort d'intégration. Il s'agit de 41 profils en travers de la Loire réalisés par un géomètre en 1994, à la demande de la DDE. Les fichiers comportent les coordonnées en x, y, z des points mesurés. Les données en x et y de chaque profil sont transférées dans un fichier texte, et les valeurs en z sont exportées de la même manière mais dans un autre fichier texte. Arc/Info génère des

points à partir du premier fichier. La construction de la topologie de points est suivie par l'ajout d'un ITEM Z alimenté par les valeurs contenues dans le fichier texte des altitudes.

– Pérennité des données

Il existe différents types de données selon leur pérennité dans le temps:

- *données invariables dans le temps*, à l'échelle considérée, telles que les propriétés de l'aquifère (perméabilité en dehors des zones potentiellement soumises au colmatage, altitude du substratum), la topographie (avec une précision de ± 2 m sur les données de l'I.G.N. et dans une région de plaine, l'érosion n'a pas de rôle significatif), les accidents tectoniques (la plaine du Forez n'est pas dans une zone sismique très active);
- *données variables à l'échelle de la décennie*, telles que le tracé en plan et le profil en long de la Loire, mais aussi l'occupation humaine qui évolue avec le bâti, le réseau routier etc.
- *données variables à l'échelle annuelle voire journalière*, pour analyser le comportement de l'hydrosystème, les piézométries historiques, les anciens profils en long de la Loire, les pluviométries efficaces sont indispensables. Le cas idéal serait d'avoir ces informations en séries continues dans l'espace et dans le temps, mais elles sont seulement disponibles à des instants précis et leur cartographie résulte de l'interprétation de mesures ponctuelles.

L'organisation thématique des données dans le S.I.G. permet une mise à jour sans modifier la structure de l'ensemble. Plusieurs cas peuvent se présenter, par exemple:

- une nouvelle étude hydrogéologique vient d'être réalisée qui comprend une carte piézométrique. L'ancienne couverture est conservée, sa valeur est informative car elle reflète l'état de la nappe à un instant $x - n$, utile à l'analyse de sa dynamique. La nouvelle piézométrie remplace l'ancienne et est utilisée par le modèle hydrodynamique; autre exemple,
- une bretelle d'autoroute est construite. La couverture est modifiée sans sauvegarde de l'état antérieur.

– Qualité des données

La qualité des données contenues dans la base de données géographiques dépend de celle des documents initiaux les contenant et en particulier du choix de l'échelle de restitution et de la méthode de levé. L'état de conservation est un facteur important surtout pour la cartographie de la Loire en 1849. Un S.I.G. peut restituer l'information à des échelles très variables (1/1 000), nettement supérieures à celle du lever (1/25 000). La qualité des résultats des simulations ont une précision qui reste fonction des mesures

de terrain et des hypothèses d'interpolation entre les points de mesure. Dans le cas de la digitalisation d'une carte, la précision du résultat est fonction de celle du document initial: les données graphiques au 1/25 000 digitalisées auront une précision de 15 à 20 m (la déviation de l'opérateur avec la souris du digitaliseur pouvant atteindre un demi millimètre). Pour la scannérisation d'une photographie aérienne, le résultat théorique correspond d'une part à la résolution du scanner: avec une résolution de 200 DPI (200 points par pouce) la précision est d'un dixième de millimètres ce qui correspond à la taille des pixels, et d'autre part à l'échelle des photographies.

Les données anciennes ont une fiabilité inférieure à celle des données récentes. Par exemple, le bâti qui évolue chaque année est digitalisé sur la carte topographique de l'IGN au 1/25 000 de 1991. Il n'existe pas de source postérieure à 1991; aussi ce choix a été maintenu, mais la couverture du bâti en 1996 n'est pas totalement fiable puisque aucune des constructions réalisées entre 1991 et 1996 n'est présente dans la base de données. Par conséquent, la mise à jour des données « périssables » est une fonction essentielle.

Enfin, les informations ne sont pas disponibles sur la totalité de la plaine du Forez. Elles ne sont pas homogènes en précision, fiabilité et mise à jour. Par exemple, les données piézométriques sur l'ensemble des alluvions récentes de mai 1995 sont au 1/25 000, celles de Balbigny sont au 1/10 000 et datent de 1981.

– Structure de la base de données

Plusieurs critères peuvent servir de base à la construction de la base de données:

- le thème auquel les données appartiennent (géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, occupation humaine etc.);
- la localisation et l'extension géographique: les informations saisies à petite échelle (1/100 000) ont une précision dix fois inférieure à celle des données saisies à grande échelle (1/10 000);
- la fonction qui leur est destinée: simple objet d'information, donnée temporaire, ou future base de calcul;
- les données à réactualiser sont accessibles en écriture aux utilisateurs, les données intemporelles ne le sont pas puisqu'elles ne nécessitent pas de mise à jour.

L'organisation de la base de données peut être conçue de manière à permettre un accès par site géographique, par thème et doit donner accès aux informations descriptives. Dans le cadre de simulations hydrodynamiques, les résultats des calculs sont séparés des données initiales et doivent pouvoir être comparés. Les données anciennes dont la fiabilité ne peut plus être garantie doivent être signalées avec une recommandation de réactualisation.

1.3.6. S.I.G. pour l'Aide à la Décision en matière d'extraction de sables et graviers

Un O.A.D. utilisera l'essentiel des fonctions du S.I.G. qui en représentera donc le coeur. Le S.I.G. assure des fonctions qui peuvent être groupées en trois catégories: information, génération de scénarios, et support de décision

Les fonctions d'information sont l'acquisition de données, l'analyse spatiale et l'affichage graphique. L'acquisition de données comprend la digitalisation de cartes, la saisie des attributs, les importations de données externes numériques ou cartographiques. L'analyse spatiale crée de nouvelles données spécifiques à partir de celles contenues dans la base de données géographiques. La génération de scénarios et la simulation sont des fonctions clés qui demandent le couplage du S.I.G. avec les modèles hydrodynamiques. L'utilisation des modèles est facilitée grâce aux fonctions d'information qui permettent en plus de l'affichage des résultats, l'affichage simultané de paramètres anthropiques. La génération de scénarios permet de simuler plusieurs aménagements: gravières en exploitation ou réhabilitées, captages d'eau souterraine.

Outil	fonctions	adéquation	inadéquation
dynamique des systèmes	- analyse du fonctionnement de systèmes dynamiques complexes; - formalisation par des diagrammes causals; - quantification des phénomènes par modélisation.	- analyse du fonctionnement de l'hydrosystème fluvial à l'échelle globale; - formalisation du résultat de l'analyse sous une forme simple;	- prise en compte de la dimension spatiale des phénomènes difficile; - pas de quantification raisonnable possible des impacts des aménagements hydrauliques;
modèle hydrodynamique	simulations d'ouvrages dans un aquifère libre en deux dimensions;	quantification des impacts d'une carrière et/ou d'un captage sur les nappes alluviales;	- résultats numériques non facilement exploitables dans le cadre d'un O.A.D.; - pas de prise en compte des paramètres anthropiques; - échelle de travail seulement locale;
S.I.G.	- gestion de tout types de données géographiques: saisie, création de base de données, mise à jour; - analyse spatiale sur données raster et vecteur; - développement d'outils spécifiques;	- gestion des données hydrogéologiques, anthropiques, etc. échelle locale ou régionale; - recherche de gisements, recherche de sites extractibles selon les termes juridiques actuels; - couplage des modèles hydrodynamiques avec le S.I.G., réalisation d'interfaces homme-machine spécifiques.	pas de fonction de modélisation hydrodynamique.

Tableau 7: bilan de l'adéquation et de l'inadéquation des outils entrant dans la composition de l'O.A.D.

1.4. Modèles hydrodynamiques couplés à un S.I.G.

Les recherches effectuées depuis cinq ans sur les apports du couplage entre des modèles hydrodynamiques et des S.I.G. vont dans deux directions. Dans un premier temps, nous évoquons des systèmes visant à rendre l'utilisation des modèles plus aisée grâce à une interface homme-machine qui permette la saisie et l'accès aux données spécifiques. Ces recherches visent à créer un type d'outil très spécifique, destiné aux hydrogéologues. Ces outils ont été appliqués sur des sites précis dans le cadre de leur élaboration, mais leur finalité est leur exportation. Dans un deuxième temps, nous décrirons succinctement des applications précises qui ont été réalisées sans privilégier la construction d'un outil particulier dans le cadre d'une demande de gestion de l'eau souterraine ou de protection d'écosystèmes liés au niveau piézométrique des aquifères.

1.4.1. Modèles hydrodynamiques couplés à un S.I.G

J. Fürst *et al.* mettent l'accent en 1994 sur les avantages d'Arc/Info et de GRASS dans la gestion de l'eau souterraine. Les apports principaux concernent la rapidité des calculs de simulation hydrodynamique, les accès aisés à la base de données, la visualisation graphique des résultats de simulations qui facilitent l'exploitation des résultats, les fonctions d'analyse spatiale spécifiques au S.I.G. pour obtenir des informations complémentaires dérivées des résultats primaires (gradient hydraulique à partir de la piézométrie). D'après Fürst *et al.* les tâches d'un O.A.D. pour la gestion des eaux souterraines peuvent être regroupées en trois catégories: l'information, la génération de scénarios et la simulation. L'information comprend la saisie (digitalisation, import/export et bases de données externes) et l'analyse des données (informations spécifiques à l'aquifère tel qu'il est représenté dans la base de données, l'analyse spatiale, l'analyse de proximité, les fonctions statistiques etc.) et l'affichage. La génération de scénarios et la simulation sont les deux tâches clés. Un modèle hydrodynamique aux différences finies en deux dimensions est utilisé pour simuler le comportement du flux souterrain. Ce modèle est intégré dans l'O.A.D. Toutes les caractéristiques du modèle sont dessinées interactivement dans un modèle raster. La définition des conditions aux limites utilise des cartes disponibles dans le S.I.G. Le format des résultats numériques des modèles est converti dans le format du S.I.G. et sont intégrés dans la base de données géographiques. Ces résultats peuvent alors être visualisés graphiquement et être comparés à d'autres informations de la base de données. Un module a été développé spécialement pour l'interprétation et la comparaison de scénarios. En même temps, des cartes colorées avec des légendes

dynamiques c'est-à-dire que l'utilisateur peut modifier lui-même, des sections en travers sont intégrées pour aider la compréhension des scénarios.

H.P. Nachtnebel *et al.* identifient en 1993 les exigences des utilisateurs des modèles hydrodynamiques et leur proposent un outil de saisie ou d'importation des données grâce à une interface spécifique. Cette même interface leur facilite la définition des conditions aux limites, des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, des entrées et des sorties du système. La visualisation des résultats de simulation est primordiale surtout pour comparer les impacts de scénarios d'aménagement entre eux. La base de données traite indifféremment des séries temporelles (pluviométrie), des informations spatiales, des tables d'attributs et des textes de commentaires. Ces données sont groupées en blocs qui décrivent un seul objet. La communication avec la base de données est assurée par une interface graphique. Le modèle doit assumer l'affichage du maillage, la définition des conditions aux limites et de leurs caractéristiques hydrauliques, l'identification des entrées et des sorties du système, l'interpolation des données hydrogéologiques et leur attribution dans les cellules du maillage. Le modèle hydrodynamique utilisé est un modèle en trois dimensions aux différences finies, et à mailles variables [McDonald J.M. et al. 1988]. La définition des limites est basée sur les observations de terrain et sur les conditions hydrogéologiques illustrées par une carte incluant les relevés des informations ponctuelles. Les conditions de Dirichlet sont associées avec une table d'attributs de la rivière et sont accessibles directement comme des objets de la base de données. Les résultats des simulations hydrodynamiques sont visualisés par le S.I.G. qui interpole les valeurs calculées à l'intérieur de chaque maille du modèle. Une carte topographique scannée apparaît en arrière plan pour aider l'analyse par un contexte géographique plus précis.

En Hollande, la demande croissante en modèles hydrogéologiques intégrés à des outils de gestion environnementaux conduit l'Institut en Géosciences Appliquées à créer EGIS (Evaluation of Groundwater Information System), un système d'informations « géohydrologiques » [F. Deckers, 1993]. Il a pour objectif de donner les supports de décision indispensables à tout projet situé dans un contexte hydrogéologique. Il concerne plus précisément la reconnaissance et la gestion de l'eau souterraine. Il regroupe un gestionnaire de données (ORACLE), un modèle hydrodynamique (MODFLOW) et un S.I.G. La convivialité est assurée par une interface utilisateur développée sous Unix. EGIS assure le stockage et la mise à jour des données hydrogéologiques collectées sur la surface étudiée. Un modèle hydrogéologique dérive de ces données, dont l'exploitation permet la simulation de scénarios d'aménagements et donne les réponses à des questions du type « que se passe-t-il si? ».

<i>Fürst</i>	
S.I.G.: GRASS (raster) et Arc/Info (vecteur)	
• Saisie	☞ digitalisation
	☞ import/export
	☞ B.D. externes
• Analyse	☞ spatiale
	☞ de proximité
	☞ statistique
• Affichage	☞ interface
Modèle hydrodynamique en 2 dimensions et aux différences finies	simulations: implantation captages

<i>Bilan:</i>
• l'échelle de travail est dictée par la taille de la zone à modéliser; • bonne adéquation avec notre objectif au niveau du couplage S.I.G./modèle hydrodynamique; • spécialisation hydrogéologique superflue pour un O.A.D. carrières; • aucune prise en compte des paramètres anthropiques

<i>Nachtnebel</i>	
ORACLE	stockage et mise à jour des données
modèle hydrodynamique en 2,5 dimensions	simulations: implantation captages
S.I.G.: Smallworld	interface visualisation

<i>Bilan:</i>
• échelle de travail nationale; • un gestionnaire de données comme ORACLE n'est pas justifiable dans notre cas; • aucune prise en compte des paramètres anthropiques

<i>Deckers EGIS</i>	
ORACLE	stockage et mise à jour des données
modèle hydrodynamique en 2,5 dimensions	simulation
S.I.G.: Smallworld	interface visualisation

<i>Bilan:</i>
• échelle de travail nationale; • un gestionnaire de données comme ORACLE n'est pas justifiable dans notre cas; • aucune prise en compte des paramètres anthropiques

Tableau 8: adéquation d'O.A.D. existants à la problématique « carrières »

Les O.A.D. réalisés sur la base du couplage d'un S.I.G. et d'un modèle en montrant les avantages en terme de rapidité de calcul, de visualisation des résultats de simulations et de génération de scénarios. Néanmoins, ces O.A.D. s'adressent à des hydrogéologues et ont pour vocation de répondre aux besoins de ces derniers. Ils ne prennent donc pas en compte les paramètres anthropiques qui sont très importants dans notre problématique

notamment en matière juridique. Par contre, ils proposent des fonctions de saisie des données, de calage des modèles qui sont intéressantes, mais ces fonctions ne doivent pas obligatoirement faire partie d'un « O.A.D. carrières » qui propose un modèle déjà calé et validé.

L'échelle spatiale de travail dans ces O.A.D. est dictée par la zone géographique à modéliser, locale ou nationale (pour la Hollande). Nous choisirons de préférence une unité géomorphologique comportant un gisement potentiel en sables et granulats

1.4.2. Applications

D'importants travaux ont été effectués en Hollande où la gestion de l'eau est cruciale pour ce pays côtier d'altitude très basse toujours menacé par des immersions marines. Une application locale pour l'alimentation en eau d'Amsterdam a été réalisée [Olsthoorn T.N. *et Al.* 1994]. La richesse écologique de la zone aquifère qui représente la ressource en eau de la ville est liée à son niveau piézométrique. Une baisse excessive entraînerait un appauvrissement en variété floristique et faunistique. Un échange intensif entre écologistes et hydrogéologues est nécessaire pour limiter les impacts des pompages pour l'alimentation en eau potable de la ville. Sans réaliser un couplage direct entre le S.I.G. (GENAMAP) et le modèle (MODFLOW), les auteurs utilisent les fonctions d'analyse spatiale et de superposition des informations cartographiques pour faciliter la mise en place et le calage du modèle. Les données hydrogéologiques sont exportées du S.I.G. en format ASCII et utilisées par le code de calcul écrit en langage FORTRAN. Les résultats des simulations sont de la même manière exportées en ASCII et visualisées grâce au S.I.G. Les cartes qui synthétisent les modifications du niveau piézométrique sont combinées avec le modèle numérique de terrain pour les besoins des écologistes. Ainsi un dialogue entre deux disciplines essentielles est ouvert par le biais du S.I.G.

D'autres applications ont été développées en Hollande dans un contexte strictement hydrogéologique. Elles utilisent des modèles aux éléments finis ou aux différences finies, écrits en langage FORTRAN et couplés au S.I.G. Arc/Info [W.J. De Lange *et al.* 1993] et à ORACLE (base de données externe). Ces applications [R. Lieste *et al.* 1993] concernent l'ensemble du territoire hollandais découpé en zones hydrogéologiquement homogènes. Le niveau de décision est régional. La validation des simulations hydrodynamiques a demandé l'acquisition d'une quantité importante de données sur les caractéristiques des aquifères et des rivières (puits et stations de jaugeage). La sensibilité de la Hollande à tous les problèmes de gestion de l'eau compte tenu de sa position

côtière partiellement en dessous du niveau de la mer lors des grandes marées, a conduit ce pays à mener des études hydrauliques et hydrogéologiques poussées.

D'autres applications ont été mises en place aux Etats Unis essentiellement en Californie [Hall P. & M. Zidar 1993] où des sites de stockages de déchets nucléaires demandaient la caractérisation globale du milieu (écologie, climatologie, hydrogéologie etc.) [C. Faunt *et al.* 1993]. L'utilisation d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions n'était pas suffisante pour cette application qui couvre 100 000 km² et compte un nombre important d'aquifères de types et d'épaisseurs variés. Aussi un modèle en trois dimensions (MODFLOW) a été utilisé. Il permet en outre de caractériser les conditions géologiques globales telles que les failles et les horizons de surface, à travers des coupes et des forages. Une phase importante de cette étude est la réalisation d'une base de données qui inclut des cartes thématiques, des images satellites et des informations descriptives. L'acquisition est réalisée par le S.I.G. Arc/Info tandis que les analyses spatiales, la gestion des données et la modélisation en trois dimensions sont effectuées par le S.I.G. Intergraph.

2. Architecture de l'outil

Les S.I.G. ont maintenant une place prédominante dans les outils informatiques d'aide à la décision pour les problèmes qui ont une dimension spatiale. Spécialement dans des contextes de protection environnementale, il existe de nombreuses applications utilisant des S.I.G. [W. Pilmann, A. Jaeschke, 1990]. Dans de nombreux cas, ils servent seulement à la restitution et à l'affichage de l'information sous forme graphique. Le S.I.G. est alors utilisé comme une base de données géographiques complexe qui synthétise des informations exhaustives à des échelles variées [F. Jemma, 1993]. Il fournit un outil de planification des ressources dans un contexte territorial global.

Il existe des applications dans le domaine de l'hydrologie ([Grayson R.B. et al., 1993], [Laurent F., 1996]), la gestion des crues ([Stuart N., Stocks C., 1993], [S.W. Kien la gestion des ressources en eau souterraine [Batelaan O. et Al, 1993]. Le S.I.G. n'y est jamais utilisé seul, mais couplé avec des Systèmes Experts (S.E.) ou des modèles mathématiques de simulation hydrodynamique.

En matière de gestion de l'eau souterraine, des modèles mathématiques utilisant des bases de données non géoréférencées et des programmes graphiques sont utilisés depuis de nombreuses années. Ces modèles qui donnent des résultats quantitatifs extrêmement précis demandent un effort important de préparation des données d'entrée et d'interprétation de ces résultats. Depuis 1990 des applications visant à rendre ces modèles plus faciles d'utilisation les couplent avec un S.I.G. en utilisant une interface homme-machine spécifique. D'autres applications utilisent ce couplage pour ses propriétés d'affichage graphique des résultats et de meilleure gestion des données spatiales sans créer d'interface spécifique. Ces dernières applications restent spécifiques à une zone étudiée, elles ne peuvent être réalisées que par des spécialistes pour des études d'impacts.

Les cinq composants de l'outil d'aide à la décision dont nous avons besoin ainsi que les liens qui les relient sont présentés dans la Figure 43.

La signification des flèches de la Figure 43 reliant les différentes parties de l'O.A.D. sont les suivantes:

1 - Interface/base de données géographiques: l'opérateur doit pouvoir extraire ou échanger avec l'O.A.D. toutes les informations qui sont nécessaires (consultation de la base de données, mise à jour, sauvegarde de résultats de simulation, etc.);

2 - Interface/modèles hydrodynamiques: l'opérateur choisit une piézométrie de calage, demande l'exécution des calculs de simulation. L'O.A.D. lui renvoie un résultat graphique de la piézométrie calculée sous la forme d'une couverture d'arcs puis sous une forme raster (impact de l'aménagement sur la piézométrie initiale) ainsi qu'une

description statistique du résultat (impact maximum et minimum, moyenne des différences et écart type). L'opérateur peut alors interroger ponctuellement l'outil au sujet de l'impact de son ouvrage (carrière et/ou pompage);

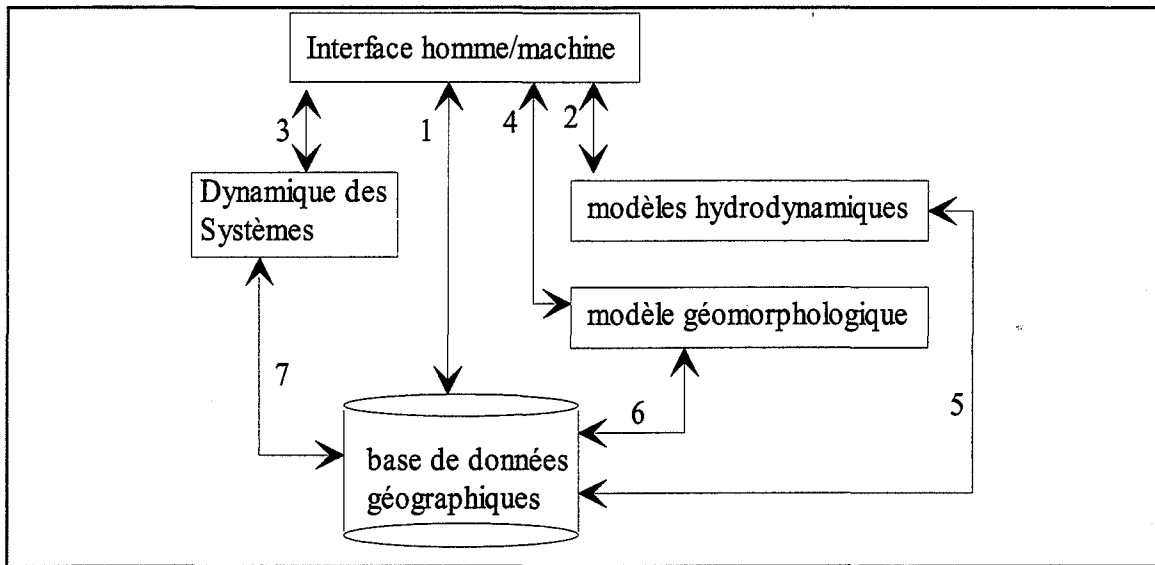


Figure 43: architecture générale de l'outil d'aide à la décision

3 - Interface/Dynamique des Systèmes: si la carrière à réaliser ne se situe pas dans une zone géographique où des modèles hydrodynamiques sont calés, il est mis à la disposition de l'opérateur les résultats de l'étude de l'hydrosystème fluvial (les diagrammes causals et l'aide en ligne pour leur lecture);

4 - Interface/modèle géomorphologique: dans le cas où le site d'application est autre que la Loire dans la plaine du Forez, l'opérateur doit pouvoir détecter les limites des terrasses alluviales qui sont des gisements potentiels en sables et granulats. Ceci lui permettra de définir l'extension géographique des alluvions récentes et en déduire les zones éventuellement extractibles;

5 - Modèle hydrodynamique/base de données géographiques: concerne l'accès à la base de données hydrogéologiques et hydrodynamiques pour imposer une perméabilité, un débit d'exhaure ou d'infiltration ou un potentiel sur les mailles concernées par le projet. L'opérateur doit pouvoir choisir de sauvegarder le résultat du calcul de manière à l'exploiter ultérieurement;

6 - Modèle géomorphologique/base de données géographiques: concerne la sauvegarde des résultats du calcul dans la base de données et leur accès ultérieur par l'opérateur.

7 - Dynamique des Systèmes/base de données géographiques: concerne l'intégration de données non spatialement référencées, dans une base de données géographiques.

Les différentes tâches symbolisées par ces sept flèches sont formalisées par des programmes en AML qui formeront le « corps informatique » de l'outil.

3. Conclusion

Une nouvelle génération d'outils d'aide à la décision a vu le jour dans les cinq dernières années. Ces outils couplent des modèles mathématiques de simulation de phénomènes physiques (hydrologiques, hydrogéologiques) avec un S.I.G. qui gère la dimension spatiale des données. Les avantages de ces couplages sont le rendu graphique de résultats numériques et donc une analyse facilitée. Le choix d'un S.I.G. comme support de génération de scénarios et de simulations hydrodynamiques et comme support d'interface spécifique, permet de proposer un modèle hydrodynamique plus facile d'utilisation. D'autres applications ont été réalisées mais elles restent dans le domaine du spécialiste des S.I.G. et de modèles aux différences fines ou aux éléments finis, à maille constante ou variable, et enfin monocouche ou multicouches. L'exportation de ces techniques très longues à acquérir reste rare et ne peut se faire que par l'intermédiaire d'une interface. Le domaine d'application est toujours unique. Il concerne par exemple l'hydrodynamique souterraine ou l'hydrologie.

Dans le contexte de l'élaboration d'un outil spécifique aux ouvertures de carrières, il est essentiel de ne pas se limiter aux impacts de ces dernières sur les nappes. Le durcissement législatif concernant cette activité est lié aux nuisances d'exploitations (maintenant interdites) dans les lits mineurs, qui se sont cumulées avec les impacts d'autres types d'ouvrages hydrauliques. Il est donc impossible de considérer un type d'aménagement isolément. L'ensemble indissociable constitué par l'hydrosystème fluvial et les aménagements anciens/actuels est étudié par la méthode de la Dynamique des Systèmes. Le domaine de validité est cerné par des limites spatiales (considérées comme celles de la géométrie de la formation des alluvions récentes qui correspondent au lit majeur géologique) et une limite temporelle (« l'instant zéro » des années 1850 jusqu'à nos jours dans le cas de la Loire dans la plaine du Forez). Les diagrammes causals de l'hydrosystème naturel et de l'hydrosystème aménagé identifient les liens de cause à effet existant entre chaque variable du système. Leur aspect complexe met en évidence que des interactions existent entre *toutes* les variables soit directement soit indirectement. Il apparaît clairement que les gravières actuelles situées dans le lit majeur des cours d'eau et en dehors de la bande de méandrage, n'ont un impact que sur la piézométrie.

Les modèles hydrodynamiques en deux dimensions et aux différences finies (DIFI) permettent de simuler la réponse d'un aquifère à un aménagement hydraulique tel qu'un pompage, une carrière ou encore l'incision de la Loire. Leur efficacité dans la gestion de l'eau souterraine est prouvée depuis de nombreuses années et leur utilisation est classique. Ils sont en parfaite adéquation avec notre objectif car après avoir été calés et

validés, la phase d'exploitation permet la génération de divers scénarios. Ces scénarios intégrer la mise en place d'une seule gravière, de son comblement après exploitation; mais aussi de plusieurs extractions avec l'exploitation de nouveaux forages pour l'alimentation en eau potable. Ces outils demandent préalablement la discrétisation de la zone d'étude en un maillage régulier. Chaque maille doit être renseignée avec les paramètres de l'aquifère (perméabilité, altitude du substratum etc.). L'élaboration de modèles hydrodynamiques nécessite une grande quantité de données extrêmement coûteuses et ne peut pas être généralisée à l'ensemble des alluvions récentes dans la plaine du Forez. Par exemple, le modèle hydrodynamique de Balbigny (16 km²) a demandé la réalisation de six forages, neufs piézomètres et une vingtaine de profils géophysiques.

Mais les paramètres nécessaires à l'aménageur ne sont pas uniquement d'ordre technique. Tous les aspects humains et géomorphologiques doivent entrer dans sa prise de décision. Aussi, un S.I.G. qui gère ces informations spatiales est indispensable. Ces fonctions sont multiples: acquisition des données, gestion de la base de données géographiques, analyse spatiale, visualisation des résultats des simulations hydrodynamiques, interface, développement de fonctions spécifiques. L'organisation des données augmente l'efficacité des modèles hydrodynamiques et l'interprétation synthétique de simulations successives. Elle permet aussi de mettre en place un système d'alerte pour l'actualisation des données périmées. Un modèle global est proposé, constitué d'une base de données hydrologique, hydrogéologique, géomorphologique, anthropique, historique et actuelle, élaborée dans le S.I.G. Cette base de données comprend aussi les diagrammes causals. Les modèles hydrodynamiques écrits en C, sont couplés avec le S.I.G. Le dialogue essentiel avec des interlocuteurs non spécialistes est rendu possible par une interface spécifique qui le rend accessible. Cet interface (menus) permet l'accès d'une part aux données, d'autre part à des fonctions d'analyse spatiale formalisées par des macroscommandes, d'interrogation des informations descriptives, de simulations hydrodynamique. Le couplage de ces outils devrait permettre des simulations rapides dans un environnement personnalisé, des comparaisons de résultats de scénarios aisées qui sont indispensables pour faciliter la tâche du décideur.

Troisième partie

TROISIEME PARTIE: application de l'Outil d'Aide à la Décision à la plaine du Forez

L'*objectif* est de mettre en oeuvre l'outil d'aide à la décision dont nous avons élaboré le modèle conceptuel dans le chapitre précédent, et de l'appliquer à la plaine du Forez. Il s'agit de faire coopérer dans un premier temps les modèles hydrodynamiques développés à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne avec un S.I.G. (Arc/Info). Cette application se déroule en plusieurs phases.

Pour cela, il faut tout d'abord appliquer les modèles hydrodynamiques aux deux secteurs (Bonson au sud et Balbigny au nord) où les données hydrogéologiques sont suffisantes. Cette phase comporte l'acquisition des données hydrogéologiques, leur exploitation dans les deux modèles, le calage puis la validation de ces derniers. L'exploitation des modèles doit porter sur des simulations de carrières et de pompages.

Dans un deuxième temps, l'application au S.I.G. comporte plusieurs étapes. L'élaboration de la base de données géographiques anthropiques et naturelles doit regrouper tous les paramètres pertinents. Le couplage des modèles avec le S.I.G. vise à obtenir des résultats graphiques des simulations, une analyse plus aisée et l'élaboration de scénarios de créations simultanées de plusieurs carrières avec des pompages pour l'A.E.P. Enfin, l'élaboration de l'interface spécifique permettra de faciliter l'utilisation de l'outil en combinant:

- des accès aisés à la base de données géographique;
- des fonctions d'interrogation des renseignements attributaires des entités géographiques;
- des simulations hydrodynamiques de carrières ou de pompages.

1. Elaboration des modèles hydrodynamiques

L'application des modèles hydrodynamiques à Bonson et à Balbigny demande des données hydrogéologiques plus précises que celles qui ont été exposées dans la première partie de ce mémoire. Les résultats de la synthèse hydrogéologique des alluvions récentes de la Loire par CPGF en 1979 sont généraux (1/25 000ème) et ne conviennent pas à l'échelle de travail locale (1/10 000ème) des modèles. D'autre part, certains paramètres supplémentaires tels que la géométrie précise de l'aquifère sont nécessaires. Pour le secteur de Balbigny comme celui de Bonson, nous disposons de données supplémentaires dont le mode d'acquisition et l'exploitation sont détaillés.

1.1. Application au secteur de Balbigny (42 - Loire)

La réalisation d'un modèle hydrodynamique se déroule en plusieurs phases. La recherche des paramètres de l'aquifère s'effectue sur le terrain grâce à des forages, des piézomètres et des sondages géophysiques. Nous utilisons les résultats des reconnaissances de C.P.G.F. HORIZONS et les exposons sous la forme de cartes commentées qui vont constituer les données de bases du modèle hydrodynamique. Suit la phase de calage de ce modèle sur des états piézométriques historiques en situation de hautes et de basses eaux. Enfin, l'exploitation du modèle calé permet la réalisation de simulation de carrières, de pompages et de l'enfoncement de la Loire dans le substratum.

1.1.1. Recherche des paramètres de l'aquifère

Les cartes présentées synthétisent les résultats des premières et deuxièmes phases de l'étude hydrogéologique des Chambons par HORIZONS en 1976 pour la DDA Loire. Cette étude en cinq phases de 1976 à 1981 avait pour objectif la simulation hydrodynamique des impacts de la future retenue de Villerest sur la nappe des Chambons. Les paramètres de l'aquifère ont été élaborés à partir de reconnaissances géophysiques et mécaniques.

a. Acquisition par reconnaissance mécanique

Six forages et neuf piézomètres ont été réalisés dans le cadre de la première phase de l'étude hydrogéologique de la nappe des Chambons par HORIZONS en 1976. Sur chacun de ces ouvrages sont mesurés l'altitude du sol, l'épaisseur et le mur de la couverture, la

profondeur du substratum, l'épaisseur des alluvions, le niveau piézométrique, l'épaisseur mouillée est déduite des deux données précédentes. Des essais par pompages sur les six puits permettent de déterminer la perméabilité et la transmissivité de l'aquifère au point considéré.

b. Acquisition par reconnaissance géophysique

La reconnaissance géophysique met en évidence les caractéristiques suivantes pour les différentes formations:

- couverture argilo-limoneuse: conductrice;
- alluvions sablo-graveleuses hors nappe: résistantes à très résistantes;
- alluvions sablo-graveleuses sous-nappe: résistantes;
- substratum argilo-marneux: conducteur;
- substratum argilo-sableux: moyennement conducteur;
- substratum cristallin: résistant.

La résistivité d'un horizon dépend non seulement de sa nature mais aussi de la minéralisation de l'eau qu'il contient. Il peut exister des différences de minéralisation importantes entre l'eau en provenance du versant (1100 à 1400 $\Omega.m$ à Epercieux-Saint-Paul) et celle de la Loire (plus de 5000 $\Omega.m$).

Nous retiendrons les valeurs caractéristiques suivantes:

- couverture: 15 à 200 $\Omega.m$
- alluvions à perméabilité élevée: 300 à 500 $\Omega.m$ correspondant à $K > 3.10^{-3}$ m/s
- alluvions à perméabilité faible: 120 à 130 $\Omega.m$ correspondant à $K < 0,5.10^{-3}$ m/s
- substratum tertiaire: résistivité inférieure à 35 $\Omega.m$.

La couverture argilo-limoneuse est en général conductrice mais elle peut être surmontée d'une couche superficielle plus sableuse (100 $\Omega.m$ ou plus) ou être constituée de matériaux limono-sableux de plus de 150 $\Omega.m$.

Les alluvions sablo-graveleuses sont hétérogènes avec des résistivités sous nappe variant de 100 à 600 $\Omega.m$ alors que la partie sèche est nettement plus résistante et dépasse fréquemment 1000 $\Omega.m$. Leurs résistivités diminuent de la Loire vers la bordure de la plaine alluviale.

Le substratum tertiaire au droit de la plaine est la plupart du temps conducteur avec des résistivités qui vont en augmentant vers l'aval (20 à 40 $\Omega.m$). Nous noterons la présence en rive droite d'un niveau résistant ($R > 1000 \Omega.m$) qui va en s'ennoyant de l'est vers l'ouest, il s'agit vraisemblablement du cristallin. Il existe des points plus résistants pouvant correspondre, soit à des anomalies électriques, soit à un alluvionnement plus grossier.

Sur les bordures de la plaine alluviale, en rive droite au Nord de Balbigny, des résistivités variables peuvent correspondre à des lambeaux de terrasses ou au cristallin

altéré avec un certain recouvrement. Au Sud de Balbigny, le Tertiaire est relativement proche constitué d'un horizon de 35 à 40 $\Omega.m$ reposant sur une couche conductrice (18 à 20 $\Omega.m$). Sur le Tertiaire reposent des alluvions peu épaisses (inférieures à 4 mètres) et sans doute très argileuses (résistivité inférieure à 100 $\Omega.m$). En rive gauche les mesures sont discontinues et certaines pourraient être interprétées comme représentatives de lambeaux de terrasses mais il s'agit vraisemblablement de Tertiaire à faciès plus sableux.

1.1.2. Résultats

Les résultats des travaux de reconnaissance de C.P.G.F. HORIZONS sont présentés de manière générale pour avoir une vue d'ensemble de la zone à modéliser, puis sous la forme de couches d'informations monothématiques qui seront faciles à intégrer dans la base de données de DIFI.

a. Géologie générale

Trois formations sont présentes: le socle cristallin, le substratum tertiaire et les alluvions anciennes et récentes.

Le primaire et le cristallin constituent les gorges de la Loire à l'entrée du seuil de Neulise. Ce socle n'a pas été rencontré par les forages en rive gauche; par contre, en rive droite il constitue le substratum de cinq puits en aval du lieu-dit Pralfry (commune de Balbigny - 42). La prospection électrique montre l'existence, sous un recouvrement tertiaire relativement peu important, du cristallin en rive droite en aval de Balbigny.

Le tertiaire qui constitue le substratum haut de la zone étudiée présente des faciès assez variables compte tenu des observations de terrain et des résistivités mesurées. En rive droite, des affleurements sont visibles en amont du pont, et en étiage sur l'ensemble du lit de la Loire sous le pont. En aval de Balbigny, le tertiaire devrait être recouvert d'un placage plus ou moins épais d'alluvions hétérogènes. Mais l'observation est rendue difficile par la queue de la retenue de Villerest qui arrive presque jusqu'au village, créant une zone d'eau dormante qui favorise le dépôt de fines et masque le substratum.

En rive gauche, la bordure de la plaine alluviale est constituée par du tertiaire argileux avec un placage peu épais d'alluvions sableuses à graveleuses. Le Tertiaire comporte en profondeur des horizons plus sableux parfois bien marqués électriquement. La présence de lambeaux très réduits de terrasses anciennes assurant la liaison entre le versant tertiaire et les alluvions récentes n'est pas à exclure.

Les alluvions anciennes sont situées en rive droite sous une couverture argilo-limoneuse de 0,5 à 7 m d'épaisseur. Ces alluvions sont très hétérogènes en épaisseur et en résistivité. Elles reposent sur le substratum tertiaire très conducteur. Les alluvions constituent le remplissage de la plaine alluviale, elles comportent deux phases: la phase sablo-graveleuse et la couverture argilo-limoneuse.

b. Carte de l'épaisseur de la couverture limoneuse

La couverture limoneuse qui correspond à la « découverte » des carriers et ne doit pas être supérieure à un certain ratio pour que l'exploitation soit économiquement viable (cf. Figure 43), a une épaisseur très variable. Elle est en général réduite en bord de Loire (inférieure à un mètre) et relativement élevée sur la bordure de la plaine. Elle peut alors dépasser trois mètres. Aux grèves peu perméables correspond la plupart du temps une couche argilo-limoneuse de 3 mètres ou plus, l'inverse n'étant pas vérifié.

c. Carte du toit du substratum

La carte du toit du substratum (cf. Figure 44) montre une forme variable en rive droite près de Balbigny avec des alternances de points hauts et de points bas. Un axe profond existe à l'amont sur la rive droite et qui recoupe ensuite la boucle des grands Chambons en rive gauche. Un autre axe profond et très continu suit la limite ouest de la plaine.

d. Carte des perméabilités

Les différents points d'eau (puits, piézomètres) ont permis d'établir différentes cartes. Chaque formation géologique a un comportement hydraulique différent. Le cristallin peut être considéré comme peu perméable. L'eau s'écoulant en général au contact du rocher relativement sain à une faible profondeur sous le sol, cette formation assure à l'aval la « fermeture » de la plaine alluviale. Le Tertiaire est globalement imperméable mais les passées graveleuses peuvent donner lieu à des nappes qui se traduisent par des sources au niveau du pont de Balbigny. En rive gauche, le Tertiaire contient deux nappes superposées particulièrement visibles en aval de Mizérieux.

La Figure 45 montre la répartition suivante des perméabilités pour l'étiage de 1981:

- $K < 0,2 \cdot 10^{-4}$ m/s: zones peu développées et situées sur les seules bordures de la plaine alluviale;
- $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s $< K < 0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s: zones représentées surtout en rive gauche en amont de Nervieux et localement au Nord de Genieux;
- $0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s $< K < 1,25 \cdot 10^{-4}$ m/s: zones très développées en rive gauche à partir de la Départementale 1 vers l'amont jusqu'en bordure de la Loire;
- $1,25 \cdot 10^{-4}$ m/s $< K < 3 \cdot 10^{-4}$ m/s: classe intermédiaire peu représentée;
- $K > 3 \cdot 10^{-4}$ m/s: très développée dans l'axe de la vallée avec de nombreuses hétérogénéités, K pouvant atteindre $6 \cdot 10^{-4}$ m/s.

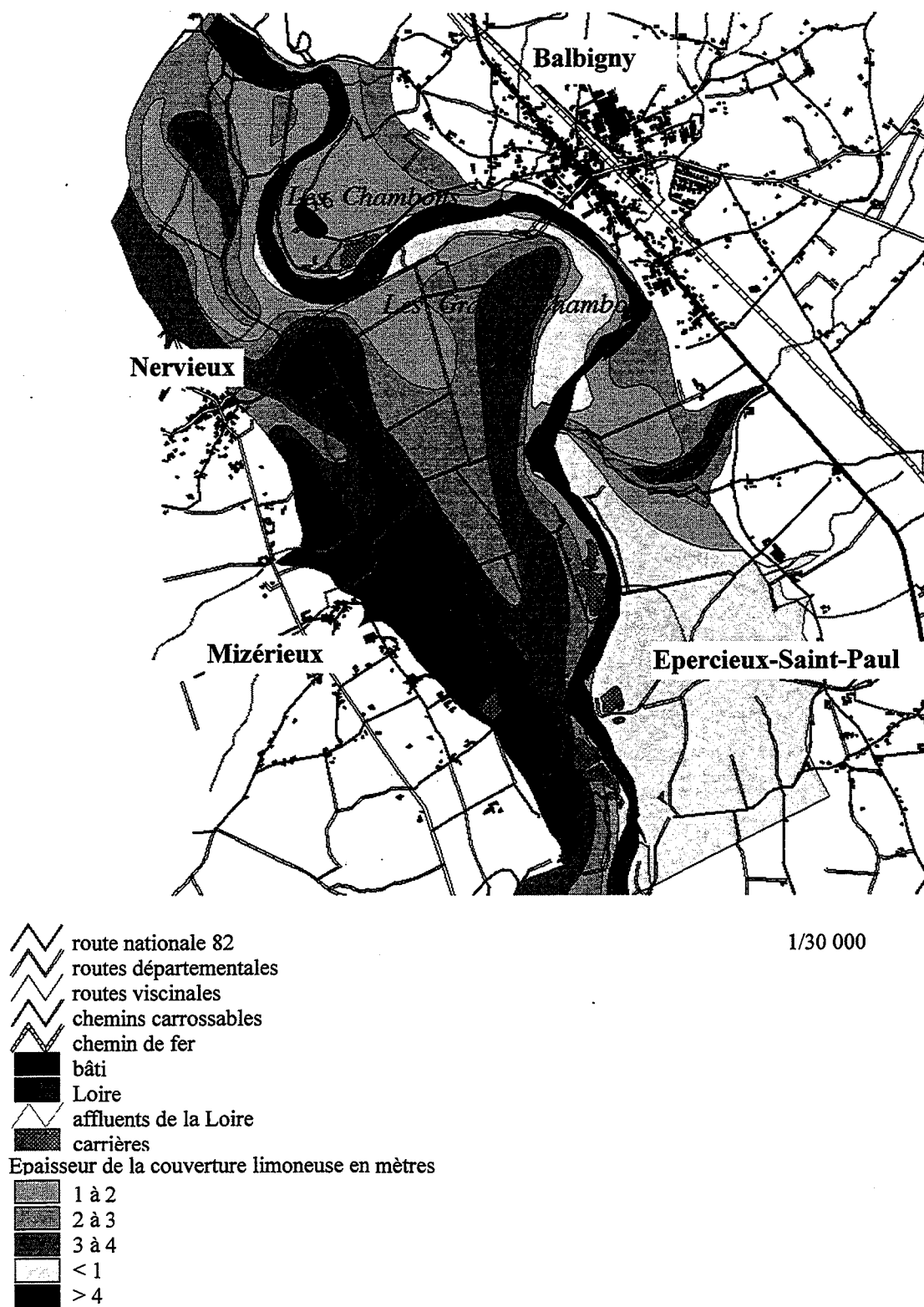


Figure 43: épaisseur de la couverture limoneuse à Balbigny

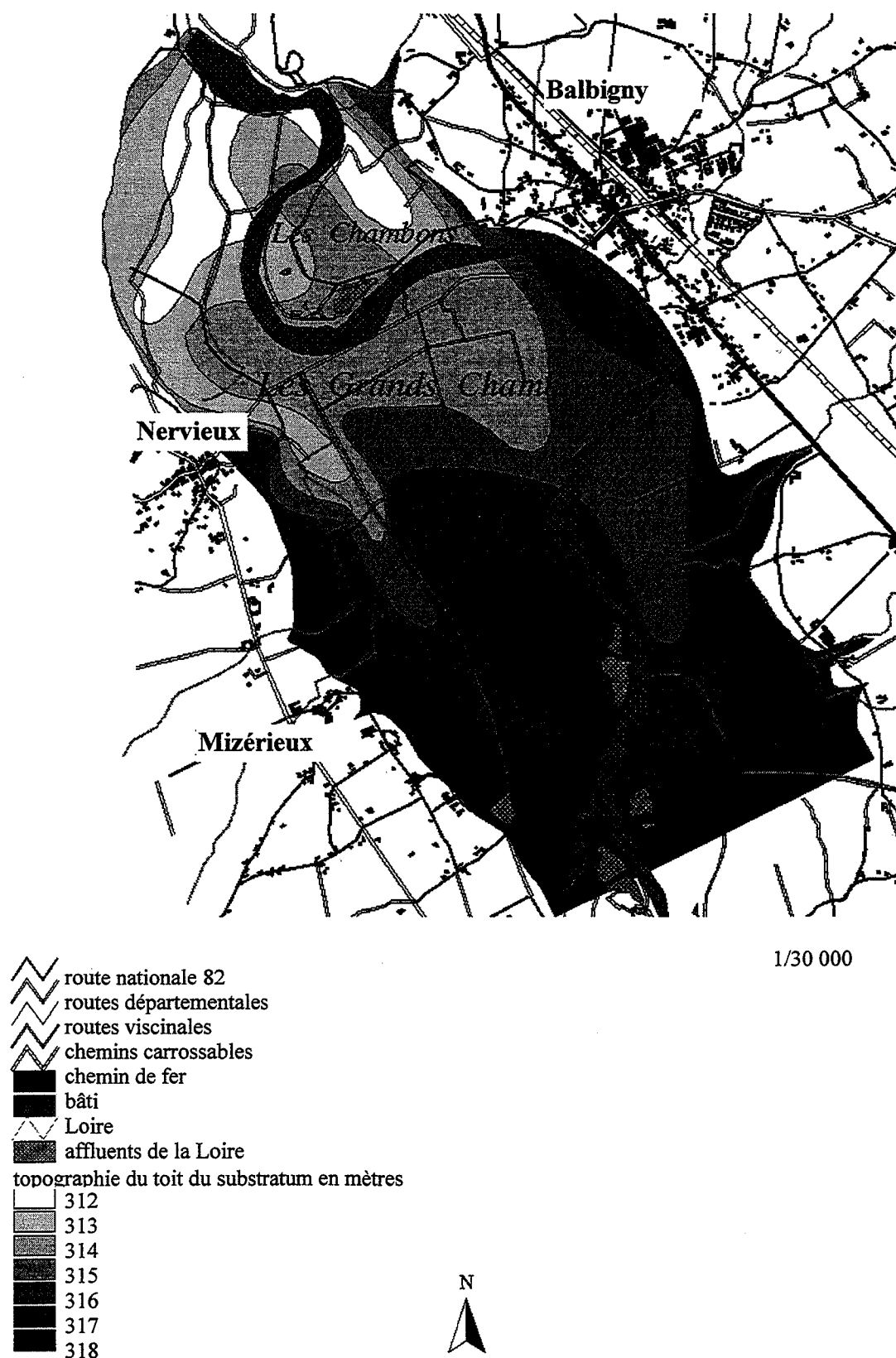


Figure 44: topographie du toit du substratum à Balbigny

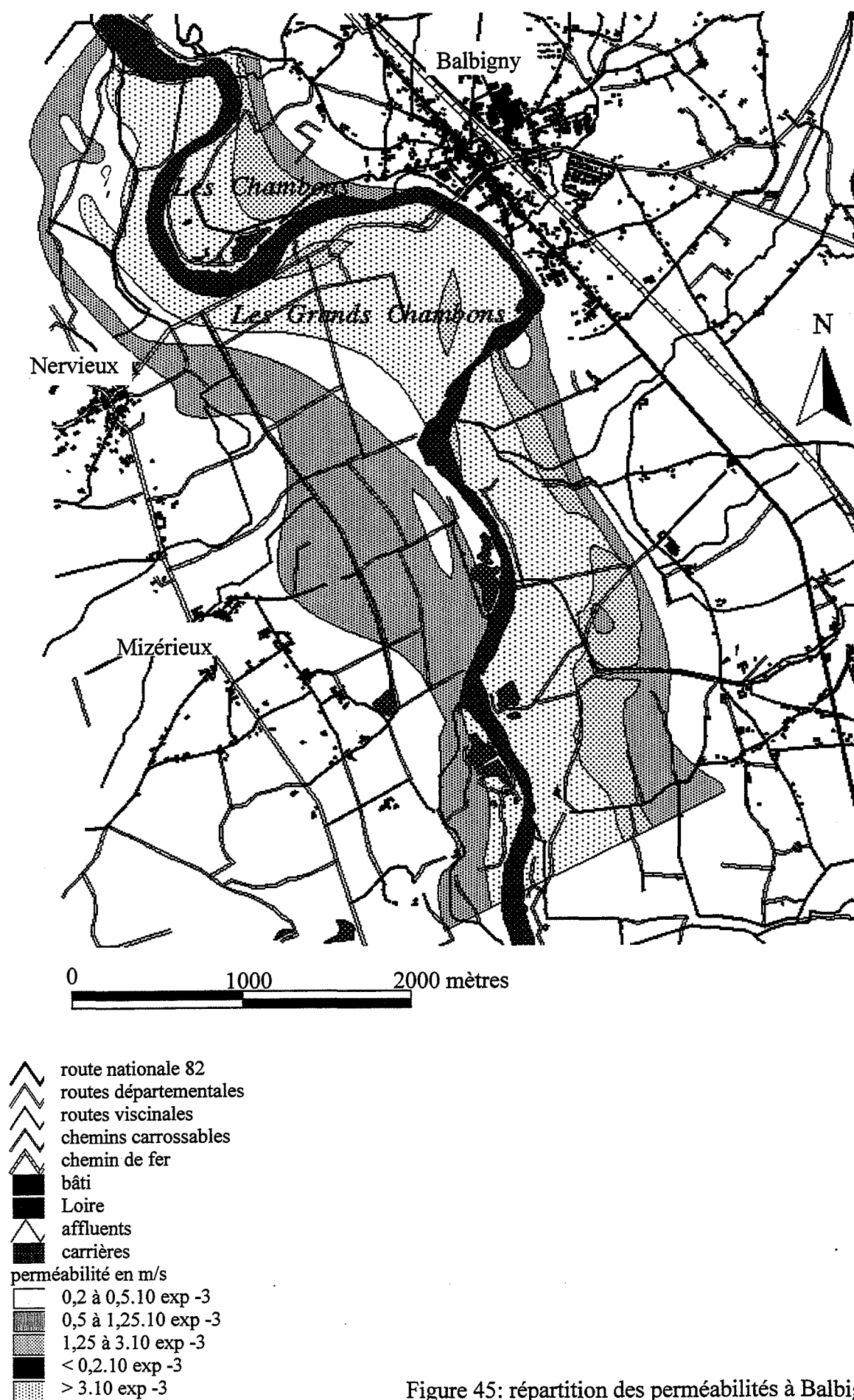
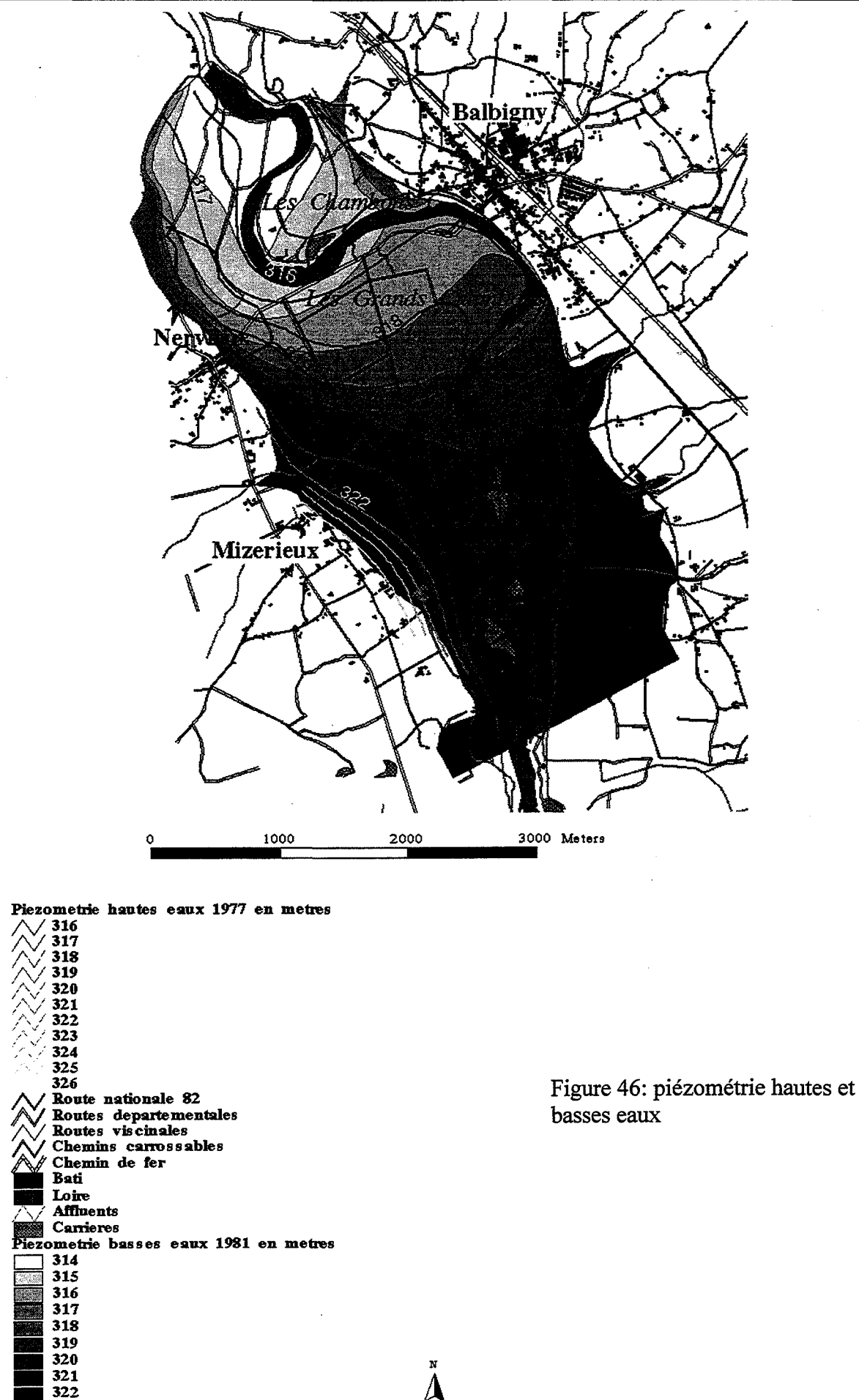


Figure 45: répartition des perméabilités à Balbigny



e. Piézométries hautes et basses eaux

Au cours des cinq études concernant l'impact du barrage de Villerest sur la nappe des Chambons, trois campagnes piézométriques en basses eaux ont été réalisées: octobre 1976 [C.P.G.F. étude 1612], août 1978 [C.P.G.F. étude 1746] et novembre 1981 [C.P.G.F. étude 2267]. La campagne de 1981 est retenue car elle représente l'état de la nappe le plus bas globalement (cf. Figure 46). Il apparaît très clairement que la Loire est le drain principal, sauf dans la boucle des grands Chambons où un deuxième axe de drainage s'individualise au sein même de l'aquifère. La piézométrie hautes eaux est celle de la campagne de février 1977 [C.P.G.F. N° 1746]. Le drain local dans la nappe au niveau des grands Chambons n'existe pas à cette période de l'année hydrologique. 105 puits ou points d'eau ont été relevés pour obtenir ces piézométries.

f. Battement de la nappe

Le battement varie en fonction des conditions d'alimentation (infiltration) de la nappe, de la perméabilité et du coefficient d'emménagement. La zone de battement maximum est située en bordure de la plaine entre Mizérieux et Nervieux avec des valeurs de l'ordre de trois mètres. La valeur du battement diminue en s'approchant de la Loire. Le phénomène est moins net en rive gauche au Sud de Balbigny, où la tendance est inverse et reflète l'influence des variations du niveau de la Loire. Sur les versants (hautes terrasses et flancs granitiques du seuil de Neulise) les battements sont très faibles voir inexistantes et ne procèdent pas du même système que dans la plaine alluviale. Ils intéressent des aquifères perchés, largement influencés par l'écoulement hypodermique ou des aquifères profonds où l'alimentation est lente et la sollicitation faible ou nulle. Le battement moyen de la nappe est de $1,75 \pm 0,50$ m.

Dans le cas général, la Loire draine la nappe. Très localement, dans la boucle des Chambons, et momentanément (à l'étiage), la nappe peut drainer la rivière en empruntant une zone de circulation préférentielle dans l'aquifère. Le battement de la nappe dans la plaine varie suivant les zones de un à trois mètres.

1.1.3. Réalisation du modèle mathématique

La mise en place du modèle DIFI sur la nappe des Chambons se déroule en deux phases:

- détermination de la répartition des paramètres hydrodynamiques K et Q telle que la solution H soit conforme aux cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux », c'est la phase de calage;
- prévision de l'influence sur H d'une modification des paramètres et en particulier d'une implantation de carrière, c'est la phase d'exploitation.

a. Choix des mailles et des limites latérales du modèle

Le modèle NEWSAM qui avait été mis en place en collaboration entre Horizons et l'Ecole des Mines de Paris en 1976 utilisait un maillage à mailles variables de 127 ou 254 m de côté (choix motivé par le format du listing: une petite maille = 0,5 inch). L'emplacement de ce maillage a été conservé avec une taille fixe de 127 m. Les limites est et ouest du modèle coïncident avec celles de la plaine alluviale. Au nord il s'agit sensiblement de l'entrée dans les gorges du seuil de Neulise, et au sud elles correspondent à la limite de la zone étudiée. L'ensemble du modèle comprend 1012 mailles et couvre environ 16 km².

b. Conditions aux limites

Les conditions aux limites définissent les relations entre la nappe des alluvions récentes et les zones extérieures. Elles sont de deux types: condition de potentiel et condition de flux.

– Conditions de potentiel

La Loire où la cote de l'eau (profil en long) correspond à un potentiel imposé, c'est la condition aux limites essentielle du modèle. Il s'agit d'un potentiel associé à chaque état piézométrique, en hautes eaux comme en basses eaux.

A chaque maille correspondant aux limites de la plaine alluviale sont fixés des potentiels imposés variables dans l'espace selon la piézométrie, et dans le temps suivant le régime en hautes ou en basses eaux de la nappe alluviale des Chambons.

– Conditions de flux

A la surface topographique, une infiltration de 250 mm efficace est imposée pour la piézométrie en hautes eaux et une infiltration nulle en basses eaux [C.P.G.F. 1982]. La limite avec le substratum est en principe étanche, mais il a été montré que des passées graveleuses peuvent amener une alimentation supplémentaire à la nappe. Effectivement, la résistivité du substratum est plus forte en rive gauche de la Loire au nord d'une ligne reliant Balbigny à Nervieux. Il peut donc y être considéré comme légèrement perméable. De plus, en période de basses eaux, dans la boucle des grands Chambons une partie du débit de la Loire est détourné dans la nappe à la sortie du coude de Mizérieux en rive gauche. Le même phénomène est constaté à la sortie du méandre de Génieux, toujours en rive gauche mais avec une ampleur moins importante. Sur les mailles situées dans ces deux zones, des débits d'entrée sont imposés pour le calage en étiage.

c. Calage

Les principales phases du calage du modèle ont été les suivantes:

- une série de simulations dans lesquelles la répartition des perméabilités est modifiée par tâtonnements en vue d'aboutir à la reproduction de la piézométrie de référence;
- lorsque le résultat graphique est satisfaisant, c'est à dire quand les courbes isopièzes de la piézométrie de calage et de la piézométrie calée sont presque superposées, un calcul d'évaluation de la précision obtenue est réalisé.

1.1.4. Exploitation du modèle de Balbigny

Le modèle de Balbigny a un programme d'accès qui permet à l'utilisateur de réaliser des simulations mais aussi d'afficher graphiquement ses résultats ainsi que toutes les informations complémentaires (occupation humaine, contraintes réglementaires) utiles à sa décision, par le biais d'un menu déroulant:

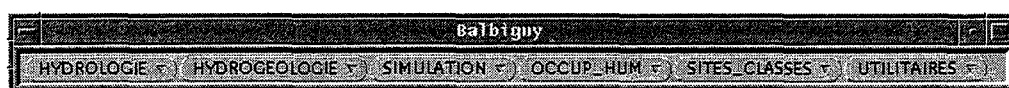


Figure 47: menu déroulant local sur Balbigny

Ce menu comporte six thèmes mais qui sont plus axés vers l'hydrogéologie et la simulation par rapport aux données concernant l'ensemble de la plaine du Forez:

- *hydrologie*: Loire en 1991, affluents, gravières en eau, photographies aériennes infrarouge noir et blanc au 1/17 000 (mission 1991);
- *hydrogéologie*: piézométries hautes eaux 1977, basses eaux 1978 et 1981, battement de la nappe en 1976, épaisseur de la couverture, topographie du substratum, perméabilité, épaisseur des alluvions, puits et sondages.
- *simulation*: maillage, coordonnées des mailles, interrogation ponctuelle des données hydrogéologiques, exécuter, piézométrie calée, piézométrie calculée, gradient hydraulique (après simulation), impact (sur la piézométrie), interrogation, enregistrement;
- *occupation humaine*: bâti, chemin de fer, route nationale, routes départementales, routes vicinales, chemins carrossables;
- *sites classés*: zones NDS du P.O.S., cimetières, périmètres de protection des captages, schéma directeur.

L'opérateur, après exécution d'une simulation hydrodynamique, peut alors choisir de calculer quantitativement l'impact de la carrière sur l'état initial de la nappe. Si l'opérateur juge le résultat de la simulation intéressant, il ajoute la couverture de la

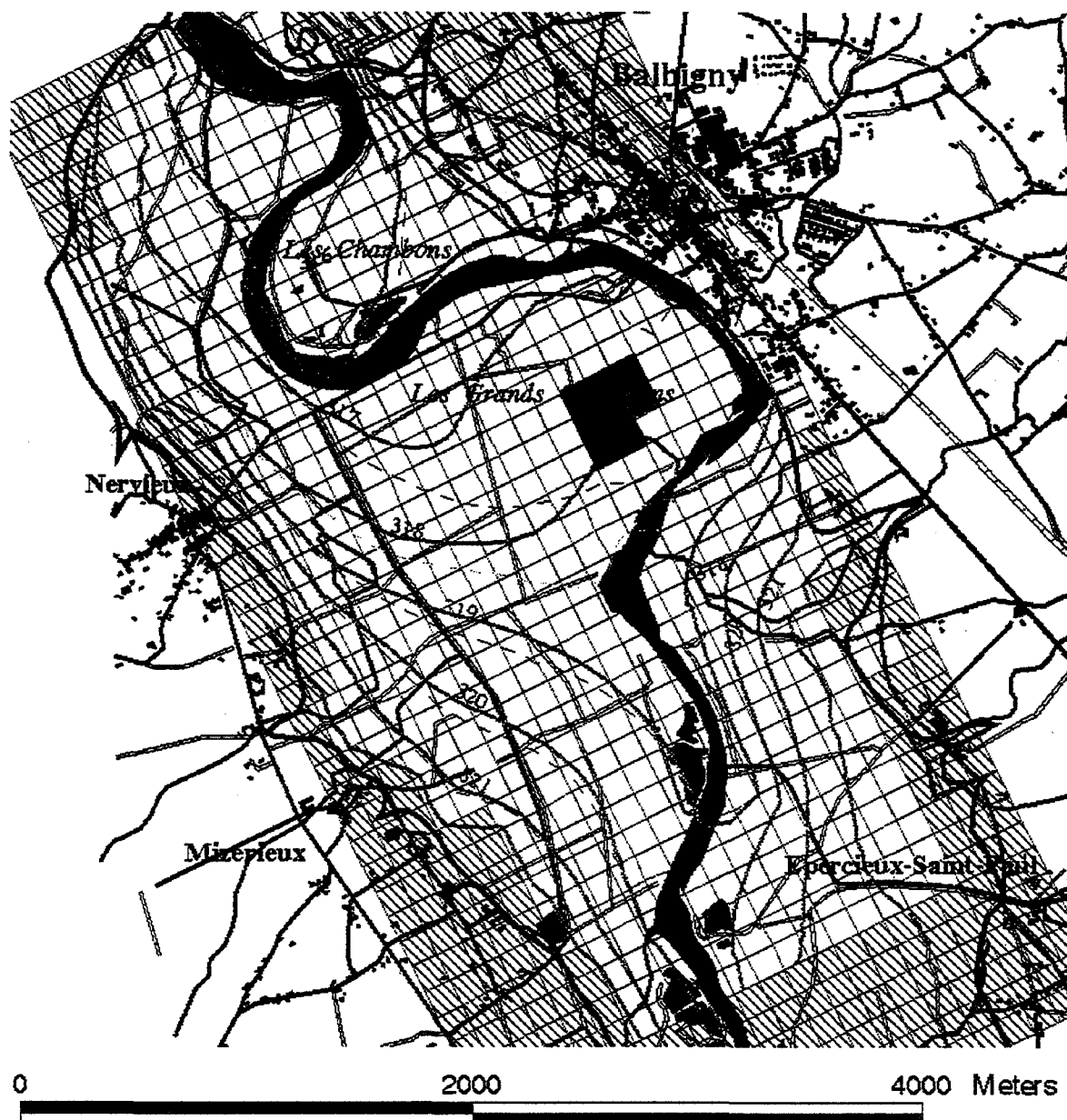
piézométrie calculée à la base de données « *simulation* ». Il pourra réutiliser ultérieurement ce résultat par exemple pour des sorties graphiques.

La simulation porte sur la réalisation d'une carrière.

Le choix se porte en rive droite de la Loire dans un secteur que le schéma directeur définit comme exploitable. Six mailles sont sélectionnées représentant une surface rectangulaire de deux mailles par trois dont la superficie totale est de 96 774 m². Une perméabilité très importante (100 m/s) est imposée sur les six mailles dont l'O.A.D. liste les coordonnées en lignes et colonnes. L'exécution du calcul est suivie de l'affichage simultané de la piézométrie initiale (basses eaux 1981) et de la piézométrie calculée, ainsi que du maillage où les mailles concernées par le projet apparaissent en rouge (cf. Figure 48).

Le résultat graphique de la simulation montre que le niveau de l'eau dans la carrière s'est stabilisé à 319 m, se raccordant au niveau de la ligne d'eau de la Loire. Le rabattement de la nappe, peut-être ainsi estimé à deux mètres au niveau de la limite SE de la nappe des alluvions récentes. Ce rabattement s'accompagne d'une déviation de l'axe de drainage souterrain. Localement c'est la carrière qui draine la nappe, remplaçant la Loire. Le calcul précis du rabattement est obtenu par la simple soustraction des deux représentations raster « piézométrie initiale - piézométrie finale » (cf. Figure 49). L'affichage de la matrice des impacts met en évidence la faible extension géographique du rabattement de nappe: 30 mailles sont affectées par un rabattement de plus de 20 cm. Ce dernier ne se propage pas sur la rive gauche de la Loire et reste confiné entre le fleuve et la limite de la terrasse ancienne. L'interrogation ponctuelle de la représentation raster des impacts met en évidence que si le rabattement est très localisé, il atteint 3,4 m de puissance. Or la représentation raster de l'épaisseur de la nappe montre l'épaisseur totale de l'aquifère, dans ce secteur géographique atteint par le rabattement, varie de 4 à 7 m. Il apparaît donc qu'en l'absence de colmatage des parois de l'excavation, l'épaisseur mouillée de la nappe sera (en bordure de Loire) réduite à 50 cm maximum.

Le site choisi pour l'implantation de la carrière est celui qui correspond au plus fort gradient hydraulique initial. La future excavation accentue le phénomène en créant un fort rabattement de la nappe en aval hydraulique, et en direction de la Loire (cf. Figure 50).



- ▲ Piezometrie calculee
- Maillage**
- ▨ maille hors zone d'etude
- maille dans la zone d'etude
- ▲ Piezometrie calee
- == Route nationale 82
- == Routes departementales
- == Routes vicinales
- - - Chemins carrossables
- x - x - Chemin de fer
- Bati
- Loire
- ▲ Affluents
- ▲ Terrasses
- Carrieres

Nord ↑

Figure 48: exemple de résultat de simulation d'une carrière à Balbigny

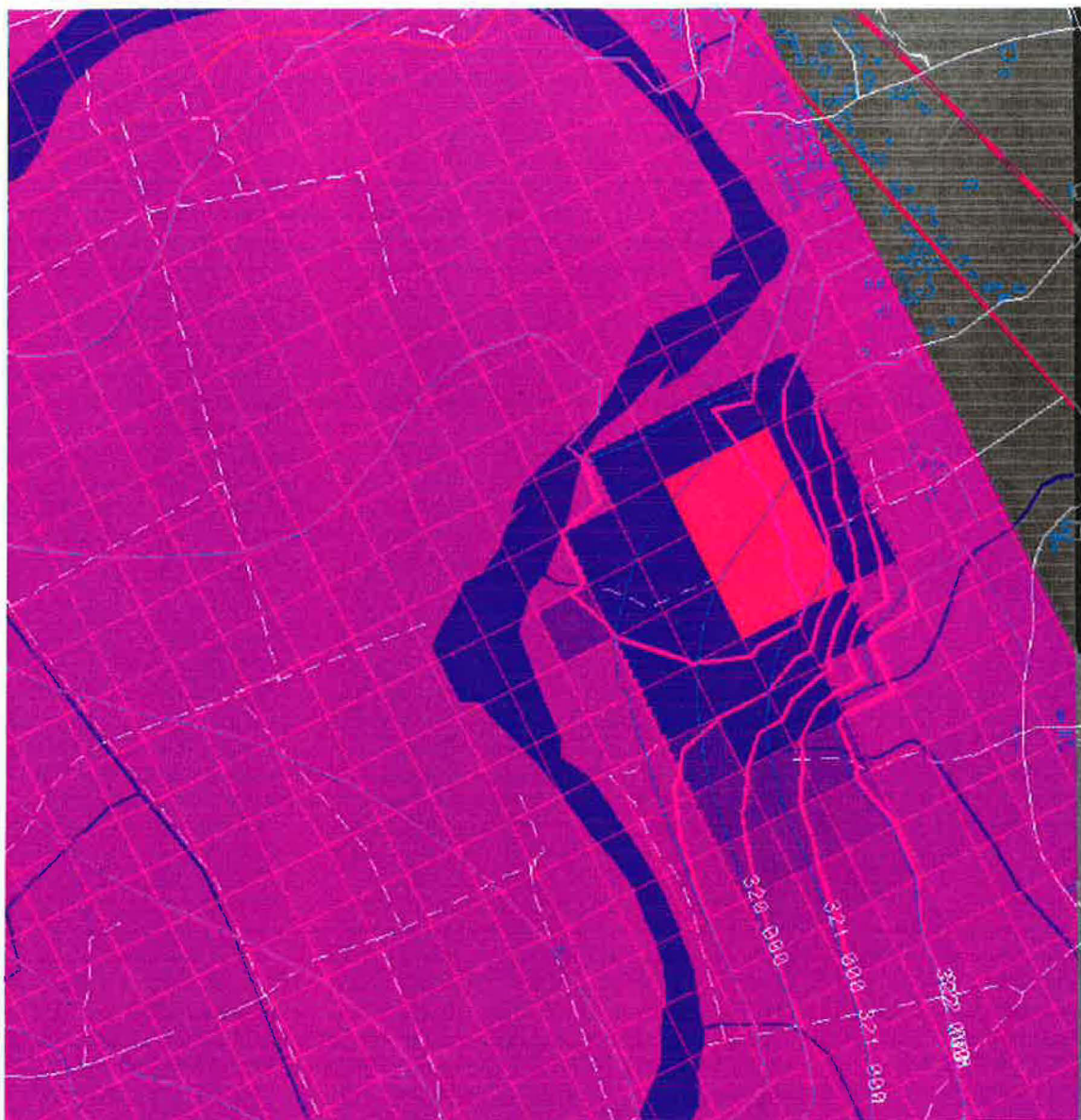


Figure 49: exemple du calcul de l'impact de la carrière simulée sur la piézométrie initiale

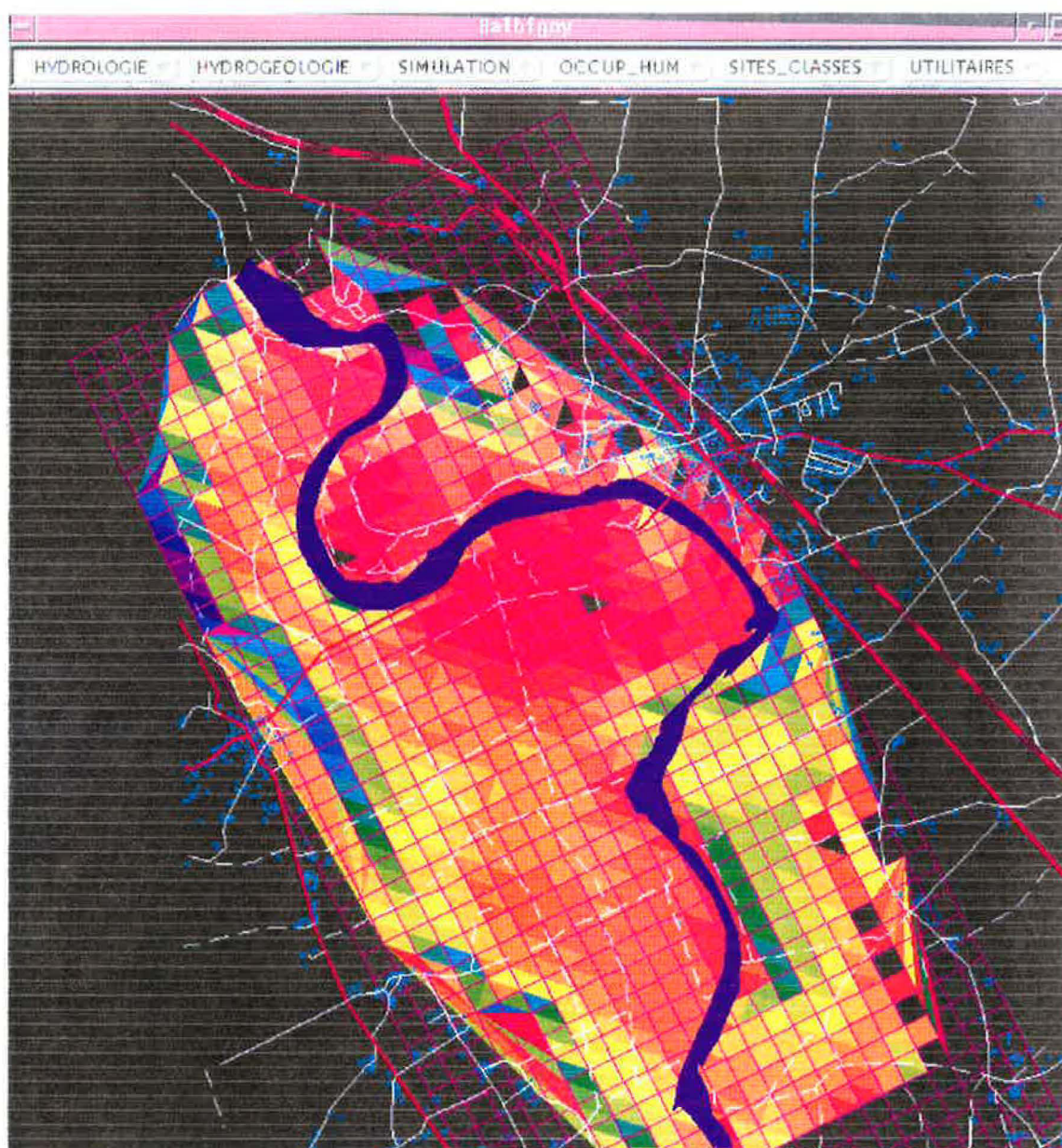


Figure 50: exemple de calcul du gradient hydraulique après réalisation de la carrière

1.2. Application au secteur de Bonson (42- Loire)

Les phases de réalisation du modèle hydrodynamique de Bonson sont les mêmes que pour celui de Balbigny. L'étalement dans le temps des études réalisées dans ce secteur étant plus important et les auteurs étant différents, il est utile d'en faire un historique depuis 1965 jusqu'en 1992. La présence de stations de pompages et de carrières représente un enjeu pour les collectivités locales qui explique cette abondance d'informations. Leur synthèse permet de retracer divers états de la nappe dans le temps, d'alimenter le modèle en données hydrogéologiques et de le caler.

1.2.1. Historique des études et travaux de reconnaissance

De nombreuses études ont été réalisées depuis 1965 qui permettent de réaliser une synthèse des données disponibles, historiques et actuelles et de faire un bilan sur l'évolution de la nappe depuis 20 ans.

En 1965, la commune de Bonson était alimentée en eau potable par un puits dit « des Giraudières » implanté dans les alluvions récentes de la rivière Bonson, peu avant sa confluence avec la Loire. Ce puits, dont les caractéristiques hydrauliques étaient particulièrement favorables pour la plaine du Forez pouvaient débiter jusqu'à 100 m³/h. A cette même époque, une étude hydrogéologique destinée à rechercher un secteur favorable permettant de compléter l'alimentation de la zone industrielle d'Andrézieux-Bouthéon a été effectuée par C.P.G.F. Cette étude comportait une carte piézométrique au 1/10 000ème et une prospection géophysique par résistivité électrique, autour du puits de Bonson en bordure de la Loire entre Saint-Rambert-sur-Loire au sud et Saint-Cyprien au nord. Seize profils géophysiques ont permis la connaissance de la géométrie de l'aquifère dans une période voisine de l'étiage puisque les mesures ont été réalisées en juillet et août 1965. Onze essais de débits ont aussi été réalisés par C.P.G.F. sur des ouvrages distincts. En 1975, le puits des Giraudières a été équipé en amont, d'une tranchée drainante de 70 m de longueur orientée parallèlement à la Loire. Cette tranchée est constituée d'un drain de captage enterré entre 5 et 6 m de la surface du sol. Le remblai est du gravier tout venant.

D'autres puits ont été implantés à moins de 100 m du premier entre 1965 et 1981, dont le débit total n'excède pas 100 m³/h, soit le débit initialement prévu. Chaque puits pris individuellement est donc devenu moins productif car la zone qui les sépare de la Loire a été partiellement exploitée en graviers [P. Davoine, 1979].

En mai 1980, l'Ecole des Mines de Saint-Etienne effectue des mesures de débit du Bonson en divers points du domaine étudié et réalise un modèle aux différences finies. En 1981, Philippe Launay met en place un modèle aux éléments finis dans l'objectif de quantifier l'influence de l'exploitation des gravières. En 1983, Didier Graillot reprend l'ensemble de ces données dans le cadre de l'application de M.I.S.E. (Modèle Intégré de Stratégie de l'Eau).

En 1992, C.P.G.F. Horizon réalise une étude diagnostic de la tranchée drainante. Trois pompes pouvant extraire jusqu'à 90 m³/h sont en fonctionnement jusqu'en 1979. Le débit maximum ne dépassait pas les 2000 m³/jour. Des problèmes d'alimentation en basses eaux sont apparus en 1980. Cette tendance à la baisse s'est maintenue jusqu'à aujourd'hui. En août 1992, C.P.G.F. Horizons réalise huit piézomètres en périphérie du puits et de la tranchée drainante.

Nous bénéficions donc de 20 ans de mesures, d'un modèle hydrodynamique aux différences finies calé sur la situation piézométrique de 1981, d'un modèle aux éléments finis, de deux situations piézométriques qui vont permettre de faire un bilan de l'évolution de la nappe entre 1965 et 1992.

1.2.2. Caractéristiques de l'aquifère

Le réservoir aquifère est constitué par les alluvions en rive gauche de la Loire et par les alluvions du Bonson dans la zone de confluence. Leur épaisseur est comprise entre 4 et 7 m. Elles sont constituées de poches de sable fin peu perméable, de sable moyen à grossier, de graviers et de galets. L'ensemble n'est pas homogène et repose sur le substratum tertiaire imperméable représenté par des argiles plastiques plus ou moins sablonneuses. Des sables argilo-limoneux de 1 à 5 m d'épaisseur recouvrent la zone prospectée par C.P.G.F. L'interprétation des 15 profils de géophysique, représentant environ 175 points de mesure, [C.P.G.F. 1965] a permis de déterminer les courbes isobathes du substratum, à l'aide de sondages d'étalonnage. La carte au 1/10 000ème résultante met en évidence:

- un chenal perméable et son prolongement vers le SW de la tranchée drainante;
- un ancien lit de rivière;
- des lentilles de sable fin.

Lors des essais de pompage par paliers et de longue durée des 18 et 19 août 1992, le niveau statique était à 4 m sous le sol, ce qui correspond à une hauteur mouillée de 1,90 m. La hauteur mouillée maximum de 3 m a été observée lors de la crue de la Loire en juin 1992. A l'issue des essais de pompage de longue durée, le rabattement observé est faible (50 cm). Cependant, C.P.G.F. note l'importance du niveau de la Loire pour la productivité des ouvrages: en niveau bas, la Loire ne se comporte pas comme un front

d'alimentation de la nappe bien que le rayon d'influence l'ait atteinte. Dès que son niveau a remonté, l'anomalie a disparu. Ainsi, le fonctionnement hydroélectrique du barrage de Grangent influe nettement sur la dynamique journalière de la nappe [C.P.G.F., 1992]. Les résultats des pompages d'essais par paliers sont synthétisés dans le Tableau 9.

ouvrage	distance en m	temps	S calculé (emmagasi- nement)	rabattement en mètres			$T.10^{-2}$ m^2/s	$K.10^{-2}$ m/s
				90 m ³ /h	120 m ³ /h	130 m ³ /h		
puits 1				0,28	0,55	0,63		0,8 à 1
PZ1	8	<1 mn	0,6 %	0,22	0,48	0,56	2,3	1,3
PZ2	55	≈ 1h30	2,2 %	0	0,02	0,04		
PZ3	13	≈ 7 mn	3,2 %	0,08	0,18	0,24	4,04	1,59
PZ4	40	≈ 1h40	4,7 %	0	0,02	0,06		
PZ5	12	≈ 5 mn	2,7 %	0,11	0,24	0,30		
PZ6	15	≈ 7 mn	2,4 %	0,04	0,075	0,13		
PZ8	65	> 1 h		0	0,02	0,02		

Tableau 9: résultats des pompages à débits constants du 18 août 1992 [C.P.G.F. Horizon, 1992]

66 points d'observation montrent que l'écoulement dans l'aquifère est à surface libre et bidimensionnel plan. En effet, il n'existe pas d'éponte supérieure qui puisse rendre l'écoulement captif. L'inclinaison d'ensemble du substratum imperméable est faible ainsi que celle de la surface libre de la nappe.

1.2.3. Réalisation du modèle de Bonson

La zone modélisée représente une surface d'environ 5 km² de Saint-Cyprien au nord, à Saint-Rambert-sur-Loire au sud. Elle est limitée à l'est par la Loire et à l'ouest par la terrasse séparant les alluvions récentes des alluvions anciennes. Elle est couverte par un maillage à mailles carrées de 100 m de côté (cf. Figure 51).

Le cours du Bonson qui traverse la zone étudiée possède un bassin versant de 136 km². Son débit moyen annuel varie de 0,34 m³/s en septembre à 2,40 m³/s en mars. La pluviométrie annuelle est de 720 mm. Les précipitations infiltrées sont de 150 à 200 mm par an et par m².

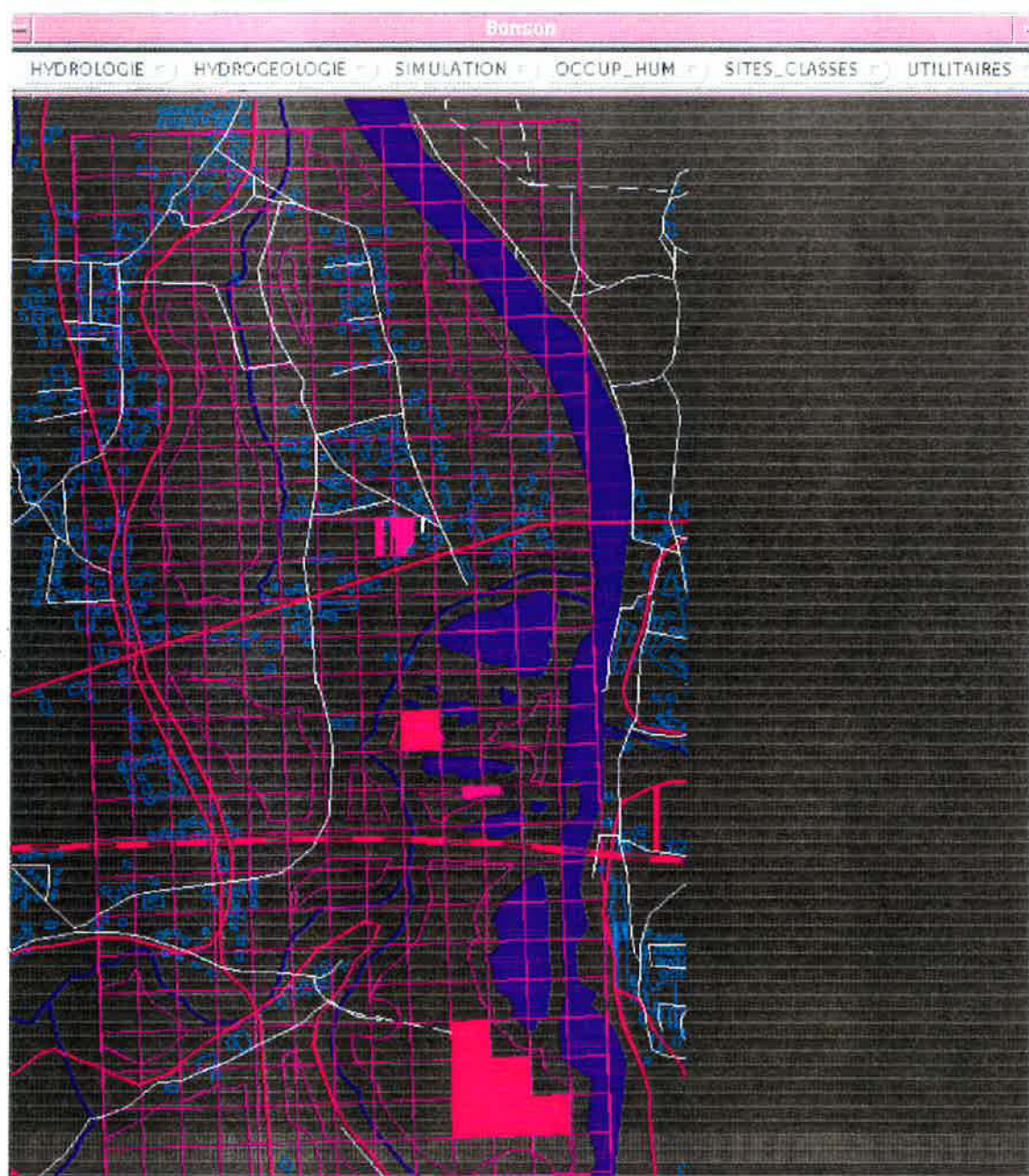


Figure 51: modèle hydrodynamique de Bonson

a. Conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes:

- la première limite est la Loire qui constitue le niveau de base vers lequel s'écoule la nappe, elle a été imposée en condition de charge;
- la seconde limite correspond à la zone d'alimentation de la nappe à partir des terrasses supérieures, elle est aussi imposée en condition de charge;
- la troisième limite est la rivière Bonson qui traverse le domaine d'étude, imposée en condition de charge;
- les dernières conditions, ponctuelles, traduisent les débits d'alimentation en eau du champ captant en rive gauche de la Loire.

b. Calage

Le calage du modèle est réalisé sur la base de la piézométrie établie par l'Ecole des Mines en 1980.

Après avoir intégré le maximum de données dans la base du modèle, une première simulation en régime permanent a permis d'en apprécier la cohérence. Des simulations successives avec ajustement de la perméabilité à partir des indocations ponctuelles de C.P.G.F. (1992) aboutissent à une restitution après calcul de la situation piézométrique de référence. Au terme de ce calage, le modèle a permis d'obtenir une carte de la répartition des perméabilités pour l'ensemble du domaine, cohérente avec la situation piézométrique de référence et la distribution des débits. Le modèle est alors utilisable pour réaliser de nouvelles simulations, autres que celle ayant servi au calage.

1.2.4. Exploitation du modèle de Bonson

P. Launay a travaillé en 1981 sur l'influence des carrières sur l'écoulement des eaux souterraines. Il disposait à cette époque de mesures piézométriques avant et après la réalisation de ces carrières. Ces mesures lui ont permis de valider son modèle et d'en prouver l'efficacité. N'ayant pas bénéficié des mêmes conditions de travail, nous présentons les résultats de P. Launay, avant proposer une autre simulation en intégrant les données récentes de 1992 et portant une carrière choisie en accord avec les contraintes juridiques actuelles.

a. Résultats des simulations de P. Launay (1981)

Le calage est effectué en régime permanent sur la situation piézométrique de 1965 sans carrières. La simulation porte sur l'exploitation de gravières en communication directe avec la Loire.

Pour simuler l'influence de l'exploitation des gravières, les modifications apportées aux données initiales sont les suivantes:

- au droit des exploitations, les conditions de charge ont été remplacées par des conditions semblables correspondant aux plans d'eau dans les gravières;
- les conditions de débit d'échange imposées le long du Bonson ont été remplacées par des conditions de charge fixes correspondant à la nouvelle ligne d'eau. En effet, dans sa nouvelle configuration étudiée, cette rivière s'interpose entre le puits d'alimentation en eau de la commune de Bonson et les gravières. Elle joue le rôle de barrière de potentiel.

La modification fondamentale du système résulte essentiellement de la nouvelle répartition des débits d'échange entre la nappe et les carrières. Or ces débits dépendent directement du degré de colmatage des exploitations. Ce paramètre étant inconnu, deux situations extrêmes sont simulées:

- dans la première hypothèse, le degré de colmatage est minimum et la répartition des perméabilités le long des berges des gravières est maintenue égale à la situation initiale;
- dans la seconde hypothèse, le degré de colmatage des berges est tel que les perméabilités affectées aux mailles placées sur les limites des gravières soient égales aux valeurs les plus faibles rencontrées sur les zones déjà colmatées naturellement dans la configuration de calage (les perméabilités de l'ordre de 8.10^{-2} m/s sont réduites à la valeur de 1.10^{-2} m/s).

La répartition des charges dans les deux simulations sont pratiquement identiques étant données la proximité des deux frontières à condition de charge imposées (la rivière Bonson et la limite ouest des gravières). Pour la seconde hypothèse, les débits d'échange entre la rivière et les gravières sont en moyenne inférieurs de 25% par rapport aux valeurs déterminées par la première simulation.

b. Résultats de simulation de carrière

Le choix des mailles pour la simulation d'une carrière est dicté par la cartographie du schéma directeur. Très peu de zones situées dans le lit majeur sont extractibles à cause essentiellement de la densité du bâti et des voies de communication, mais aussi à cause des anciennes carrières qui sont toujours en eau. Un seul site permet d'envisager l'implantation d'une carrière rectangulaire de six mailles contiguës de cent mètres de côté soit 60 000 m² comme à Balbigny. Ce site est proche de la limite ouest de alluvions récentes. Les coordonnées en lignes et colonnes des mailles sont fournies à l'utilisateur grâce au résultat de l'interrogation de la base de données attributaire du maillage du modèle. Une perméabilité de 100 m/s est imposée sur les six mailles concernées par le projet. L'exécution du calcul est suivie comme pour le modèle de Balbigny par

l'affichage simultané de la piézométrie calée et de la piézométrie simulée après implantation de la carrière.

La comparaison visuelle des deux résultats graphiques montre:

- un exhaussement de la nappe en amont hydraulique de la carrière, et une augmentation du gradient hydraulique, puisque les courbes piézométriques sont plus serrées;
- un rabattement de la nappe en aval hydraulique de la carrière;

La carrière n'étant pas située à proximité de la Loire, l'impact n'atteint pas le fleuve.

Le calcul de l'impact de la carrière par soustraction des représentations raster des piézométries calée et simulée donne les valeurs exactes de ces impacts ainsi que leur extension spatiale. L'exhaussement maximal de la nappe est de 1,70 m en amont hydraulique. Il apparaît que cet exhaussement est précédé un peu plus en amont d'un rabattement très faible en couronne autour de carrière de 20 à 50 cm. Le rabattement aval maximum est de 50 à 60 cm. L'extension spatiale maximale de la perturbation de la surface piézométrique est de 600 m environ. La surface en eau de la carrière est stabilisée à 363 m cote N.G.F.

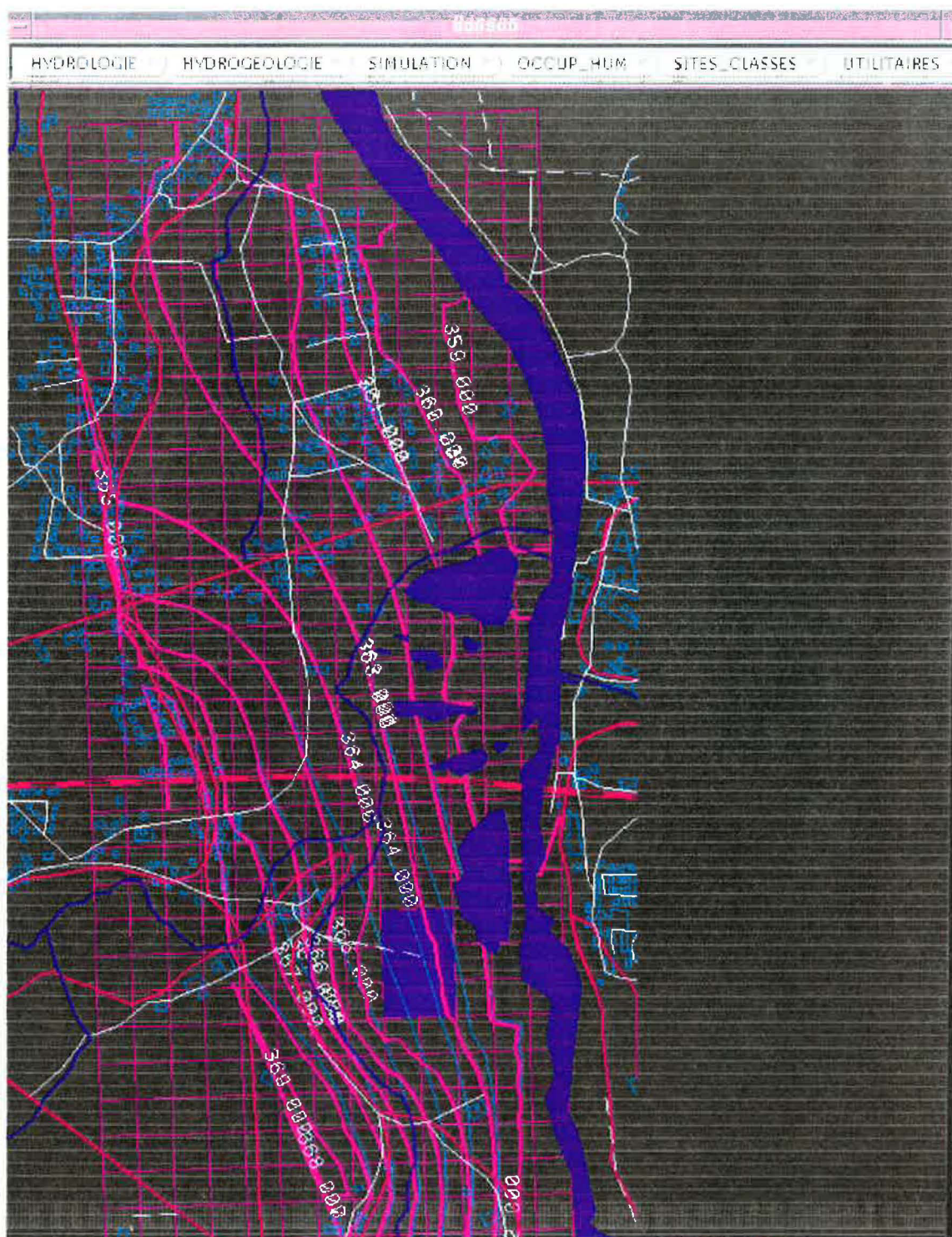


Figure 52: exemple de résultat de simulation de carrière à Bonson

2. Mise en oeuvre du Système d'Information Géographique

L'architecture de l'O.A.D. (cf. &2) place le S.I.G. dans une position centrale. Il contient la base de données géographiques et attributaires dont la mise en place et l'organisation sont des phases clé de la réalisation de l'outil. Le S.I.G. est aussi couplé aux modèles hydrodynamiques calés et validés, et à un modèle géomorphologique de détermination automatique des limites du lit majeur (cf. &1).

2.1. Base de données géographiques

La recherche de nouveaux sites pour les carrières dans la Plaine du Forez prend en compte trois types d'informations géographiques:

- les critères humains interviennent au niveau des aménagements existants, des zones protégées et des contraintes réglementaires en vigueur;
- les résultats de l'étude de la morphodynamique de la Loire et de ses nappes d'accompagnement qui cartographient les zones exploitables dans les alluvions récentes, hors de la bande de méandrage;
- les données hydrogéologiques sur la nappe des alluvions récentes. Les résultats des simulations ne sont pas intégrés puisqu'il s'agit d'exemples. L'O.A.D. est conçu pour permettre à son utilisateur de réaliser facilement ses propres simulations.

Ces informations ont deux domaines de fiabilité géographique. Certaines sont globales et ont été saisies à l'échelle de la plaine du Forez (du 1/25 000 ème au 1/100 000 ème), les autres sont locales (1/10 000 ème).

2.1.1. Données globales sur la plaine du Forez

Les données globales comportent les usages et contraintes, les aménagements humains principaux, les critères hydrologiques, géomorphologiques et hydrodynamiques.

a. Contraintes réglementaires

Les contraintes réglementaires concernent d'une part les zones inondables qui limitent les activités autorisées, et d'autre part les sites protégés qui doivent être pris en compte dans la réalisation de l'étude d'impact.

<i>contraintes réglementaires</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
Zones Inondables (Z.I.)	carte technique DDE	1991	1/10 000	polygones
ZNIEFF	carte SOGREAH	1995	1/100 000	polygones

Tableau 10: contraintes réglementaires

Dans le cas de la plaine du Forez, les carrières situées dans le lit majeur sont toutes aussi en zones inondables. Les excavations jouent un rôle d'écrêteur de crue pour les événements de très faible ampleur.

Un nombre important d'aménagements autres que les carrières sont situés en zones inondables. Ces infrastructures sont protégées par des ouvrages hydrauliques de différentes natures.

b. Aménagements humains principaux

Les aménagements humains principaux concernent les ouvrages hydrauliques et les réseaux routiers et ferroviaires.

– Les ouvrages hydrauliques

Peuvent être considérés comme des ouvrages hydrauliques toutes les infrastructures implantées sur les alluvions récentes et qui ont un impact sur ces dernières et sur la morphodynamique de la Loire. Ces ouvrages et leurs impacts ont été détaillés dans le &1. Ce sont les digues, seuils, carrières, stations d'épuration et de pompage, et les barrages hydroélectriques. Ils représentent six couvertures d'arcs, polygones et points digitalisés d'après des documents de sources variées (cf.

Tableau 11).

<i>ouvrages hydrauliques</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
seuils	carte technique DDE	1991	1/25 000	arcs
	travail de terrain	1993/95		
digues	carte technique DDE	1991	1/25 000	arcs
carrières	cartes I.G.N.	1991	1/25 000	polygones
	photographies aériennes	1991	1/17 000	
stations d'épuration	cartes I.G.N.	1991	1/25 000	points
stations de pompage	cartes I.G.N.	1991	1/25 000	points
barrages	cartes I.G.N.	1991	1/25 000	points

Tableau 11: aménagements hydrauliques dans la plaine du Forez

– Les réseaux routiers et ferroviaires

Le réseau routier de la plaine du Forez compte tenu de l'échelle de travail n'a pas été détaillé au delà de l'autoroute 72 qui relie Saint-Etienne à Clermont-Ferrand et les routes départementales et nationales qui ne sont pas différenciées. Le réseau ferroviaire est considéré à part (cf. Tableau 12).

<i>Réseau</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
A72	cartes I.G.N.	1988	1/50 000	arcs
routes nationales et départementales	cartes I.G.N.	1988	1/50 000	arcs
réseau ferroviaire	cartes I.G.N.	1988	1/50 000	arcs

Tableau 12: transports dans la plaine du Forez

c. Données hydrologiques et géomorphologiques

Les données hydrologiques et géomorphologiques regroupent l'ensemble des informations historiques et actuelles sur la Loire et son lit majeur dans la plaine du Forez. Certaines proviennent de la saisie de cartes, d'autres ont été achetées à l'I.G.N., d'autres encore sont issues de l'étude géomorphologique.

<i>hydrographie et géomorphologie</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
Loire en 1991	cartes I.G.N.	1991	1/25 000	polygones
Loire en 1954	photographies aériennes	1954	1/25 000	polygones
Loire en 1946	photographies aériennes	1946	1/25 000	polygones
affluents	B.D. Carto	1993	entre 1/50 000 et 1/5 000	arcs
chenal actif de la Loire en 1849	Ponts et Chaussées Dir. Voies Navigables Armées et cadastre	post 1910 1946 1849	1/20 000	polygones
lit mineur en 1849	Ponts et Chaussées Dir. Voies Navigables Armées et cadastre	post 1910 1946 1849	1/20 000	polygones
Bande de Méandrage (B.M.)	cf. &1	entre 1849 et 1991	1/25 000	polygone
plaine du Forez	cartes géologiques B.R.G.M.		1/50 000	polygone
failles	carte fracturation thèse D. Ech. Charif	1996	1/50 000	arcs
terrasses anciennes	cartes techniques C.P.G.F.	1979	1/25 000	arcs
lit majeur géologique	cf. &1	1996	1/50 000	arcs
M.N.T.	B.D. Carto	1993	1/50 000	rep. raster
profils en travers	D.D.E. Navigation M.N.T.	1993 1993	1/1 000 1/50 000	arcs arcs
Convexités	cf. &1	1996	1/50 000	rep.raster

Tableau 13: hydrologie et géomorphologie dans la plaine du Forez

Les données achetées à l'I.G.N. posent un problème de coût qui est, aussi bien pour le M.N.T. que pour le réseau hydrographique, particulièrement élevé. De plus, l'échelle de saisie est:

- variable (réseau hydrographique), ce qui implique des documents avec une précision aussi très variable (entre 50 et 5 m), ou:
- trop petite (M.N.T.) comprenant des valeurs erronées.

d. Données hydrodynamiques

Les données hydrodynamiques à l'échelle de la plaine du Forez sont peu nombreuses. Elles concernent essentiellement la piézométrie établie en mai 1995 par SOGREAH et la résistivité établie en 1979 par C.P.G.F (cf. Tableau 14).

<i>hydrodynamique</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
piézométrie	cartes SOGREAH	1995	1/25 000	arcs
résistivité	cartes techniques C.P.G.F.	1979	1/25 000	arcs et polygones
maillages	cartes techniques C.P.G.F. thèse P. Launay	1979	1/10 000	polygones polygones

Tableau 14: hydrodynamique

2.1.2. Base de données locale à Balbigny

La base de données locale à Balbigny reprend partiellement les données de la B.D. sur la plaine du Forez notamment en ce qui concerne les couvertures représentant des informations élémentaires, telles que la Loire. Elle ne comprend pas l'ensemble des données historiques sur la géomorphologie puisqu'elle est destinée à l'étude d'impact hydrogéologique. Elle comporte donc en supplément toutes les données relatives au modèle hydrodynamique et aux caractéristiques de l'aquifère. Les thèmes sont sensiblement différents de ceux de la B.D. globale et comprennent:

- l'hydrologie;
- l'hydrogéologie et le modèle hydrodynamique;
- l'occupation humaine.

a. hydrologie

En matière d'hydrologie, seul le réseau actuel, c'est à dire la Loire et ses affluents, sont représentés. Sont considérés comme plans d'eau: les étangs, les carrières anciennes et/ou celles en activité (cf. Tableau 15).

<i>hydrologie</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
Loire	carte I.G.N.	1991	1/25 000	polygones
affluents	B.D. Carto I.G.N.	1993	entre 1/50 000 et 1/25 000	arcs
plans d'eau (carrières, étangs)	cartes I.G.N. et photographies aériennes	1991 1991	1/25 000 1/17 000	polygones

Tableau 15: B.D. locale (Balbigny), hydrologie

b. Hydrogéologie

Ce sont les données hydrogéologiques (cf. Tableau 16) qui sont plus nombreuses et aussi plus 2,5 fois plus précises (car elles ont été saisies au 1/10 000ème) que dans la base de données de la plaine du Forez (échelle de saisie 25 000ème). Trois couvertures

de piézométrie sont proposées en hautes et basses eaux entre 1977 et 1981. La piézométrie de mai 1995 qui correspond à une situation intermédiaire dans l'année hydrologique est conservée à titre d'information. Les caractéristiques de l'aquifère sont synthétisées dans les couvertures du toit du substratum, de l'épaisseur du recouvrement argileux, et de la perméabilité. L'épaisseur du magasin aquifère est une information supplémentaire qui résulte d'un traitement en analyse spatiale sur S.I.G.

Les couvertures de polygones de l'altitude du toit du substratum, et de l'épaisseur du recouvrement argileux ont été transformées en représentations en mode raster de manière à être traitées avec le M.N.T. de l'I.G.N. Le pas du maillage choisi est de 50 m pour rester cohérent avec les données de l'I.G.N.. L'épaisseur de la formation des alluvions récentes est ensuite calculée entre les matrices: altitude du sol - (altitude du toit du substratum + épaisseur du recouvrement argileux). Le résultat est conservé dans la base de données sous sa forme raster.

Enfin, la base de données hydrogéologique comprend le maillage du modèle hydrodynamique.

<i>hydrogéologie</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
piézométrie hautes eaux	C.P.G.F.	02/77	1/10 000	arcs
piézométrie basses eaux	C.P.G.F.	08/81	1/10 000	arcs
piézométrie basses eaux	C.P.G.F.		1/10 000	arcs
piézométrie « moyenne »	SOGREAH	05/95	1/25 000	arcs
perméabilité	C.P.G.F.	1979	1/10 000	polygones
épaisseur de la couverture	C.P.G.F.	1979	1/10 000	polygones
épaisseur des alluvions	C.P.G.F.	1979	1/10 000	représentation en mode raster
toit du substratum	C.P.G.F.	1979	1/10 000	polygones
maillage	C.P.G.F.	1979	1/10 000	polygones

Tableau 16: B.D. locale (Balbigny), hydrodynamique

c. Occupation humaine

La Base de Données géographiques concernant l'occupation humaine regroupe l'ensemble des aménagements ou des contraintes au sol qui sont des facteurs limitants ou favorisants dans le choix d'une future carrière. La sélection de ces informations découle de l'étude des réglementations en matière de carrières. Par exemple les digues interviennent en limitant le « lit endigué » où toute extraction est interdite. Le réseau routier est aussi plus développé, divisé en quatre couvertures de la route nationale au chemin vicinal (cf. Tableau 17). Dans un projet de carrière, les infrastructures existantes pour l'accès au site d'extraction sont importantes car elles minimisent les coûts d'exploitation. La construction d'une route vicinale ou d'un chemin carrossable pour les engins de chantier est en effet très onéreuse. Le schéma directeur est une ébauche locale

du Schéma Départemental des Carrières (S.D.C.). Il a été élaboré par analyse spatiale (cf. &2) et synthétise les contraintes réglementaires sous une forme graphique simple. En plus, il prend en compte certains résultats de l'analyse géomorphologique (cf. &1) à titre indicatif, ce qui représente un apport supplémentaire par rapport au S.D.C. La compréhension de ce schéma directeur dépend de la visualisation des couvertures qui ont contribué à son élaboration, soient: le bâti, le réseau routier, le lit endigué, les périmètres de protection rapprochés et éloignés des captages, les cimetières et les Z.N.I.E.F.F. A titre d'information les sondages disponibles dans la banque de données du sous sol du B.R.G.M. sont reportés. Enfin, deux photographies aériennes au 1/17 000 de 1991 ont été recalées et intégrées dans cette base de données. Elles permettent la vérification de la validité des différentes couches d'informations proposées, et un repérage spatial plus facile. L'intégration de missions aériennes plus anciennes ou plus récentes est utile pour faire apparaître d'éventuelles modifications de répartition des carrières.

<i>aménagements</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
digues	Carte administrative	1994	1/25 000	arcs
bâti	Carte I.G.N.	1991	1/25 000	polygones
routes nationales	Carte I.G.N.	1991	1/25 000	arcs
routes départementales	Carte I.G.N.	1991	1/25 000	arcs
routes vicinales	Carte I.G.N.	1991	1/25 000	arcs
chemins carrossables	Carte I.G.N.	1991	1/25 000	arcs
Schéma Directeur	analyse spatiale	1995	1/25 000	polygones
Zones NDS (prévues pour l'extraction de graviers)	Plan d'Occupation des Sols	1995	1/10 000	polygones
Périmètres de protection des captages rapprochés et éloignés	Administration	1995	1/10 000	polygones
Cimetières	Carte I.G.N.	1995	1/25 000	points
Sondages	Banque de Données du Sous Sol (B.R.G.M.)		1/25 000	points
photos aériennes		1991	1/17 000	images

Tableau 17: B.D. locale (Balbigny), aménagements

2.1.3. Base de données locales à Bonson

La base de données locale à Bonson est identique à celle de Balbigny en ce qui concerne les thèmes de l'hydrologie, de l'occupation humaine et du modèle hydrodynamique. C'est à dire qu'elle comporte les mêmes couches cartographiques, en conséquence ces thèmes ne sont pas repris ici. Elle est différente pour l'hydrogéologie puisque la nature des informations et les dates d'acquisition sont spécifiques à chaque secteur.

Les données hydrogéologiques (cf. Tableau 18) à Bonson comme à Balbigny ont été saisies au 1/10 000ème. Trois états piézométriques sont proposés entre 1965 et 1995. Les caractéristiques de l'aquifère sont synthétisées dans les couvertures du toit du substratum et de la perméabilité. L'épaisseur du magasin aquifère ne figure pas dans la base de données hydrogéologique car sans information cartographique sur l'épaisseur du recouvrement argileux, le calcul sur S.I.G. n'a pas pu être effectué.

Il n'y a pas de captage en activité dans la nappe des alluvions récentes à Balbigny. Par contre, à Bonson l'importance du champ captant et de son impact sur la piézométrie ont conduit à une couche cartographique supplémentaire comportant: les piézomètres réalisés par HORIZONS en 1992, les puits et la tranchée drainante.

Enfin, comme à Balbigny la base de données hydrogéologique comprend le maillage du modèle hydrodynamique.

<i>hydrogéologie</i>	<i>source</i>	<i>date</i>	<i>échelle de saisie</i>	<i>couverture</i>
piézométrie	C.P.G.F.	1965	1/10 000	arcs
piézométrie basses eaux	C.P.G.F.	1992	1/10 000	arcs
ouvrages hydrauliques • piézomètres • tranchée drainante • puits	HORIZONS	1992	1/10 000	• points • arc • points
piézométrie « moyenne »	SOGREAH	05/95	1/25 000	arcs
perméabilité	C.P.G.F.	1965	1/10 000	polygones
toit du substratum	C.P.G.F.	1965	1/10 000	polygones
maillage	E.M.S.E.	1980	1/10 000	polygones

Tableau 18: Base de Données hydrogéologique locale à Bonson

Ces informations cartographiques sur la plaine du Forez, sur Balbigny et sur Bonson représentent 66 couches classées lors de la saisie en huit thèmes différents selon la nature de l'information. Leur extension spatiale est variable (globale ou locale), leurs fonctions dans l'O.A.D. sont distinctes (information, simulation, analyse spatiale etc.). La base de données représente donc une masse importante de couches cartographiques qu'il faut organiser en fonction de critères pertinents.

2.1.4. Organisation des données

Les données géographiques et attributaires sont organisées selon des critères qui concernent d'une part la prise en compte de l'extension spatiale des informations et d'autre part leur validité temporelle.

a. Extension spatiale des informations

Tout d'abord, l'extension géographique des informations disponibles conduit à diviser la base de données en trois ensembles principaux (cf. Figure 53) selon leur caractère global (plaine du Forez) ou local (Balbigny et Bonson). Cette séparation est motivée par l'échelle et la précision des documents initiaux précisées dans un dictionnaire des données consultable en annexes. Ce sont cette échelle et cette précision initiales qui dictent le choix de l'échelle de restitution de l'information. Aujourd'hui, l'utilisation d'un S.I.G. permet l'édition de plans et de cartes à des échelles très variables. Si l'utilisateur n'est pas vigilant, il peut être amené à créer des documents avec une précision bien supérieure à celle des données initiales. Cette précision est cependant artificielle, puisque la précision réelle sera toujours fonction des données d'origine. En séparant la B.D. d'une part en données globales, et d'autre part en données locales, l'utilisateur est dans l'impossibilité de superposer des couches d'information de précisions très différentes et de les utiliser dans le même document cartographique à grande échelle. En revanche, il a toujours la possibilité d'éditer des vues zoomées d'informations à petite échelle.

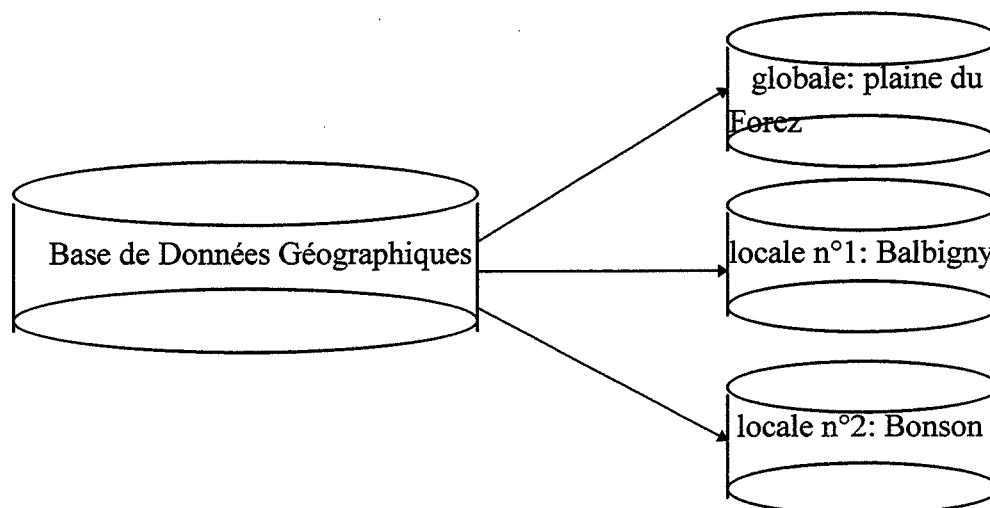


Figure 53: premier niveau d'organisation de la base de données géographiques

Il est possible d'intégrer dans la base de données géographique des informations concernant un ou plusieurs autres secteurs en créant de nouveaux sous-ensembles. Il est aussi possible d'intégrer dans les trois sous-ensembles existants d'autres thèmes comme la faune, la flore, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, qui entrent dans la composition des études d'impact. La seule limitation au nombre des informations

intégrables dans la base de données est la capacité mémoire de la machine sur laquelle l'O.A.D. est implanté.

b. Actualisation des informations

La prise en compte du temps est primordiale dans un outil qui propose des données géographiques, hydrogéologiques etc. historiques, actuelles et futures comme *l'état piézométrique de la nappe après réalisation d'une carrière*. Les informations peuvent être considérées comme (cf. Figure 54):

1 - **données historiques** dont la date d'édition est connue. Elles peuvent être considérées comme inchangentes à l'échelle de la durée d'un projet de carrière (la fracturation), ou refléter l'état géographique de l'un des élément du système à un instant particulier (la Loire en 1846);

2 - **données « actuelles »** comme la cartographie des zones inondables. Ce type d'information administrative dont la date de réalisation peut être ancienne (1947 pour certaines communes de la plaine) mais elle reste valable aujourd'hui jusqu'à l'édition d'un nouveau plan. C'est aussi le cas du schéma directeur qui évolue en fonction des contraintes réglementaires. Celui qui est proposé dans cet outil est représente spatialement la situation juridique « carrières » de 1996. Parmi ces données actuelles, certaines doivent être mises à jour avec (tracés en plan de la Loire) ou sans conservation de l'état antérieur (schéma directeur). En ce qui concerne les données à mettre à jour, la date de l'opération est simple lorsqu'il s'agit d'un plan administratif qui vient d'être modifié, ou du résultat d'une nouvelle campagne piézométrique. Par contre pour des informations plus générales telles que le bâti ou le réseau routier, il est nécessaire de mettre en place un protocole d'alerte de « donnée périmée » à partir d'un laps de temps qui ne peut être qu'arbitraire. L'utilisateur est averti de l'utilisation d'un plan ancien, et incité à le remettre à jour ou à vérifier sur le terrain si des changements majeurs n'ont pas été effectués (réalisation d'une zone industrielle par exemple);

3 - **futures** comme les résultats de simulations hydrodynamiques qui seront ou ne seront pas conservés.

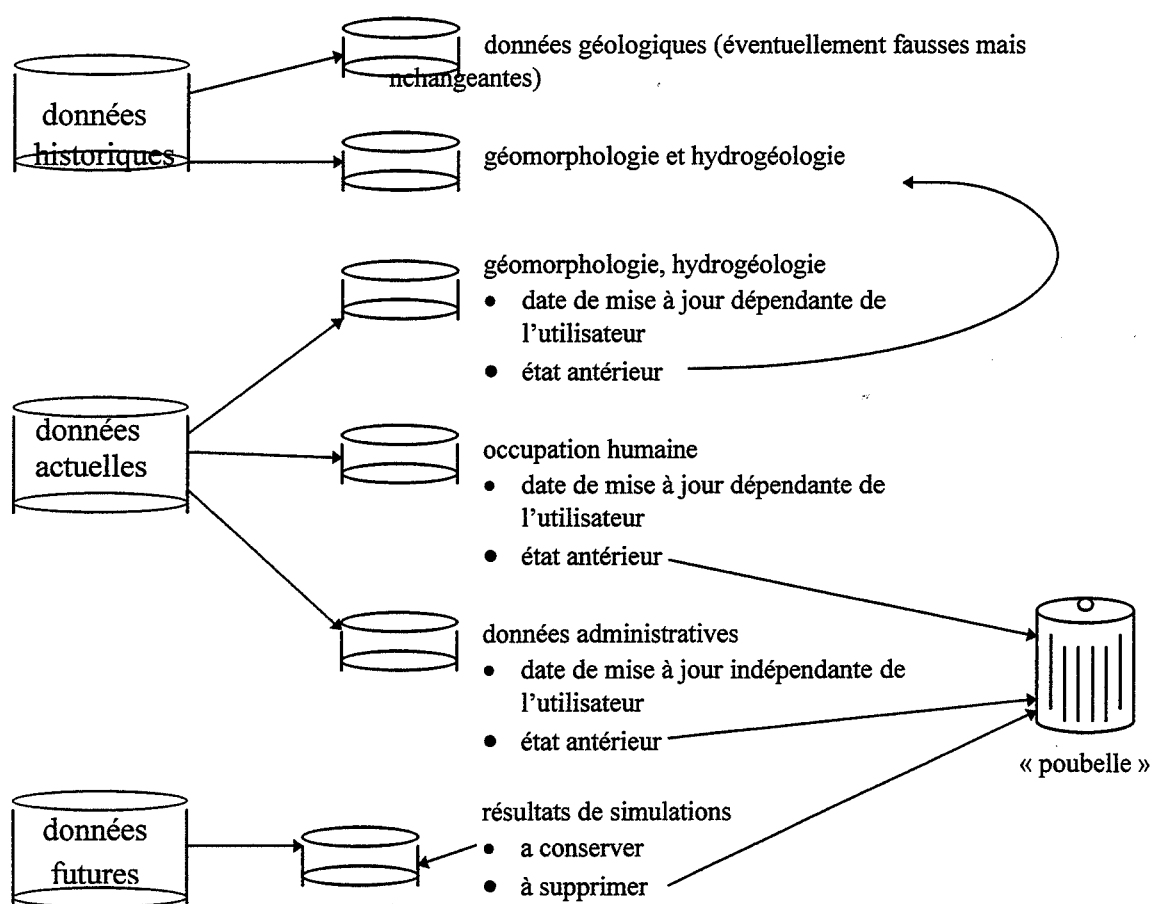


Figure 54: typologie des données géographiques en fonction de leur actualisation

La base de données prend en compte la pérennité des données en séparant chaque ensemble (B.D. globale sur la plaine du Forez et les deux B.D. locales sur Balbigny et Bonson) en trois selon que la réactualisation des informations qu'elles contiennent est souhaitable à court ou à long terme, ou totalement inutile (cf. Figure 55). Les données à mettre à jour sont elles-mêmes partagées en deux groupes suivant la durée de leur fiabilité annuelle ou décennale. Cette organisation est commune aux trois ensembles principaux, mais pour Balbigny et Bonson un quatrième sous-ensemble intervient qui comprend toutes les données relatives aux modèles hydrodynamiques. Ce sous-ensemble et les données à réactualiser sont les seules à être accessibles à l'opérateur.

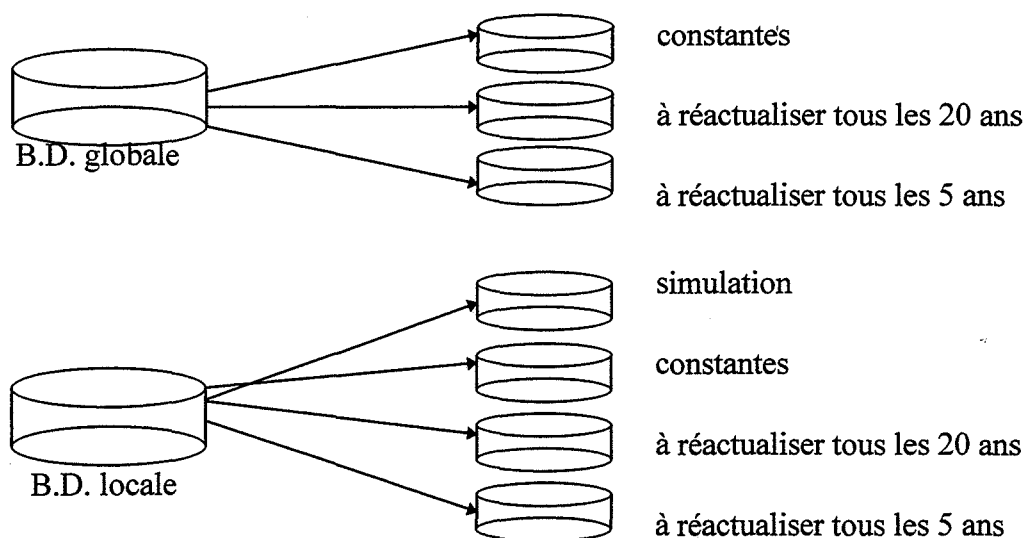


Figure 55: organisation des données géographiques pour la mise à jour

La mise à jour des données est essentielle pour assurer l'opérationnalité d'un O.A.D., cependant elle ne peut être effectuée qu'en acceptant un certain différé et une périodicité qui a été ici établie arbitrairement à cinq et vingt ans. En effet, la situation en temps réel du bâti (par exemple) n'a pas forcément une grande importance pour les carriers. La première durée de cinq ans a été choisie car l'évolution de l'occupation humaine est susceptible d'y être significative. Une durée inférieure impliquerait une demande de remise à jour pour des corrections de détails et ne serait pas justifiée. La deuxième durée de vingt ans peut sembler longue mais elle s'applique à des données géomorphologiques ou à des infrastructures d'envergure comme les barrages ou les autoroutes (cf. Tableau 19). Il est possible après concertation avec les utilisateurs potentiels de l'O.A.D. de définir d'autres périodicités et de changer celles qui sont actuellement opérationnelles.

	Base de données globale sur la plaine du Forez	Bases de données locales Balbigny et Bonson
données constantes	limites de la plaine du Forez	maillages
	Modèle Numérique de Terrain	perméabilité
	convexités	toît du substratum
	failles	épaisseur de la couverture
	terrasses anciennes	épaisseur de la nappe
	lit majeur	piézométries historiques
	Loire 1846	
	lit mineur 1846	
20 ans	tracé en plan de la Loire	autoroute
	profils en travers	voies ferrées
	profil en long	barrages
	bande de méandrage	sondages
	affluents	profils géophysiques
	autoroute	
	voies ferrées	
5 ans	réseau routier principal	routes vicinales
	digues	chemins carrossables
	seuils	carrières
	carrières	périmètres de protection des captages
	stations d'épuration et de pompage	P.O.S.
	piézométrie	piézométrie
		photographies aériennes

Tableau 19: répartition des couches d'information des B.D. en fonction du délai de mise à jour

2.1.5. Base de données géographiques pour un « O.A.D. carrières »

La B.D. intégrée dans l'Outil d'Aide à la Décision comporte plusieurs types de données:

- données géographiques globales (plaine du Forez);
- données géographiques locales (Balbigny et Bonson);
- données géographiques à validité constante dans le temps;
- données géographiques futures calculées;
- données géographiques à validité limitée à cinq ans;
- données géographiques à validité limitée à vingt ans.

Ces données peuvent être regroupées par thèmes:

- géomorphologie;
- hydrologie;
- hydrogéologie;
- modélisation hydrodynamique;
- occupation humaine.

La B.D. géographiques comporte des données en mode vecteur (couvertures de points, d'arcs et de polygones), des données en mode raster et des images.

La conception et l'élaboration de son architecture en deux niveaux (spatial et temporel) est motivée par l'échelle et la précision des documents initiaux, l'outil ne devant pas inciter l'utilisateur à travailler à une échelle trop grande. Par contre il doit lui permettre de prendre en considération « l'âge » de ses données de manière à lui proposer des situations historiques, actuelles et futures.

L'utilisation de cette base de données et des modèles hydrodynamiques n'est pas simple et la nécessité d'un interface homme-machine doit être discutée. L'intérêt d'un tel complément serait la finalisation d'un outil de gestion des ressources en eau.

2.2. Nécessité d'un « interface homme-machine spécifique » ?

La conception et la réalisation de l'interface est une phase très importante du développement de l'O.A.D. qui vise à améliorer l'usage qui en sera fait. Si l'interface est incomplet ou obscur, alors l'outil ne sera pas exploitable et tombera en désuétude. C'est pourquoi dans le cadre de ce travail de thèse nous avons intégré la recherche d'un interface approprié. Cette étape comporte une phase de conception et une phase de réalisation selon deux niveaux:

- le module global sur la plaine du Forez;
- deux modules locaux sur les sites qui comportent des modèles hydrodynamiques.

2.2.1. Méthodologie

La démarche proposée par C. Kolsky (1993) est une méthodologie d'ingénierie pour la conception ergonomique d'interfaces pour la supervision de contrôles de procédés industriels. Bien qu'un outil environnemental d'aide à la décision utilisant un S.I.G. soit très éloigné par exemple de la recherche de dysfonctionnements dans une centrale

nucléaire, certaines des étapes proposées en amont de l'élaboration de l'interface sont intéressantes. Cette démarche adaptée à notre objectif se déroule en trois phases classiques pour l'ensemble des outils informatiques: d'une part l'analyse fonctionnelle et d'autre part, l'analyse structurelle qui conduit à la réalisation.

La caractérisation de l'hydrosystème et de son fonctionnement a guidé la construction de la base de données. Les données qui répondent au besoin informationnel de l'opérateur devront être remises en forme pour générer des vues. Elles serviront à l'élaboration de vues interactives qui doivent faciliter le travail de l'opérateur puisque sa décision repose sur « l'image » qu'il se fera, à partir de l'interface, à la fois de l'hydrosystème, des aménagements et de leur impact.

a. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle consiste à reconstituer la démarche habituelle de l'opérateur face à une prise de décision, et d'en formaliser les tâches, les besoins en assistance et en information. Pour cela, il faut tout d'abord déterminer les caractéristiques de l'opérateur pour lequel l'outil est élaboré.

– Opérateur

Les utilisateurs ciblés pour cet outil sont les planificateurs membres de la Commission Départementale des Carrières, les industriels exploitants de carrières et les bureaux d'étude qui réalisent les études d'impacts de carrières. Les connaissances théoriques des opérateurs ont trait à la géologie, à l'hydrogéologie, à l'hydrologie, au climat et à l'écologie (faune, flore, nuisances). Tous ces thèmes sont abordés successivement dans leurs études. Les connaissances pratiques concernent les modes d'exploitation, de réhabilitation, de calculs etc. Les outils et méthodes choisis pour répondre à l'objectif, qui ne rentrent pas dans leurs compétences sont le S.I.G. et la lecture des diagrammes causals. Les objectifs, modes de fonctionnement et capacités des modèles hydrodynamiques sont généralement bien connus.

– Démarche de l'opérateur

Pour rechercher des sites extractibles ou répondre à une demande d'étude d'impact, le premier travail est de situer les parcelles concernées dans un cadre environnemental et réglementaire global (cf. Figure 56). Ensuite, en fonction des contraintes et des implantations humaines deux cas sont possibles: soit la carrière est réalisable, soit elle ne l'est pas et un autre site est cherché. Dans le cas favorable, suit un inventaire des données disponibles selon les thèmes imposés par le décret 93-245 du 25 février 1993 [J.O. du 26 février 1993, p. 3033] pour décrire l'état initial. Puis il faut estimer les effets

directs et indirects de la carrière sur l'environnement et notamment sur les modifications d'écoulement des eaux souterraines. Les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère dans lequel les matériaux seront prélevés étant généralement peu connues, l'opérateur va réaliser une expertise à partir de ses connaissances et de son vécu. L'utilisation de la Dynamique des Systèmes et des modèles hydrodynamiques dans la plaine du Forez, lui donnent accès à d'autres niveaux de travail. La carrière projetée peut être indemne ou situé en dehors des maillages des modèles. Dans le premier cas, l'opérateur réalise des simulations et donne une évaluation quantitative des impacts de la carrière sur la nappe alluviale. Dans le deuxième cas, il se reporte aux diagrammes causals. Ces derniers appuyés par l'expertise de l'opérateur donnent une évaluation qualitative des impacts de la carrière sur la nappe alluviale.

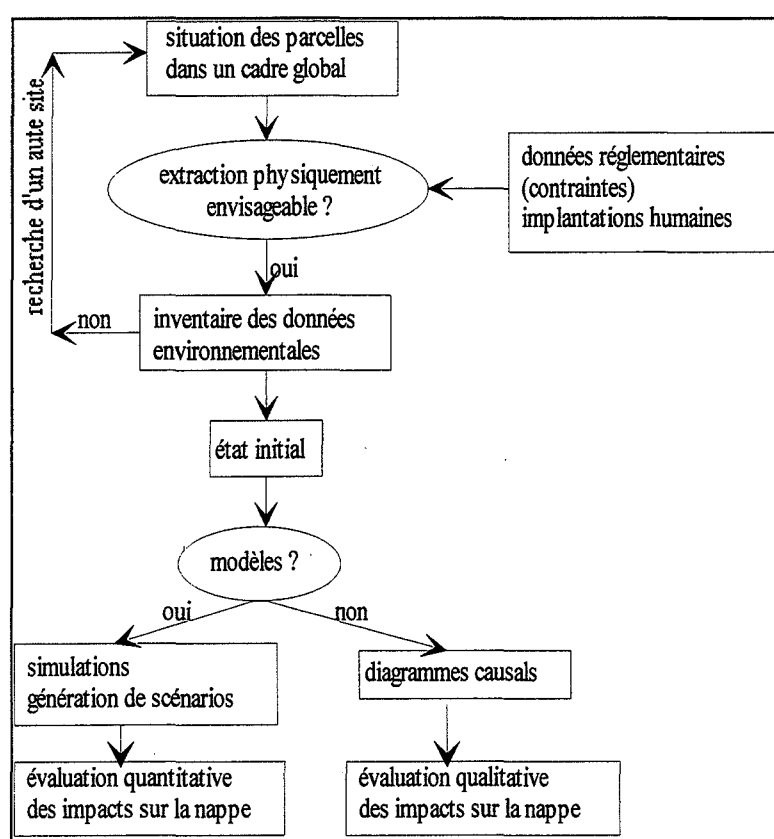


Figure 56: démarche de l'opérateur

Les besoins informationnels simples sont déduits de la Figure 56, les données réglementaires, environnementales, les implantations humaines et leurs attributs sont requis sous forme graphique et sous forme de textes descriptifs, par exemple pour les zones inondables: « courant fort » et « courant faible ». Pour les simulations hydrodynamiques un niveau d'information plus complexe est nécessaire. L'opérateur peut avoir besoin de connaître toutes les caractéristiques de l'aquifère en un point qu'il va sélectionner lui-même. Une interrogation verticale de toutes les couches apportera ces réponses.

– Formalisation des tâches

Les tâches à accomplir peuvent être séparées en deux catégories. Ce sont tout d'abord celles de l'opérateur dans sa démarche de prise de décision, et ensuite celles de l'outil qui ont pour but de lui faciliter le travail: les utilitaires.

Les tâches de l'opérateur

D'après l'analyse de la démarche dans le cas où la carrière est physiquement possible, l'opérateur va définir l'état initial en fonction des données globales sur la plaine du Forez. Sa première tâche est la visualisation de ces données géographiques. Son premier besoin est uniquement informationnel. Ensuite, il va visualiser la localisation des maillages hydrodynamiques et voir si les parcelles concernées par son projet sont situées à l'intérieur ou à l'extérieur. Dans le premier cas, il réalise des simulations et a besoin d'informations plus complètes (surtout en matière d'hydrogéologie). La deuxième tâche est encore de visualiser et de s'informer sur la géométrie de l'aquifère, sa dynamique etc. Après avoir acquis cette connaissance (cf. Figure 57), la simulation demande la localisation des mailles qui correspondent le mieux au tracé des parcelles. Il doit être renseigné sur leurs coordonnées en lignes et en colonnes. L'opérateur ouvre alors le fichier texte des données du modèle et impose une perméabilité importante sur ces mailles. Il sauvegarde puis ferme le fichier et exécute le modèle. L'outil lui donne accès aux résultats graphiques. La comparaison de l'état initial et final de la piézométrie, puis l'expertise sont deux tâches non assistées par l'outil et qui font appel à ses connaissances. En fonction de sa réflexion, il décide de sauvegarder sous un nom qu'il saisit au clavier, ou de supprimer le résultat de la simulation. A la fin de ce travail, il revient à sa dernière vue globale et quitte l'outil.

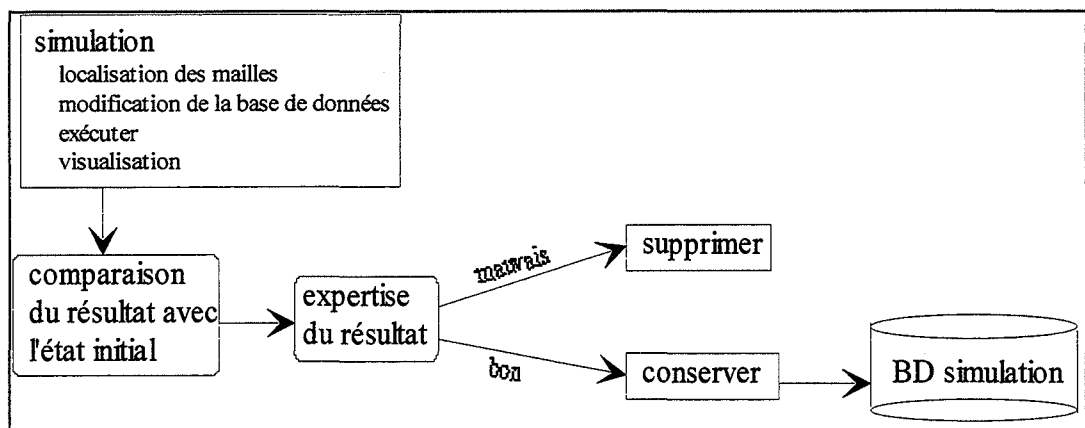


Figure 57: analyse fonctionnelle des tâches de simulation hydrodynamique

Les tâches de l'outil: utilitaires

La définition de l'état initial du site dépend de la qualité de la réponse de l'outil (base de données géographiques) aux besoins informationnels. L'accès aux données, leur mise en forme et l'affichage déterminent la facilité d'utilisation et de lecture. Toutes les

informations disponibles sur l'ensemble de la plaine du Forez (tracés de la Loire, réseau hydrographique, réseau routier etc.) représentent un espace géographique de 50 km de long environ, confiné sur un écran d'ordinateur. Pour une meilleure lisibilité une fonction zoom est indispensable avec déplacement horizontal de la vue zoomée, selon des agrandissements ou/et diminutions standards, retour à l'état initial. La superposition de plus de cinq ou six couches d'informations rend le graphisme trop dense, il faut alors avoir la possibilité d'effacer et de recommencer une autre vue. La mise à jour des données est l'utilitaire le plus important qui demande la sélection de la couverture (parmi celles qui sont accessibles à l'écriture pour l'opérateur), sa mise à jour et sa sauvegarde. Enfin, l'outil doit permettre de quitter le niveau global informationnel et le niveau local informationnel et de simulation pour revenir à la racine de son système.

b. Analyse structurelle

L'analyse structurelle consiste, à partir de l'analyse fonctionnelle, à esquisser le squelette de l'interface et les connexions entre les différents menus (cf. Figure 58). Le démarrage de l'O.A.D. s'effectue sous la racine d'Arc/Info et permet d'accéder à un « module d'accueil » puis au menu concernant le site régional à étudier, ici la plaine du Forez. Ce menu déroulant propose l'ensemble des données globales par thème et un sous-menu sur le choix des profils en travers du cours d'eau concerné par le site étudié, ici la Loire. La visualisation des maillages fait apparaître un menu de choix de simulation. Si l'opérateur sélectionne « oui », deux options « Balbigny » ou « Bonson » lui sont proposées dans le menu suivant, il accède alors aux menus locaux. Le résultat de l'interrogation ponctuelle de l'ensemble de la base de données hydrogéologiques sur les mailles du modèle est présentée sous la forme d'un menu qui permet en outre de sélectionner une autre maille ou de revenir au menu local par exemple pour changer de site d'étude.

- > accès aux sous menus
 —————> retour aux menus supérieurs

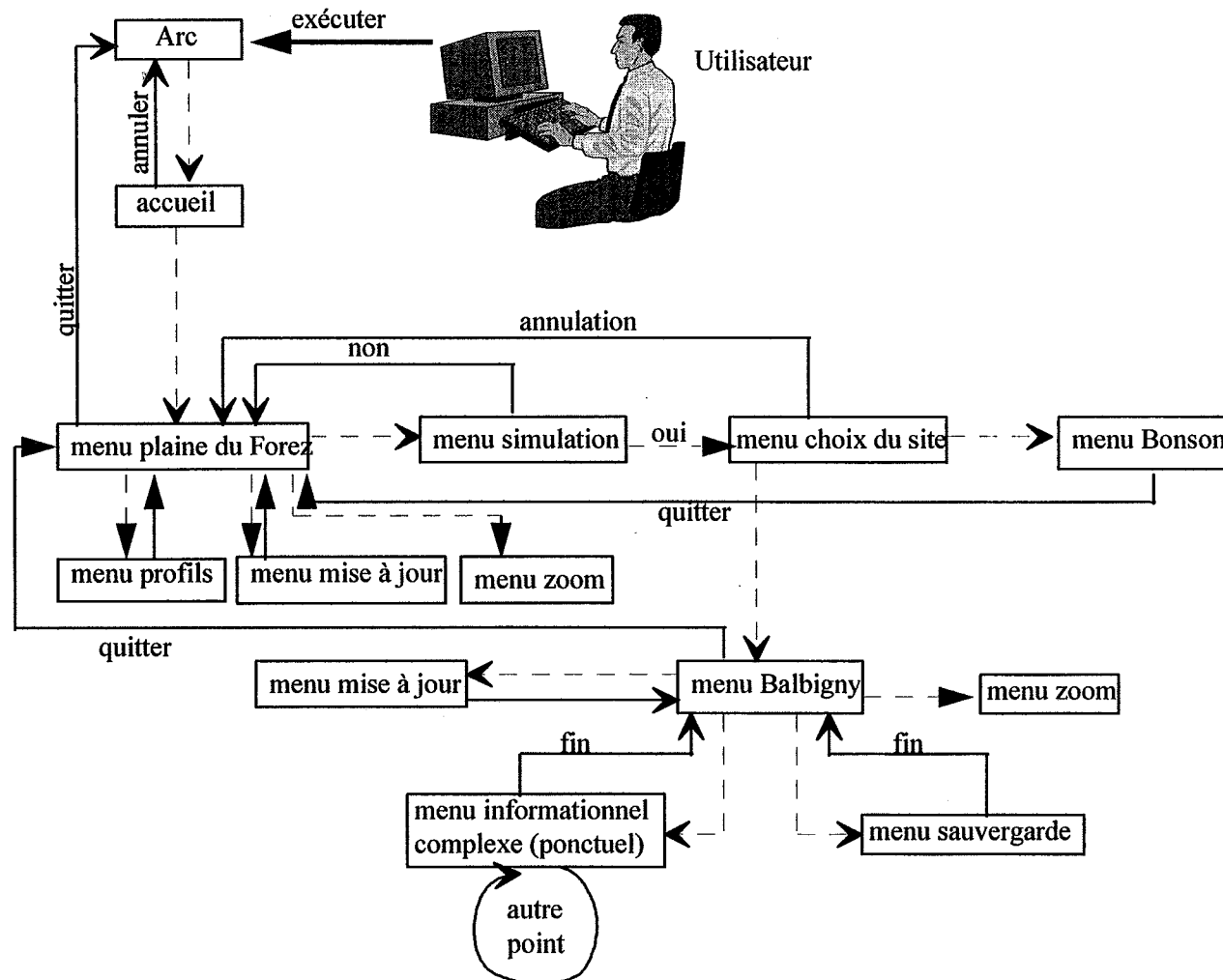


Figure 58: schéma de principe de fonctionnement de l'interface homme machine

2.2.2. Réalisation de l'interface

L'interface est un ensemble de programmes en Arc Macro Language (A.M.L.) qui décrivent les différents menus qui appellent d'autres programmes de calcul (modèles hydrodynamiques) et de macrocommandes. Ces deux types de programmes sont enregistrés dans deux espaces de travail appelés respectivement « menus » et « AMLs » inclus dans la B.D. (cf. Figure 59). Chaque programme en AML indique au départ la localisation de chacun des éléments nécessaires à son exécution: données géographiques, autres AMLs, menus et l'extension géographique maximale de l'affichage, par exemple la plaine du Forez .

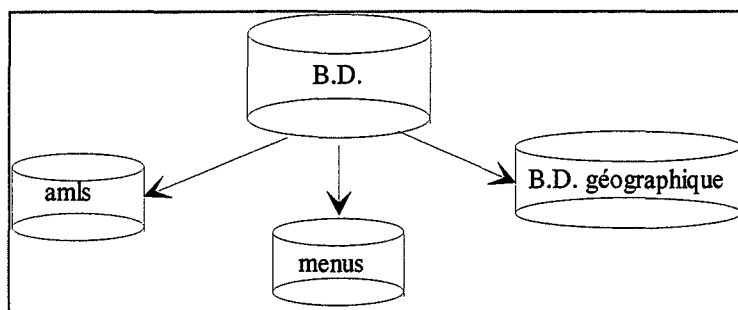


Figure 59: base de données de l'outil d'aide à la décision

Les menus représentent des listes de choix de façon littérale. La désignation d'un élément dans une liste à l'aide du curseur déclenchent exécution d'une commande Arc/Info, d'une procédure AML, d'un autre menu ou l'affichage d'une entité géographique de la base de données. Cette entité est définie par son type (couverture de points, arcs ou polygones, représentation raster, TIN, image), son mode de représentation graphique (couleur) et ses éventuels attributs littéraux.

2.3. Apports et limites de l'O.A.D. en général

2.3.1. Apports

Il y a plusieurs raisons essentielles à intégrer des modèles hydrodynamiques dans un S.I.G. au lieu de leur créer un interface graphique spécifique.

- ***un S.I.G. fournit une grande quantité d'outils de gestion et de présentation de données n'ayant pas seulement trait aux modèles hydrodynamiques.***
L'utilisateur a accès à des informations géographiques et attributaires nombreuses concernant des thèmes variés. Ces informations peuvent être combinées facilement

avec les résultats de simulations pour une aide à l'analyse efficace. En outre, les fonctions d'analyse spatiale qui sont disponibles en standard dans les S.I.G., ou qui peuvent être créées grâce aux langages tels que le langage AML pour les besoins d'une application, permettent de personnaliser un outil.

- **la base de données géographiques d'un S.I.G., dans laquelle les modèles de simulation sont des méthodes d'analyse de l'information hydrogéologique,** garantit la consistance du modèle d'information et autorise un niveau élevé de systèmes intégrés.
- **l'architecture de la base de données par couches monothématiques datées et organisée sur une hiérarchie temporelle de validité de l'information** garantit à l'utilisateur la possibilité:
 - de *mettre à jour* ses informations *sans mettre en péril l'organisation de l'ensemble de l'O.A.D.* La pérennité de l'Outil ne dépend que de son « propriétaire ».
 - de savoir à partir de quelle date les informations qu'il utilise seront périmées et devront être *remises à jour*;
 - de *compléter la base de données* sans limites autres que la capacité mémoire de la machine utilisée, en intégrant d'autres thèmes que ceux initialement proposés. Ce travail traite seulement des aspects réglementaires, géologiques, géomorphologiques et hydrodynamiques d'un projet de carrière mais il est possible d'ajouter des couches d'information en respectant la structure temporelle et spatiale de la base de données actuelle;
 - de *créer de nouveaux menus* sur le même modèle que les menus actuels pour des thèmes différents, ou d'ajouter ces thèmes sur les menus existants;
 - de réaliser le même travail sur une autre région en conservant la structure informatique de l'O.A.D. développé.

2.3.2. Limites

Les fonctions de mise à jour des couvertures sont élémentaires. Il est seulement possible d'ajouter des entités graphiques (points, arcs, polygones) sans pouvoir ni enlever, ni modifier une forme existante (agrandir un polygone). Des fonctions complètes de mise à jour de la base de données renvoient à un module d'Arc/Info: Arcedit. L'idéal serait que l'opérateur y ait accès, il pourrait alors effectuer toutes les modifications nécessaires, et éventuellement ajouter des documents scannés, enrichir les attributs etc.

3. Limites et incertitudes de résultats

L'utilisation « raisonnable » d'un Outil d'Aide à la Décision utilisant des données géographiques demande des indications claires sur des limites et les incertitudes concernant les informations brutes, les résultats d'analyse spatiale et des résultats des calculs des modèles hydrodynamiques.

Les incertitudes liées aux données géographiques dépendent de quatre paramètres (cf. Tableau 20):

- la qualité des données brutes qui dépend de l'organisme fournisseur par exemple l'I.G.N. pour le Modèle Numérique de Terrain;
- l'état de conservation des cartes en papier pour les documents historiques par exemple la Loire en 1849 est un document vieilli, partiellement déchiré aux pliures;
- la qualité du travail de la personne ayant réalisé la digitalisation de ces documents, un demi millimètre autour du trait à saisir étant la marge d'erreur moyenne généralement admise;
- l'échelle de la carte à digitaliser, ou de la photographie aérienne à scanner ou encore du M.N.T. à intégrer dans la base de donnée.

<i>Document</i>	<i>échelle initiale</i>	<i>digitalisation ou scanérisation</i>	<i>précision</i>
carte papier	1/10 000	0,5 mm	10 m
	1/25 000	0,5 mm	25 m
	1/50 000	0,5 mm	50 m
	1/100 000	0,5 mm	100 m
photographie aérienne	1/17 000	300 dpi	
	1/30 000	300 dpi	
M.N.T.	1/50 000 soit le pas des mailles: 50 m		± 2 m

Tableau 20: incertitudes liées à la saisie/sacnnérisation ou intégration des données géographiques

Les incertitudes liées au modèle hydrodynamique dépendent de la densité et de la qualité des données injectées dans la base de données hydrogéologique. Par exemple, si la carte piézométrique qui sert à caler le modèle a été réalisée avec seulement une dizaine de sondages sur 20 km², la carte résultante ne sera rien d'autre que l'interprétation (liée directement à son auteur) d'une situation à partir de données trop fragmentaires. Si des insuffisances sont détectées en amont de l'application de l'O.A.D. sur une zone d'étude, ces insuffisances doivent être prises en compte par l'utilisateur

mais leurs raisons d'être (financières, délais trop courts) sont rarement maîtrisables. De plus, elles sont extrêmement classiques et les gestionnaires ont l'habitude de composer avec ce type de situation. En conséquence, seules les erreurs et incertitudes inhérentes à l'O.A.D. lui-même seront évoquées ici:

- taille de la maille des modèles: 100 m pour Bonson et 127 m pour Balbigny;
- précision atteinte par le calcul hydrodynamique: 0,1 m.

Il est à noter que cette dernière précision est paramétrable par l'administrateur de l'Outil d'Aide à la Décision qui peut la diminuer ou l'augmenter. Mais si le secteur étudié ne comporte qu'un piézomètre par kilomètre carré, la précision de l'ordre du centimètre ou du millimètre obtenue sur chaque maille de 100 m après calcul sera totalement artificielle et dépourvue de réalité physique. Dans le cas de simulations de carrières, la taille des mailles (≥ 100 m) limite la fidélité avec laquelle le contour réel prévu sera reproduit.

Conclusion générale

Conclusions et perspectives

L'évaluation des impacts des extractions de graviers sur un fleuve et ses nappes d'accompagnement n'est pas aisée. L'état initial d'un milieu fluvial à partir duquel se mesurent les modifications provoquées par un aménagement est une notion délicate. En effet, l'hydrosystème fluvial est naturellement en équilibre dynamique, c'est à dire qu'il se réajuste sans cesse à des variations naturelles de paramètres essentiellement climatiques. De plus, un type d'aménagement ne peut pas être considéré isolément. Ce sont les impacts cumulés de générations d'ouvrages différents tels que les digues, barrages, extractions de graviers, captages, qui doit être envisagé. Chacun provoque des phénomènes de réajustement morphologique du fleuve à de nouvelles conditions d'écoulement (chenalisation, régulation des débits, blocage de la charge de fond, réduction de l'épaisseur mouillée des aquifères). Ces phénomènes ont des extensions spatiales en amont, en aval, et latéralement qui sont décalées dans le temps, interagissent et dont l'évolution future est par là même difficile à évaluer.

Cependant, compte tenu des désordres observés sur l'ensemble des fleuves européens et des enjeux économiques ayant trait à la gestion de la ressource minérale et à la ressource en eau, il est nécessaire de mieux maîtriser le fonctionnement global de l'hydrosystème fluvial.

La Loire supérieure célèbre pour ses crues dévastatrices et ses étiages très faibles, a été aménagée dès le XVIIIème siècle. Elle représente dans la plaine du Forez un enjeu économique majeur. Les alluvions récentes sont exploitées pour la ressource minérale et pour l'A.E.P. des communes riveraines. Le barrage de Grangent situé en amont, au niveau du seuil du Pertuiset fournit de l'électricité, et de l'eau pour l'irrigation en période d'étiage. L'étude de la morphodynamique de la Loire montre que malgré tous ces ouvrages et une stabilité apparente du lit mineur, elle possède une dynamique active à l'échelle annuelle qui se traduit par des érosions de berges et par une forte incision qui se poursuit jusqu'au substratum tertiaire. La comparaison de l'état actuel des paramètres les plus significatifs (profil en long, tracé en plan) avec ceux de 1849 mettent en évidence que l'incision qui augmente le drainage des nappes a commencé bien avant la mise en place des ouvrages majeurs. Cette tendance a été accélérée par le barrage de Grangent et par les extractions de graviers dans le lit vif. Même si ces dernières y sont maintenant interdites, la présence de Grangent rend impossible toute recharge alluviale lors des crues et le phénomène semble avoir à se poursuivre dans les années à venir. ***Les impacts de nouvelles gravières dans le lit majeur sont bien moindres à condition qu'elles se tiennent éloignées de la bande de méandrage qui représente la somme des tracés en plan de la Loire à différentes époques. Des zones de mobilité préférentielle sont particulièrement à éviter, notamment en aval de Saint-***

Laurent-la-Conche. En amont, au contraire la stabilité latérale au cours des 150 dernières années rend les exploitations plus envisageables.

La conception d'un outil d'aide à la décision conclut à l'utilité conjuguée de la Dynamique des Systèmes pour la compréhension globale des interactions des paramètres du système, d'un S.I.G. pour la gestion des données spatiales et leur analyse, et enfin des modèles hydrodynamiques pour la simulation des impacts des gravières sur les nappes alluviales. Le couplage entre le S.I.G. et les modèles permet une utilisation rationnelle de ces derniers, dans un but de planification, grâce une meilleure préparation des données en entrée et en sortie et à la restitution graphique des résultats numériques. La base de données géographique intègre des données anthropiques telles que l'utilisation du sol, les contraintes (zones de protection de la nature), mais aussi naturelles: hydrogéologiques, géomorphologiques, hydrologiques. La part géomorphologique de cette étude est intégrée grâce à des couvertures telles que de la bande de méandrage et le lit majeur géologique, qui synthétisent les résultats obtenus. La part d'expertise encore inhérente à la morphodynamique fluviale rend très difficile l'utilisation d'outils de simulation spécifiques isolés de l'intégration spatiale des éléments décrits ci-dessus.

L'interface homme-machine réalisé dans le cadre de ce travail de thèse permet de proposer un outil accessible pour interpréter les résultats de simulations hydrodynamiques et pour évaluer les impacts sur la dynamique souterraine de nouvelles carrières. L'accès aux données est conçu et organisé en menus déroulants qui séparent chaque thème d'information intervenant dans l'évaluation d'impacts hydrodynamiques. L'interrogations des bases de données est possible pour toutes les informations hydrogéologiques.

Des améliorations de l'O.A.D. destinées à la mise à jour des couvertures, en rajoutant un module de saisie des données sont à prévoir. En effet tel qu'il est conçu, cet outil est fonctionnel mais tout le travail qui se situe en amont de son utilisation requiert un certain niveau d'expertise sur le sujet, notamment en ce qui concerne:

- l'étude géomorphologique d'un cours d'eau,
- l'élaboration d'un autre modèle hydrodynamique sur un autre site, ce qui est tout à fait possible,
- la saisie des données géographiques,
- la réalisation de la base de données,

sera difficile car aucun interface n'a été prévu à cet effet. D'autre part, d'un point de vue hydrodynamique l'intégration de modèles à mailles variables pour une meilleure précision du contour des carrières, ou pour travailler sur des nappes alluviales plus complexes (nappes étagées à granulométrie variables ou comportant des lentilles argileuses) et en trois dimensions apporterait une amélioration notable, surtout si elle était conjuguée aux capacités d'affichage en trois dimensions des outils d'analyse spatiale pour une visualisation de bonne qualité des résultats de simulation.

En accord avec les décrets d'application de la nouvelle loi carrières du 4 janvier 1993, et à la loi Barnier du 02 mars 1995, l'O.A.D. peut s'intégrer dans la démarche des membres de la Commission Départementale des Carrières dans le cadre de l'élaboration d'un Schéma Départemental des Carrières. En effet, il répond aux exigences suivantes:

- *localisation les zones à protéger d'un point de vue géomorphologique;*
- *contribution à la connaissance de l'hydrosystème fluvial;*
- *analyse de la situation initiale;*
- *étude de l'impact des carrières existantes sur l'hydrodynamique souterraine.*

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [Agence de Bassin Loire Bretagne, 1991] - Qualité des cours d'eau, Edition 1989.
- [Agence de Bassin Loire Bretagne, 1990] - Réseau de mesure de la qualité des eaux de surface, résultats annuels 1989, Régions AUVERGNE - RHONE ALPES - BOURGOGNE.
- [Agence de Bassin Loire Bretagne, 1993] - Caractéristiques hydrologiques, bassin Loire-Bretagne. *Rapport interne*. 347 p.
- [Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1990] - Rhône-Alpes, Carte régionale de la qualité des cours d'eau, synthèse établie à partir des données disponibles fin 1988. 207 p.
- [Allignol F., Graillot D., Vitel G. et Dechomets R., 1996] - Développement d'un outil d'aide à la décision pour l'ouverture de carrières dans le lit majeur d'un fleuve - application à la Loire Supérieure (42) - *Les problèmes de l'eau dans l'environnement des mines et des carrières*, Paris 4 juin 1996.
- [Allignol F., Graillot D. et Déchomets R., 1996] - Outil d'aide à la décision pour l'ouverture de gravières dans le lit majeur d'un fleuve - application à la Loire forezienne (42 - France). *Memento des Mines et Carrières*.
- [Amoros C. et Petts G.E., 1993] - Hydrosystèmes fluviaux. *Editions Masson*. 300 p.
- [Amoros C., Rostan J.C., Pautou G. et Bravard J.P., 1987] - The reversible process concept applied to the environmental management of a large river systems. *Environment Management Vol. 11, N°5*, pp. 607 - 617.
- [Amoros C., Bravard J.P., Reygrobellet J.L., Pautou G. et Roux A.L., 1988] - Les concepts d'hydrosystème et de secteur fonctionnel dans l'analyse des systèmes fluviaux à l'échelle des écosystèmes. *Bull. Ecol. t. 19, 4*, pp. 531 - 546.
- [Anderson J.M., 1973] -The eutrophication of lakes. *Toward Global Equilibrium : collected papers*. *Wright-Allen Press, Inc.* p 117 - 140.
- [Andrew Schoolmaster F., Paul G. et Maar, 1992] - Geographic Information System as a tool in water use data management. *Water Ressources Bulletin. American Water Ressources Association VOL. 28, NO. 2*
- [Aracyl J., 1984] - Introduction à la dynamique des systèmes. *Presses Universitaires de Lyon*. 412 p.
- [Babonaux Y., 1987] - L'aménagement "intégré" du bassin de la Loire une question d'actualité. *L'information géographique*, 51, p.133-141.

[Babonaux Y., 1970] - Le lit de la Loire, étude d'hydrodynamique fluviale. *Mémoires de la section de géographie*, Paris. 228 p.

[Barat A. et Duboeuf Ph., 1990] - Société des eaux minérales naturelles de St Romain le Puy - Parot (Loire). Diagnostic sur l'état de la ressource et ses possibilités d'amélioration. *Rapport BRGM*, R. 31 490. RHA. 4S/90. 14 p.

[Batelaan O. et al., 1993] - Development and application of a groundwater model integrated in the GIS GRASS. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, edited by Kovar & Nachtnebel. *IAHS Publication No. 211*. 10 p.

[Belleudy P. et Schûtrumpf H., 1993] - Modélisation de l'évolution morphologique du Rhin et de l'Isaar. *Actes du colloque d'hydrotechnique "Transports solides en eaux continentale et littorale"*, Société Hydrotechnique de France. 13 p.

[Ben Slama E., Peron S., Belleudy P. et Rouas G., 1993] - TSAR : un modèle monodimensionnel de simulation des évolutions des fonds alluvionnaires des rivières. *Actes du colloque d'hydrotechnique "Transports solides en eaux continentale et littorale"*, Société Hydrotechnique de France. 15 p.

[Bergerat F., 1983] - Failles et champs de contrainte successifs en bordure de la plaine du Forez. *Géologie de la France (2)*, I, n°1-2, 1983. pp. 143 - 148.

[Berthier M., Duboeuf Ph. et Fournier-Ruet I., 1992] - Commune de Magneux Haute-Rive. Renforcement de l'alimentation en eau potable de la commune. *Rapport BRGM*, R 35175 RHA 4S/92. 6p.

[Bethemont J. et Wasson J.G., 1992] - Etude de compréhension globale du fonctionnement de l'hydrosystème de la Loire et de ses affluents, phase 1. Etat initial et problématique. Rapport d'étape N°2. *Rapport CEMAGREF Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques/Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative - CRENAM/CNRS U.R.A. 260*. 38 p.

[Bonnet M., 1982] - Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. *Documents du BRGM série n° 34. Thèse Doctorat d'Etat en Sciences, Institut National Polytechnique de Lorraine - Nancy*. 438 p.

[Braunschweig B., 1985] - La simulation sur micro-ordinateur, les modèles de dynamique des systèmes. *Coll. Informatique & Entreprise. Ed. Eyrolles*. 169 p.

[Bravard J.P., Roux A.L., Amoros C., Richardot-Coulet M., Reygrobellet J.L., Bournaud M et Pautou G., 1986] - L'impact des activités humaines sur les eaux continentales. *Société Hydrotechnique de France. XIX^e Journées de l'Hydraulique Paris, 9-11 sept. 1986. Rapport N° IV*. 11 p.

[Bravard J.P., 1989] - Les rivières aménagées ou les coûts de l'imprévoyance. *Informations et Commentaires N°69 Oct.-Dec. 1989*. pp. 23- 27.

[Bravard J.P., 1989] - La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Age et à l'Epoque Moderne. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 1989, 25 : pp. 145-157.

[Bravard J.P., Caclin M.C. et Poinart D., 1989] - Profil en long et granulométrie du lit des cours d'eau aménagés : l'exemple du canal de Miribel (Haut-Rhône). *Revue de géographie de Lyon*, Vol 64/N°4, pp. 240 - 251.

[Bravard J.P., Malavoi J.R. et Amoros C., 1989] - L'Ain ou la difficulté de gérer une rivière en cours de métamorphose. *Journée d'étude Rivières en crise : Saône, Ain, Durance 17 mars 1989*. pp. 57- 71.

[Bravard J.P., 1991] - La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : Quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ? *La Houille Blanche N°7 8-1991*. p. 515 - 521.

[Bravard J.P. et Peiry J.L., 1993] - La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19 - 20 ème siècle). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supp., Bd. 88*, pp. 67 - 79.

[Broutin A., 1867] - Histoire de la ville de Feurs. *St. Etienne, Edit. Chevalier*. pp. 293 - 294.

[Burrough P.A., 1993] - Principles of Geographical Information Systems for Land Ressources Assessment. *Oxford Science Publications. Monograph on soil and ressources survey N°12*. 194 p.

[Cailman X., Poirel A., Lallement C., Clair M., 1993] - L'expérience acquise par E.D.F. en matière de chasse de retenues. Modélisation du transit des matières en suspension sur l'aval. *Actes du colloque d'hydrotechnique "Transports solides en eaux continentale et littorale", Société Hydrotechnique de France*. 17 p.

[Castany G., 1982] - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Coll. Dunod Université, Ed. Bordas*. 236 p.

[C.E.M.A.G.R.E.F., 1984] - Etude hydrobiologique et piscicole de la Loire amont, synthèse de l'état de référence du site de Villerest. 53 p.

[C.E.M.A.G.R.E.F., 1988] - Qualité biologique de la Loire et de 11 points situés sur ses affluents. 15 p.

[C.E.M.A.G.R.E.F., 1990] - Propositions d'études pour l'élaboration de bases de gestion écologique du bassin versant de la Loire. *Division Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture. Groupement de Lyon. Document de travail*. 18 p.

[Chafchafi A., Le Griel A., Gonord H., Etlicher B. et Etienne R., 1993] - Niveaux et plaquages alluviaux de la Loire dans le bassin de Bas-en-Basset: nouvelles observations et essai de synthèse. *Revue de Géographie de Lyon*, 15 p.

[Circ. Minist. du 22 mai 1980] - Circulaire interministérielle du 22 mai 1980 relative à la limitation des extractions de matériaux dans le lit des cours d'eau domaniaux (non publiée au J.O.)

[Code de l'Environnement]
sous-titre code du Domaine Public Fluvial pp. 49-73

[Coque R., 1993] - Géomorphologie. *Editions A. Colin, Paris*. 503 p.

[CPGF Horizons, 1975] - DDA Loire, Vivezy-Lignon-Monts d'Uzore- Ressources en eau. *Etude 1392*. 25 p.

[CPGF Horizons, 1976] - DDA Loire, Retenue de Villereest, étude hydrogéologique des Chambons. *Etude 1438*. 35 p.

[CPGF Horizons, 1976] - DDA Loire, Institut Départemental pour la protection du Val de Loire contre les Crues, barrage de Villereest, étude hydrogéologique des Chambons. *Etude 1569*. 29 p.

[CPGF Horizons, 1976] - DDAF, CRAINTILLEUX - Recherches d'eau- Rapport préliminaire. *Etude 1583*. 17 p.

[CPGF Horizons, 1977] - DDA Loire, Institut Départemental pour la protection du Val de Loire contre les Crues, barrage de Villereest, influence du niveau de la retenue sur la nappe phréatique des Chambons. *Etude 1612*. 50 p.

[CPGF Horizons, 1977] - DDA Loire, A.E.P. de Saint-Bonnet-les-Oulles, note technique. *Etude 1618 A*. 8 p.

[CPGF Horizons, 1977] - DDAF, Feurs-Balbigny - Alluvions de la Loire. *Etude 1658 B*. 28 p.

[CPGF Horizons, 1978] - Alluvions de la Loire, rive gauche, Magneux-Rive-Feurs. *Etude 1747*. 26 p.

[CPGF Horizons, 1979] - DDA Loire, Institut Départemental pour la protection du Val de Loire contre les Crues, barrage de Villereest, influence du niveau de la retenue sur la nappe phréatique des Chambons. *Etude 1746*. 24 p.

[CPGF Horizons, 1979] - DDAF, Magneux-Hauterive-Feurs- Alluvions. *Etude 1747*. 11 p.

[CPGF Horizons, 1979] - Synthèse hydrogéologique des alluvions récentes de la plaine du Forez. *Etudes 1734 A, B et C*, DDA de la Loire. 185 p.

[CPGF Horizons, 1979] - BATIFRANCE, Z.I. Andrezieux-Bouthéon - Recherches d'eau. *Etude 1937*. 13 p.

[CPGF Horizons, 1980] - DDE St Galmier, Commune de Veauche. *Etude 2132*. 12 p.

[CPGF Horizons, 1982] - Synthèse Loire II - Nitrates. Alluvions anciennes entre St Bonnet les Oulles-Boutheon et la Toranche. *Etude 2239*. 36 p.

[CPGF Horizons, 1982] - DDA Loire, aménagement de Villereest, incidence d'un barrage en queue de retenue sur la nappe des Chambons. *Etude 2267*. 24 p.

[CPGF Horizons, 1984] - Etude hydrogéologique, zone de Saint-Galmier-Chamboeuf. *Etude 2588*. 23 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Conseil Général- DDAF, Forages et essais de pompage, zone de Saint-Galmier Nord-Ouest. *Etude 2761 A.a*. 18 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Conseil Général- DDAF, Essais de débit sur le F40, zone de Chamboeuf. *Etude 2761 A.b*. 15 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Conseil Général- DDAF, Alimentation en eau, Syndicat du Bonson et zones de Saint-Just-Saint-Rambert. *Etude 2761 B-a*. 24 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Conseil Général- DDAF, Alimentation en eau, Montrond les Bains-Unis-Craintilleux-Veauchette. *Etude 2761 B.b*. 17 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Etude géophysique à Saint-André-le-Puy. *Etude 2761 C*. 19 p.

[CPGF Horizons, 1985] - Prospection géophysique complémentaire à Chamboeuf. *Etude 2761 D*. 7 p.

[C.P.G.F. Horizons, 1988] - Note technique, mise en évidence d'hétérogénéités en milieu poreux; applications : auscultations de digues, les recherches de fuites, la contamination d'un champ captant. 14 p.

[C.P.G.F. Horizons, 1992] - DDAF - Mairie de St Just St Rambert. Etude diagnostique du fonctionnement de la tranche de captage d'eau potable de St Rambert sur Loire en rive gauche de la Loire. *Etude 4094*. 16 p.

[Crepet F., 1992] - L'utilisation des eaux dans le bassin de la Loire supérieure et les perturbations apportées au régime hydrologique du fleuve. *D.E.A. Institut de géographie alpine*, 115 p.

[Cubizolles H., 1994] - Fonctionnement et dynamique d'un cours d'eau de moyenne montagne. *Thèse de l'Univ. de Clermont Ferrand*. 500 p.

[Dacharry M., 1974] - Hydrologie de la Loire en amont de Gien. *Nouvelles Editions Latines, Paris*. Deux volumes. 650 p.

[Dacharry M., 1975] - Regards neufs sur de vieux problèmes ligériens. *Etudes Ligériennes, L*. pp 7-18.

[Dargent C. et Falaise P., 1990] - Actualité du schéma d'aménagement de la Loire moyenne. L'aménagement de la vallée de la Loire. *Actes du colloque l'écologie et l'aménagement de la Loire*. 9 p.

[Dassonville G., 1978] - Méthodes récentes d'études des nappes d'eau souterraine au moyen de modèles mathématiques, applications pratiques. *La technique de l'eau et de l'assainissement* N°373 - janvier 1978. pp 7-18.

[Davoine P., 1979] - L'évolution des méthodes hydrogéologiques vue au travaux d'un thème particulier : les relations nappes phréatiques-rivières in *Aqua Complexe : l'Administration, la Pollution, l'Assainissement, la Distribution en Eaux en France*. Plaque Assoc. Elèves Ecole Nat. Sup. des Mines de Saint-Etienne. pp 17-21.

[D.D.E. de la Loire, 1978] - Gravières de la plaine du Forez. Réaménagement du val de Loire dans les communes de Marclopt, Magneux-Haute-Rive, Chambéon et Saint-Laurent-la-Conche. *Laboratoire Central d'Hydraulique de France*. 111 p.

[De Blomac F., Gal R., Hubert M., Richard D. et Tourret C., 1994] - Arc/Info concepts et applications en géomatique. Ed. *Hermes, Paris. Traité des Nouvelles Technologie, série Géomatique*. 250 p.

[Deckers F., 1993] - EGIS a geodrological information system. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, edited by Kovar & Nachtnebel. *IAHS Publication No. 211*. pp. .

[Degorce J.N., 1991] - Les milieux humides dans la Loire. *Thèse de Géographie, Université Jean Monnet, Saint-Etienne*, 372 p + annexes.

[Degorce J.N. et Tomas F., 1984] - Heurs et malheurs de la vallée de la Loire en Forez. *Centre d'études foréziennes, Pub. Univ. J. Monnet St. Etienne. Paysages et milieux naturels de la plaine du Forez*. pp 67-87.

[De Lange W.J. et Van Der Meij J.L., 1993]- A national groundwater model combined with a GIS for water management in the Netherland. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, edited by Kovar & Nachtnebel. *IAHS Publication No. 211*. 11 p.

[Depraetere C., 1991] - LAMONT: Logiciel d'Application des Modèles Numériques de Terrain. Ed. *ORSTOM*. 82 p.

[Derruau M., 1988] - Précis de géomorphologie. Ed. *Masson Paris, 7ème édition*. 533 p.

[Donnadieu G. et Karsky M., 1993] - Les dynamiques de la motivation. MODERE : un modèle de la motivation, son application aux politiques de rémunération. *Rev. intern. systémique*. 0980-1472 Vol. 7/93/02/ 143 /40/§ 6.00/© Afcet Gauthier-Villars. pp 143 - 182.

- [Duclos.P., 1967] - Géologie et minéralisations uranifères de la plaine tertiaire du Forez. *Thèse d'Etat Sciences. Univ. Clermont Fd. Rapport R. 3117 du CEA.* 104 p.
- [Edouard J.L. et Vivian H., 1987] - Une hydrologie naturelle dans les Alpes du Nord ?... *Les nouveaux paramètres de l'hydrologie alpine : les aménagements hydroélectriques.* pp. 165 - 188.
- [Ech-Cherif El Kettani D., 1996] - Géologie du fossé du Forez : essai de synthèse et comparaison avec les autres bassins tertiaires du massif central français (partie est). *Thèse de l'Univ. Jean Monnet-St-Etienne.* 372 p.
- [Etlicher B., 1986] - Les massifs du Forez, du Pilat et du Vivarais: régionalisation et dynamique des héritages glaciaires et périglaciaires en moyenne montagne cristalline. *Thèse d'Etat, Univ. de Lyon.* 1356 p.
- [Etlicher B. et Bessenay C., 1995] - Le SIG des Hautes Chaumes foréziennes: pour une gestion écologique de l'espace. *Actes du Séminaire International SIG et gestion de l'environnement: nouveaux outils, nouvelles pratiques ? - St. - Etienne.* 6 p.
- [Fakhreddine A., 1990] - Mise en place d'un observatoire de gravières terrestres à ciel ouvert en Gironde, Test méthodologique : la vallée de la Garonne. *Diplôme d'Etudes Approfondies en dynamique des milieux naturels et humains. Université de Bordeaux III.* 128 p + annexes.
- [Faunt C., D'Agnese F. et Keith Turner A., 1993] - Development of a three dimensional hydrogeological framework model for the Death Valley Region, southern Nevada and California, USA. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211.* 8 p.
- [Fédération Régionale des Associations de Protection de l'Environnement du Centre, 1980] - L'écologie et l'aménagement de la Loire. 14 p.
- [Forrester J.W., 1971] - Principles of systems. *Wright-Allen Press, Inc. U.S.A.* 284 p.
- [Graillot D., 1983] - M.I.S.E. Modèle Intégré de Stratégie de l'Eau, outil pédagogique et d'Aide à la Décision. *Thèse de 3ème cycle de l'Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc.* 223 p. + annexes.
- [Graillot D., 1986] - Faisabilité d'un système d'ingénierie pour la réalisation de projets d'aménagement en eau à partir du modèle de simulation : MISE. *Thèse d'Etat de l'Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc.* tomes 1 et 2. 507 p.
- [Grayson R.B., G. Blöschl, Barling R.D. et Moore I.D., 1993] - Process, scale and constraint to hydrological modelling in G.I.S. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211.* 10 p.

[Grüner L., 1857] - Description géologique et minéralogique du département de la Loire. *Imprimerie Impériale. Paris.*

[Hamm L., Tanguy J.M. et Zhang B., 1993] - Prise en compte des effets gravitaires dans la modélisation du transport solide par charriage. *Actes du colloque d'hydrotechnique "Transports solides en eaux continentale et littorale", Société Hydrotechnique de France.* 20 p.

[Huglo C., 1993] - Mini ou grande réforme ? Le nouveau décret sur les études d'impacts du 25 février 1993. *Gazette du Palais, 20 au 24 août 1993. La Doctrine.* pp. 5 - 17.

[Jemma F., 1993] - GIS application to water ressources management in the land planning context : a methodological proposal. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211.* 10 p.

[Huglo C., 1993] - Mini ou grande réforme ? Le nouveau décret sur les études d'impacts du 25 février 1993. *Gazette du Palais, 20 au 24 août 1993. La Doctrine.* pp. 5 - 17.

[Jemma F., 1993] - GIS application to water ressources management in the land planning context : a methodological proposal. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211.* 6 p.

[J.O., 20 décembre 1979] - Décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979 relatif aux autorisations de mise en exploitation des carrières, à leur renouvellement, à leur retrait et aux renonciations à celles-ci. pp. 3244 - 3251.

[J.O. 10 mars 1993] - Loi n°93-3 du 4 janvier 1993 relative aux carrières, pp 233 - 236

[Karsky M., 1993] - La dynamique des systèmes ou la systémique de l'ingénieur. *Knowledge Based Simulation.* 13 p.

[Kienzle S.W., 1993] - Application of a G.I.S. for simulating hydrological responses in developing regions. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211.* pp. .

[Kolsky C., 1993] - Ingénierie des interfaces homme-machine, conception et évaluation. *Traité des nouvelles technologies, série automatique. Ed. Hermes.* 337 p.

[Lam D.C.L. et Swayne D.A., 1994] - An expert system approach of integrating hydrological database, models and GIS : application of the RAISON System. pp. 23 - 35.

[Larras J., 1977] - Fleuves et rivières non aménagées. *Collection du BCEOM. Ed. Eyrolles.* 187 p.

[Launay P., 1981] - Programmes utilisant la méthode des éléments finis pour le calcul des écoulements hydrodynamiques souterrains en milieu saturé. *Thèse de docteur-ingénieur de l'Institut Polytech. de Lorraine*. 136 p.

[Laurent F., 1996] - Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau. application aux schémas d'aménagement et de gestion des eaux. *Thèse de l'Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris et l'Ecole des Mines de St.-Etienne*. 357 p.

[Laurini R. et Milleret-Raffort F., 1993] - Les bases de données en géomatique. *Traité des nouvelles technologies, série Géographie assistée par ordinateur*. Ed. Hermès. 340 p.

[Leger D., David P., Richard P. et Cardon C., 1980] - Circulaire ministérielle : limitation des extractions de matériaux dans le lit des cours d'eau. 4 p.

[Le Griel A., 1975] - L'évolution morphologique de la plaine du Forez au Pliocène et au Quaternaire. *Thèse de troisième cycle, Université de Saint-Etienne*, 268 p.

[Le Griel A., 1991] - L'évolution morphologique du Massif Central français : essai sur la genèse d'un relief. *Thèse d'état lettres, Université de Lyon*, 659 p + 1 tome d'illustrations.

[Le Verrier U., 1889] - Etude sur la géologie du Forez. *Bull. Soc. Industrie Minérale*. 3ème série, tome 2.

[Lieste R., Kovar K., Verlouw J.G.W. et Gan J.B.S., 1993] - Development of a GIS-based « RIVM National Groundwater Model for the Netherlands (LGM). *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, edited by Kovar & Nachtnebel. *IAHS Publication No. 211*. 11 p.

[Mc Donald M.G. et Harbaugh A.W., 1988] - A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. *US Geological Survey. Techniques of water-resource investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1*.

[Mat. de construction et produits de carrières, 1996] - L'exploitation des carrières, régime juridique. n° spécial 683 - février 1996. 48 p.

[Ministère de l'Industrie, 1960] - Décret du 5 septembre 1960 concédant à Electricité de France (service national) l'aménagement et l'exploitation de la chute de Grangent, sur la Loire, dans les départements de la Loire et de la Haute-Loire. *Extrait du Journal Officiel du 16 septembre 1960*. 10 p.

[Ministère de l'Environnement. Ministère de la Recherche et de l'Industrie. Délégation à la Qualité de la Vie. Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats, 1981] - Notices d'impact sur l'Environnement. Carrières. *Atelier Central de l'Environnement Impact*. 31 p.

- [Ministère de l'Environnement, 1996] - Cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique. *Editions Ville et Territoire, Paris*. 100 p.
- [Moore I.D., Grayson R.B. et Landson A.R., 1991] - Digital terrain Modelling : a review of Hydrological process. Vol. 5. 3 - 30.
- [Nachtnebel H.P., Fürst J. et Holzmann H., 1993] - Application of geographical information system to support groundwater modelling. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211*. pp. 653-664.
- [Nguyen T.D., 1993] - Modélisation numérique du transport solide en coulement non permanent. Application à la retenue de Belley (Rhône). *Actes du colloque d'hydraulique "Transports solides en eaux continentale et littorale", Société Hydraulique de France*. 15 p.
- [O.C.D.E., 1982] - Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. *Publications de l'O.C.D.E. Paris*. 164 p.
- [Paegelow M., 1991] - Système d'Information Géographique et gestion de l'environnement, application à l'étude des sols et de la pollution par les nitrates d'origine agricole en bassin-versant expérimental. *Thèse de l'Université de Toulouse - Le Mirail*. 156 p.
- [Peiry J.L., 1989] - L'utilisation du cadastre sarde de 1730 pour l'étude des rivières savoyardes : l'exemple de la vallée de l'Arve (Haute-Savoie). *Revue de géographie de Lyon, Vol. 64/N°4*. pp. 197 - 203.
- [Peiry J.L., Salvador P.G. et Nougier F., 1994] - Incision dans les Alpes du françaises du nord : état de la question. *Revue de géographie de Lyon, Vol. 69/N°1*. pp. 47 - 56.
- [Pickup G., 1976] - Geomorphic effects of changes in river runoff. *Australian Geographer 13*. pp. 188 - 193.
- [Pornon H., 1990] - Systèmes d'Information Géographique ; des concepts aux réalisations. *Service technique de l'urbanisme, Ed. Hermes*. 105 p.
- [Ramez P., 1993] - Etude des rivières à graviers par une approche globale. *Actes du colloque d'hydraulique "Transports solides en eaux continentale et littorale", Société Hydraulique de France*. 16 p.
- [Rouas G. et Monadier P., 1989] - La modélisation du transport solide en rivière : une action à caractère national. Service Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables. *La Houille Blanche N°3/4-1989*. pp. 259 - 262.
- [Simos J., 1990] - Evaluer l'impact sur l'environnement. Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, coll. META*. 260 p.

[S.O.G.R.E.A.H. et Aquascop, 1996] - Etude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire. *Etude pour la D.D.E. Loire, le Minist. de l'Environnement, l'agence de l'eau Loire/Bretagne, le C.G. de la Loire, l'UNICEM Rhône/Alpes*. Volets 1 (usages et contraintes) 60 p., 2 (fonctionnement géomorphologique) 84 p. et 4 (propositions de gestion) 76 p.

[S.R.A.E. Rhône Alpes, 1981] - Contribution des Services Extérieurs du Ministère de l'Agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines dans le département de la Loire. 71 p.

[S.R.A.E. Auvergne, 1982] - Etude de la qualité des eaux de la Loire.

[Staron G., 1981] - Caractéristiques climatiques et hydrologiques de la crue des 21 et 22 septembre 1980 sur le bassin de la Loire supérieure. *Actes du colloque l'écologie et l'aménagement de la Loire*. 10 p.

[Staron G., 1982] - Méthodologie pour une meilleure connaissance de la ressource en eau : application expérimentale au bassin de la Loire supérieure. *Revue de Géographie de Lyon*. pp. 265 - 285.

[Suchel J.B., 1984] - Le milieu climatique- Paysages et milieux naturels de la plaine du Forez. *Editions Centre d'Etudes Foréziennes. Univ. J. Monnet St Etienne*, pp 189 - 231.

[Suchel J.B., 1990] - Le climat des monts du Forez. *Les monts du Forez, le milieu et les hommes. Eds Université Jean Monnet, Centre d'études foreziennes*, pp. 81 - 99.

[Stuart N. et Stocks C., 1993] - Hydrological modelling within GIS: an integrated approach. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, edited by Kovar & Nachtnebel. IAHS Publication No. 211*. pp 319-333.

[Tomas F., 1971] - Le relief et les sols de la plaine du Forez. *Centre d'études foréziennes. Thèse de troisième cycle, Université Saint-Etienne*. 188 p.

[Tomas F. et Degorce J.N., 1984] - Heurs et malheurs de la vallée de la Loire en Forez. *Paysages et milieux naturels de la Plaine du Forez, Centre d'études foréziennes*. pp. 67 - 86.

[Warner R.F., 1994] - Instability in channels and floodplains in southeast Australia: natural processes and human activity impacts. *Revue de géographie de Lyon. Vol. 69/1*. pp. 17 -24.

[Wybo J.L., 1991] - EXPERTGRAPH Analyse basée sur des connaissances et suivi en temps réel d'information géographique évolutive. Application à la prévention des incendies de forêt. *Thèse de l'Université de Nice - Sophia Antipolis*. 148 p.

[Zeeverbergen L. W. et Thom C.R., 1987] - Quantitative analysis of Land Surface Topography Earth Surface. *Processes and Landforms Vol 12*, pp 47 - 56.

Cartes

I.G.N. Firminy 1988 1/50 000
I.G.N. Montbrison 1988 1/50 000
I.G.N. Firminy 1990, 1/25 000.
I.G.N. Veauche 1987, 1/25 000.
I.G.N. Feurs 1986, 1/25 000.

[B.R.G.M., 1974] - Carte géologique de la France au 1/50 000^{ème}, feuille de Montbrison et notice.

[B.R.G.M., 1979] - Carte géologique de la France au 1/50 000^{ème}, feuille du Puy et notice.

[B.R.G.M., 1988] - Carte géologique de la France au 1/50 000^{ème}, feuille de Roanne et notice.

[B.R.G.M., 1981] - Carte géologique de la France au 1/50 000^{ème}, feuille de Feurs et notice.

[D.D.A.S.S. de la Loire, 1992] - Fleuve Loire, le Furan, le Rhins, le Gier, schéma de situation des prélèvements et des stations.

[D.D.A.S.S. de la Loire, 1992] - Département de la Loire, recensement des ouvrages de prélèvements. Carte échelle 1/100 000.

Cartes anciennes, archives

Carte de la Loire, Feurs 1849, archives D.D.E. 42

Cadastre napoléonien 1809, 1812: tableau d'assemblage: communes d'Andrézieux, St-Cyprien, Feurs - 1/10 000

Photographies aériennes

Mission aérienne I.G.N. 1954 noir et blanc 1/25 000

Mission aérienne 1991, Infra-Rouge noir et blanc, 1/17 000

Données géographiques numériques

Base de Données hydro, I.G.N. 1/50 000 plaine du Forez

M.N.T. I.G.N., 1/50 000, Firminy, Veauche, Feurs, Balbigny.

Logiciels utilisés

Arc/Info 7.0: Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., 380 New York street, Redlands, California, USA. Distribué par ESRI France, Meudon.

Arcview 2.0: idem

DIFI: Ecole Nationale des Mines de Saint-Etienne, Centre SIMADE, département Ingénierie de l'environnement.

Annexes

ANNEXE N°1. Hydrologie du haut bassin versant de la Loire	227
ANNEXE N°2. Qualité des eaux	229
1. <i>Qualité des eaux de surface en 1988</i>	229
2. <i>Qualité biologique des eaux de surface</i>	230
3. <i>Qualité des eaux souterraines des alluvions récentes de la Loire</i>	230
ANNEXE N°3. Principes de la modélisation hydrodynamique : résolution des équations de base	232
1. <i>Formalisation mathématique de base des écoulements de nappe</i>	232
2. <i>Résolution des équations</i>	234
3. <i>DIFI</i>	238
ANNEXE N°4 Système d'Information Géographique	241
Annexe N° 5. Notice d'utilisation de l'Outil d'Aide à la Décision « carrières »	
1. <i>Module d'accueil</i>	243
2. <i>Module global sur la plaine du Forez</i>	245
a. <i>Profils en travers</i>	247
b. <i>Simulation hydrodynamique</i>	249
3. <i>Modules locaux: exemple de Balbigny</i>	250
a. <i>Coordonnées des mailles</i>	251
b. <i>Interrogation ponctuelle de la base de données</i>	251
c. <i>Exécuter une simulation</i>	252
d. <i>Calculer l'impact de la carrière sur la nappe</i>	253
e. <i>Enregistrer le résultat de la dernière simulation</i>	253
4. <i>Caractéristiques de l'interface</i>	254
5. <i>Limites de l'O.A.D.</i>	254
a. <i>Paramétrisation de l'outil</i>	254
b. <i>Graphisme</i>	254

Liste des Figures

Figure 1 : discrétisation	234
Figure 2 : application des équations hydrodynamiques au niveau d'une maille	234
Figure 3 : cas d'une limite imperméable ou limite de Neumann	237
Figure 4 : deuxième exemple de calcul aux limites	237
Figure 5: Le processeur aml d'après AML user's guide	241
Figure 6: module d'accueil	243
Figure 7: module global sur la plaine du Forez	245
Figure 8: menu « profils en travers »	246
Figure 9: tracé d'un profil topographique par l'utilisateur	247
Figure 10: premier menu de choix de simulation	248
Figure 11: deuxième menu de choix de simulation (site)	249
Figure 12: menu déroulant local sur Balbigny	249
Figure 13: interrogation des coordonnées des mailles (en rouge)	251
Figure 14: interrogation ponctuelle de la base de données hydrogéologiques	252
Figure 15: messages d'erreurs dans la sélection d'une maille	253
Figure 16: enregistrement du résultat d'une simulation	255

Liste des Equations

Equation 1 : équation de continuité	232
Equation 2 : équation de Darcy	233
Equation 3 : équation de diffusivité	233
Equation 4 : moyenne harmonique	235
Equation 5 : prise en compte des limites	238
Equation 6 : calcul itératif de h d'après Frankel-Young	240
Equation 7 : coefficient de sur-relaxation d'après Maler.	240

Tableau 1: Probabilité des crues de la Loire à Bas-en-Basset (1918-68)	227
--	-----

ANNEXE 1 Hydrologie du haut bassin versant de la Loire

Les données hydrologiques sur le haut bassin versant de la Loire servent à définir les durées de retour des crues. L'intérêt est non seulement hydrologique mais aussi géomorphologique. En effet, le débit plein bord (le plus efficace d'un point de vue géomorphologique) a été estimé entre 1 et 3 ans de durée de retour [Petit F., 1994]. Les tableaux suivants servent à appréhender ce phénomène au droit de différentes stations.

	Crue décennale	Crue trentennale	crue centennale	Crue millénaire
Débits maxima instantanés- estimation (m ³ /s)	1000/1050	1100/1150	1450/1500	1800
Débits moyens journaliers (m ³ /s)	635	700/750	900/1000	1150/1250

Tableau 1: Probabilité des crues de la Loire à Bas-en-Basset (1918-68)

Source : Aménagement du bassin ligérien (1978)

Bas en Basset, de 1919 à 1995

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Débit moyen journalier en m ³ /s	300	610	610	720	860
Débit Max. instantané ¹ en m ³ /s	100	760	940	1600	1300

Montrond les Bains, de 1984 à 1995

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans
Max journalier en m ³ /s	420	630	770
Max. instantané en m ³ /s	540	800	980

Feurs, de 1985 à 1995

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans
Max journalier en m ³ /s	410	610	740
Max. instantané en m ³ /s	520	780	950

Villerest avant la construction du barrage, 1920 à 1982

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Max journalier en m ³ /s	540	820	1000	1200	1400
Max. instantané en m ³ /s	630	960	1200	1400	1700

¹ Débit maximal de la crue

Villereest après la construction du barrage, 1985 à 1995

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans
Max journalier en m ³ /s	460	690	830
Max. instantané en m ³ /s	600	890	1100

Source : Service Hydrologique Centralisateur Limoges, 1995

ANNEXE 2 Qualité des eaux

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons choisi une orientation hydrodynamique souterraine quantitative/géomorphologie/occupation du sol. Les données concernant la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface, bien qu'ayant été partiellement acquises, ne sont pas intégrées dans la base de données géographiques. Cependant, elles sont intégrables et figurent dans les annexes à titre informatif complémentaire.

1. Qualité des eaux de surface² en 1988

La qualité des eaux en amont du barrage de Grangent se situe dans la classe 2 (qualité moyenne). En 1982 la qualité reste moyenne, mais en 1989 un phénomène d'eutrophisation est constaté.

La qualité des eaux de la Loire au débouché du barrage de Grangent (aval du Furan) jusqu'à la confluence avec la Mare est globalement mauvaise. Sur ce tronçon, en aval de Saint-Just-sur-Loire, l'Onzon rejoint la Loire et a une qualité globale très mauvaise. L'eau alimentant la Loire provient d'un soutirage de fond de la retenue. Les concentrations en NH_4^+ auraient augmenté depuis 1982 et seraient en 1989 supérieures à 8 mg/l.

Le Furan en amont de Saint-Etienne est en classe 1A, en aval de Saint-Etienne il passe en classe 4 jusqu'à sa confluence avec la Loire au niveau de Grangent.

En aval de la confluence avec la Mare, la Loire retrouve une qualité globale moyenne, et ce jusqu'à Balbigny. En fait, en amont de Feurs, la classe est à la limite entre 1B et 2, mais les nombreux rejets de la commune et des industriels de Feurs (effluents parasites, fonctionnement insuffisant de la station d'épuration) ont conduit à déclasser la Loire en qualité 2 jusqu'à Balbigny. Le Lignon du Forez qui rejoint la Loire en amont de Cleppé, lui apporte des eaux de bonne qualité.

Globalement, tous les affluents de rive gauche issus des Monts du Forez, sont dans la classe 1A jusqu'à leur entrée dans la plaine dont la limite avec les reliefs est jalonnée par de petites agglomérations. Après la traversée de ces agglomérations, les affluents sont déclassés en 1B ou en 2.

En rive droite, trois affluents sont remarquables par leur mauvaise qualité (classe 4). Ce sont :

² Qualité générale (Agence de Bassin Loire-Bretagne, 1991 ; Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1990)

- l'Ondaine qui rejoint la Loire à l'entrée du barrage de Grangent. Ce cours d'eau traverse les communes de la Ricamarie, le Chambon Feugerolles, et Firminy;
 - le Furan qui trouve sa confluence avec la Loire en aval de Saint-Just-sur-Loire. Il traverse toute l'agglomération de Saint-Etienne;
 - l'Anzieux qui trouve sa confluence avec la Loire à Boisset-les-Montrond et qui traverse les communes de Bellegarde -en-Forez et de Saint-André-le-Puy.
- La qualité globale des autres affluents se situe comme en rive gauche entre 2 et 3.

2. Qualité biologique des eaux de surface³

Jusqu'à la ville du Puy, la Loire a un IBG entre 18 et 20, ce qui dénote une bonne qualité biologique des eaux (qui correspond à la classe physico-chimique 1A). Directement en aval du Puy, l'IBG tombe à 12 (eutrophisation modérée), pour remonter à 16 jusqu'à Grangent (pollution ou eutrophisation faible). L'ensemble de la plaine jusqu'à Feurs oscille ensuite suivant les stations entre 13 et 10 ce qui correspond à une pollution et à une eutrophisation moyenne à forte. La situation s'améliore jusqu'à Villerest (16-17), pour se dégrader à nouveau au niveau de Roanne.

3. Qualité des eaux souterraines des alluvions récentes de la Loire

La qualité de la ressource est tributaire de celle des eaux de la Loire et de ses affluents. Les minéralisations observées sont très contrastées:

- R varie entre 1348 et 8260 ohms/cm;
- Dureté varie entre 3,25 et 27,2 degrés français.

La teneur moyenne en nitrates était de 8,7 mg/l en 1979 (étude CPGF 1734 C) avec un écart type de 8,6 mg/l traduisant une forte dispersion des valeurs (minimum 0,2 mg/l, maximum 43,5 mg/l). Les points présentant des indices de contamination d'origine agricole ou domestique sont les suivants : puits de Cleppé, Feurs, Chalain, CRAINTILLEUX, Cuzieu, Bonson, Saint-Rambert et Andrézieux.

Les teneurs en fer et manganèse supérieures à 0,5 mg/l étaient en 1979 très dispersées géographiquement, si on excepte les fortes teneurs des points à Cleppé, Cuzieu, les autres mesures sont toutes inférieures à 0,1 mg/l.

Les relations étroites entre la nappe alluviale et la Loire font que la qualité de la ressource est dépendante de celle des eaux de surface, en particulier au droit de la zone

³ CEMAGREF, 1988

de captage de Bonson, le phénomène d'alimentation induite est quasi permanent et les eaux du fleuve participent pour une part importante au débit d'exhaure.

Les eaux sont assez peu minéralisées en bordure de la Loire; la minéralisation augmente sensiblement lorsqu'on approche des limites de la plaine et ceci en fonction des apports plus ou moins importants des nappes des versants.

En période d'étiage, la qualité est souvent médiocre.

ANNEXE 3 Principes de la modélisation hydrodynamique : résolution des équations de base

Un rappel des principes de modélisation mathématique est utile puisque c'est à partir des résultats des simulations d'implantation de carrières que se fonde l'évaluation de leur impact sur l'hydrodynamique souterraine.

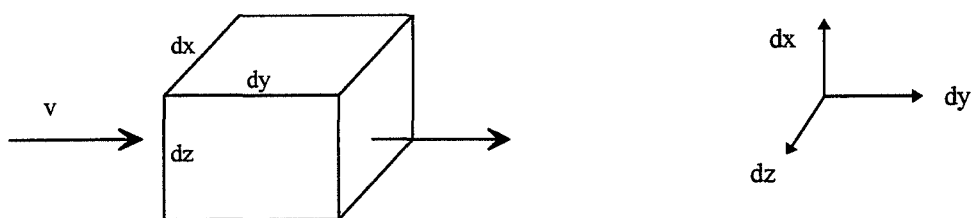
1. Formalisation mathématique de base des écoulements de nappe

Un modèle de nappe consiste à découper le secteur d'étude en blocs de terrain (discrétisation) et à les assembler en leur appliquant les équations de la théorie des écoulements en milieu poreux. Cette dernière repose sur le principe de Lavoisier de conservation de la masse et s'exprime par l'équation de continuité.

On considère ρ la masse volumique de l'eau comme indépendante du temps:

- $\sum$ débits entrant ou sortant dans un volume fermé de milieu poreux = 0 *en régime permanent*;
- $\sum$ débits entrant ou sortant dans un volume fermé de milieu poreux = *quantité d'eau emmagasinée ou produite dans le volume élémentaire considéré, dans l'unité de temps, en régime transitoire.*

Soit une unité de volume $dx dy dz$, à travers laquelle transite un fluide à la vitesse v .



$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = -\rho(\alpha + n\beta) \frac{dp}{dt}$$

Equation 1 : équation de continuité

où :

- ρ masse volumique de l'eau
- α coefficient de compressibilité de l'aquifère
- β coefficient de compressibilité de l'eau
- n porosité de l'aquifère

$p = \rho gh$ pression

$$v = -K \text{grad}(h)$$

Equation 2 : équation de Darcy

avec K perméabilité en m/s

Les équations de continuité et de Darcy, avec $T = bK_i$ (b : épaisseur de l'aquifère en m) permettent d'obtenir :

$$T_x \frac{\partial H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial H}{\partial y^2} + \frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} = S \frac{dH}{dt} + q$$

Equation 3 : équation de diffusivité

qui peut encore s'écrire :

$$\text{div}(T \text{grad} H) = S \frac{dH}{dt} + q$$

où q représente le débit échangé avec le milieu extérieur par unité de surface.

T et S sont les paramètres hydrauliques de l'aquifère : transmissivité (intégrale de la perméabilité sur l'épaisseur de la couche) et coefficient d'emménagement.

L'inconnue est donc H , (la hauteur piézométrique ou potentiel fonction de l'espace plan et du temps) $H = h(x, y, t)$.

En écoulement permanent $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$, et en régime bidimensionnel le terme en z disparaît :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = q(x, y)$$

L'équation de diffusivité est dite « équation aux dérivées partielles » et l'intégrer revient à rechercher une fonction quelconque de x, y qui en soit la solution exacte dans le cas considéré. Ceci est généralement impossible dans notre cas, il faut recourir à des techniques d'intégration approchée par discrétisation. Le problème posé, connaître H en tout point est remplacé par un problème simplifié. H est connue seulement en quelques points sur un maillage. De même, H n'est recherchée qu'aux noeuds du maillage et doit être représentative de la charge moyenne à l'intérieur d'une maille carrée ou rectangulaire entourant le noeud considéré. L'équation sur un tel domaine est écrite sur chacun des noeuds du maillage. L'inconnue est H recherchée à chaque noeud sauf sur ceux où il y a une condition aux limites. Ces méthodes de résolution sont les « éléments finis » ou les « différences finies ».

La méthode des « éléments finis » est basée sur une discrétisation du domaine étudié par triangulation en fonction des points de mesure disponibles. Cette méthode est employée essentiellement en milieu fissuré ou karstique.

Le procédé des « différences finies » est basé sur une discrétisation du domaine étudié en mailles carrées ou rectangulaires de taille constante ou variable selon la densité d'informations. Ces procédés sont généralement appliqués à des milieux poreux, relativement homogènes tels que les aquifères en nappes alluviales.

2. Résolution des équations

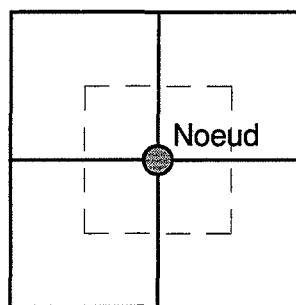


Figure 1 : discrétisation

Pour résoudre l'équation de diffusivité, les dérivées d'ordre 1 et 2 de h sont nécessaires. Elles sont approximées par la différence des fonctions au point $(x-\Delta x)$ et $(x+\Delta x)$.

Plaçons-nous sur un noeud quelconque du domaine, entouré de la maille dont il est le centre et des quatre noeuds les plus voisins :

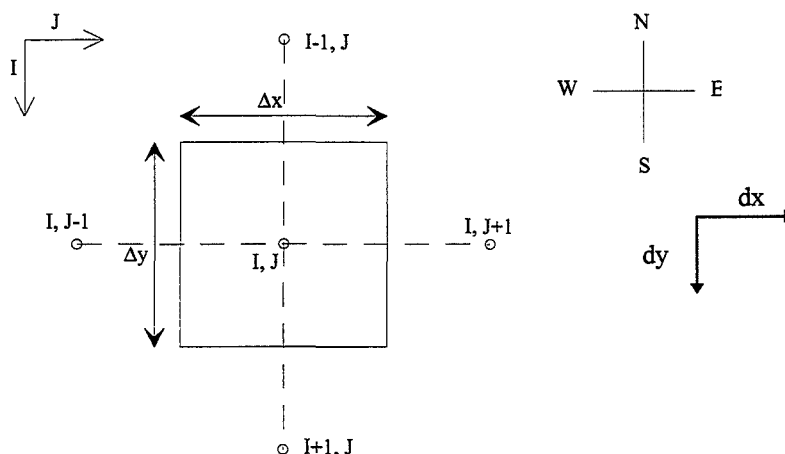


Figure 2 : application des équations hydrodynamiques au niveau d'une maille

Appliquons les relations dérivées aux noeuds I, J :

$$\begin{aligned}
* \frac{\partial h}{\partial x} &\approx \frac{h(I, J-1) - h(I, J+1)}{2\Delta x} \\
* \frac{\partial h}{\partial y} &\approx \frac{h(I-1, J) - h(I+1, J)}{2\Delta y} \\
* \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} &\approx \frac{h(I, J-1) - 2h(I, J) + h(I, J+1)}{(\Delta x)^2} \\
* \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} &\approx \frac{h(I-1, J) - 2h(I, J) + h(I+1, J)}{(\Delta y)^2}
\end{aligned}$$

Remplaçons ensuite ces quatre expressions dans l'Equation 3 en régime permanent :

$$\frac{\mathcal{A}_x}{\alpha} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\mathcal{A}_y}{\phi} \frac{\partial h}{\partial y} + T_x \frac{\partial^2 h}{\alpha^2} + T_y \frac{\partial^2 h}{\phi^2} = q(x, y, t)$$

puis :

$$\begin{aligned}
&\frac{\mathcal{A}_x}{\alpha} \left[\frac{h(I, J-1) - h(I, J+1)}{2\Delta x} \right] + \frac{\mathcal{A}_y}{\phi} \left[\frac{h(I-1, J) - h(I+1, J)}{2\Delta y} \right] + \\
&T_x \left[\frac{h(I, J-1) - 2h(I, J) + h(I, J+1)}{(\Delta x)^2} \right] + T_y \left[\frac{h(I-1, J) - 2h(I, J) + h(I+1, J)}{(\Delta y)^2} \right] = q(I, J)
\end{aligned}$$

D'autres inconnues apparaissent qui sont maintenant $\frac{\mathcal{A}_x}{\alpha}$ et $\frac{\mathcal{A}_y}{\phi}$

On va donc développer T_x et T_y pour arriver à un calcul approximé de T_x et T_y .

$$\begin{aligned}
T_w \frac{h(I, J-1) - h(I, J)}{Dx^2} + T_N \frac{h(I-1, J) - h(I, J)}{Dy^2} + T_E \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{Dx^2} + \\
T_s \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{Dy^2} = \frac{Q(I, J)}{DxDy}
\end{aligned}$$

$Q(I, J)$ représente le débit qui passe dans une maille volumique de dimensions $\Delta x, \Delta y$.

$$Q(I, J) = q(I, J) \Delta x, \Delta y$$

avec :

$$T_w = \frac{2T(I, J-1).T(I, J)}{T(I, J-1) + T(I, J)}$$

Equation 4 : moyenne harmonique

c'est la moyenne harmonique, les autres transmissivités de passage ou transmissivités directionnelles sont construites sur le même mode.

Cette équation est valable sur tout le domaine sauf aux limites.

Le terme « différence finies » donné à cette méthode vient de l'approximation d'une dérivée par le quotient de la différence de la valeur de la fonction entre deux points

voisins, par la distance entre ces deux points. Une telle équation peut être écrite en chaque noeud du maillage considéré et en quatre noeuds voisins sauf sur ses limites.

Exemple 1 :

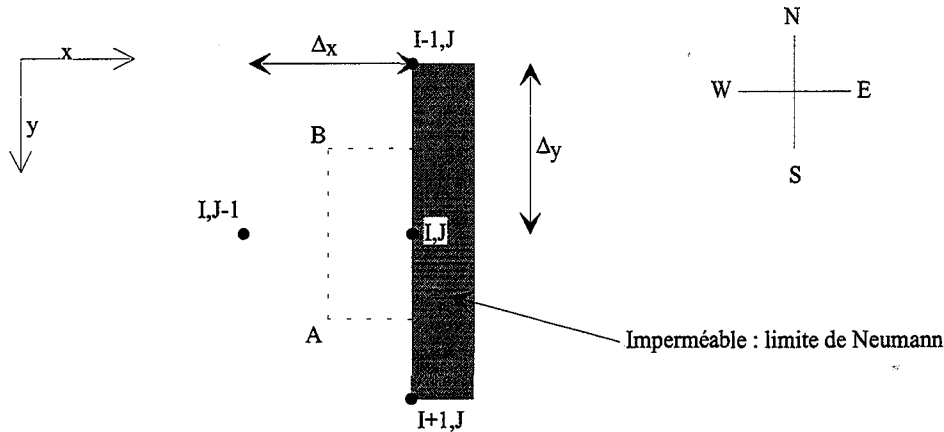


Figure 3 : cas d'une limite imperméable ou limite de Neumann

$$Q_{AB} = T_w \Delta y \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{\Delta x}$$

$$Q_{BC} = T_w \Delta y \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{\Delta x}$$

$$Q_{CD} = 0$$

$$Q_{DA} = T_s \frac{\Delta x}{2} \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{\Delta y}$$

On obtient donc :

$$\frac{Q(I, J)}{Dx Dy} = T_w \Delta y \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{\Delta x} + T_w \Delta y \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{\Delta x} + T_s \frac{\Delta x}{2} \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{\Delta y}$$

Exemple 2 :

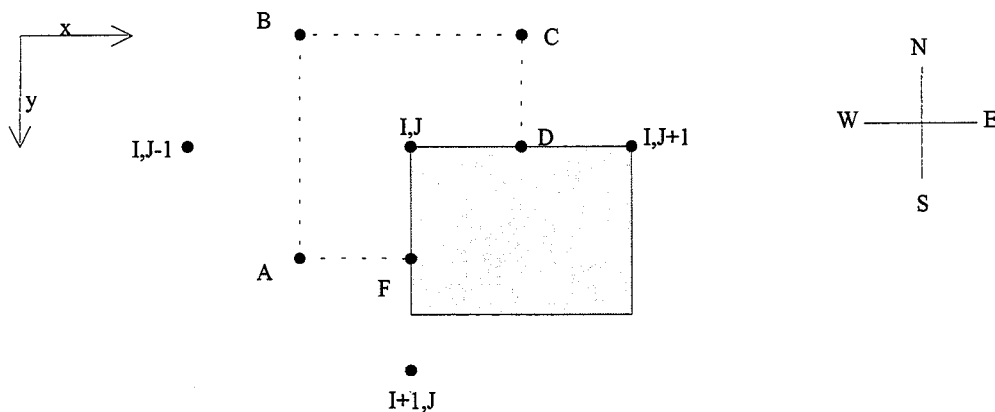


Figure 4 : deuxième exemple de calcul aux limites

$$Q_{AB} = T_W \Delta y \frac{h(I, J-1) - h(I, J)}{\Delta x}$$

$$Q_{BC} = T_N \Delta x \frac{h(I-1, J) - h(I, J)}{\Delta y}$$

$$Q_{CD} = T_E \frac{\Delta y}{2} \frac{h(I, J-1) - h(I, J)}{\Delta x}$$

$$Q_{DE} = 0$$

$$Q_{EF} = 0$$

$$Q_{FA} = T_S \frac{\Delta x}{2} \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{\Delta y}$$

On a donc :

$$T_W \frac{h(I, J-1) - h(I, J)}{\Delta x^2} + T_N \frac{h(I-1, J) - h(I, J)}{\Delta y^2} + T_E \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{2\Delta x^2} + T_S \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{2\Delta y^2} = \frac{Q(I, J)}{\Delta x \Delta y}$$

Ce qui nous donne la formule générale :

$$aT_W \frac{h(I, J-1) - h(I, J)}{\Delta x^2} + bT_N \frac{h(I-1, J) - h(I, J)}{\Delta y^2} + cT_E \frac{h(I, J+1) - h(I, J)}{2\Delta x^2} + dT_S \frac{h(I+1, J) - h(I, J)}{2\Delta y^2} = \frac{Q(I, J)}{\Delta x \Delta y}$$

Equation 5 : prise en compte des limites

a, b, c, d, sont des paramètres de disposition des limites.

3. DIFI

DIFI ou Différences Finies est le modèle hydrodynamique développé à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (Département Ingénierie de l'Environnement) dans les années 70 en langage Fortran. Il a été réécrit en langage C en 1994 et s'applique à des nappes libres. Le calcul est toujours réalisé en régime permanent.

- *Construction du modèle*

La discrétisation du domaine étudié est sous forme d'un maillage carré ou rectangulaire. Le programme rajoute une couche de mailles tout autour du secteur défini par l'utilisateur. Pour chaque maille on renseigne H le potentiel, K la perméabilité, Z

l'altitude du substratum, A l'altitude de la surface du sol et Q les débits entrants ou sortants (respectivement positifs ou négatifs). L'ensemble de ces données sont entrées pour chaque maille dans un fichier texte qui décrit aussi dans ses premières et deuxièmes lignes les caractéristiques générales du modèle :

- nombre de lignes ;
- nombre de colonnes ;
- epsilon : précision du calcul imposée par l'utilisateur ;
- maximum d'itérations : nombre d'itérations à partir duquel le calcul est arrêté ;
- unité selon les lignes ;
- unité selon les colonnes.

A partir de la troisième ligne, les caractères sont organisés en six colonnes et concernent les paramètres de l'aquifère sur le maillage, par exemple :

	valeur de K	de la ligne x	à la ligne x+n	de la colonne y	à la colonne y+m
K	0,001	10	15	17	23

Lorsque plus de deux mailles contiguës contiennent la même valeur de perméabilité ou d'altitude du substratum, ce mode de stockage évite de réécrire cette même valeur dans chacune des mailles concernées. Avant de saisir les données, elles sont toutes initialisées à zéro pour s'assurer de couvrir toute la zone étudiée. A la fin du fichier texte la liste des mailles hors du domaine qui ne doivent pas être calculées sont formalisées de la manière suivante :

E	-2	de la ligne x	à la ligne x+n	de la colonne y	à la colonne y+m
---	----	---------------	----------------	-----------------	------------------

Les conditions aux limites sont celles de Dirichlet (potentiel) ou de Neumann (débits): sur H par l'intermédiaire d'une valeur négative interprétée par le programme comme fixe mais utilisée en valeur absolue ;

sur Q en valeurs négatives (pompages) ou positives (injection).

Ces conditions aux limites sont équivalentes, elles ne peuvent donc pas être imposées simultanément sur la même maille. En fonction du problème posé et des données disponibles, il faut choisir entre les deux types de conditions.

• Calcul

En régime permanent, $\sum Q_{ij} = 0$.

Sont calculées dans l'ordre :

les perméabilités et transmissivités directionnelles, soient K et T vers le N, S, E et W, par exemple :

$$K_N = \frac{2K + K_E}{K_N + K_E}$$

$$T_N = K_N * e$$

Les autres perméabilités et transmissivités sont construites sur le même mode.
les débits directionnels

$$Q_N = T_N * |H_N|$$

la transmissivité totale est la somme des transmissivités précédentes ;

le potentiel calculé : $h_{IJ} = (h * \omega) + h_{IJ} * (1 - \omega)$;

ω est un coefficient de sur-relaxation qui permet d'augmenter la vitesse de convergence du calcul.

La méthode de calcul itératif est celle de Frankel-Young. Pour les itérations de i à n , il faut remplacer h calculée par h pondérée en fonction de ω et de h à l'itération $n-1$.

$$(h_i^n)_{\text{pondéré}} = \omega (h_i^n)_{\text{calculé}} + (1 - \omega) (h_i^{n-1})_{\text{pondéré}}$$

Equation 6 : calcul itératif de h d'après Frankel-Young

ω est calculé d'après la méthode de Moler :

$$\omega_{\text{approximé}} = \frac{2}{1 + 1,701 \frac{a}{r^3}}$$

Equation 7 : coefficient de sur-relaxation d'après Maler.

avec a : dimension de la maille carrée

r : rayon du cercle ayant même surface que le domaine étudié.

Convergence

La précision du calcul s'affine à chaque itération mais sans jamais atteindre mathématiquement la perfection. Un test de sortie est donc nécessaire. Ce test peut-être un nombre maximal d'itérations. Il est aussi possible d'imposer une valeur de fin de calcul qui corresponde à une réalité satisfaisante sur le terrain, compte tenu des incertitudes sur les données initiales. Le choix de cette valeur se porte généralement sur la précision des mesures piézométriques (0,1 m par exemple). Dès que $((h_{IJ}$ à n itérations) - $(h_{IJ}$ à $n - 1$ itérations)) qui est calculé en tout point du maillage, est inférieur à la précision admise, le calcul est terminé.

ANNEXE 4 Système d'Information Géographique

Arc Macro Language (A.M.L.)

Ainsi, tous les traitements effectués sur les données géographiques pour atteindre un objectif donné n'intéressent absolument pas l'utilisateur d'un outil d'aide à la décision quel qu'il soit. Toutes les phases intermédiaires entre la donnée d'entrée et le résultat doivent être « cachées » grâce à un programme informatique qui automatise les opérations nécessaires à l'analyse et au calcul. Le développement d'un outil nécessite un langage pour pouvoir écrire des programmes de calcul utilisant les données géographiques et leurs attributs. Le langage AML a été développé par ESRI dans cette optique, et pour créer l'interface spécifique. Un applicatif demande aussi la mise en place d'une base de données pouvant associer des données en mode raster et en mode vecteur, ainsi que leurs attributs.

Le langage AML est un interpréteur de commandes. Il assure la gestion de l'interface entre l'homme et le noyau du logiciel Arc/Info. Toute ligne de commande transmise par l'utilisateur au noyau et ceci à l'aide du clavier ou d'un fichier texte ou encore d'un menu, est préalablement filtrée par l'interpréteur, qui traite les instructions qui lui sont destinées (cf. Figure 5).

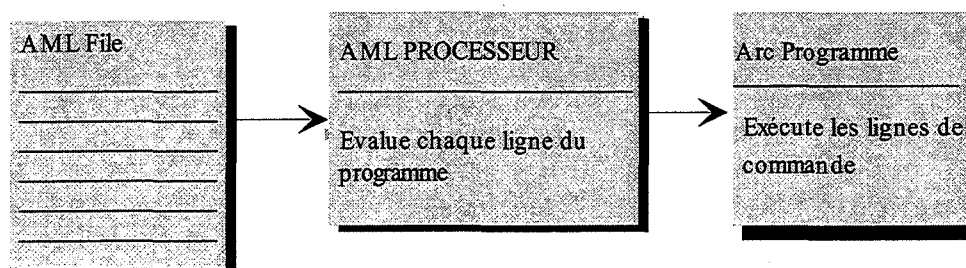


Figure 5: Le processeur aml d'après AML user's guide

Ces instructions permettent, entre autres, de réaliser:

- des répétitions de blocs de commandes (boucles);
- des évaluations d'expressions logiques;
- des textes conditionnels;
- des manipulations de variables et de fonctions.

Les instructions destinées à l'interpréteur sont identifiées grâce à des caractères spéciaux. Le noyau Arc/Info n'a aucune « vision » de l'ensemble des instructions du langage AML, il ne « voit » que les commandes qu'il exécute. Le langage AML utilise des fonctions qui sont des outils élémentaires de calcul. Les variables sont des informations destinées à être stockées et transmises d'un programme à l'autre. Les routines sont des sous-parties locales de programmes particuliers, qui les appellent. Le langage AML permet d'écrire des programmes

spécifiques de calcul, d'utiliser des commandes Arc/Info dans ces programmes et de créer le dialogue homme/machine par l'intermédiaire de menus. Leur construction représente une part très importante dans le développement d'un outil. La présentation des champs de saisie d'information, des champs de déclenchement des actions, l'enchaînement de différents menus déterminent son ergonomie.

Annexe N° 5. Notice d'utilisation de l'Outil d'Aide à la Décision « carrières »

1. Module d'accueil

Pour accéder au module d'accueil, il faut entrer sous Arc/Info et taper au clavier la directive de lancement du premier AML :

Arc: &r start

Ce premier AML lance l'affichage de deux fenêtres contenant des images (les bords de Loire à Marclopt, et des informations sur l'O.A.D.: date de création, partenaires) et le menu accueil qui propose d'annuler en revenant sous Arc, ou de continuer. Ce dernier choix lance le deuxième AML.

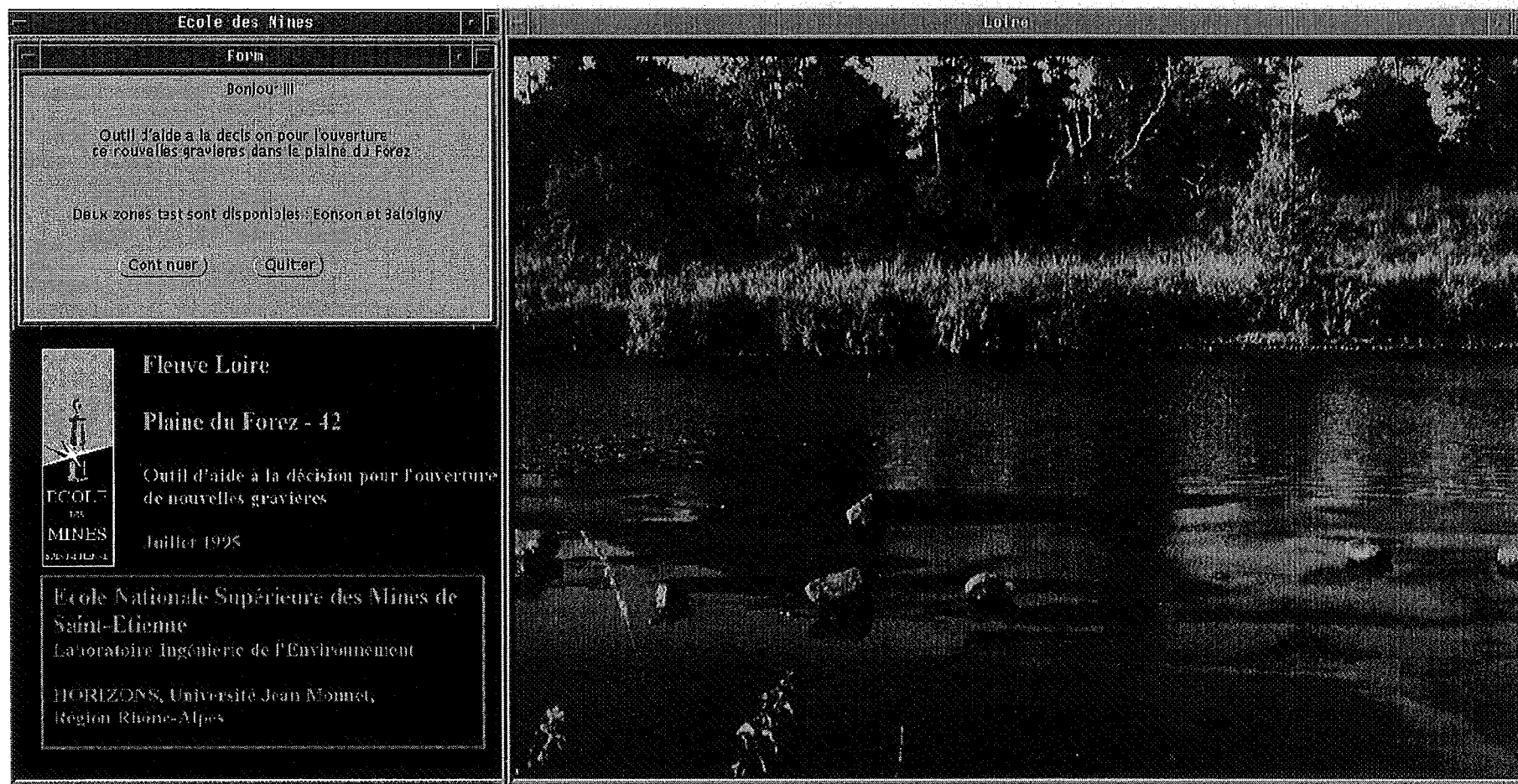


Figure 1: module d'accueil

2. Module global sur la plaine du Forez

Le deuxième AML initialise à zéro toutes les variables de la base de données globales sur la plaine du Forez plus deux variables nécessaires aux utilitaires: l'extension géographique de l'affichage et le dessin (somme des données géographiques sélectionnées par l'opérateur). Enfin, il lance le menu déroulant « plaine du Forez » qui comprend l'ensemble des données dont l'affichage est nécessaire pour une prise en compte globale du problème. Ces données sont proposées par thème (cf. Figure 2):

- *l'hydrographie*: affluents, Loire 1991, Loire 1846, Bande de Méandrage;
- *la géomorphologie*: plaine du Forez, Modèle Numérique de Terrain, convexités, failles, terrasses anciennes, lit majeur, profils en travers;
- *l'hydrogéologie*: maillages, piézométrie mai 1995, résistivité;
- *l'occupation humaine*: limites communales, autoroute 72, réseau routier principal, voies ferrées, digues, barrages et seuils, gravières;
- *les sites classés*: zones inondables (courants forts et faibles) et les Z.N.I.E.F.F. Certaines zones cumulant plusieurs types de protection et leur description étant trop longue pour être affichée directement à l'écran, un viseur apparaît et permet à l'utilisateur de cliquer sur le polygone qui l'intéresse. La description des caractéristiques de cette zone est alors inscrite dans une fenêtre indépendante qu'il devra fermer avant de poursuivre son travail.

Chacune de ces données est décrite par son type (couverture de points, arcs, polygones, représentation raster) et par le graphisme qui a été choisi pour elle (palette de couleur, mode de représentation). La sélection d'une donnée dans le menu entraîne son affichage et la variable qui la représente prend la valeur 1, ce qui permet de l'identifier comme « active » dans une vue.

Le dernier thème est celui des utilitaires et regroupe les fonctions de « *zoom* », « *effacer* », « *mise à jour* » et « *quitter* »:

- le programme AML du *zoom* appelle le menu *zoom* qui emprunte ses icônes à Arc/Info. Il définit la nouvelle extension graphique de la vue et appelle deux autres programmes « *fenêtre* » et « *retour* » qui assurent le dessin des variables actives (égales à 1), respectivement dans le cas du *zoom* et pour le retour à l'extension initiale;
- le bouton *effacer* ne fait appel à aucun programme, il réinitialise les variables à zéro;
- le bouton *quitter* est un simple retour à la racine d'Arc/Info.

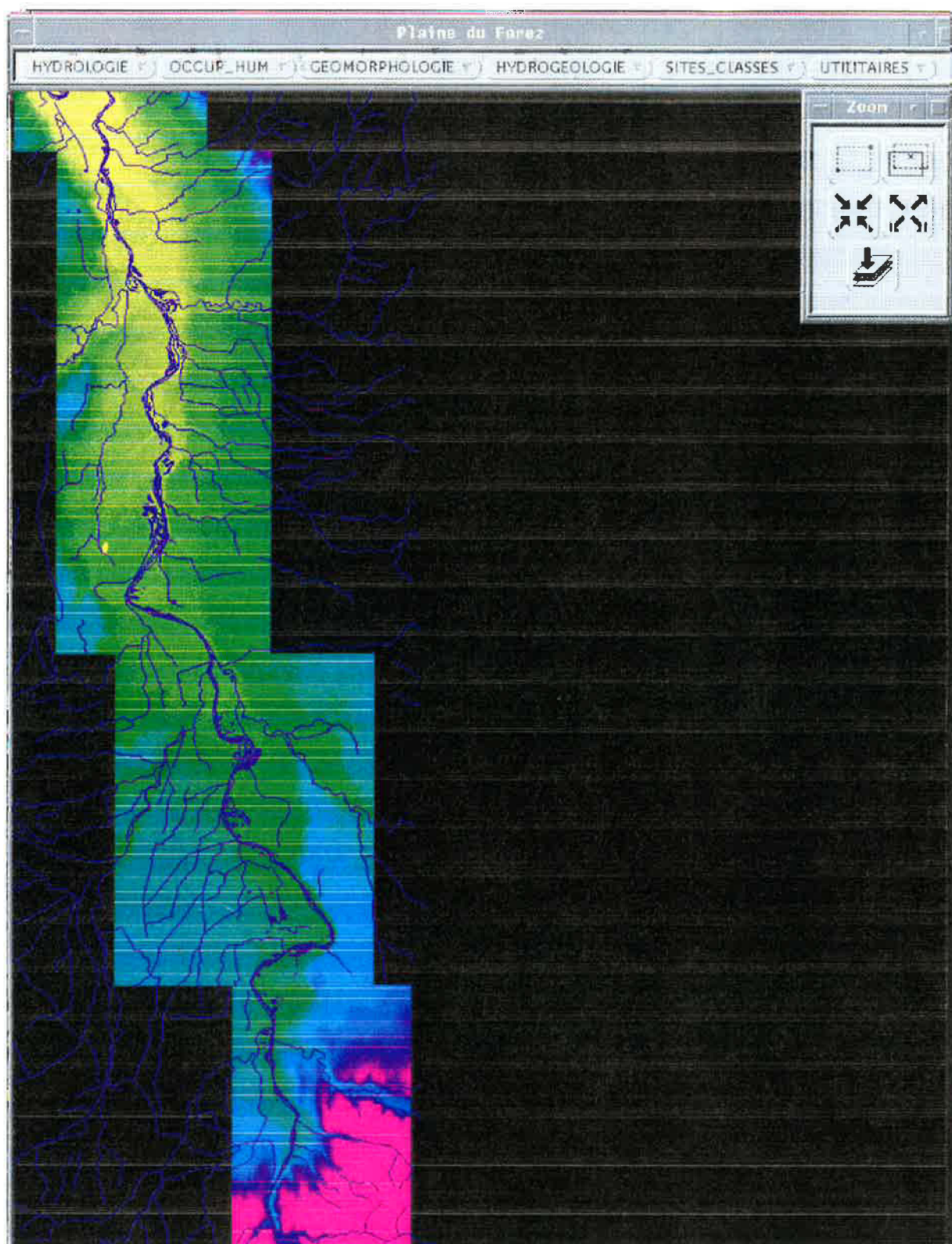


Figure 2: module global sur la plaine du Forez

a. Profils en travers

Le bouton « *profils* » du thème géomorphologie appelle un menu de choix du type de profil en travers à tracer: profil issu des fichiers de données de la DDE ou profil à définir par l'utilisateur (cf. Figure 3). Ce menu appelle un programme AML qui gère les deux options.

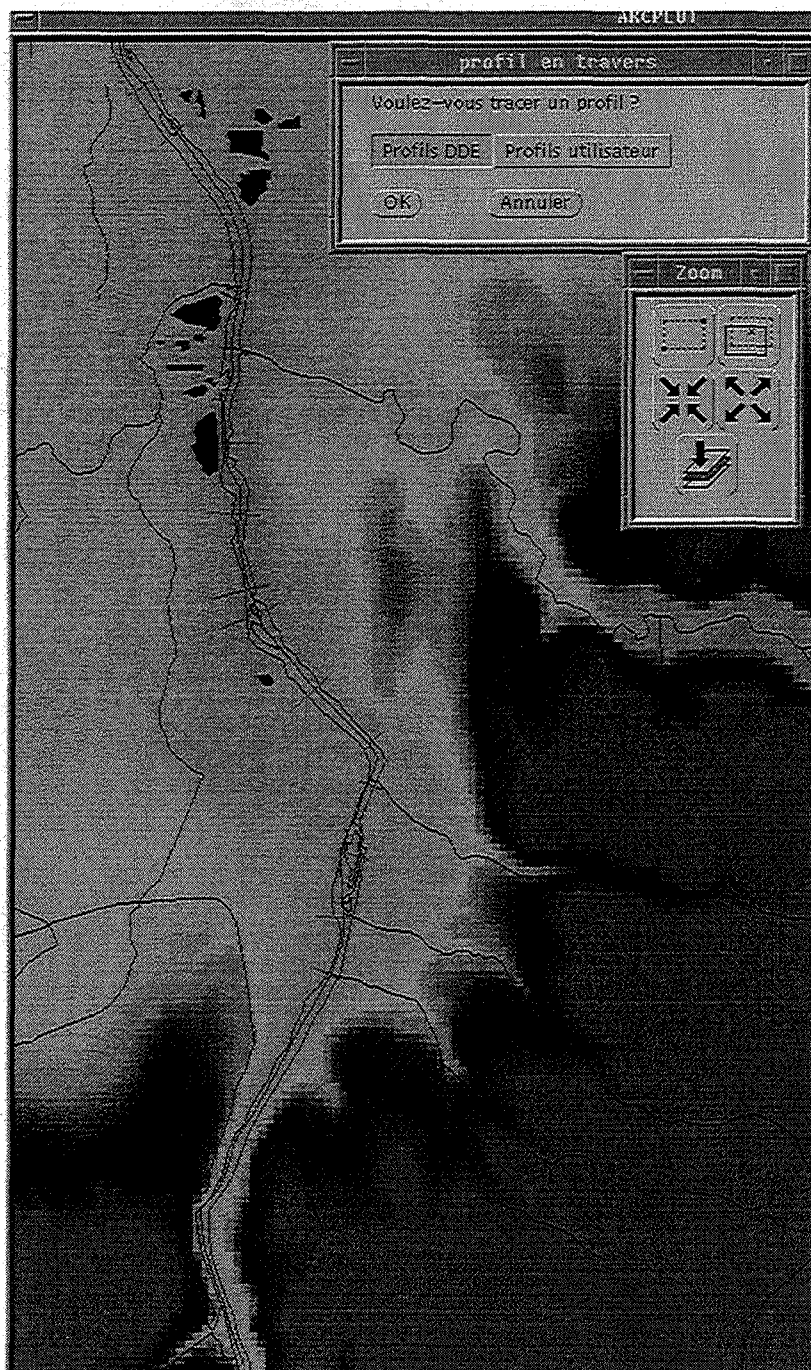


Figure 3: menu « profils en travers »

- *profils DDE*: les fichiers Excel ont été intégrés dans la base de données géographiques comme couvertures de points qui comportent un ITEM altitude et un ITEM distance cumulée

du premier point au dernier. Une autre couverture d'arcs synthétise l'ensemble de ces profils. Chaque arc représente l'un d'entre eux et est relié à son « équivalent en points ». Lorsque le bouton DDE est sélectionné, le programme AML prévoit le choix d'un arc grâce à un viseur. L'opérateur clique sur cet arc et le programme affiche en bas de la fenêtre active le profil sur deux axes comportant en ordonnée la distance et en abscisse l'altitude NGF. Leur taille est prédéfinie en fonction de la longueur maximale (400 m) et des altitudes minimale et maximale des profils (320 à 380 m). Le retour au menu principal est automatique.

- *profils utilisateur*: ils sont réalisables sur la zone géographique couverte par les MNT. Le programme AML appelle la matrice des altitudes (représentation raster du relief), puis une fonction standard d'Arc/Info qui trace un profil en travers entre plusieurs points définis par l'utilisateur grâce à un viseur. Ce profil apparaît comme ceux de la DDE en bas de la fenêtre active sur deux axes définis par le programme AML. Ces profils n'ont qu'une valeur d'information, ils ne sont pas destinés à être conservés. L'entité graphique qu'ils représentent est donc supprimée avant le retour automatique au menu principal. Contrairement au profils DDE leur extension géographique n'est pas limitée, et l'utilisateur peut choisir de réaliser une coupe de l'entrée à la sortie de la Loire de la plaine du Forez, c'est à dire sur une cinquantaine de kilomètres.

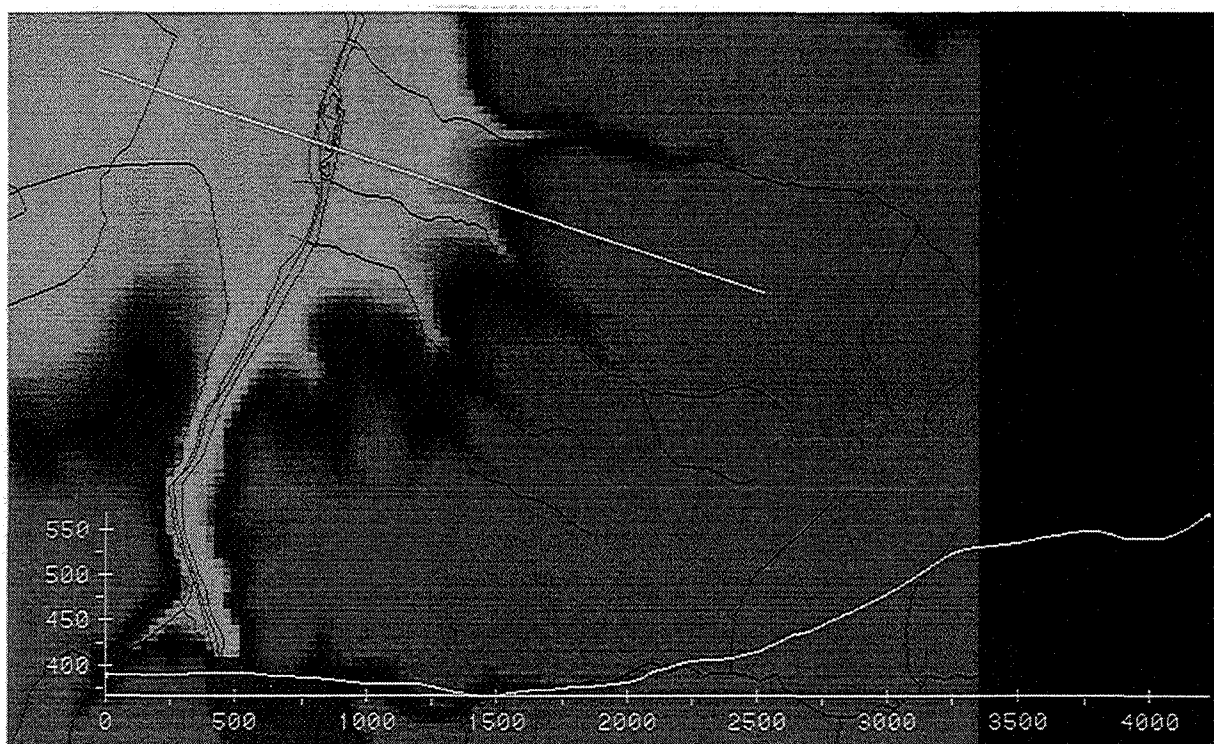


Figure 4: tracé d'un profil topographique par l'utilisateur

b. Simulation hydrodynamique

Pour accéder aux modèles hydrodynamiques, il faut sélectionner le bouton « *maillages* » du thème hydrogéologie qui affiche les maillages de Bonson et de Balbigny puis appelle un sous-menu. Ce dernier demande si l'utilisateur désire réaliser des simulations (cf. Figure 5). Dans le cas où la zone géographique faisant l'objet d'une extraction de sables et granulats est prévue, n'est pas située dans un de ces deux maillages, il répond « *non* » et retourne au menu principal. Dans le cas contraire, il clique sur « *oui* » et un deuxième sous-menu lui propose le choix entre Balbigny et Bonson (cf. Figure 6). Il peut alors confirmer ce choix ou l'annuler ce qui le ramène au menu principal.

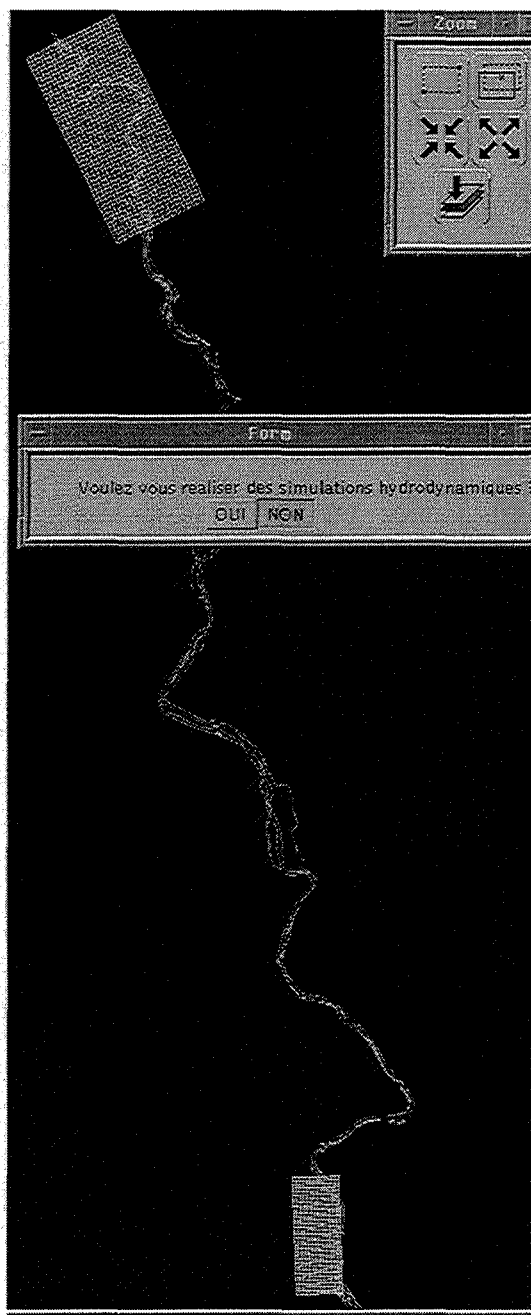


Figure 5: premier menu de choix de simulation

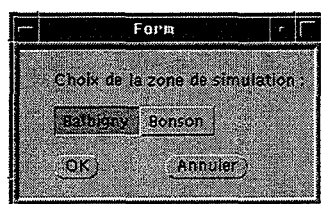


Figure 6: deuxième menu de choix de simulation (site)

Ces deux menus et les choix qu'ils proposent sont gérés par un seul programme AML qui appelle deux autres programmes d'accès aux modules locaux.

3. Modules locaux: exemple de Balbigny

Les deux modules locaux sont construits exactement sur le même mode, comportent des programmes et des menus équivalents où seules les données diffèrent. Nous ne présentons donc que le module de Balbigny. Son programme d'accès a les mêmes fonctions que son homologue sur la plaine du Forez: il initialise l'ensemble des variables qui seront utilisées à titre d'information (couvertures, représentations en mode raster et photographies aériennes), d'affichage, mais aussi toutes celles qui concernent le calcul hydrodynamique, soit quarante deux variables au total. Ensuite il appelle le menu déroulant sur la zone géographique de Balbigny (cf. Figure 7).

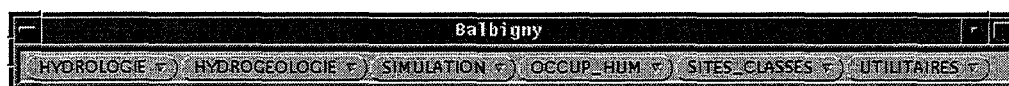


Figure 7: menu déroulant local sur Balbigny

Ce menu comporte six thèmes dont certains sont communs avec le menu global mais qui sont plus axés vers l'hydrogéologie et la simulation:

- *hydrologie*: Loire en 1991, affluents, gravières en eau, photographies aériennes infrarouge noir et blanc au 1/17 000 (mission 1991);
- *hydrogéologie*: piézométries hautes eaux 1977, basses eaux 1978 et 1981, battement de la nappe en 1976, épaisseur de la couverture, topographie du substratum, perméabilité, épaisseur des alluvions, puits et sondages.
- *simulation*: maillage, coordonnées des mailles, interrogation ponctuelle des données hydrogéologiques, exécuter, piézométrie calée, piézométrie calculée, gradient hydraulique (après simulation), impact (sur la piézométrie), interrogation, enregistrement;

- *occupation humaine*: bâti, chemin de fer, route nationale, routes départementales, routes vicinales, chemins carrossables;
- *sites classés*: zones NDS du P.O.S., cimetières, périmètres de protection des captages, schéma directeur;
- *utilitaires*: zoom, effacer, quitter.

Les utilitaires sont construits sur un mode identique de celui du module global. Le programme AML d'appel du menu *zoom* et de l'affichage des couvertures sélectionnées dans une vue est le même. Seuls les programmes « *fenêtre* » et « *retour* » sont spécifiques puisqu'ils comportent les variables locales du module.

Le thème simulation ne comporte qu'une seule fonction d'affichage: le maillage où figurent les mailles en dehors de la zone alluviale et celles sur lesquelles une condition aux limites est imposée. Les conditions de potentiel sont en hachures cyan et les conditions de flux sont en hachures magenta. Tous les autres boutons font appel à des programmes AML où à des menus qui ont pour vocation la réalisation aisée d'une simulation hydrodynamique.

a. **Coordonnées des mailles**

Avant de réaliser une simulation, l'opérateur choisit les mailles les plus adaptées pour représenter les parcelles de la future extraction. Un viseur apparaît après avoir sélectionné le bouton « *don_list* » qui signifie « *liste des données en lignes et colonnes* ». L'utilisateur clique sur les mailles choisies qui sont alors enregistrées dans un fichier de la BD et apparaissent en rouge de manière à bien les localiser visuellement. En effet, après la simulation la piézométrie a changé et les mailles sont plus difficiles à situer. Le maillage est une couverture de polygones qui comporte quatre ITEMS: ligne, colonne, Q (pour flux imposé) et H (pour potentiel imposé). Un programme AML interroge les ITEMS ligne et colonne des mailles sélectionnées et restitue le résultat dans une fenêtre texte. L'opérateur va alors ouvrir la base de données du modèle et imposer sur ces mailles une perméabilité très forte, puis enregistre la modification. Ensuite il lui faut quitter la fenêtre texte avant de continuer.

b. **Interrogation ponctuelle de la base de données**

Afficher simultanément toutes les données hydrogéologiques sur une même vue est possible mais la vue qui en résulte est inexploitable car elle comporte un véritable enchevêtrement d'arcs de multiples couleurs. Il sera aussi très difficile d'attribuer un renseignement littéral au polygone qui lui correspond. Aussi le bouton « *don_ponc* » pour « *liste ponctuelle des*

données hydrogéologiques » appelle un programme AML et un menu spécifique. Un viseur permet de sélectionner une maille qui est enregistrée comme celles destinées à la simulation dans un fichier de la BD. Elle apparaît en cyan en même temps que le menu (cf. Figure 8) qui rend compte du résultat de l'interrogation sur le point exact où l'opérateur a cliqué.

DONNEES PONCTUELLES		
Maille selectionnee :		
Ligne :	22	
Colonne :	14	
Piezometrie etiage 1981	317	metres
Permeabilite	> 3	* 10 exp -3 m/s
Epaisseur du sol	3-4	metres
Epaisseur des alluvions	5.754096	metres
Altitude du substratum	314	metres
Pente	1.071819	pour cent
Altitude	323.754	metres

Buttons: Retour, Autre maille

Figure 8: interrogation ponctuelle de la base de données hydrogéologiques

Il peut arriver que l'utilisateur clique sur deux mailles à la fois, surtout s'il n'a pas utilisé le zoom. Dans ce cas, un message d'erreur lui incite à recommencer l'opération. Il peut aussi sélectionner une maille en dehors de la zone alluviale, un autre message d'erreur apparaît similaire au précédent (cf. Figure 9).

ERREUR

ATTENTION ! VOUS AVEZ SELECTIONNE UNE MAILLE
EN DEHORS DE LA ZONE ALLUVIALE

Veillez recommencer votre selection

continuer

ERREUR

ATTENTION ! VOUS AVEZ SELECTIONNE PLUSIEURS MAILLES

Veillez recommencer votre selection en cliquant au
centre de la maille.

continuer

Figure 9: messages d'erreurs dans la sélection d'une maille

c. Exécuter une simulation

La réalisation d'un calcul hydrodynamique est simple, il suffit de sélectionner le bouton « exécuter » du thème simulation qui appelle un programme AML. Ce dernier effectue des

tâches ayant trait d'une part au calcul hydrodynamique et d'autre part à l'affichage des résultats:

- sélection des attributs du maillage;
- exécution du modèle en langage C avec le fichier de données sélectionné par l'opérateur;
- remplacement de l'ancien ITEM H de la couverture « piézométrie calculée » par le nouveau H;
- élimination de l'ancien TIN s'il existe;
- calcul du nouveau TIN;
- tracé des isopièzes à partir du TIN avec une équidistance de un mètre;
- enregistrement de la piézométrie calculée sous la forme d'une couverture d'arcs;
- initialisation de la variable du maillage à 1;
- lecture du fichier de la BD dans lequel les mailles sélectionnées pour l'emplacement de la carrière sont enregistrées, si elles existent alors elles apparaissent en rouge et sur le reste du maillage seuls les contours des polygones sont affichés;
- initialisation de la Loire, de la piézométrie initiale et de la piézométrie calculée à 1, affichage de ces trois couvertures dans des couleurs prédéfinies;
- retour au menu.

Le retour au menu permet l'affichage de couvertures supplémentaires pour mieux localiser les zones d'impact important par rapport aux implantations humaines.

d. Calculer l'impact de la carrière sur la nappe

L'opérateur peut alors choisir de calculer quantitativement l'impact de la carrière sur l'état initial de la nappe en cliquant sur le bouton « *impact* » du thème « *simulation* ». La démarche et le programme en AML nécessaires ont été décrits dans le &2.

e. Enregistrer le résultat de la dernière simulation

Si l'opérateur juge le résultat de la simulation intéressant, il sélectionne le bouton « *enregistrer* » du thème « *simulation* ». Ce bouton appelle un menu qui demande la saisie au clavier du nom de la couverture d'arcs de la piézométrie calculée. Cette couverture est alors ajoutée à la base de données « *simulation* » et le retour au menu est automatique.

Cette possibilité d'enregistrer les piézométries calculées sous des noms divers demande de pouvoir choisir parmi ces dernières lorsque l'opérateur sélectionne le bouton « *piézo simu* ». Ce bouton appelle un petit menu déroulant qui propose toutes ces couvertures. L'opérateur clique sur l'une d'elles qui s'affichera et dont la variable sera initialisée à 1.

4. Caractéristiques de l'interface

L'interface réalisé pour cet O.A.D. représente 18 menus et 34 programmes en AML. Il se déroule sur trois niveaux: module d'accueil, module global (plaine du Forez), modules locaux (Bonson et Balbigny). L'ensemble des capacités du langage AML ont été utilisées pour développer une application complète qui regroupe des outils de calcul externes au S.I.G., un modèle de données avec une symbolique et des attributs, des fonctions additionnelles et des menus. Les apports d'un tel travail pour l'opérateur sont multiples mais certaines lacunes sont évidentes et demanderont ultérieurement un développement supplémentaire.

5. Limites de l'O.A.D.

a. Paramétrisation de l'outil

La mise en place d'un modèle hydrodynamique supplémentaire ne peut pas être réalisée par un utilisateur. Elle passe par l'élaboration d'une base de données locales (saisie, construction de la topologie etc.), par l'écriture des programmes en AML pour réaliser un module complet comme les deux existants actuellement. Aucune aide à ces différentes tâches n'est prévue dans la version actuelle.

De même, l'interface n'inclue pas de menus spécifiques pour caler un nouveau modèle ni de calculs automatiques de précision entre la piézométrie initiale et la piézométrie calculée dans l'opération de calage.

L'outil n'est donc pas paramétrable en mode « utilisateur » pour d'autres sites ou d'autres modèles hydrodynamiques.

b. Graphisme

L'affichage graphique est limité dans ses capacités sous Arcplot. Même s'il existe des variétés importantes de bibliothèques de symboles les couleurs sont peu nombreuses. Différentes couches d'informations auront donc la même représentation ce qui restreint la clarté des vues.

La superposition de plus de cinq couvertures est possible mais difficilement exploitable lorsqu'il s'agit de polygones. S'ils sont seulement représentés par leurs contours, ils peuvent être confondus avec une autre couverture d'arcs. Si un remplissage opaque coloré est choisi, une couche de polygones en masque une autre lors d'une superposition.

– Affichage

Les palettes de couleur aussi bien pour les points, arcs et polygones, proposées dans Arc/Info n'ont pas une quantité infini de possibilités. De plus, le fond noir standard de l'écran élimine toutes les teintes sombres qui ne ressortent pas du tout. Il est possible de faire varier les épaisseurs de trait mais le résultat est généralement particulièrement inesthétique et un trait fort nuit à la précision du tracé et peut masquer d'autres contours. Aussi, compte tenu du nombre important de couvertures proposées dans les menus déroulants, il est impossible d'avoir une couleur différente pour chacune. Que ce soit pour le module global que pour les modules locaux, certaines couvertures sont affichées avec le même graphisme.

RESUME

Il s'agit de concevoir et de réaliser un outil d'aide à la décision pour l'ouverture de carrières dans le lit majeur d'un fleuve qui soit en accord avec les nouvelles dispositions de la loi sur l'eau (1992) et de la loi carrières (1993).

Les modèles hydrodynamiques permettent de simuler la réponse d'un aquifère à un aménagement hydraulique tel qu'un pompage ou une carrière en générant de divers scénarios. La validité du modèle, les données initiales et les conditions aux limites peuvent être vérifiées et affinées en fonction du contexte morphodynamique du fleuve. Les paramètres nécessaires à l'aménageur concernent aussi tous les aspects humains et géomorphologiques qui doivent entrer dans sa prise de décision. Un Système d'Information Géographique (S.I.G.) gère ces informations spatiales et permet leur analyse. Couplé avec modèles hydrodynamiques calés et validés, il permet aussi la visualisation des résultats des simulations grâce au développement de fonctions spécifiques.

Le modèle global proposé est constitué d'une base de données environnementale, anthropique, historique et actualisée, couplée avec deux modèles hydrodynamiques. Il est appliqué sur la Loire et ses alluvions récentes dans la plaine du Forez (42 - France).

Mots clés: analyse spatiale, Systèmes d'Information Géographiques, modélisation hydrodynamique, géomorphologie fluviale, aide à la décision, extraction de sables et granulats.

ABSTRACT

The goal of this research has been to provide a decision support system for locating and authorizing gravel harvesting in floodplains in accordance with the 1992 water act and the 1993 gravel harvesting act.

Hydrodynamical models are used to simulate an aquifer response to hydraulic works such as welling-up or a gravel harvesting by generating different scenarios. The validity of the models and input data as well as the boundary conditions can be verified and optimised depending on the morphodynamical context of the river. Other parameters pertaining to geomorphological, anthropogenic and resource use are taken into account for environmental decision making. A Geographical Information System (G.I.S.) is used to analyse and manage these spatial data. The hydrodynamical models are validated and linked to the G.I.S. allowing simulation and visualisation of results through development of specific applications.

The proposed comprehensive model is comprised of an anthropical, historical and updated environmental data bank, linked with two hydrodynamical models. It is applied to the Loire and is floodplain in the Forez plain (42 - France).

Key words: spatial analysis, Geographical Information Systems, hydrodynamical models, fluvial geomorphology, decision support system, sands and gravel harvesting.