

**Mémoire présenté pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement**

**LE COÛT DES DOMMAGES DUS AUX INONDATIONS:
ESTIMATION ET ANALYSE DES INCERTITUDES**

volume 1 : texte principal

par
Jean Philippe TORTEROTOT

thèse soutenue le 6 octobre 1993
devant le jury composé de:

M. Claude HENRY
M. Edmund PENNING-ROUSELL
M. Jean ROUSSELLE
M. Jean GRASSIN
M. Guy OBERLIN
M. Rémy POCHAT
M. Pierre-Alain ROCHE

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de Thèse

à Françoise, Cécile, Nicolas, Benoît

*ce travail ne serait arrivé à son terme
ni sans votre présence, ni sans votre patience*

*on ne peut créer et donner
qu'à partir de ce que l'on a reçu*

*merci à mes parents, à mes proches,
et à tous ceux qui m'ont éduqué, instruit, formé et entouré*

REMERCIEMENTS

Monsieur le Professeur Claude HENRY m'a fait l'honneur de présider le jury chargé d'examiner ce travail. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude.

Monsieur le Professeur Edmund PENNING-ROWSELL a accepté la lourde tâche de rapporteur pour cette thèse, qui a trouvé beaucoup d'inspiration dans les travaux qu'il dirige au Flood Hazard Research Centre et dans le projet EUROflood qu'il coordonne. Qu'il trouve ici témoignage de ma très sincère reconnaissance.

Monsieur le Professeur Jean ROUSSELLE a également accepté d'être rapporteur de ce travail, dont il a été un interlocuteur privilégié et attentif au-delà de l'océan. Je lui adresse ma profonde gratitude pour son aide, son soutien et ses encouragements chaleureux.

Cette thèse n'aurait pas pu être préparée sans le soutien technique du Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne qu'a dirigé Monsieur Jean GRASSIN. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour cette aide précieuse et pour nos contacts dont ma recherche a bénéficié.

Ma reconnaissance sincère va à Monsieur Guy OBERLIN, pour l'intérêt qu'il a témoigné à ce travail, pour l'analyse qu'il en a faite, ainsi que pour ses commentaires.

Monsieur Rémy POCCHAT m'a accueilli à bras ouverts au CERGRENE, pour me permettre de faire mes premières armes scientifiques et professionnelles au sein d'une équipe stimulante. Je dois beaucoup à sa confiance chaleureuse et à son enthousiasme, et tiens à lui exprimer mon dévouement et ma très profonde gratitude.

En acceptant de diriger mon travail de thèse, Monsieur Pierre-Alain ROCHE s'est exposé à des sollicitations et questions aussi nombreuses que peu réfrénées. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour sa patience, son soutien moral et scientifique irremplaçable, le recul et la rigueur avec lesquels il a orienté et enrichi ma réflexion. J'espère, à son contact, avoir su apprendre à concilier l'exigence rigoureuse envers soi-même et le plaisir de l'exercice intellectuel.

Différentes phases des travaux de recherche résumés dans cette thèse ont bénéficié de soutiens financiers du Ministère de l'Environnement, et des départements ministériels qui l'ont précédé. Je tiens à en remercier vivement la Délégation aux Risques Majeurs et ses collaborateurs, pour leur aide et pour la qualité de nos contacts, ainsi que le Service de la Recherche, des Etudes et du Traitement de l'Information sur l'Environnement. Je suis très sensible à l'accueil cordial, dont j'ai toujours bénéficié pour m'initier à la problématique des risques naturels majeurs et réaliser ma recherche, et pour lequel je tiens à remercier notamment Madame Josiane PERCHE et Messieurs Geoffroy CAUDE, Richard DAVOLI, Alain JACQ, Jean NOYELLE.

Le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, et son successeur le Service de Bassin Loire-Bretagne au sein de la Direction Régionale de l'Environnement, à Orléans, ont apporté un soutien technique et humain irremplaçable au travail effectué sur le Bassin de la Loire: données et informations, expertises, avis... Pour leur compétence, leur disponibilité et leur accueil, ma très chaleureuse reconnaissance va à Messieurs CLERICY, GASOWSKI, REINBOLD et VALLET, ainsi qu'à Monsieur André BACHOC qui a pris la direction du Service après son départ du CERGRENE. J'adresse également mes remerciements à Monsieur Jean-Christophe DUGON, pour nos réflexions communes au cours de son stage à Orléans.

Les divers travaux d'enquêtes menés au cours de cette recherche n'auraient pas pu être réalisés sans l'aide irremplaçable et les expertises apportées par un grand nombre de Services Extérieurs de l'Etat. Je tiens à exprimer ma gratitude à ces Services et à leurs agents, pour la disponibilité qu'ils ont su dégager en faveur de mes demandes.

Une partie du travail présenté a pris place dans le cadre du projet EUROflood ("Flood Hazard Assessment, Modelling and Management"), et a bénéficié à ce titre du soutien financier de la Commission des Communautés Européennes (programme E.P.O.C.H). J'adresse toute mon amitié aux collaborateurs du projet, pour le grand intérêt et le plaisir de nos réflexions communes.

Au cours des années, de nombreux contacts scientifiques et techniques m'ont permis de recueillir des informations, d'initier des réflexions, d'explicitier et de confronter mes travaux. Ce sont autant de contributions à cette thèse, pour lesquelles je suis redevable.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre de la Formation Complémentaire Par la Recherche destinée aux Ingénieurs du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, pour le privilège dont j'ai bénéficié dans cette phase d'apprentissage de la recherche et d'approfondissement de mes compétences. Je suis très sensible à la confiance qui m'a été accordée, et aux soutiens qui m'ont été apportés par les personnels de l'ENGREF et par mes supérieurs Messieurs Jean-Pierre TROY, Denis BALLAY et Claude MILLIER. De même, j'exprime ma reconnaissance à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et à sa Direction de la Recherche, qui m'a accueilli en formation doctorale et m'a apporté un soutien logistique précieux, notamment les services de documentation.

Le travail de recherche a été mené au sein du CERGRENE, Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement, qui est un laboratoire commun à l'ENPC et à l'ENGREF. Nombreux sont ceux qui ont apporté un soutien technique et scientifique direct à mon travail, par des conseils, des avis, des aides... Il me serait impossible de les citer tous sans oubli, et je me permettrai de distinguer Luiz KAUARK-LEITE et Claude MICHEL (lors de sa mise à disposition par le CEMAGREF) pour le contenu scientifique de ma thèse, Jean-Philippe CHANCELIER, Jean-Marie MOUCHEL et Bruno TASSIN qui ont essayé de remédier à mes faiblesses informatiques, Catherine ALCOUFFE pour la gestion du centre, Catherine BOUGIS, Sandrine CORTELL et Sandrine GABCO pour l'aide de secrétariat. Merci à Laure SIMON d'avoir investi tant d'énergie et d'enthousiasme dans le CERGRENE, pour permettre à ses membres de continuer à donner libre cours à leur passion de la recherche, et à toutes les personnes qui ont pris part à la direction, à l'animation et à la gestion du Centre. De même, j'ai bénéficié souvent d'encouragements et d'attentions de la part des membres du CERGRENE, qui m'ont permis de poursuivre mon travail et de le mener à son terme. A tous je veux exprimer ma très profonde et amicale reconnaissance. Merci à Oscar DE MORAES CORDEIRO-NETTO et Jean-Claude DEUTSCH d'avoir si souvent apaisé mes doutes.

Mes remerciements vont également à ceux qui ont pris le risque de venir travailler sous ma responsabilité: Mesdemoiselles Virginie GUEDON, Isabelle MARGUET, Agnès PICHON, Thérèse PINÇON, Christine THOMAS et Messieurs Jean-Yves BIZOT, Bernard BOURGUE, Patrick BRICARD, Eric BRUCHET, Franck COHEN-SOLAL, Robert DAVIDSON, Jean-Louis PERRU, Nicolas VIGIER, Jan-Okko ZIEGLER. Ils ont enrichi cette recherche de leur enthousiasme et de leur compétence. Il me faut distinguer Isabelle et Jan-Okko pour l'importance du défi relevé, et Christine pour les conditions difficiles de sa contribution.

J'ai eu le privilège de trouver auprès de ma famille et de mes amis affection attentive, soutien constant, patience durable et compréhension. Il me reste à trouver comment les remercier.

RESUME

Parmi les nombreux effets des événements d'inondations fluviales, les atteintes aux personnes, les dégradations de biens et les perturbations d'activités constituent des dommages que les politiques de gestion du risque d'inondation visent à réduire. Ces dommages résultent d'un aléa naturel modifié par action anthropique, des enjeux exposés et des ressources mises en oeuvre face à l'événement.

La première partie de ce mémoire propose un cadre conceptuel pour l'estimation des dommages comme élément d'aide à la décision, notamment dans une perspective économique intégrant le risque et l'incertitude.

La deuxième partie considère l'échelle élémentaire de l'habitat, et se base sur des enquêtes réalisées sur différents sites auprès de ménages sinistrés. Après une analyse de l'occupation des zones inondables, on caractérise les composantes du facteur humain, et en particulier les réponses à l'annonce de crue et à la montée des eaux. Ces réponses et leurs effets sur les dommages sont étudiés par des techniques d'analyses de données, qui intègrent d'autres facteurs significatifs.

La troisième partie du mémoire traite de l'estimation des dommages sur une aire géographique, par des approches de modélisation. A partir d'une analyse conceptuelle de ces modélisations, est défini puis développé un modèle informatisé d'estimation des dommages sur un secteur inondable. Ce modèle local exploite, selon des procédures descriptives explicites, toutes informations et expertises existantes. Il est mis en oeuvre sur 245 secteurs, à partir d'une base de données constituée sur les grandes vallées du bassin de la Loire. Une procédure de simulation permet de quantifier les incertitudes sur les estimations de coûts, en analysant les contributions des différentes sources d'incertitudes. A échelle régionale, on analyse les effets des cohérences spatiales des crues et des sources d'incertitudes.

La quatrième partie conclut sur les méthodes développées et propose des perspectives ultérieures de recherches.

MOTS CLES

COURS EAU

INCERTITUDE

DECISION

INONDATION

DOMMAGE

MODELE SIMULATION

EVALUATION PROJET

RISQUE

ABSTRACT

COST OF DAMAGE DUE TO RIVER FLOODING: ASSESSMENT AND UNCERTAINTY ANALYSIS

Among all effects of river flooding, flood risk policies aim at reducing the inconvenients to people, damage to goods, and disturbance of activities. These damages depend on a natural hazard, possibly modified by human action, as well as on flood-prone capital and on ressources mobilized against flooding effects.

The first part of this dissertation outlines a conceptual framework for damage assessment as a decision making contribution, taking into consideration the economic aspects of risk and uncertainty.

The second part deals with the primary level of individual housing, based on surveys performed with flooded households in various areas. Floodplain occupancy is analyzed and the human factor is considered with regards to flood hazard, stressing on responses to flood warning and water rise. These responses and their impacts on damages are considered through data analysis techniques, using other significant variables.

The third part of the dissertation deals with damage modelling and assessment on a flood-prone area. According to a conceptual framework, a computerized model is defined and developped for flood damage cost assessment on a single sector. This local model uses all available information and expertise, within an explicit description. It is applied to 245 sectors, using a data base generated on large valleys of the Loire River basin. A simulation procedure is developped for analyzing uncertainties on cost assessment, and the contributions of the various uncertainty sources. At regional scale, damage assessment is considered with regards to spatial scale of flood events and of uncertainty sources.

Finally, the fourth part outlines some conclusions on the methods developped and gives further research directions.

KEY WORDS

DAMAGE

DECISION

FLOOD

PROJECT EVALUATION

RISK

SIMULATION MODEL

STREAM

UNCERTAINTY

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME / ABSTRACT

TABLE DES MATIERES

PARTIE A: CONTEXTE ET MOTIVATIONS.....	1
I. LES INONDATIONS FLUVIALES ET LEURS CONSEQUENCES.....	5
I.1. LA PLACE DES INONDATIONS PARMI LES CATASTROPHES	
NATURELLES.....	5
I.1.1. Les inondations dans le monde.....	6
I.1.2. Les inondations en France.....	7
I.2. UNE PROPOSITION DE TERMINOLOGIE ET DES DEFINITIONS.....	9
I.2.1. L'aléa.....	9
I.2.2. Les effets, les impacts, les dommages.....	11
I.2.3. La vulnérabilité.....	13
I.3. LA DEFINITION DU RISQUE D'INONDATION.....	14
II. LE RISQUE D'INONDATION: LA ZONE INONDABLE SYSTEME	
PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE.....	17
II.1. UNE SCHEMATISATION DU SYSTEME.....	17
II.2. LA CONCEPTUALISATION ECONOMIQUE D'UN EVENEMENT	
D'INONDATION.....	19
II.2.1. Les dommages dépendent du cadre décisionnel.....	19
II.2.2. Les techniques d'estimation économique des dommages.....	22
II.3. LA CONCEPTUALISATION ECONOMIQUE DU RISQUE	
D'INONDATION LIE A L'OCCUPATION DE L'ESPACE.....	25
II.3.1. Le risque d'inondation conditionne l'occupation des sols.....	26
II.3.2. L'évaluation hédoniste du risque d'inondation.....	27
II.3.3. Le rôle du temps.....	27
II.3.4. L'occupation des sols en zone inondable est-elle irrationnelle ?.....	28
II.4. LES SOURCES D'INFORMATIONS EN MATIERE	
D'INONDATIONS ET DE ZONES INONDABLES.....	29
II.4.1. Remarques générales.....	29
II.4.2. Contours de zones inondables et limites administratives.....	30
II.4.3. De la difficulté de recueillir de l'information a posteriori sur les	
inondations.....	30

III. LES POLITIQUES DE GESTION DU RISQUE D'INONDATION FLUVIALE ET LEUR EVALUATION.....	33
III.1. LES MODES DE GESTION DU RISQUE D'INONDATION FLUVIALE.....	33
III.1.1. Description et classification.....	33
III.1.2. Pourquoi évaluer les modes de gestion des inondations ?.....	35
III.2. L'AIDE A LA DECISION.....	36
III.2.1. Les méthodes d'aide à la décision.....	36
III.2.2. Choisir une méthode.....	39
III.2.3. Quelques exemples d'évaluations.....	39
III.3. FACE A LA PRISE DE DECISION: LE RISQUE ET L'INCERTITUDE.....	40
III.3.1. Prendre en compte l'incertitude.....	41
III.3.2. Prendre en compte le risque.....	42
 PARTIE B: ANALYSE DES DOMMAGES A ECHELLE ELEMENTAIRE: LE CAS DES DOMMAGES MATERIELS A L'HABITAT.....	 45
 IV. CONNAÎTRE L'OCCUPATION DES ZONES INONDABLES ET LES DOMMAGES A L'HABITAT	 49
IV.1. LES METHODES D'ESTIMATION DES DOMMAGES A PRIORI.....	49
IV.1.1. Les dommages matériels à l'habitat.....	49
IV.1.2. L'estimation des dommages.....	51
IV.2. LES ENQUETES REALISEES	52
IV.2.1. Les sites d'enquêtes.....	52
IV.2.2. La méthode d'enquête.....	56
IV.3. LES DONNEES RECUEILLIES ET LEUR ANALYSE.....	59
IV.3.1. Les contrôles effectués sur les données.....	59
IV.3.2. L'occupation des zones inondables vue au travers des données recueillies.....	60
 V. L'IMPORTANCE DU FACTEUR HUMAIN, SOURCE DE VARIABILITE ET D'INCERTITUDE.....	 65
V.1. QUELQUES RESULTATS SUR LES REPONSES A L'ALERTE DE CRUE ET A LA MONTEE DES EAUX.....	65
V.1.1. L'alerte.....	67
V.1.2. Les réactions et mesures de protection	68
V.1.3. La réduction des dommages par les réponses humaines.....	70
V.2. LES CARACTERISTIQUES DU FACTEUR HUMAIN FACE AU RISQUE D'INONDATIONS.....	73
V.2.1. Les comportements individuels d'occupation des zones inondables et de prévention	73
V.2.2. La perception du risque d'inondation.....	76
V.2.3. Peut-on interpréter les attitudes et prévoir les comportements ?.....	78
V.3. DES PROPOSITIONS POUR DES DEMARCHES D'OBSERVATION ET DE RECUEIL D'INFORMATIONS.....	79

VI. LES REPONSES INDIVIDUELLES A L'ALERTE ET LEUR ACTION SUR LES DOMMAGES: ANALYSE ET MODELISATION	83
VI.1. LES OBJECTIFS ET LE CONTEXTE.....	83
VI.2. UNE ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE DU PROCESSUS "ALERTE - REPONSES - DOMMAGES" ET SON INTERPRETATION.....	84
VI.2.1. Les variables considérées.....	84
VI.2.2. L'analyse factorielle des correspondances multiples.....	87
VI.2.3. L'interprétation des résultats de l'AFCM.....	89
VI.3. UNE TENTATIVE DE QUANTIFICATION DES DOMMAGES EN FONCTION DES PARAMETRES EXPLICATIFS.....	93
VI.3.1. Les hypothèses de travail et la nature de l'analyse effectuée.....	93
VI.3.2. Les commentaires d'ensemble sur les relations $E = f(H)$ établies	95
VI.3.3. Les dommages immobiliers.....	96
VI.3.4. Les dommages mobiliers.....	97
VI.3.5. Les fonctions de dommages à l'habitat individuel.....	103
VI.4. QUELQUES ELEMENTS DE CONCLUSION.....	104

**PARTIE C: MODELISATION ET ESTIMATION DES
COUTS DE DOMMAGES SUR UNE AIRE
GEOGRAPHIQUE: ECHELLES LOCALE ET REGIONALE..... 107**

VII. MODELISER ET ESTIMER LES DOMMAGES A DIFFERENTES ECHELLES GEOGRAPHIQUES.....	111
VII.1. LA PRATIQUE ET LA PROBLEMATIQUE.....	111
VII.1.1. Les objectifs	111
VII.1.2. L'évaluation passe par une modélisation.....	112
VII.2. UNE TYPOLOGIE DES REPRESENTATIONS	113
VII.2.1. Modèle statique ou dynamique.....	113
VII.2.2. Modèle déterministe, conceptuel ou statistique.....	114
VII.2.3. Modèle distribué ou global - échelles d'espace.....	115
VII.2.4. Niveau de décomposition - structure des sous-modèles.....	115
VII.3. L'ETAT DE L'ART.....	116
VII.3.1. Modèles statistiques	116
VII.3.2. Modèles conceptuels globaux.....	116
VII.3.3. Modèles semi-déterministes globaux.....	117
VII.3.4. Modèles semi-déterministes distribués	118
VII.4. LES PRINCIPES DE MODELISATION RETENUS.....	119

VIII. LA STRUCTURE DU MODELE LOCAL D'ESTIMATION DES DOMMAGES	123
VIII.1. LA STRUCTURE GENERALE DU MODELE.....	123
VIII.1.1. La définition des unités géographiques.....	123
VIII.1.2. La décomposition du modèle - structure générale.....	124
VIII.2. LE SOUS-MODELE HYDROLOGIQUE.....	125
VIII.2.1. Le choix des crues de base.....	128
VIII.2.2. L'estimation des relations "période de retour - débit de pointe - cote maximale" T-Q-H.....	128

VIII.3. LE SOUS-MODELE HYDRAULIQUE.....	131
VIII.3.1. La typologie hydraulique des secteurs.....	131
VIII.3.2. Les hypothèses de base.....	132
VIII.3.3. La prise en compte du risque de rupture de digue.....	132
VIII.3.4. L'estimation des surfaces, hauteurs et durées de submersion.....	136
VIII.4. LE SOUS-MODELE D'OCCUPATION DES SOLS.....	137
VIII.4.1. La structure de base.....	137
VIII.4.2. Retour sur le principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols.....	140
VIII.4.3. Les dérogations au principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols.....	143
VIII.5. LE SOUS-MODELE DE DOMMAGES.....	144
VIII.5.1. Le principe des calculs effectués.....	145
VIII.5.2. La nature des coûts estimés.....	148
VIII.6. LES DONNEES D'ENTREE ET LEUR TRAITEMENT.....	149
VIII.6.1. Remarques générales.....	149
VIII.6.2. Les données relatives à un bief.....	149
VIII.6.3. Les données relatives à un secteur.....	150
IX. LE RECUEIL DE DONNEES SUR LES ZONES INONDABLES DU BASSIN DE LA LOIRE ET LA MISE EN OEUVRE DU MODELE LOCAL.....	153
IX.1. L'AIRE D'ETUDE ET LA PROCEDURE DE RECUEIL.....	153
IX.1.1. L'aire d'étude.....	153
IX.1.2. L'organisation et le phasage du travail.....	156
IX.1.3. Le mode de critique des données.....	156
IX.1.4. La critique des données hydrologiques.....	158
IX.2. LA BASE DE DONNEES CONSTITUEE ET LA MISE EN OEUVRE DU MODELE LOCAL.....	159
IX.2.1. La zone géographique couverte.....	159
IX.2.2. La base de données ZONINOND et son environnement.....	165
IX.2.3. La mise en oeuvre du modèle local.....	168
IX.3. LES SOURCES D'ERREURS ET D'INCERTITUDES: CRITIQUE GENERALE DES DONNEES.....	173
IX.3.1. Les données d'identification.....	174
IX.3.2. Les données hydrologiques et hydrauliques.....	174
IX.3.3. Les données d'occupation des sols.....	177
X. L'ANALYSE DES INCERTITUDES DANS LE MODELE LOCAL.....	181
X.1. LA CONFRONTATION D'UN PROTOTYPE DU MODELE LOCAL AVEC LES RESULTATS DE CALCULS DE SIMULATION HYDRAULIQUE.....	181
X.1.1. Les objectifs.....	181
X.1.2. L'aire d'étude et les données de référence.....	182
X.1.3. L'analyse des hypothèses.....	184
X.1.4. Les conclusions en matière d'incertitudes.....	187

X.2. LE MODE D'ANALYSE DES SOURCES D'INCERTITUDES.....	188
X.2.1. L'état de l'art.....	188
X.2.2. Le choix d'une méthode d'analyse.....	190
X.2.3. La caractérisation et la représentation des sources d'incertitudes.....	191
X.2.3.1. Les principes de base.....	191
X.2.3.2. La structure générale de la représentation des sources d'incertitudes.....	192
X.2.3.3. Sources d'incertitudes sur l'hydrologie: relations "période de retour T - débit de pointe Q - cote maximale H".....	193
X.2.3.4. Sources d'incertitudes sur l'hydraulique.....	200
X.2.3.5. Sources d'incertitudes sur l'occupation des sols.....	202
X.2.3.6. Sources d'incertitudes sur les fonctions de coûts élémentaires.....	205
X.2.3.7. Sources d'incertitudes sur les seuils des phénomènes hydrauliques.....	206
X.3. LA SIMULATION DES SOURCES D'INCERTITUDES ET LEUR ANALYSE.....	207
X.3.1. La procédure de simulation et son mode d'exploitation.....	207
X.3.2. L'analyse des résultats d'ensemble.....	209
X.3.2.1. Les résultats globaux.....	209
X.3.2.2. Une analyse typologique.....	211
X.3.2.3. Une analyse qualitative.....	212
X.3.3. Les contributions des différentes sources d'incertitudes.....	213
X.3.3.1. Le mode d'analyse.....	213
X.3.3.2. L'analyse quantitative générale.....	214
X.3.3.3. L'analyse qualitative.....	216
X.3.3.4. La dispersion sur la relation "cote - coût".....	217
X.3.4. Les conclusions pour les incertitudes sur le modèle local.....	218
XI. DU MODELE LOCAL AU BILAN REGIONAL	221
XI.1. LES COHERENCES PARTIELLES A RESPECTER DANS L'AGREGATION REGIONALE DES COUTS DES DOMMAGES	221
XI.1.1. La composition des coûts en regard de l'aléa hydrologique.....	222
XI.1.2. La composition économique des coûts.....	223
XI.1.3. La composition des incertitudes.....	225
XI.2. LA PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION SPATIALE DE L'ALEA HYDROLOGIQUE	226
XI.2.1. Le cas du bassin de la Vienne.....	227
XI.2.2. Le cas de la vallée centrale de la Loire.....	233
XI.3. LA PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION SPATIALE DES SOURCES D'INCERTITUDES.....	235
XI.3.1. Les régions analysées et les enjeux sur les incertitudes	235
XI.3.2. Une tentative d'approche analytique.....	238
XI.3.3. La simulation numérique des incertitudes à l'échelle régionale.....	239
XI.4. QUELLES CONCLUSIONS POUR L'ESTIMATION DES COUTS A ECHELLE REGIONALE.....	247
XI.4.1. La portée des analyses effectuées.....	247
XI.4.2. Les conclusions majeures.....	248
XI.4.3. Peut-on alléger la démarche d'analyse ?.....	250

PARTIE D: CONCLUSION GENERALE.....	251
XII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR LES MODELES D'EVALUATION DES DOMMAGES.....	253
XII.1. LA CONNAISSANCE DES DOMMAGES A ECHELLE ELEMENTAIRE.....	253
XII.1.1. Les résultats obtenus.....	253
XII.1.2. Des questions à approfondir.....	254
XII.2. L'APPLICABILITE ET LA VALIDITE DES MODELISATIONS DEVELOPPEES.....	255
XII.2.1. Le modèle local.....	255
XII.2.2. L'évaluation à échelle régionale.....	257
XII.3. DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE SUR LES MODELES D'ESTIMATION DES DOMMAGES.....	258
XII.3.1. Hétérogénéités, découpage spatial et précision.....	258
XII.3.2. Vers une évaluation régionale complète.....	259
XII.3.3. Apporter une aide à la décision.....	260
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	263

ANNEXES (en volume séparé)

Annexe I.A.	le poids des différentes catégories de coûts
Annexe IV.A.	les questionnaires d'enquêtes auprès des particuliers et des activités
Annexe VI.A.	l'interprétation d'une AFCM
Annexe VI.B.	le calage de relations entre l'endommagement et la hauteur de submersion
Annexe VI.C.	les fonctions de dommages à l'habitat
Annexe VIII.A.	le programme TRTM du sous-modèle hydrologique
Annexe VIII.B.	le risque de rupture de digue
Annexe VIII.C.	la description détaillée du sous-modèle hydraulique
Annexe VIII.D.	les fonctions de coût élémentaires
Annexe VIII.E.	la structure des programmes de calcul pour le modèle local
Annexe VIII.F.	les valeurs par défaut pour les hauteurs de plancher
Annexe IX.A.	les questionnaires utilisés pour le recueil des données sur les zones inondables
Annexe IX.B.	la critique hydrologique effectuée sur les données des stations hydrométriques
Annexe IX.C.	les biefs et secteurs dans la base de données ZONINOND

Annexe IX.D.	l'état d'avancement du recueil et de la critique des données sur les zones inondables
Annexe IX.E.	les résultats du modèle par bief
Annexe X.A.	la structure du programme de simulation des sources d'incertitudes sur le modèle local
Annexe X.B.	la distribution des estimations de coûts sur un secteur
Annexe X.C.	les caractéristiques statistiques des incertitudes sur les secteurs
Annexe X.D.	l'analyse typologique des incertitudes
Annexe XI.A.	l'analyse de l'aléa hydrologique régional sur le bassin de la Vienne
Annexe XI.B.	l'analyse de l'aléa hydrologique régional sur la Loire centrale
Annexe XI.C.	l'analyse des incertitudes à échelle régionale
Annexe XI.D.	les secteurs prépondérants pour les dommages sur la Loire centrale

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. calcul simplifié du coût moyen annuel, dans le cas où les dommages ne dépendent que d'un seul paramètre d'intensité de crue (d'après Davis, 1988).....	16
Figure II.1. schématisation du système de crue (tiré de El-Jabi, 1980).....	18
Figure II.2. schématisation des interactions entre inondations et société.....	20
Figure IV.1. localisation géographique des 8 sites d'enquêtes.....	53
Figure IV.2. paramètres caractérisant les crues sur les huit sites d'enquêtes - période de retour de la crue de référence et temps de montée (délai entre le dépassement du seuil de crue et le maximum de crue).....	55
Figure IV.3. paramètres caractérisant les submersions sur les huit sites d'enquêtes - durée moyenne de submersion des parcelles bâties et hauteur moyenne de submersion par rapport au pied des bâtiments.....	56
Figure VI.1. représentation des axes principaux obtenus dans les analyses factorielles des correspondances multiples.....	89
Figure VI.2. fonctions d'endommagement calées pour l'immobilier et le mobilier.....	99
Figure VI.3. fonctions de dommage total pour l'habitat individuel (maison de valeur moyenne).....	106
Figure VII.1. les processus en jeu dans la formation des dommages dus aux inondations.....	114
Figure VIII.1. le découpage géographique en biefs et secteurs inondables.....	125
Figure VIII.2. la structure d'ensemble du modèle local.....	126
Figure VIII.3. la structure du sous-modèle hydrologique.....	128
Figure VIII.4. la structure du sous-modèle hydraulique.....	132
Figure VIII.4b. la discrétisation d'un secteur inondable par rapport aux crues de base	134
Figure VIII.5. la structure du sous-modèle d'occupation des sols.....	138
Figure VIII.6. la structure du sous-modèle de dommages.....	146
Figure VIII.6b. estimation du coût moyen annuel des dommages.....	148

Figure IX.1.	aire d'étude retenue pour le recueil.....	155
Figure IX.2.	exemples de résultats des interpolations et extrapolations de paramètres hydrologiques	159
Figure IX.3.	la zone géographique couverte par les données recueillies.....	166
Figure IX.4.	les biefs inondables pour lesquels les données recueillies sont exploitables par le modèle local (à l'échelle de chaque secteur).....	167
Figure IX.5.	organigramme de la structure informatique mise en place.....	169
Figure IX.6.	relations entre fréquence de dépassement de la crue et coût des dommages sur des biefs inondables.....	171
Figure X.1.	simulation des incertitudes sur le modèle local - structure générale	194
Figure X.2.	simulation des incertitudes sur le modèle local - sous-modèle de dommages	195
Figure XI.1.	les régions étudiées pour la prise en compte de l'aléa hydrologique.....	228
Figure XI.2.	les régions étudiées pour la prise en compte de la dimension spatiale des incertitudes.....	236
Figure XI.3.	la procédure de simulation des incertitudes régionales.....	241
Figure XI.4.	histogrammes des estimations du coût centennal (C100) et du coût moyen annuel (CMA) sur la Loire centrale (50000 simulations, coûts exprimés en millions de Francs au troisième trimestre 1991)	242
Figure XI.5.	relations fréquence - coût sur trois régions (coût moyen par rapport aux incertitudes et intervalle de confiance centré à 70%, 50000 simulations, coûts exprimés en millions de Francs au troisième trimestre 1991).....	244

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1. valeurs immobilières au mètre carré de surface hors-oeuvre pour l'habitat individuel (en Francs, valeur courante août 1988).....	61
Tableau IV.2. valeurs du mobilier présent dans les logements enquêtés (en milliers de Francs, valeur courante août 1988).....	62
Tableau IV.3. catégories socio-professionnelles des chefs de famille, pour les logements enquêtés (classification I.N.S.E.E).....	63
Tableau IV.4. taux de chefs de famille retraités (ou retirés des affaires).....	64
Tableau V.1. mode d'alerte des particuliers (pourcentages de foyers suivant les modes d'alerte).....	68
Tableau V.2. mesures immédiates de protection (pourcentages de logements où ces mesures ont été prises).....	70
Tableau V.3. réductions des dommages en fonction du délai d et de la hauteur de submersion h (Penning-Rowsell, 1991).....	71
Tableau V.4. la réduction des dommages par l'annonce de crues à Boulder, en fonction du délai d et de la période de retour de la crue T (cité par Handmer et Ord, 1986).....	71
Tableau V.5. la réduction des coûts des dommages par les réponses individuelles à l'annonce de crue et à la montée des eaux.....	72
Tableau V.6. la prise en compte du risque dans la conception des bâtiments (en pourcentage des bâtiments enquêtés).....	74
Tableau VI.1. variables considérées pour l'analyse du processus "alerte - réponses - dommages"	85
Tableau VIII.1. les types d'occupation des sols pris en compte par le modèle local	138
Tableau VIII.2. simulation de coûts de dommages en fonction de la localisation des biens vulnérables au-dessus d'un seuil de crue (crues exprimées en période de retour)	142
Tableau X.1. statistiques arithmétiques sur les indicateurs de coût (500 simulations sur 112 secteurs inondables).....	210
Tableau X.2. statistiques géométriques sur les indicateurs de coût (500 simulations sur 112 secteurs inondables).....	211

Tableau X.3.	dispersions sur les coûts estimés pour une crue de cote donnée (500 simulations sur 112 secteurs inondables)	217
Tableau XI.1.	caractéristiques des coûts régionaux dus aux inondations (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	229
Tableau XI.2.	quantiles de coût régional (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	229
Tableau XI.3.	caractéristiques statistiques des coûts sur les cours d'eau supposés homogènes (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	230
Tableau XI.4.	estimation des paramètres de lois Pearson type 3 avec les écart-types asymptotiques d'estimation (Bobée, 1976).....	231
Tableau XI.5.	débits de pointe de crue à proximité des confluent sur la Vienne (en mètres cubes par seconde).....	232
Tableau XI.6.	caractéristiques statistiques des coûts régionaux simulés sur la Loire centrale (simulation de 4000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	234
Tableau XI.7.	quantiles empiriques de coût régional sur la Loire centrale (simulation de 4000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	235
Tableau XI.8.	coûts des dommages et premières hypothèses d'incertitudes à l'échelle régionale (coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)	238
Tableau XI.9.	résultats des 50 000 simulations d'incertitudes régionales (coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991).....	243

partie A

CONTEXTE ET MOTIVATIONS

En submergeant des terres, les événements d'inondations conduisent à des effets très divers sur le milieu naturel, comme sur les sociétés humaines. Ainsi, les submersions jouent des rôles évidents, parfois irremplaçables, par rapport aux processus biologiques ou par rapport à des composantes du cycle de l'eau: écologie d'espèces animales ou végétales, recharge de nappes alluviales... A l'inverse, les inondations peuvent frapper des populations et détruire des investissements, à une échelle importante dans certains pays, et avec des retombées sur le développement social et économique.

Le travail de recherche présenté ici porte plus spécifiquement sur l'évaluation a priori des dommages dus aux inondations fluviales, en considérant d'une part l'échelle élémentaire du logement et du ménage qui l'occupe (partie B du mémoire), d'autre part les échelles plus grandes, de la partie de vallée à la région (partie C du mémoire). La présente partie a pour ambition de proposer un cadre conceptuel large et cohérent, qui nous a paru nécessaire à la suite de notre travail, même si cette suite ne concerne qu'une partie du cadre. En effet, nous nous sommes concentrés sur les problématiques les plus couramment abordées, en cherchant à en approfondir les limites et les difficultés.

Pour qu'une inondation fluviale conduise à des dommages, et soit a fortiori considérée comme une catastrophe (le terme cataclysme est moins usité, alors que le mot grec κατακλισμος signifie "inondation", et son étymologie "bouleversement de la surface du globe"; DRM et STU, 1990), il faut nécessairement un phénomène naturel intense de précipitations atmosphériques (ou de fonte des neiges) et d'écoulement, aggravé ou tempéré par l'action humaine. Mais il faut également des personnes, biens ou activités qui soient exposés à l'action de l'eau. Cette évidence conditionne toute démarche d'évaluation. En effet, l'intérêt et la difficulté méthodologiques d'une telle question résident dans les caractéristiques suivantes:

- on considère des événements (heureusement) relativement rares et aléatoires, difficiles à observer;
- les comportements humains qui influencent les dommages (occupation de l'espace, prévention, protection...) sont très variables et diversement connus.

L'évaluation se trouve par conséquent confrontée à la fois à l'aléa, et donc au risque, et à l'incertitude sur les conséquences des inondations. Nous approfondirons ces concepts dans le chapitre I, après une première entrée en matière et description des enjeux des inondations.

Dans le chapitre suivant, est abordée l'interaction entre société et inondations fluviales. On se place notamment dans un cadre économique, permettant de caractériser les dommages dans une dimension économique considérée sous des angles différents. On confronte à ces conceptualisations la nature des informations existant en matière d'inondations et de zones inondables.

Le troisième chapitre porte sur les politiques de gestion du risque d'inondation fluviale et leur évaluation. En effet, les évaluations de dommages sont dépendantes de cadres décisionnels particuliers, explicites ou implicites: identification des enjeux majeurs préalablement à une décision, évaluation de projets de protection, simulation de fonds financiers d'indemnisation... Si les méthodologies présentées dans les parties B et C de ce mémoire sont indépendantes d'une question particulière, elles ne peuvent être mises en oeuvre que dans un contexte décisionnel particulier. Citons Kirby (1991): *Research on hazards and disasters is unusual because it is so explicitly policy oriented.*

Cette orientation spécifique de la recherche sur les risques naturels est également attestée par l'actualité. Si le présent travail a débuté pendant la Décennie Internationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement, il s'est poursuivi et apporte ses conclusions au cours de la Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles (résolution 44/236 de l'Assemblée Générale des Nations Unies). L'objectif en est de *réduire, par une action internationale concertée, en particulier dans les pays en développement, les pertes en vie humaines, les dégâts matériels et les perturbations sociales et économiques que causent les catastrophes naturelles telles que ... les inondations ...* L'un des buts fixés est de *mettre au point des mesures pour évaluer, prévoir, prévenir les catastrophes naturelles et en atténuer les effets.* Le Directeur du Secrétariat de la Décennie souligne la nécessité d'une évaluation consistante des politiques de prévention et des investissements que cela représente (Merani, 1991).

I. LES INONDATIONS FLUVIALES ET LEURS CONSEQUENCES

Nous définirons l'inondation comme la présence temporaire de l'eau sur des surfaces non habituellement submergées, en ne considérant que les phénomènes constituant des risques naturels: *a natural hazard is a rare natural event whose occurrence in an environment created by men used to coping with more frequent events will most probably cause a disaster due to its character of being a rare event* (Siccardi, 1992). On s'intéresse à des événements limités dans le temps, dont l'intensité et/ou l'occurrence ne sont pas prévisibles avant leur déclenchement (à notre niveau de connaissances), et constituent un phénomène aléatoire rare.

Si l'on fait abstraction des ruptures de barrages-réservoirs (ou du moins des ruptures non provoquées par une crue rare à l'amont), l'eau qui submerge provient soit de la mer, lorsque l'on considère des tempêtes côtières, soit de précipitations qui se traduisent par un ou plusieurs des phénomènes suivants:

- stagnation de l'eau en surface (sols imperméables, défaut ou défaillance d'évacuation...);
- ruissellement de surface;
- alimentation de réseaux d'assainissement dont la capacité de transfert et/ou de stockage est dépassée à l'aval;
- alimentation de nappes souterraines dont le niveau monte jusqu'à dépasser l'altitude du terrain naturel;
- alimentation de cours d'eau, dont le débit augmente au point que l'eau sort du lit mineur, c'est-à-dire du *chenal de passage des débits quotidiens* (El-Jabi, 1980).

C'est cette dernière catégorie d'inondations, celle des inondations fluviales, qui nous intéresse ici. Soulignons qu'aucune classification des inondations ne saurait être parfaite. Ainsi, la submersion d'une parcelle peut résulter conjointement d'une crue fluviale et d'une remontée de nappe, ou d'un ruissellement de surface. Par ailleurs, tout le processus physique qui conduit l'eau précipitée à l'eau submergeant une parcelle est plus ou moins marqué par l'action humaine: aménagement et occupation du bassin versant, modifications du cours d'eau...

Nous allons ici présenter quelques enjeux des inondations dans le monde et en France, avant de proposer un cadre conceptuel pour les phénomènes qui nous intéressent.

I.1. LA PLACE DES INONDATIONS PARMIS LES CATASTROPHES NATURELLES

Lorsque l'on traite des inondations, comment résister à la tentation de "remonter au déluge". A travers un grand nombre de civilisations antiques des différents continents, on retrouve plus de 400 mythes, récits ou légendes traitant d'un déluge qui aurait submergé tout ou partie du monde connu (Bonnin, 1984; 1990). Mentionnons une exception notoire, l'Egypte, dont la vie était rythmée par les crues bénéfiques du Nil. Provoqués par intervention divine comme punition ou vengeance (à Babylone, les hommes étaient trop bruyants pour les "oreilles" du dieu Enlil), ces déluges sont caractérisés par nombre d'éléments symboliques, comme la durée de la pluie. Pour plusieurs de ces événements au moins, il a été possible de retrouver trace d'inondations réelles très importantes, qui soient en concordance (Clark et al, 1983). Pour clore cette rapide évocation, mentionnons le mythe de déluge "utilitariste" chez les Indiens Quichés. Les hommes avaient été créés en argile, et singulièrement bâclés puisqu'ils ne pouvaient pas tourner la tête. Le déluge a permis "d'effacer l'erreur" pour tout recommencer (DRM et STU, 1990). Venons-en, à présent, à l'évocation d'événements plus récents, dans le monde et en France.

I.1.1. Les inondations dans le monde

Des événements spectaculaires

La Chine possède le triste privilège d'être citée en priorité, lorsque l'on énumère des inondations catastrophiques. Ainsi, en l'an 168 avant notre ère, le Houang-Ho inondait un million d'hectares et détruisait 40.000 habitations (Bonnin, 1990). Ce fleuve a connu 1.500 inondations en 3.500 ans, modifiant 26 fois son cours et son embouchure (Clark et al, 1983). En 1887, ce sont 2,6 millions d'hectares inondés, avec plus de 900.000 victimes (2 millions au moins avec les famines et épidémies; Dacharry, 1990). Le Yang-Tsé n'est pas en reste, avec une zone inondable de 18 millions d'hectares accueillant 250 millions d'habitants (Clark et al, 1983; la crue de 1911 a fait 100.000 victimes). Entre une rupture de barrage en 1642 et 1978, on dénombre en Chine huit inondations particulièrement catastrophiques (DRM et STU, 1990; Theys, 1988), avec 40 millions de victimes pour les seules années 1851 à 1866.

D'autres pays d'Asie ne sont pas en reste:

- l'Inde (la crue de l'Indus de 1973 a coûté 250 millions de dollars US; Dacharry, 1990; 2.000 et 6.000 victimes en 1961 et 1970; DRM et STU, 1990; Viau, 1985);
- l'Iran (2.000 victimes en 1954; DRM et STU, 1990);
- le Japon (1.900 victimes en 1947; DRM et STU, 1990);
- et bien sûr le Bangladesh; l'inondation de 1987 a couvert 39% du pays (1.800 victimes, 6.500 km de routes et 7.000 écoles détruites...), celle de 1988 60% (1.600 victimes, 3,7 millions de maisons, 10.000 km de routes et 19.000 écoles détruites...; Asia Region Technical Department, 1990).

D'autres continents aussi connaissent des inondations dont les bilans se chiffrent en milliers de victimes (Clark et al, 1983; Viau, 1985; Rosen et Reuss, 1988; DRM et STU, 1990): le Honduras (10.000 victimes en 1974), le Brésil (2.000 en 1967 et en 1974), les Etats-Unis (2.000 en 1889; 6,6 millions d'hectares inondés par le Mississippi en 1926-27, avec 41.000 bâtiments détruits et 600.000 sinistrés), le Guatemala (40.000 victimes en 1949). Par opposition, l'Europe de l'Ouest a connu de 1977 à 1984, 175 victimes en 9 événements d'inondations. Selon Clark et al (1983) et Smith (1989), les victimes des inondations se comptent en centaines de milliers depuis la seconde guerre mondiale. Khan (1987) a ainsi dénombré 133 événements ayant fait des victimes, de 1977 à 1984.

Les chiffres financiers des pertes sont beaucoup plus difficiles à établir. La crue de l'Arno, en 1966, a inondé et endommagé à Florence un patrimoine artistique et culturel inestimable, dont la remise en état partielle se compte en années de travail (10 ans, pour une peinture sur bois de la Pré-Renaissance, le Crucifix de Cimabue, dont on a récupéré des fragments dans la boue). Sur un million d'ouvrages anciens endommagés, environ la moitié a pu être restaurée (Clark et al, 1983). Le chiffre de 1,3 milliards de dollars US cité (DRM et STU, 1990) peut-il tenir compte de tout cela ?

Malgré les difficultés d'estimations, on peut trouver mention de deux autres événements dépassant le coût du milliard de dollars US (Mississippi en 1844 et Kansas River en 1951; DRM et STU, 1990). L'OCDE (1991) cite 6 événements d'inondations, dans ses pays membres, dont le coût a dépassé 200 millions de dollars US.

Des degrés d'exposition très variables

La proportion des territoires nationaux exposés aux inondations est très variable, tel que cela apparaît pour les Etats pour lesquels nous avons trouvé des données:

- 22% en moyenne annuelle au Bangladesh, 60% pour une inondation de période de retour 100 ans (c'est-à-dire d'un niveau atteint ou dépassé en moyenne une fois en 100 ans), 70% pour 500 ans (Asia Region Technical Department, 1990) et jusqu'à 85% (Roche, 1989-a);

- plus de 23% en Hongrie (Hubert, 1984; Roche, 1989-a; Toth, 1992-a) avec plus d'un tiers des terres arables, 32% des voies ferrées, 2.000 sites industriels et 2,5 millions d'habitants;
- 15% en Roumanie (Balteanu, 1993);
- 10% au Japon (Seki, 1990), avec 50% de la population et 70% des immobilisations; les dommages peuvent atteindre 10% de la production intérieure brute (Viau, 1985);
- 7% aux Etats-Unis d'Amérique (White et Haas, 1975), avec plus de 13.000 agglomérations (Viau, 1985);
- 2% en Slovénie pour des crues décennales (d'un niveau atteint ou dépassé en moyenne une fois en 10 ans; Brilly et Smith, 1992); les zones inondables produisent 30% du produit national brut;
- 300 collectivités, 10.000 bâtiments et 2% de la population pour les crues décennales en Australie (Smith et Handmer, 1986).

Au-delà de ces chiffres particuliers, on observe une disparité entre pays industrialisés et pays en développement: les premiers concentrent la majeure partie des coûts financiers de dommages, les seconds la majeure partie des victimes. Khan (1987) chiffre à 360 millions de dollars US les coûts des dommages pour une inondation du Bangladesh aux deux tiers de sa surface, alors que des événements localisés en Amérique du Nord ou en Europe peuvent dépasser ces coûts.

Si globalement les pertes en vies régressent avec le temps, notamment grâce aux progrès de la prévision et de l'annonce de crue, les dommages matériels et les pertes d'exploitation s'accroissent dans toutes les régions du monde, en particulier du fait de la pression de l'urbanisation qui est la plus sensible dans les pays les moins industrialisés. Mitchell (1990) a identifié les villes de plus d'un million d'habitants qui ont été touchées par une inondation grave de 1946 à 1988: Rio, Recife, Mexico City, Madras, Jakarta, Bandung, Séoul, Buenos Aires, Karachi, Lima, Lisbonne.

On ne peut pas raisonner seulement en valeur absolue. En effet, si on les exprime en proportion du produit national brut, les pertes dues aux risques naturels (en général) sont vingt fois plus fortes dans les pays en développement que dans les pays industrialisés (Anderson, 1990; Kreimer et Munasinghe, 1991). De surcroît, ces pertes ont un effet synergique avec la pauvreté: leur poids décourage l'investissement, et les catastrophes pèsent plus lourdement encore sur les économies parallèles. Anderson (1990) analyse le facteur de "fragilité" que constitue la pauvreté face aux risques naturels.

Les inondations par rapport aux autres risques naturels

Chaque année en moyenne, les crues en Asie endommagent ou détruisent quatre millions d'hectares et menacent l'existence ou le bien-être de 17 millions de personnes (Smith, 1989). Les zones inondables nourrissent un tiers de la population mondiale (Clark et al, 1983). Ces éléments illustrent le poids des inondations par rapport aux différentes catastrophes, dont elles représentent 40% des événements graves (Burton et al, 1978). Selon les Nations Unies (ONU, 1979), les inondations ont causé la mort de 1,3 million de personnes sur 4,6 entre 1900 et 1976, et ont fait 175 millions de sinistrés sur les 233 imputables aux catastrophes naturelles de toutes sortes.

I.1.2. Les inondations en France

La France métropolitaine n'est certes pas exposée à des catastrophes de l'ampleur de celles qui ont été mentionnées plus haut. Son climat tempéré et ses caractéristiques géographiques la laissent à l'abri des cyclones, ou de phénomènes d'inondations qui dureraient plusieurs mois. Il n'en demeure pas moins que la multiplicité des influences climatiques et des configurations hydrographiques conduit à des inondations de types contrastés: des crues cévennoles de l'automne dans le Sud-Est, liées à des précipitations très intenses (plusieurs centaines de millimètres en quelques heures, avec des ruissellements intenses, des écoulements torrentiels...), aux crues lentes des fleuves de la grande

moitié Nord, dues à de longues successions de fronts océaniques hivernaux. Les crues fluviales peuvent également être générées en tout ou en partie par la fonte des neiges.

On peut considérer que les inondations côtières ont un poids au mieux secondaire, à l'échelle du territoire métropolitain (ce risque pouvant être intense localement). Par contre, les inondations pluviales (ruissellement de surface et/ou défaut d'évacuation) correspondent aux événements d'inondations les plus nombreux, quoique de faible amplitude spatiale. Rappelons que nous n'évoquons ici que la situation du territoire métropolitain, situé géographiquement en Europe. Les phénomènes d'inondations qui touchent les Départements et Territoires d'Outre-Mer ne peuvent être décrits en des termes comparables, notamment sur le plan climatique. Leurs effets sont loin d'être négligeables.

Des événements marquants

Barrier (1990) mentionne une inondation qui, en l'an 800 avant notre ère, a totalement submergé le site d'Argentoratum, future Strasbourg. Les lièvres avaient dû perdre la mémoire de ce risque, puisqu'en 1570 ils ont été obligés de se réfugier en grand nombre dans les arbres. Sinon, les plus anciennes inondations dont on ait retrouvé mention directe sont les 8 grandes inondations de la Garonne, entre 580 et 592. La Garonne et le Tarn ont donné lieu à de nombreuses inondations graves: 500 victimes en 1875 (1.400 maisons ruinées à proximité de Toulouse; Geneslay, 1971; Barrier, 1990), 171 en 1930 à Toulouse et 200 à Montauban (3.000 maisons détruites et 500 usines arrêtées; Caude, 1988-b). De nombreux cours d'eau ont débordé cette année-là dans le Sud-Ouest de la France. Cela a de nouveau été le cas en 1977.

Si 1955 a également connu des inondations de la Garonne, cette année-là a surtout marqué le tiers Nord-Est du pays: la Seine et la Marne (après les célèbres inondations de 1910), la Saône, le Rhône (Geneslay, 1971). De même, 1983 a vu des inondations sur 2406 communes de 33 départements, après les crues de 1981 et 1982, sur les bassins de la Saône, de la Moselle, de la Marne, de la Seine, et sur les affluents rive droite de la Loire (2 à 3 milliards de francs de dommages recensés, 29 morts et disparus; DRM et STU, 1990).

Le bassin de la Loire a connu lui aussi de nombreuses inondations (Dion, 1934; Geneslay, 1971). Geneslay fait mention d'inondations à Tours en 52 avant notre ère, de 9 forts événements de crues aux V^{ème} et VI^{ème} siècles, 5 au XIV^{ème}, 12 au XV^{ème}, 14 au XVI^{ème} (dont 6 inondations), 15 au XVII^{ème}, 20 au XVIII^{ème} (13 inondations), 8 au XIX^{ème}. Au siècle dernier, la Loire a connu trois très fortes crues, en 1846, 1856 et 1866. La première a détruit la gare d'Amboise moins de sept mois après le passage du premier train. Les deux suivantes ont conduit à plus de 100 ruptures de digues et inondé des dizaines de milliers d'hectares. Depuis, seule la crue de 1907 a dépassé le niveau décennal, à l'aval du confluent de l'Allier. Mais la crue de 1980 sur la Loire amont a causé des dégâts et pertes importantes, ainsi que celles de 1982 sur la Charente et sur le bassin de la Vienne.

Les années récentes ont été marquées par des phénomènes plus brutaux et plus localisés:

- la crue torrentielle du Grand-Bornand, en juillet 1987, dans les Alpes;
- la crue de l'Orb en décembre 1987;
- les précipitations très intenses sur Nîmes, en octobre 1988 (1,9 milliards de francs d'indemnisations pour les biens privés, 2,1 de dommages pour les biens publics; Bidan, 1993);
- les tempêtes de pluies de février 1990 sur l'Ouest de la France, en Alsace, en Franche-Comté... (1,2 milliard d'indemnisations);
- les orages de septembre 1992 sur le Sud-Est, puis sur le Sud-Ouest (on a beaucoup retenu le cas de Vaison-la-Romaine, qui concentre 1,2 milliard d'indemnisations sur un total estimé de 1,6; Bidan, communication personnelle).

Sur les 1866 inondations déclarées catastrophes naturelles (au sens de la loi du 13 juillet 1982, et sur 2397 événements de toutes natures), la plupart concernent des inondations localisées dues au ruissellement direct de l'eau (Bidan, 1993).

Les enjeux

Un premier repérage des zones inondables (par l'effet des crues fluviales) a été établi par le BCEOM (1969), sous la forme d'un Atlas. Un linéaire de 16.000 kilomètres de cours d'eau "débordants" menace 2,2 millions d'hectares, soit 4% du territoire métropolitain (Siméon, 1981), et 2% de la population (Caude, 1988-b); 4% de cette surface sont urbanisés (Roche, 1989-a). Dans les années 1970, le coût moyen annuel des dommages a été estimé à environ 2 milliards de francs (dommages matériels, pertes d'exploitation...; BCEOM, 1977; Siméon, 1981).

Il est difficile de cerner ces coûts, qui doivent prendre en compte des phénomènes multiples. Ainsi, Bamberger (1987) a estimé qu'en moyenne annuelle, la fermeture des voies sur berges à Paris lors des crues de la Seine accroissait les temps de trajets de 1,3 million d'heures et les distances parcourues de 1,1 million de kilomètres.

Pour finir, mentionnons les recensements des communes exposées aux risques naturels sur tout ou partie de leur territoire (DRM, 1992). Sur 10.000 communes identifiées en 1982, 7.500 sont exposées aux inondations (sur un nombre total d'environ 36.400). En 1989, 9.400 sur 15.000. Parmi ces communes figurent 300 agglomérations importantes (Caude, 1988-b).

I.2. UNE PROPOSITION DE TERMINOLOGIE ET DES DEFINITIONS

On s'est appuyé jusqu'ici sur le vocabulaire usuel pour évoquer les inondations et leurs conséquences. Mais ce vocabulaire est fatalement imprécis, comme le sont les notions qu'il décrit (à commencer par "risque"). C'est pourquoi nous proposons de définir à la fois des concepts précis et une terminologie correspondante non ambiguë. Ces définitions ne sauraient en aucun cas être considérées comme absolues en-dehors de l'exposé de notre travail.

I.2.1. L'aléa

Lorsque l'on considère une parcelle inondée (ou un groupe de parcelles inondées), l'aléa correspond à tout ce qui caractérise la submersion, indépendamment du mode d'occupation des sols. L'aléa est l'élément "perturbateur" conditionné par l'extérieur, susceptible de provoquer des modifications aux sols, à l'écosystème, aux personnes, aux biens, aux activités. L'aléa ne conditionne pas seul l'étendue des conséquences: on abordera plus loin la vulnérabilité et ses déterminants (biens exposés, réactions humaines face au danger...).

Comme on pourra le constater en détaillant les paramètres caractéristiques de l'aléa, ce dernier est lié à la fois à des phénomènes naturels (la pluie, le ruissellement, la formation de la crue...) et à des actions humaines: les actions conscientes ou non sur le cycle hydrologique, la gestion d'ouvrages hydrauliques, toute modification de la morphologie des lits mineurs et majeurs du cours d'eau, les modifications des processus d'érosion, les stockages de matières polluantes ou d'objets pouvant être emportés par l'eau... Notre proposition de ne pas faire une distinction nette entre causes naturelles et causes humaines peut paraître paradoxale en regard des classifications usuelles appliquées dans les problématiques d'environnement. Il nous semble toutefois, au moins dans le cas des inondations, que cette distinction est caduque pour plusieurs raisons:

- à l'échelle de la parcelle inondée (ou du groupe de parcelles), on ne peut maîtriser aucune de ces causes naturelles ou humaines; a contrario, l'action humaine influence ou peut influencer l'ensemble des processus conduisant à l'inondation (c'est même le cas pour les précipitations, au travers du changement climatique);
- les effets des actions humaines sur les processus physiques du cycle de l'eau sont parfois extrêmement difficiles à quantifier.

On propose de caractériser l'aléa par les paramètres suivants, en se référant notamment à Parker et Penning-Rowse (1972), El-Jabi et al (1982), Handmer (1986), Green et al (1993), Penning-Rowse (dans EUROFLOOD, 1993):

- date calendaire (saisons...) et horaire du début d'inondation (l'horaire dans le cas des événements rapides);
- vitesse de montée de l'eau;
- hauteur maximale de submersion par rapport à la surface du sol;
- durée maximale de submersion;
- relation "hauteur de l'eau - durée" en surface, ainsi que pour la saturation des sols, en relation éventuelle avec les nappes alluviales;
- vitesse du courant; turbulence de l'écoulement;
- action du vent sur la surface de l'eau (vagues);
- charges en sédiments avec leurs caractéristiques (nature physique, granulométrie...);
- "pollution" de l'eau (produits toxiques, ou laissant des dépôts);
- matériaux grossiers et objets transportés par le courant (y compris glace, rochers en cas de lave torrentielle...).

L'occurrence de l'inondation et l'intensité de ses différents paramètres sont des phénomènes aléatoires, conditionnés par le déclenchement de pluies dépassant des seuils donnés pour une ou plusieurs des caractéristiques suivantes: intensité moyenne, durée, intensité maximale, volume précipité (en fonction des conditions d'évaporation, d'évapotranspiration et d'infiltration). Selon les cas, il existe des relations liant plus ou moins différents paramètres de l'aléa: vitesse de courant et matériaux transportés, vitesse de montée de l'eau et durée de submersion...

Mais ces relations ne sont le plus souvent que partielles: il en va ainsi de la hauteur maximale de submersion (qui dépend en première approche du débit maximal) et de la durée maximale (qui dépend en première approche de la forme de l'hydrogramme de crue, liant le temps et le débit). Pour un même débit maximal sur un cours d'eau donné, les formes d'hydrogrammes de crues peuvent varier très sensiblement.

Il en résulte que toute analyse statistique de l'aléa devrait prendre en compte avec leurs degrés de cohérence tous les paramètres (du moins ceux qui varient sensiblement et qui ne sont pas liés étroitement à un autre paramètre). Dans la pratique, on considère presque toujours (implicitement ou explicitement) que les paramètres sont constants, négligeables dans leurs effets, ou liés strictement à la cote maximale ou au débit maximal. Parfois, la forme de l'hydrogramme est prise en compte pour le paramètre de durée (voir Macgilchrist, 1985). Les travaux d'hydrologie statistique, répondant à ces questions, sont très nombreux. Dans la littérature francophone récente, on renverra notamment le lecteur aux ouvrages ou articles de El-Jabi et al (1982), Miquel (1984), Cunnane (1989), Rousselle et al (1990), CEMAGREF (1991) (voir aussi Klemes, 1989).

Une exception à la prise en compte unique de l'intensité maximale de crue (cote ou débit) correspond à la démarche "inondabilité", développée au CEMAGREF sous la direction de G Oberlin, pour définir et cartographier une "norme" d'exposition aux inondations. Après une prise en compte unique de la durée de submersion a été développée une procédure permettant de prendre en compte également la hauteur de submersion et la vitesse de courant (Gautier, 1991; CEMAGREF, 1992).

Pour clore cette définition de l'aléa, il nous faut revenir sur la question de l'échelle spatiale. On s'est placé explicitement à l'échelle d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles. Si l'on devait définir l'aléa sur une partie de vallée, on pourrait décomposer la zone inondable en parcelles et revenir à la caractérisation présentée ci-dessus. On considérerait ainsi une grande "collection" de paramètres, entre lesquels existent de très fortes dépendances (charge de l'eau en sédiments pour deux parcelles voisines...). De surcroît, les paramètres "locaux" d'aléa dépendent de l'occupation des parcelles

voisines (conditions d'écoulement, matières polluantes stockées). L'aléa peut alors être défini par les conditions d'écoulement et de submersion aux limites de la zone considérée (hydrogramme d'entrée, teneurs de l'eau...).

Ce raisonnement peut être étendu à des unités géographiques plus grandes. La différence qualitative susceptible d'intervenir concerne l'événement hydrologique de crue, lorsque celui-ci dépend d'épisodes pluvieux partiellement ou peu corrélés sur le plan spatial: bassins versants d'affluents différents, ou parties amont et aval d'un même bassin. On reviendra sur cette question au chapitre XI.

I.2.2. Les effets, les impacts, les dommages

Définir et qualifier les conséquences d'une inondation

Définir et analyser les effets d'une inondation particulière revient à comparer les systèmes géomorphologique et pédologique, hydrologique, écologique, humain, social, technique, économique et leurs évolutions selon deux hypothèses:

- l'événement d'inondation s'est produit;
- l'événement ne s'est pas produit, toutes choses égales par ailleurs.

Cette assertion paraîtra bien banale, mais elle est la plus précise, la plus complète et la plus juste. Elle permet de prendre en compte différents phénomènes:

- les conséquences des inondations ont des natures multiples;
- les inondations peuvent avoir des conséquences positives selon différents points de vue (pour un écosystème, ou pour le commerce à l'extérieur de la zone inondée...);
- les inondations modifient non seulement un état, mais aussi une dynamique d'évolution; les conséquences peuvent être différées ou irréversibles.

Au-delà, il y a besoin de concepts non ambigus pour ce que l'on nomme indistinctement "conséquences", "dommages", "coûts"... Pour cela, nous proposons d'élargir à tous les systèmes le cadre conceptuel utilisé par Howe et al (1991) de façon complète pour le milieu naturel.

On a défini déjà les effets comme tout changement objectif, provoqué par l'inondation, dans les systèmes naturels, humains, économiques. Les impacts sont ceux de ces effets (donc de ces changements objectifs) que la société et/ou ses membres perçoivent, et auxquels ils sont susceptibles d'attacher la moindre importance. Mais la seule question posée pour l'investigation scientifique est de savoir quelles parties ou caractéristiques de ces impacts on peut analyser: effets d'un barrage écrêteur de crues sur les dépôts de sédiments, rôle de la durée de submersion sur les cloisons d'un bâtiment...

Les dommages sont les valeurs, anthropocentriques par nature mais pas nécessairement monétaires, que la société et/ou ses membres attribuent aux impacts: "c'est très grave", "cela ne coûte pas cher". Ces valeurs résultent d'arbitrages individuels ou collectifs, de comparaisons. *Hazard damages are thus losses of human-centered values that result from natural hazard events* (Howe et al, 1991). Les valeurs que constituent les dommages traduisent le changement induit par les impacts vis-à-vis de quatre motivations (Pearce, 1978; Pearce et Markandya, 1989):

- l'usage d'un bien, d'un service, d'un site...;
- l'option, c'est-à-dire la possibilité d'un usage futur;
- le legs, c'est-à-dire la possibilité d'un usage pour autrui;
- l'existence, c'est-à-dire l'utilité d'un bien, d'un site ou d'un service, indépendamment de tout usage actuel ou futur, selon des motivations morales (éthique personnelle, religieuse, sociale...).

Les dommages sont par nature subjectifs, et dépendent d'un cadre de décision, en particulier de la nature du décideur et de la question posée: "si cette inondation ne s'était pas produite", "quels dommages évitera cette digue". C'est pourquoi il importe de focaliser une analyse sur les dommages "pertinents": ceux qui importent aux décideurs, et qui sont liés à la décision analysée (dommages susceptibles d'être réduits par un projet, par exemple). Nous reviendrons sur l'évaluation des dommages dans le chapitre II, pour évoquer des techniques d'estimation économique, et dans le chapitre III pour se placer dans la problématique de la prise de décision. C'est dans ces cadres qu'il faut en particulier considérer les coûts, correspondant à l'évaluation monétaire de certains impacts.

La nature des impacts et des dommages

Les impacts sur le milieu naturel sont très variés: modification de la morphologie des sols, dépôts ou érosions, réalimentation des nappes, modifications des fonctions vitales de différentes espèces... Nous n'entrerons pas plus dans l'évocation de ces impacts, qui peuvent être considérables, mais qui sortent du champ traité ici. Cette limite de notre travail illustre malheureusement le trop fréquent fossé qui existe entre les analyses des impacts des inondations sur les milieux naturels d'une part, sur les milieux humain, social, technique et/ou économique d'autre part.

On peut décrire ces derniers impacts selon plusieurs catégories:

- pertes en vies humaines, effets sur la santé, et notamment effets liés au stress dû à l'événement et à l'angoisse (Green et Penning-Rowse, 1986; Doizy, 1991);
- dégâts matériels provoqués aux différents biens privés et publics; ces dégâts, qui correspondent à des logiques économiques de réparation ou de remplacement, sont qualifiés de directs, et sont dus à l'action physique de la submersion; les dégradations matérielles peuvent être dues à l'action physique de l'eau (pression, poussée...), à son action chimique ou biologique (pourrissement...), aux dépôts;
- impacts liés aux difficultés de fonctionnement, d'échanges, de communications, qualifiés d'impacts indirects; localisés dans la zone submergée (impacts indirects primaires) ou à l'extérieur (impacts secondaires), ces impacts correspondent aux perturbations induites: arrêts d'activités et de services, coupures de voies de communication, ruptures de circuits économiques... (Parker et al, 1987); ces impacts, conditionnés principalement par l'étendue des dommages directs et par la durée de submersion, peuvent faire l'objet de "compensations" par transferts dans le temps et dans l'espace: modifications des circuits commerciaux, reports de production, déviations de routes; dans cette catégorie des impacts indirects entrent également les moyens mis en oeuvre pour les secours et les mesures immédiates de protection.

On a décrit plus haut différents paramètres caractérisant l'aléa, et conditionnant les impacts. Dans les travaux du BCEOM, on trouvera notamment des nomenclatures d'impacts plus fines (1967) et une description des processus d'endommagement matériel (1970).

Notons que la classification retenue ici, inspirée par Kates (1965), Parker et Penning-Rowse (1972), El-Jabi (1980), Handmer (1986), ou Parker et al (1987), ne fait pas l'unanimité. Ainsi, les Nations Unies (ONU, 1979) qualifient d'impacts directs, en capital ou en revenu, tous les impacts localisés dans la zone inondée. Il en est de même pour Howe et al (1991), en considérant les effets à court terme dans cette zone ("first-round impacts").

On a souvent cherché à exprimer les impacts indirects en proportion des impacts directs, à cause de la plus grande difficulté à appréhender et chiffrer les premiers (Kates, 1965; Grigg et Helweg, 1975; BCEOM, 1980-b), mais une telle démarche masque la différence conceptuelle entre les deux types d'impacts, et donc de dommages (Handmer, 1986; Parker et al, 1987). Ainsi, les pertes d'exploitation ou perturbations de communications vont dépendre de la "fragilité" intrinsèque de l'activité touchée, mais également de sa dépendance vis-à-vis de l'extérieur, et de la possibilité de transférer production ou échanges dans le temps ou dans l'espace.

Cette question pose le problème de l'échelle spatiale à laquelle on analyse les dommages, et du degré auquel on considère que des pertes et des gains se compensent, quand ils ne concernent pas

les mêmes personnes ou organismes. Le surcroît de ventes d'une boulangerie épargnée par l'inondation peut-il être déduit des pertes subies par une boulangerie concurrente submergée? Et qu'en est-il si l'industrie concurrente, qui réalise des bénéfices supplémentaires, est située hors du champ géographique et politique de l'évaluation? Cette question de la prise en compte de la répartition des coûts et avantages dans une aire géographique donnée relève du choix politique d'un cadre de décision, et nous y reviendrons dans le chapitre III. Notons la nécessité de définir explicitement le cadre de l'évaluation des dommages, et le danger important d'omission ou de double compte pour certains types d'impacts.

Penning-Rowse et Green (1990) proposent une analyse de l'évolution, au Royaume-Uni, des dommages directs et indirects. On trouvera, en annexe I.A, quelques résultats de la littérature sur les importances relatives des coûts de différents types de dommages.

Les types d'impacts par rapport à l'évaluation

On fait habituellement une dernière distinction entre types d'impacts tangibles et intangibles. Ces derniers correspondent aux impacts qu'on ne peut pas mesurer par une unité permettant de les comparer et de les classer. En particulier, on ne peut pas établir une valeur monétaire directe (Parker et Penning-Rowse, 1972). Ces dommages sont multiples (Green et Penning-Rowse 1986; Green, 1988; Green et Herring, dans EUROFLOOD, 1993):

- pertes en vies humaines;
- angoisse face à l'événement;
- stress et ses conséquences;
- inquiétude persistante face au risque d'inondation;
- problèmes de santé à court et moyen termes;
- rupture du mode de vie, rupture du tissu social;
- isolement;
- pertes de biens privés irremplaçables (souvenirs...);
- dommages au patrimoine historique et culturel (voir l'inondation de Florence, en 1966).

Ces dommages peuvent revêtir une importance considérable, comme le montrent Green (1988) ou Doizy (1991). Le seul traumatisme psychologique peut dépasser en gravité ressentie les dommages matériels (IWR, 1980). Les impacts intangibles sont en partie déterminés par les impacts tangibles directs, mais en partie seulement. Handmer (1986) cite des études réalisées à Bristol, après l'inondation de 1968: il apparaît une augmentation significative des actes médicaux et chirurgicaux, et un changement à court terme des phénomènes de mortalité ("concentration" dans les premiers mois, ou modification de la répartition de la mortalité entre hommes et femmes sur un cas australien).

I.2.3. La vulnérabilité

Après avoir défini l'aléa d'une part, les différents concepts représentatifs des conséquences des inondations d'autre part, venons-en à la vulnérabilité qui les met en relation. La vulnérabilité est un concept relatif, qui exprime le lien entre l'aléa, la nature et l'importance des enjeux exposés à cet aléa, les ressources disponibles pour faire face, et les impacts qui en résultent. Penning-Rowse (dans EUROFLOOD, 1993) et Green et al (1993) donnent une définition détaillée de la vulnérabilité pour ce qui concerne l'habitat et ses occupants.

Pour préciser cette notion de vulnérabilité, sans s'attacher particulièrement à un bien, une activité ou une occupation des sols, définissons la vulnérabilité comme la fonction qui exprime les impacts (ou dommages) potentiels par rapport:

- aux paramètres influents parmi ceux qui caractérisent l'aléa (par exemple la hauteur de submersion, la durée, la vitesse de montée de l'eau, la saison...);
- aux enjeux, c'est-à-dire à la quantité et la nature des biens, activités, surfaces... exposés à cet aléa, ainsi qu'à la "fragilité" face à la submersion (qui dépend par exemple de la saison, pour les cultures agricoles); pour les bâtiments, l'une des caractéristiques des enjeux sera par exemple la hauteur des planchers par rapport au terrain naturel (l'aléa ne pouvant se définir que par rapport à ce terrain "naturel", indépendamment de l'occupation des sols);
- aux ressources disponibles pour limiter les impacts, comme le délai disponible et la capacité physique des occupants d'un logement (pour prendre des mesures de protection "immédiates"), les moyens financiers pour accélérer les remises en état, la couverture par le biais des assurances...

Green et al (1993) résument cette définition par la confrontation entre le "challenge", c'est-à-dire l'exposition des enjeux à l'aléa, et les ressources disponibles. Notons que la vulnérabilité d'un bâtiment (dans notre définition) est indépendante de la localisation de ce bâtiment: la vulnérabilité met en relation les impacts résultant d'un aléa potentiel, ou hypothétique, avec les facteurs qui les conditionnent. La notion de fréquence n'intervient pas ici, mais dans la définition du risque qui suit.

I.3. LA DEFINITION DU RISQUE D'INONDATION

Nous concluons ce chapitre sur la définition du concept de risque que nous proposons. Cohen (1992) souligne la diversité des concepts que recouvre le terme de "risque", en fonction des contextes et des groupes sociaux et professionnels: probabilité de rejet à tort d'un test statistique, dispersion d'un actif financier, espérance mathématique d'un coût, variation d'une probabilité de décès... Contrairement à la situation d'incertitude sur laquelle on reviendra plus loin, la situation de risque est liée à l'existence d'éléments aléatoires dont les lois de probabilité sont connues (avec plus ou moins de précision).

Nous avons évoqué plus haut le caractère stochastique de l'aléa, qui conduit nécessairement au caractère stochastique des impacts (ou dommages) au travers de la relation de vulnérabilité. La multiplicité des paramètres caractérisant l'aléa, et le caractère partiel de leur cohérence, interdisent de définir une relation directe et univoque entre probabilité et aléa d'une part, entre aléa et impacts d'autre part. Il n'en demeure pas moins que la nature probabiliste des impacts est réelle.

On définit le risque comme la loi de probabilité des impacts (ou des dommages) à l'échelle d'un bien, d'une parcelle, ou de toute unité géographique (cf. les échelles spatiales de l'aléa). Le risque dépend donc:

- de l'aléa, comme phénomène naturel et anthropique exogène, obéissant à une loi de probabilité multidimensionnelle;
- des enjeux exposés;
- des ressources disponibles pour faire face.

Il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas non plus sans élément vulnérable exposé. Dans certains cas, on peut également considérer que les enjeux et les ressources ont une nature aléatoire: nombre de personnes présentes à une heure donnée (dans le cas de crues rapides, "subites"), efficacité de la prévision et de l'annonce de crue...

Plaçons-nous dans un cas particulier, pour définir la notion fréquemment utilisée de "coût moyen annuel" (CMA), le cas où les impacts sont exprimés en coûts de dommages. Le CMA est alors

l'espérance statistique de la variable aléatoire "coût des dommages dus à un événement d'inondation", lorsque les probabilités sont exprimées en fréquence annuelle de dépassement.

Lorsque l'aléa qui conditionne les dommages peut être décrit par un paramètre unique comme la cote maximale de crue ou le débit de pointe (c'est une hypothèse aussi simplificatrice que courante...), on définit le risque (courbe E, figure I.1) comme composition de la relation liant la fréquence annuelle de dépassement -ou son inverse la période de retour- au paramètre d'aléa (courbe C), et de la relation liant ce paramètre au coût (courbe D, issue par exemple des courbes A et B). Le CMA est alors l'intégrale de la fonction liant le coût à la fréquence annuelle de dépassement (figure I.1).

Pour clore ce chapitre largement consacré au formalisme et à la conceptualisation du risque, nous formulerons le souhait d'avoir su respecter la recommandation de Cohen (1992): *Nous retiendrons que le formalisme ne se justifie que s'il accroît la rigueur de l'analyse des situations et fournit, une fois bien expliqué, un vocabulaire commun aux différents acteurs. Il ne doit en aucun cas camoufler les inévitables choix de valeurs en hypothèses prétendument techniques énoncées en langage hermétique.*

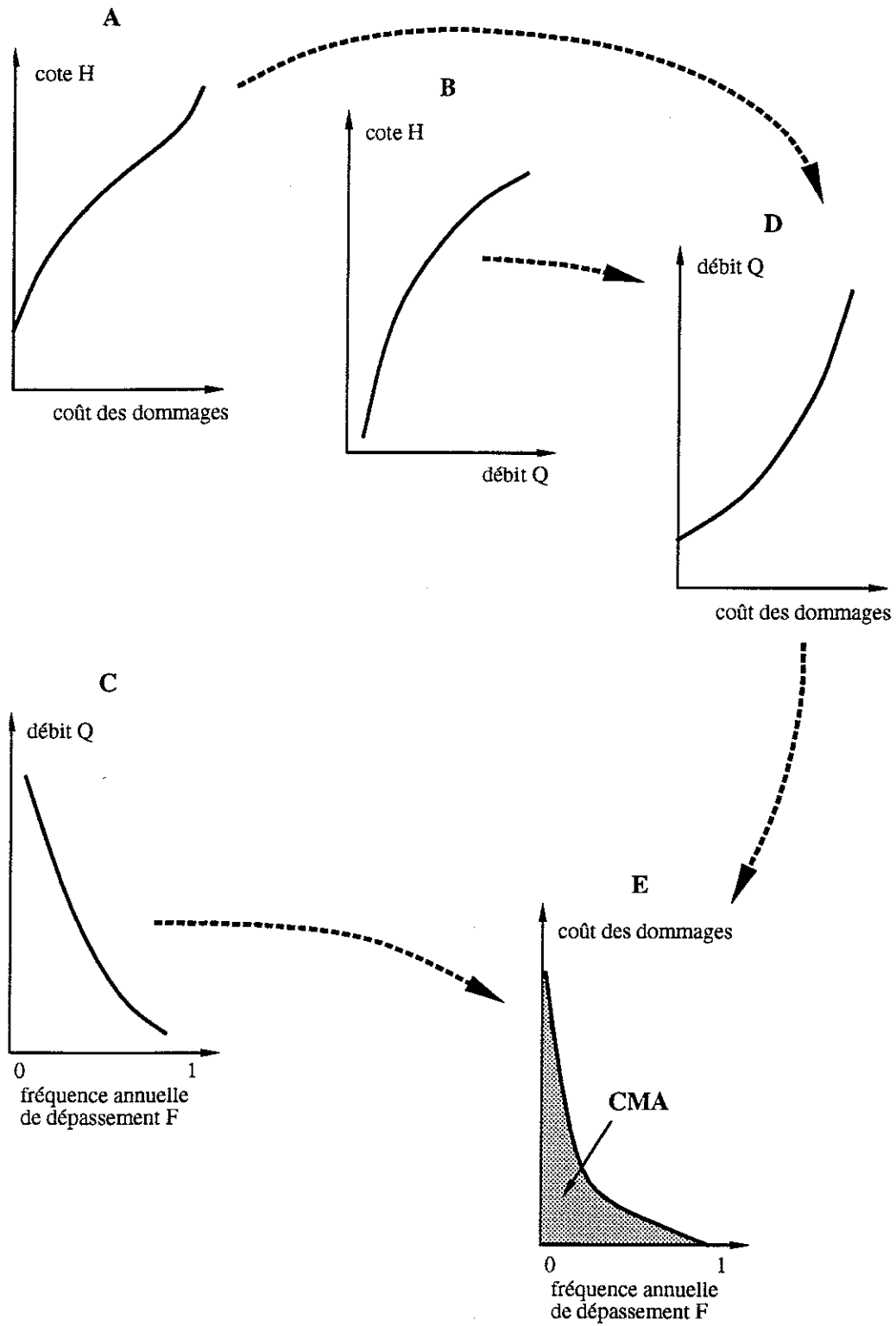


Figure I.1. : Calcul simplifié du coût moyen annuel, dans le cas où les dommages ne dépendent que d'un seul paramètre d'intensité de crue (d'après Davis, 1988)

II. LE RISQUE D'INONDATION: LA ZONE INONDABLE SYSTEME PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE

Dans le chapitre qui précède, on a décrit et caractérisé à un premier niveau les inondations fluviales et leurs conséquences, en identifiant les concepts de base. Ce faisant, on a fait apparaître le trait majeur qui conditionne toute évaluation et toute gestion du phénomène d'inondation. Pour qu'un événement d'inondation soit une catastrophe, grande ou petite, et pour que l'exposition à l'aléa d'inondation constitue un "risque naturel" (selon l'expression consacrée), il faut une interaction entre un phénomène aléatoire ayant un déclenchement naturel, des enjeux exposés à ce phénomène, une insuffisance des ressources consacrées à la minimisation des impacts.

Une évaluation des dommages renvoie donc nécessairement à une réalité complexe. La méconnaissance conceptuelle des interfaces entre inondations et société peut conduire à des évaluations présentant des défauts profonds de cohérence, dans leur mise en oeuvre ou dans leur interprétation.

Pour ces raisons, nous avons tenté dans le présent chapitre d'aborder l'évaluation des dommages à l'intérieur d'une description cohérente de l'interaction entre inondations et société, en s'intéressant successivement à un événement donné, puis au risque lié à l'occupation de l'espace en un lieu exposé à l'aléa. La dernière partie du chapitre présente des commentaires sur les données et informations portant sur les inondations et les zones inondables, telles qu'elles existent dans le contexte de la France métropolitaine. Ceci illustrera les écarts qui existent entre la description conceptuelle (que l'on espère cohérente) et les descripteurs concrets sur lesquels on peut s'appuyer.

Comme on l'a mentionné au chapitre précédent, l'évaluation des dommages trouve son sens dans un cadre décisionnel donné: question posée (choix d'une politique, "dimensionnement" d'une mesure technique ou réglementaire...), nature et caractéristiques du (des) décideur(s), méthode d'aide à la décision retenue... Nous aborderons ces questions dans le chapitre III qui suit. Ici, on se contentera de comparer une situation d'exposition au risque (respectivement d'inondation survenue) à une situation fictive de référence: aucune inondation ne peut se produire (respectivement, l'événement d'inondation ne s'est pas produit).

II.1. UNE SCHEMATISATION DU SYSTEME

Nous nous contenterons de considérer une notion très pragmatique du "système" pour décrire les interactions entre inondations et société, à savoir les états et les actions qui conditionnent l'aléa d'inondation et ses conséquences. Cette notion de système est sous-jacente à beaucoup de travaux portant sur les inondations, tant l'importance des interactions entre aléa et actions anthropiques est reconnue. Les représentations systémiques auxquelles nous avons eu accès ont pour objectif majeur de situer toute intervention humaine dans un cadre complet et cohérent.

Ainsi, le BCEOM (1977) a analysé le système "maîtrise des eaux" pour définir des objectifs d'action en vue de réduire les impacts des inondations sur différentes composantes de la société. El-Jabi et al (1980; 1982) ont défini l'espace décisionnel de l'aménagement des plaines inondables, avec ses dimensions politique, hydrotechnique, environnementale, géographique physique, économique et sociologique. La figure II.1 présente la schématisation du système de crue, définie dans ce cadre.

Nous avons essayé, pour notre part, de proposer une schématisation plus détaillée des interactions entre inondations et société, explicitant notamment la place des différents concepts relatifs

aux "conséquences" des inondations sur la société, ainsi que les types de modes de gestion du risque d'inondation:

- actions sur le cycle de l'eau et sur l'aléa local (barrages, digues, maîtrise du ruissellement...);
- modifications (en localisation, en valeur, en "fragilité") des enjeux exposés dans la situation actuelle et/ou par rapport aux évolutions futures (réglementations d'urbanisme, règles constructives, mesures individuelles "statiques");
- affectation des ressources disponibles pour diminuer les impacts ou les redistribuer (annonce de crue, secours, indemnisations).

Ces différents modes de gestion du risque, plus souvent nommés "mesures", seront décrits de façon plus détaillée dans le chapitre III.

La dernière spécificité de notre schématisation est de tenter d'identifier les différentes échelles de temps:

- le court terme est le temps de l'événement d'inondation isolé et de ses conséquences immédiates (même si ces conséquences peuvent apparaître plus tard);
- le moyen terme est le temps de la décision, influencée éventuellement par un ou plusieurs événements, et de la gestion du risque d'inondation;
- le long terme est le temps de l'évolution générale des systèmes environnemental (géomorphologique et biologique), social, économique; ceci inclut les influences de ces évolutions sur le bassin versant des cours d'eau et sur les zones inondables.

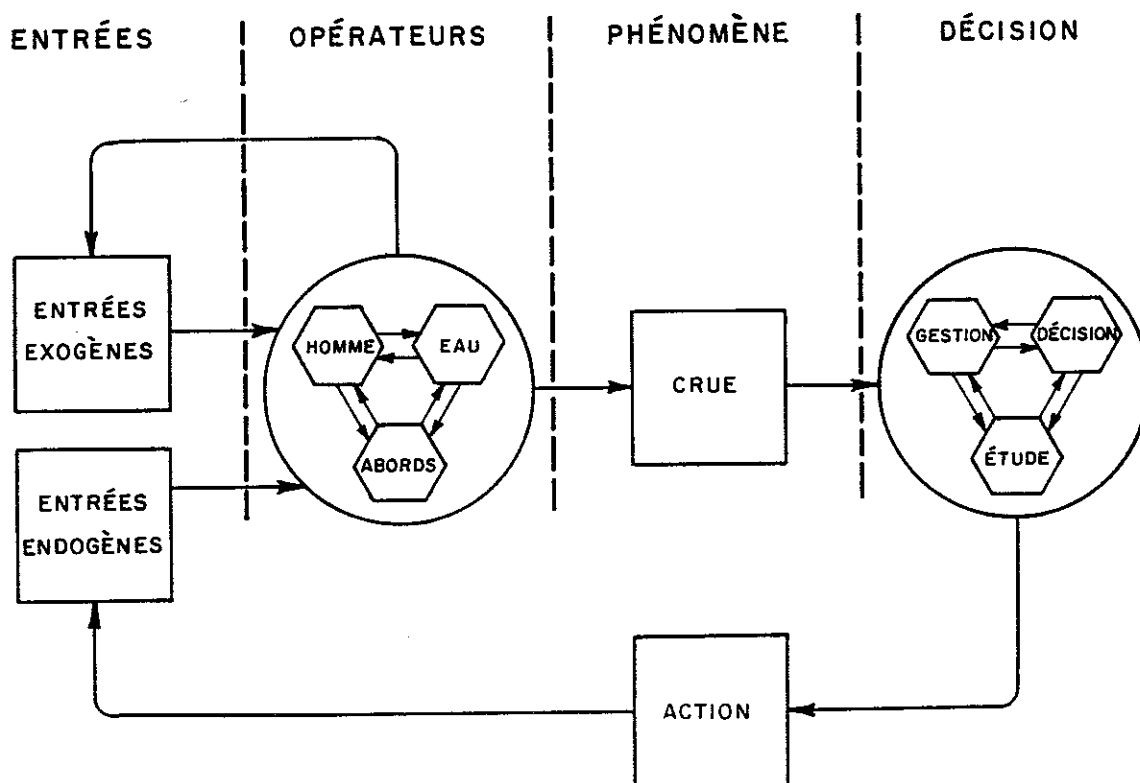


Figure II.1. : schématisation du système de crue (tiré de El-Jabi, 1980)

La schématisation des interactions entre inondations et société est présentée en figure II.2, et se réfère aux concepts définis plus haut ou dans le chapitre I. Par la suite, on va s'intéresser plus particulièrement à la conceptualisation et à l'évaluation des phénomènes de court terme (dommages dus à un événement), puis à la question de l'occupation de l'espace par rapport au risque (enjeux exposés). Rappelons que le chapitre III traite des modes et des décisions de gestion du risque d'inondation fluviale.

II.2. LA CONCEPTUALISATION ECONOMIQUE D'UN EVENEMENT D'INONDATION

Nous nous intéressons ici à l'estimation économique des dommages dus à un événement d'inondation, c'est-à-dire à la comparaison de deux situations: 1° l'inondation s'est produite 2° l'inondation ne s'est pas produite (mais le risque en soi n'est pas modifié). Ceci appelle plusieurs commentaires préliminaires.

Soulignons pour commencer qu'une estimation de dommages n'est pas forcément économique: on peut quantifier des dommages par un indicateur physique, pour peu que cet indicateur ait une signification de valeur par rapport au processus de décision dans lequel on l'intègre (approche multi-critère, par exemple). On évoque ici l'estimation économique car d'une part c'est le mode d'évaluation vers lequel on tend le plus souvent, d'autre part cette estimation concentre l'ensemble des difficultés méthodologiques (notons bien qu'il s'agit ici d'estimation de dommages, et non d'évaluation globale de projet ou de politique).

Par ailleurs, insistons d'emblée sur la différence entre une évaluation financière et une évaluation économique:

- la première se limite aux flux monétaires proprement dit, dans le cadre d'un marché réel;
- la seconde estime des valeurs, traduites en unité monétaire, par rapport à des objectifs déterminés (bien-être social, efficacité économique...).

II.2.1. Les dommages dépendent du cadre décisionnel

Les considérations présentées ci-dessous s'appuient notamment sur les travaux et écrits de Squire et van der Tak (1975), Parker et al (1987), Henry (1989), Greely-Polhemus Group (1991), Howe et al (1991). Comme on l'a évoqué déjà, un dommage est une valeur subjective, donc relative. Il n'est défini qu'à l'intérieur d'un référentiel, que nous appellerons ici "cadre décisionnel". Ainsi, les techniques d'estimation économique sont des méthodes que l'on cherche à rendre les plus rigoureuses possibles, en vue de mesurer des valeurs subjectives (Torterotot et al, 1990). Dans le manuel d'évaluation économique élaboré pour le US Army Corps of Engineers, on trouve un avis plus radical encore (Greely-Polhemus Group, 1991): *The economist has to measure what cannot be measured using concepts that cannot be observed. So, he must resort to using less-than-perfect tools as proxy measures of approximate values of things that don't really exist !*

On propose de décrire le cadre décisionnel selon deux composantes qui conditionnent l'estimation d'une valeur:

- les objectifs et principes fondamentaux;
- la nature du "décideur" au titre de qui est menée l'estimation, et plus particulièrement l'échelle à laquelle il se place ("accounting stance", dans la terminologie anglophone).

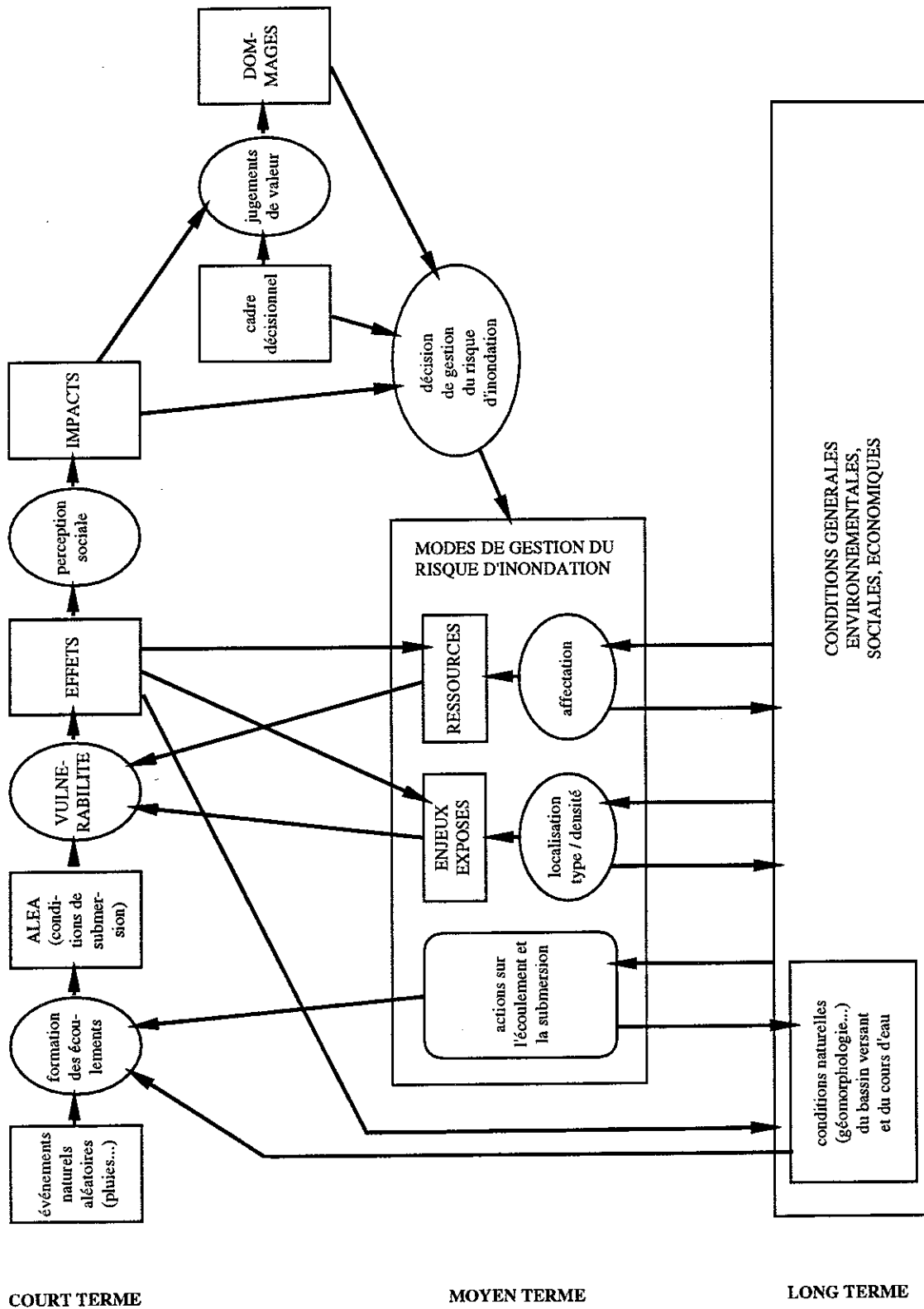


Figure II.2. : schématisation des interactions entre inondations et société

Les objectifs et principes fondamentaux

Les estimations de dommages sont destinées à éclairer des décisions individuelles, ou dans la plupart des cas collectives. Les valeurs dépendent de la contribution (positive ou négative) des impacts aux objectifs généraux, face à des contraintes de rareté de ressources (humaines, environnementales, économiques), et selon des critères nécessairement subjectifs comme on l'illustrera. En ce sens, les estimations relèvent de l'économie normative, et non de l'économie positive qui tente d'apporter une description "objective" des phénomènes économiques.

Si l'on adopte le cadre néo-classique de l'économie du bien-être (*welfare economics*), on s'appuie sur les principes suivants (voir par exemple la synthèse de Doizy, 1991, pour le cas des impacts intangibles):

- l'objectif premier est l'allocation optimale des ressources, en recherchant l'efficacité économique;
- le critère considéré est la somme des préférences, ou "utilités" individuelles, exprimées selon une unité monétaire;
- toute amélioration collective (par un projet, une politique, une décision) est jugée au sens du critère de Hicks-Kaldor ("Pareto potentiel"; McAllister, 1980), à savoir que les individus qui voient leur utilité augmenter seraient théoriquement en mesure "d'indemniser" ceux dont l'utilité diminue.

Cela suppose en particulier que pour tout changement de situation que l'on peut vouloir évaluer, chaque individu peut exprimer ses préférences, ou changements d'utilités, sous forme d'équivalents monétaires: le consentement à payer (pour accroître l'utilité) ou le consentement à accepter (pour une perte d'utilité). Pour pouvoir identifier les individus concernés et estimer une valeur, cela suppose de prendre en compte les diverses motivations vis-à-vis d'un bien ou d'un service. Ceci est d'autant plus important qu'il peut s'agir d'un bien ou service non-marchand (pour lequel on ne peut observer directement de comportement d'acquisition ou de cession), et/ou d'un bien ou service collectif (son usage par un individu n'est ni exclusif, ni destructif). La valeur attribuée, à titre individuel, est composée de différentes parts correspondant aux différentes motivations énumérées en I.2.2: la valeur d'usage, la valeur d'option, la valeur de legs et la valeur d'existence.

Notons que dans le cas d'un bien ou service échangé sur un marché, le consentement à payer est égal au surplus du consommateur (utilité en excès du prix payé), déterminable à partir de la courbe de demande individuelle.

Il est bien évident que les principes et objectifs présentés peuvent être enrichis ou amendés. Ainsi, Squire et van der Tak (1975) et Ray (1984) mettent en avant des objectifs d'équité sociale ou de préférences par rapport au temps. Ils prennent en compte la répartition des revenus (une même somme apportée à deux personnes différentes ne constitue pas la même valeur collective) et les arbitrages entre consommation et investissement, pour l'établissement de prix de référence. Une estimation des valeurs qui n'intégrerait pas les objectifs économiques et sociaux conduirait à des critères - puis à des décisions- incohérents. A ce titre, la valeur des ressources utilisées est mesurée par un coût d'opportunité, c'est-à-dire l'accroissement d'utilité que l'on aurait pu obtenir en utilisant différemment ces ressources.

Pour évaluer un projet d'aménagement des eaux, l'Etat fédéral, aux Etats-Unis d'Amérique, se base sur l'objectif du *National Economic Development* (NED; Greely-Polhemus Group, 1991):

- une contribution au NED est l'accroissement de valeur nette de production nationale de biens et services (marchands et non-marchands);
- les avantages d'une modification de cette valeur nette correspondent à la somme des changements d'utilité individuels; les coûts correspondent à la somme des coûts d'opportunité individuels.

Howe et al (1991) insistent sur le risque de "doubles comptes". Si l'on définit les dommages comme la variation du produit national brut due à l'inondation, on peut les estimer par plusieurs indicateurs équivalents qu'il ne faut pas additionner:

- variation de valeur des biens et services finaux;
- variation des rémunérations (du travail, du capital);
- variation des valeurs ajoutées.

Ce risque de doubles comptes est important, et justifie d'autant plus des définitions conceptuelles claires. Ainsi, il ne faut pas intégrer dans les dommages le fait que la réparation ou le remplacement peut conduire à un état du capital meilleur (voir aussi Penning-Rowsell et Chatterton, 1977; ONU, 1979): il faut considérer la remise en état ou le remplacement à la valeur (et à l'âge) juste antérieure à l'inondation. Dans le cas contraire, il faut considérer le coût complet d'une remise à neuf, mais aussi l'avantage apporté par rapport à la situation antérieure à l'inondation. Et si un bien n'est ni réhabilité ni remplacé, on peut estimer le dommage par la perte de valeur ajoutée actualisée sur la durée de vie restant au bien, à la date de l'inondation.

La nature du décideur (accounting stance)

Les différents auteurs cités plus haut insistent beaucoup sur ce second point, malgré son apparente simplicité. Comme on l'a vu au chapitre précédent, les impacts d'une inondation peuvent être favorables ou défavorables. Ce deuxième cas est notamment susceptible de se produire au niveau de certains impacts indirects secondaires, lorsque des entreprises épargnées augmentent provisoirement ou durablement leur valeur ajoutée suite à des difficultés rencontrées par les entreprises concurrentes (submersion, accès coupés, fournisseurs inondés...). Selon qu'une estimation globale de dommages se focalise sur la zone inondée, ou au contraire porte sur l'ensemble des impacts nationaux, des phénomènes de "compensation" partielle joueront ou non sur le bilan.

Ainsi, une même perturbation locale de la production ou des transactions n'induit pas le même dommage aux différentes échelles individuelle, locale, régionale, nationale. Le bilan global dépendra des transferts d'activité dans l'espace, par rapport au niveau géographique et/ou institutionnel considéré. Il faudra prendre en compte de même tout autre "transfert" comme la fiscalité (directe et indirecte), les subventions et indemnités...

II.2.2. Les techniques d'estimation économique des dommages

Les techniques générales

Nous nous contenterons ici de présenter les grandes caractéristiques des techniques d'estimation économique des dommages, dans le cas où l'on considère les conséquences d'un événement d'inondation donné. Ces conséquences se traduisent par des modifications sur les biens possédés ou échangés, sur des biens autres, ainsi que sur des services. Quelle que soit la nature de ces biens ou services, ils appartiennent à l'une des catégories suivantes (Howe et al, 1991):

- ces biens et services sont marchands, et leurs prix d'échange reflètent les valeurs sociales (l'utilité étant alors égale au surplus du consommateur);
- ces biens et services sont marchands, mais leurs prix d'échange ne reflètent pas les valeurs sociales (le marché présentant des distorsions par rapport au cadre décisionnel: marché non parfait, externalités...);
- ces biens et services ne sont pas marchands, mais il existe au moins une technique d'estimation adaptée;
- ces biens et services ne sont pas marchands, et il n'existe aucune technique adaptée.

Les premier et quatrième cas n'appellent pas d'autre commentaire. Pour le deuxième cas, on peut recourir soit aux méthodes présentées plus loin, soit estimer des prix de référence, c'est-à-dire les prix que l'on observerait sur le marché si le fonctionnement de ce marché était cohérent avec les objectifs et principes du cadre décisionnel (tels ceux présentés plus haut). Cela consiste par exemple à exclure la fiscalité, à considérer un marché concurrentiel avec information parfaite et coûts de transaction nuls (voir par exemple Squire et van der Tak, 1975; Ray, 1984; Pearce et Markandya, 1989). En théorie, les prix de référence devraient être estimés par une nouvelle optimisation sous contrainte de l'allocation des ressources. Mais il faut noter qu'en pratique les prix de référence sont souvent estimés à partir des prix de marché, sans que toutes les conditions théoriques nécessaires soient toujours réunies pour cela (Henry, 1989). Le paragraphe qui suit approfondit le troisième des cas évoqués.

L'estimation des dommages non-marchands

On va évoquer à présent les techniques applicables à la troisième catégorie de biens et services (donc d'impacts). Ces techniques s'appliquent de la même manière au deux premières catégories, si ce n'est que ces approches sont plus "lourdes" que les approches directes possibles. Cela concerne essentiellement certains impacts "intangibles", dans la mesure notamment où ces techniques soit constituent des premières approches à valider, soit apportent des estimations qui ne sont vraisemblablement que partielles. Les différentes techniques reviennent en fait à l'une des méthodologies générales suivantes:

- estimer la valeur d'un dommage d'après ses traductions sur des marchés de biens et services tangibles (frais de santé, temps de travail perdu...);
- analyser les comportements révélés sur un marché de "substitution" dont les dommages sont un attribut, et en estimer les consentements à payer (méthode des coûts de trajet, méthode hédoniste);
- créer un marché fictif (évaluation contingente).

Ces différentes méthodes s'appliquent par excellence aux biens et services d'environnement, et ont été développées beaucoup en économie de l'environnement. On se basera notamment sur les synthèses didactiques de Pearce et Markandya (1989), Howe et al (1991).

Pour le cas où l'on analyse un dommage par ses conséquences sur des marchés, on donnera plus loin l'exemple relatif aux atteintes à la santé. Mais cette approche est avant tout appliquée au cas des coupures des voies de communication (BCEOM, 1967; Bamberger, 1987; Parker et al, 1987). La méthode d'estimation suppose que l'on sache déterminer, pour les trajets de diverses natures (professionnels, de loisirs...), le rallongement en distance et en durée, qui sont valorisés par un prix de revient au kilomètre de l'usage du véhicule et une valeur du temps (au coût salarial, pour le cas le plus simple des trajets professionnels). Nous n'entrerons pas plus avant dans les différentes difficultés méthodologiques, mais nous en soulignerons la première, à savoir l'identification des répercussions physiques de la modification du trafic: changement d'itinéraire pour éviter les secteurs inondés, mais aussi perturbations induites sur les déviations et à leur proximité.

Pour la prise en compte d'un marché de substitution, considérons par exemple la dégradation d'un site naturel ou culturel. Les visites faites à ce site dépendent de l'utilité retirée par les visiteurs, et on peut considérer que le coût total d'une visite (coût de trajet, temps passé, prix d'accès...) constitue une limite inférieure de l'utilité de ce bien. En analysant les taux de visites et les coûts associés, il est possible de reconstituer une courbe de demande et d'estimer, de façon approchée, un surplus des visiteurs d'un site. On peut ainsi comparer les surplus avant et après dégradation partielle d'un site, et en déduire la valeur du dommage.

On considère de même un marché de substitution, lorsque la qualité d'un site ou les caractéristiques d'une infrastructure influent sur les loyers, les valeurs foncières et/ou les valeurs immobilières, toutes choses étant égales par ailleurs. Le différentiel sur ces valeurs, comme fonction unique de cet attribut "site" ou "infrastructure" en éliminant l'influence des autres attributs, constitue une évaluation de la valeur du site ou de l'infrastructure endommagés par l'inondation. Cette valeur ne correspond qu'aux individus vivant à proximité. On reviendra en II.3 sur l'analyse hédoniste vis-à-vis du risque d'inondation, qui constitue un attribut d'une parcelle ou d'un bâtiment. Comme on

l'expliquera, cette analyse ne peut être appliquée directement pour estimer les dommages d'un événement d'inondation donné.

La dernière des techniques d'estimation est la méthode d'évaluation contingente: dans le cadre d'enquêtes, on définit un marché fictif dans lequel les individus interrogés indiquent le montant maximum qu'ils sont prêts à payer pour acquérir (ou protéger) un bien ou un service (consentement à payer), ou le montant qu'ils demandent pour renoncer à un bien ou un service (consentement à accepter). Cette approche, qui se présente souvent sous la forme d'enchères, s'appuie sur un jeu d'hypothèses et de conditions à remplir. Quatre biais peuvent limiter la validité de l'évaluation contingente:

- le biais stratégique, lorsque l'individu interrogé n'est pas sincère (le "cavalier seul" minimise son consentement à payer avoué pour un bien collectif qui serait désiré par la majorité et dont il pourrait profiter dans tous les cas);
- le biais conceptuel, en fonction des caractéristiques des enchères, ou du fait d'une mauvaise interprétation;
- le biais hypothétique, lorsque le caractère fictif des questions et des montants évoqués en modifie la valeur par rapport à un choix en situation réelle;
- le biais opérationnel, lorsque le marché fictif simulé ne respecte pas les conditions d'un marché réel.

Pour une telle technique, l'une des pierres d'achoppement est que les individus interrogés doivent pouvoir prendre pleinement conscience des enjeux considérés, et en comprendre toute la portée. Ainsi, pour le cas de la pollution des cours d'eau, les évaluations contingentes menées par le Flood Hazard Research Centre se sont appuyées sur la traduction de paramètres de qualité biochimiques -peu parlants pour la population- en paramètres de qualité perçue constituant une échelle commune: aspect de l'eau, faune présente... (Green et al, 1988; Torterotot et al, 1990). De même, pour poser les bonnes questions à un échantillon qui soit représentatif de la population concernée, il faut connaître les motivations qui sous-tendent l'attribution de valeurs à des biens et services (Green et Tunstall, 1990).

On pourrait très bien imaginer d'appliquer l'évaluation contingente à l'ensemble des dommages dus à une inondation, même si nous n'avons pas trouvé trace d'une telle démarche. Shabman et Stephenson (1992) présentent un référendum proposant la construction d'un ouvrage de protection contre les inondations, qui se traduirait par une légère augmentation des impôts locaux. Les motivations de vote ont été analysées en marge de cette consultation, et ont révélé que la population non concernée directement était majoritairement favorable au projet, et que le consentement à payer dépassait largement les intérêts individuels. Ce consentement à payer est apparu conditionné avant tout par des motivations collectives de réduction des perturbations globales induites par une inondation. Thunberg et Shabman (1991) ont analysé plus finement le consentement à payer pour une protection, qui s'est révélé nul pour certaines personnes appelées à bénéficier de cette protection, et qui dépendait essentiellement des facteurs suivants: le souci de préserver le fonctionnement social de la communauté, puis la protection des biens, la préservation des valeurs immobilières, la réduction de l'anxiété. N'oublions pas qu'il s'agit ici d'un cas particulier, dont on ne peut pas tirer de conclusion générale.

Le cas des pertes en vies humaines et des effets sur la santé

Comme on l'a évoqué précédemment, parmi les impacts intangibles figurent les pertes en vies humaines, par noyade, épidémie ou famine, par affaiblissement physiologique (effet différé sur l'espérance de vie à court terme). De surcroît, un événement d'inondation a des répercussions sur la santé, notamment par suite du stress intense, de l'anxiété, de l'inquiétude qui reste face au risque d'inondations futures, ou simplement du changement brutal dans les conditions de vie à court et moyen termes (évacuation...).

Notons que l'on considère ici l'évaluation d'une valeur monétaire liée aux pertes en vies humaines. Certaines méthodes d'aide à la décision considèrent ces impacts sans qu'il faille estimer un coût de dommage correspondant. Par ailleurs, il est important de souligner qu'en France

métropolitaine, les pertes en vies humaines dues aux inondations résultent d'enchaînements de circonstances peut-être maîtrisables, mais très aléatoires à l'échelle du pays: date d'un événement (occupation des terrains de camping et caravaning), horaires (présences, alerte et vitesse de réaction), résistance des bâtiments exposés aux plus forts courants... Si l'on ajoute à cela que la très grande majorité des débordements de cours d'eau ne fait pas de victimes, force est de constater qu'il est excessivement difficile de prévoir les impacts des inondations fluviales en termes de vies humaines.

Nous n'entrerons ici ni dans un débat éthique de la valorisation économique de la vie, ni dans une discussion technique et scientifique détaillée. Comme le montre Moatti (1989), cela n'aurait pas de sens de vouloir estimer la valeur économique du décès certain d'une personne précise: on ne peut que raisonner sur une variation de la probabilité de durée de vie, ou sur des décès statistiques et anonymes au sein d'une population importante. De même, on évalue a priori, non a posteriori. Jones-Lee (1984), ainsi que Howe et al (1991), évoquent différentes approches pour l'estimation d'une valeur monétaire:

- valeur révélée par les primes d'assurance-vie ou les jugements des tribunaux en dommages et intérêts;
- valeur révélée par les salaires des métiers à risques, par rapport à des métiers de même qualification (méthode hédoniste des salaires);
- valeur révélée par les investissements de sécurité (circulation, santé...; selon les causes possibles de décès, ces investissements sont très variables);
- "gross output" correspondant à la production nette perdue et aux difficultés rencontrées par la famille de la victime;
- consentement à payer analysé au travers d'une évaluation contingente.

Chacune de ces approches conduit à des valeurs disparates et discutables. Seule la dernière approche présente des garanties minimales de cohérence avec la théorie économique.

En ce qui concerne les impacts -a priori entièrement "négatifs"- des inondations sur la santé, Handmer (1986) propose pour l'Australie une estimation au travers des conséquences sur le marché, à savoir les frais de santé et le temps de travail perdu. Aux Etats-Unis (IWR, 1980), des approches indirectes ont été mises en oeuvre, en mesurant les effets sur la santé par les "barèmes physiques" de traumatisme utilisés par la justice ou pour l'indemnisation des vétérans du Vietnam, et en appliquant les valeurs correspondantes.

Au Royaume-Uni, le Flood Hazard Research Centre développe une approche complète vis-à-vis des dommages intangibles subis par les ménages, parmi lesquels les impacts sur la santé (Green et Penning-Rowsell, 1986; Green, 1988; Green et Penning-Rowsell, 1989; Doizy, 1991). La mise au point d'échelles de mesure sociologique permet de classer les niveaux de stress, d'anxiété, ou d'inquiétude par rapport aux inondations. C'est un premier pas du statut d'impact intangible vers celui d'impact tangible.

Au travers d'enquêtes, les différents types d'impacts ont été quantifiés par une note de gravité perçue, ce qui a permis d'analyser les corrélations entre différents impacts, leurs contributions au traumatisme global subi (dépendant beaucoup du niveau de stress), et leurs dépendances par rapport aux conditions de submersion. Sur la base des notes de gravité, les coûts des dommages tangibles ont été extrapolés pour constituer des valeurs de dommages intangibles. Ces valeurs apparaissent importantes, et ne sauraient aucunement être négligées par rapport aux dommages matériels, même si beaucoup de questions méthodologiques restent ouvertes (Doizy, 1991).

II.3. LA CONCEPTUALISATION ECONOMIQUE DU RISQUE D'INONDATION LIE A L'OCCUPATION DE L'ESPACE

Nombreux sont les auteurs qui évoquent l'accroissement dans le temps -en moyenne- des coûts des dommages dus aux inondations, et ceci malgré les investissements de protection et de

prévention (Holmes, 1961; Renshaw, 1961; El-Jabi et al, 1982; Jacq, 1987; Shabman, 1988). Les raisons avancées sont multiples:

- évolutions dans la formation des écoulements (intensification du ruissellement, diminution des temps de propagation...);
- accroissement des enjeux exposés dans les zones inondables, et de la fragilité de ces biens et activités (sophistication des matériaux, automatisation, plus grande dépendance par rapport aux circuits commerciaux...; Penning-Rowse et Green, 1990);
- amélioration des recueils d'informations, qui conduit à progressivement recenser les dommages d'une façon plus complète.

On met en particulier en cause les mesures de protection structurelle (barrages, digues...) qui induisent un sentiment de sécurité exagéré et s'accompagnent par conséquent d'une exposition accrue à l'aléa d'inondation. Cette exposition accrue amplifiant l'intérêt de protections supplémentaires, on emploie à ce sujet l'image du cycle infernal, ou plus encore de la spirale ascendante des dommages et des protections (El-Jabi, 1980).

Considérons un instant l'occupation des zones inondables dans une perspective historique. Que les activités humaines se soient implantées puis concentrées dans les vallées, et en particulier dans les zones inondables, est une évidence. La présence d'eau pour les besoins humains, les terrains fertiles et plats ainsi que divers processus logiques ont conduit à cette situation. Ainsi, la voie d'eau a joué un rôle majeur dans les communications, privilégiant de façon décisive les implantations proches, au même titre qu'aujourd'hui les autoroutes drainent les activités à leur proximité (Torterotot et Roche, 1990).

Ces premières implantations conciliaient le plus souvent la proximité du cours d'eau et la protection offerte par un palier rocheux, un resserrement de vallée... (Barrier, 1990). Citons Geneslay (1971): *aux temps anciens, Gaule, époque gallo-romaine, Gaule franque, les habitations n'étaient édifiées que sur des endroits insubmersibles, même aux plus grandes crues*. Mais l'embryon d'urbanisation s'étant développé, son extension n'a pu se faire que dans les zones inondables. L'attrait des infrastructures humaines venait s'ajouter à celui des infrastructures naturelles (Viau, 1985). Les différentes villes françaises, retenues pour des enquêtes auprès de particuliers sinistrés (voir le chapitre IV), présentent ce même trait de s'être développées à partir de positions hautes (Torterotot, 1988; voir en particulier la colonisation progressive du lit majeur de la Charente par la ville de Saintes, décrite par V Guédon et N Vigier en annexe 5 de ce rapport).

Nous allons tenter de placer ici la question de l'occupation des zones inondables dans une perspective et un cadre économiques.

II.3.1. Le risque d'inondation conditionne l'occupation des sols

Considérons une parcelle de terrain: ses caractéristiques propres (surface, pente...) et sa localisation (proximité d'infrastructures, ou au contraire nuisances...) lui permettent d'assurer des fonctions économiques en accueillant de l'habitat, des activités industrielles et commerciales, des cultures agricoles, des équipements et infrastructures... A ce titre, une parcelle est un bien économique qui génère un surplus ("location rent" dépendant de ses caractéristiques et de sa localisation), en fonction des coûts d'occupation (achat, loyer, contraintes) et de l'utilité produite.

Des événements d'inondations, en submergeant cette parcelle ou en l'isolant, vont conduire à augmenter les intrants (réparations, mesures mises en oeuvre à échelle individuelle) et réduire l'utilité produite (en termes d'abri, de production industrielle, de ventes réalisées...). En diminuant les avantages offerts par la parcelle, le risque d'inondation en restreint le surplus. Il constitue de fait une ressource naturelle "négative" (Bialas et Loucks, 1978; Yezer et Rubin, 1987): toutes choses égales par ailleurs, le capital et le travail sont plus productifs sur une parcelle non exposée à l'aléa. Mais on peut rarement considérer que "toutes les choses sont égales par ailleurs". Brown (1972; Brown et al, 1972) a simulé des chroniques d'effets financiers des inondations sur des biens, qui sont soumis par ailleurs à l'amortissement et au renouvellement.

Si une parcelle se trouve protégée contre les inondations, les dommages directs et indirects évités ne constituent qu'une partie de l'avantage généré, dans la mesure où on peut choisir un mode d'occupation des sols différent ou modifié (intensification...), en cherchant à maximiser la différence entre "production" (utilité générée) et intrants (Green et Herring, dans EUROFLOOD, 1993).

En élaborant et en validant un modèle économique intra -et inter-cités pour les risques naturels, Yezer et Rubin (1987) ont montré que face à une modification du niveau de risque, et pour des marchés en équilibre, les loyers et les valeurs immobilières et foncières constituent un indicateur non ambigu: ils diminuent dans la zone inondable lorsque le risque perçu augmente, et inversement. Par rapport à une parcelle non inondable comparable en tout point, la valeur est -en théorie- diminuée de l'équivalent des "inconvenients" du risque, ou du moins de la part non indemnisée de ces inconvenients (Green et Herring, dans EUROFLOOD, 1993). Cependant, Yezer et Rubin insistent à juste titre sur le fait que l'influence sur les loyers et valeurs immobilières ou foncières dépend du risque perçu, et non du risque "réel", qui n'a en fait aucune réalité pour les agents économiques.

II.3.2. L'évaluation hédoniste du risque d'inondation

En fonction des éléments présentés ci-dessus, on peut quantifier le risque d'inondation auquel sont soumis une parcelle ou un bâtiment par le différentiel de valeur foncière, de valeur immobilière, ou de loyer. En corollaire, cette méthode s'applique par exemple à l'évaluation des avantages d'une protection complète (voir le chapitre III). On peut ainsi mentionner les travaux de Park et Miller (1982), Thompson et Stoevener (1983), Montz et Tobin (1986), Tobin et Newton (1986), Yezer et Rubin (1987; pour le cas général des risques naturels), Donnelly (1989), Montz (1992).

Rappelons le principe général de cette méthode hédoniste: en définissant les valeurs comme fonctions des nombreux paramètres significatifs (surface, proximité des écoles, nuisances routières...), on quantifie le différentiel correspondant au caractère inondable d'une parcelle ou d'un bâtiment (on peut aussi considérer un degré quantitatif d'exposition). Le plus souvent, on utilise une fonction linéaire en calant une régression multiple. Les résultats peuvent apparaître incohérents entre différentes études, notamment pour peu que l'on considère l'exposition objective plutôt que l'exposition perçue au risque.

Des comparaisons entre la différence de valeur immobilière et la valeur actualisée d'une prime d'assurance "inondation" (Donnelly, 1989) ont révélé des ordres de grandeur non incohérents (dans la mesure notamment où l'assurance ne peut pas indemniser tous les impacts des inondations). Mais il faut signaler d'une part que les valeurs immobilières dépendent d'un grand nombre de paramètres, le risque d'inondation pouvant présenter une influence faible. D'autre part, on observe que le risque influence les caractéristiques de l'habitat, dont la valeur peut être diminuée par l'effet des contraintes imposées au titre des inondations (Montz, 1992).

II.3.3. Le rôle du temps

On a implicitement considéré jusqu'ici une situation stable, avec une influence stationnaire du risque d'inondation sur l'occupation des sols. Cependant, c'est le risque perçu qui exerce cette influence, et la perception évolue au fil du temps (voir le chapitre V). En particulier, chaque événement est susceptible de raviver une perception qui décroît entre les événements. Ainsi, Tobin et Newton (1986) proposent une modélisation des baisses brusques et des lentes remontées que peuvent connaître les valeurs immobilières, au gré des inondations qui se succèdent. Montz et Tobin (1986) ont observé dans les faits de telles évolutions.

Yezer et Rubin (1987) ont systématisé la prise en compte de cet effet, à partir de l'hypothèse qu'une catastrophe naturelle ne pouvait modifier les valeurs immobilières que si elle modifiait le niveau du risque perçu. Dans le cas contraire en effet, "l'économie de l'occupation des sols" reste dans un état d'équilibre, dans lequel les inconvenients prévisibles des inondations sont "compensés" par une valeur immobilière d'achat moindre. L'analyse suivante a été menée pour différentes catastrophes réelles:

- d'après les dernières années, estimation d'une fréquence "perçue" de catastrophe sans tenir compte de la plus récente que l'on analyse, puis en en tenant compte;

- estimation des risques perçus dans les deux cas (à partir des dommages nets, indemnisations déduites), sans tenir compte de la catastrophe récente et en en tenant compte; ces deux risques sont traduits en terme de coût moyen annuel net actualisé perçu, ou "attendu" (*expected*);
- en comparant la différence des deux espérances de coût à l'évolution observée sur les valeurs immobilières, on constate que cette évolution est un bon indicateur de la modification de risque perçu du fait de l'événement récent.

II.3.4. L'occupation des sols en zone inondable est-elle irrationnelle ?

Face à une occupation toujours croissante des zones inondables, s'élève fréquemment l'argument de l'irrationnalité d'une telle tendance. De même, différents auteurs mettent en regard les investissements de protection et l'augmentation des dommages en valeur absolue. Shabman (1988) tempère cet argument en montrant que les dommages, ramenés au produit national brut des Etats-Unis, diminuent en moyenne en fonction du temps. Cela ne suffit pas pour autant pour s'assurer de l'efficacité économique des investissements de protection.

Mais il faut bien voir que les dommages ne traduisent qu'une partie des inconvénients de l'occupation des zones inondables, et pas les avantages. A ce titre, l'évaluation des dommages ne constitue pas en soi un critère de jugement par rapport à l'efficacité économique (Green et al, 1993). Burby et al (1988) montrent notamment qu'un facteur majeur expliquant l'urbanisation en zone inondable est la pression foncière sur une commune. L'alternative à l'occupation de la zone inondable est alors la densification ailleurs, ou la colonisation dans des zones ne présentant pas certains autres avantages.

En particulier, les équipements et infrastructures existant dans les zones inondables ou à proximité constituent des attraits importants. Si nos moyens techniques nous permettent mieux que jamais de s'affranchir de la proximité du cours d'eau (alimentation, communication...), les vallées sont restées attractives du fait de leur urbanisation même: les attraits d'origine anthropique se sont progressivement substitués aux attraits naturels, avec les avantages économiques que cela représente.

La question de la rentabilité sociale collective de l'occupation des zones inondables, et des conditions de cette occupation, reste ouverte. Et cette question doit être posée à deux échelles de temps différentes:

- quel est l'intérêt à court terme d'étendre l'urbanisation actuelle dans les zones à risque, en bénéficiant de la proximité d'infrastructures existantes? et que dire d'implantations nouvelles situées respectivement dans une zone inondable ou en-dehors?
- quel est le bilan à plus long terme si l'on compare un scénario de progression "homothétique" de l'occupation des zones inondables déjà urbanisées à un scénario d'implantations nouvelles en-dehors des zones inondables, avec leur développement au "détriment" des zones inondables?

Comme on peut le voir, toute extension d'urbanisation en zone inondable accroît l'intérêt à court terme d'extensions futures, à plus forte raison si la première extension a conduit à des investissements de protection.

La gestion du risque d'inondation gagnerait beaucoup à ce que soient plus élucidés et quantifiés les mécanismes individuels et collectifs qui président aux implantations en zone inondable. Si nous disposons aujourd'hui d'une partie des instruments d'analyse, une réflexion économique spécifique reste à élaborer, pour définir les orientations et les traduire dans l'action (planification et aménagement du territoire, réglementations d'usage et d'occupation des sols...).

II.4. LES SOURCES D'INFORMATIONS EN MATIERE D'INONDATIONS ET DE ZONES INONDABLES

Après avoir donné une description rapide des inondations fluviales et de leurs conséquences, et en préliminaire aux parties B et C du présent mémoire, il nous a semblé utile de faire quelques commentaires les plus généraux possibles sur diverses sources d'informations concernant les inondations et les zones inondables. Pour une revue plus approfondie de ces informations et données dans le contexte français, on renverra le lecteur aux travaux détaillés du BCEOM (1967; 1980-b; Torterotot, 1990-a). On insistera ici avant tout sur les limites des sources d'informations, et sur les difficultés résultant pour leur exploitation. Au travers de la critique et de l'exploitation de différents types de données, on illustrera notamment dans les chapitres VI, IX et X le rôle clé des informations que l'on peut recueillir sur les inondations et les zones inondables.

Avant d'aller plus loin, il nous faut souligner le grand intérêt et l'utilité de tous les travaux et procédures conduisant à délimiter et caractériser les zones inondables, comme sources d'informations et supports de politiques. Pour le cas français, nous citerons en particulier:

- l'Atlas des zones inondables (voir BCEOM, 1969; Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire);
- les Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles d'inondations, avec les cartes d'aléa et de vulnérabilité (voir Caude, 1988-a; Ministère de l'Environnement, Délégation aux Risques Majeurs);
- l'Atlas des zones inondables de la vallée de la Loire (Ministère de l'Environnement, DIREN Centre, Service de Bassin Loire-Bretagne).

II.4.1. Remarques générales

Beaucoup de sources d'informations spécifiques aux inondations sont fragmentaires, hétérogènes dans le temps et dans l'espace, voire incomplètes. Elles ont des degrés de précision et de crédibilité variables. Plusieurs caractéristiques des données demandent à être identifiées et prises en compte en vue d'une utilisation de ces données:

- l'échelle d'espace (un cours d'eau ou plusieurs, bassin physique ou unité administrative...);
- l'échelle de temps (cumuls annuels, données propres à un événement particulier, valeurs moyennes annuelles...);
- l'ancienneté des informations (évolutions probables dans l'intervalle, aménagements ou protections réalisées depuis...);
- la logique sous-tendant l'élaboration des données.

Ce dernier point est particulièrement important. En effet, certaines études préalables à un aménagement ne s'intéressent qu'aux changements qu'induit ce dernier sur les inondations et sur la vulnérabilité d'une zone. Par ailleurs, les données issues de procédures d'indemnisation présentent un grand nombre de biais qui ne peuvent être quantifiés de façon simple:

- tous les sinistrés n'ont pas nécessairement droit à l'indemnisation (existence de seuils, de franchises...);
- ceux qui y ont droit ne demandent pas nécessairement à être indemnisés;
- suivant les conditions d'indemnisation, il existe un écart plus ou moins important entre le dommage financier et la somme versée (franchise, existence de taux d'indemnisation ou d'aide, prise en compte d'une partie seulement des dommages, ou assiette constituée par une partie des biens touchés...); les indemnisations portent -selon la police d'assurance- sur la valeur nette des biens ou sur la valeur vétusté déduite;

- le dommage qui sert de base au calcul de l'indemnisation peut, suivant les cas, être évalué par les sinistrés eux-mêmes (sous-estimation par méconnaissance, mais aussi sur-estimation "pour compenser"...), par des experts indépendants ou liés aux assureurs, par un forfait défini localement...

Si l'on considère par exemple les statistiques d'indemnisations établies par l'Assemblée Pleinière des Sociétés d'Assurance contre les Incendies et Risques Divers, les données portent sur toutes les inondations d'une même année dans un département, pour une part du marché de l'assurance qui diffère d'un département à l'autre. Si l'on ajoute à ces caractéristiques les biais énumérés plus haut, on ne peut que constater la quasi impossibilité à exploiter de telles données lorsque l'objectif est une évaluation "complète" des dommages. Par contre, de telles données conservent leur intérêt pour analyser le marché de l'assurance lui-même. On pourrait évoquer également le régime d'indemnisation des "calamités agricoles", pour lequel le taux d'indemnisation à un agriculteur, suite à des inondations ou des sécheresses, dépend du fait que cet exploitant agricole soit assuré ou non contre la grêle, au titre de l'incitation à l'assurance.

II.4.2. Contours de zones inondables et limites administratives

Il est d'une évidence flagrante que les contours des zones inondables ne respectent en rien les limites administratives, ni les découpages parcellaires pris en compte par les services cadastraux d'une part, par les recensements de toutes natures d'autre part. Or, ces différentes unités géographiques structurent certaines des informations sur les inondations survenues (par commune, même si deux cours d'eau ont débordé), et elles structurent bien plus encore toutes les données permettant de caractériser l'occupation de l'espace, la population...

Ceci suppose par conséquent que pour étudier les zones inondables, il faut soit recueillir une information très fine (enquête à la parcelle, éventuellement îlots urbains de recensement), soit considérer des unités géographiques qui englobent largement (ou recouvrent très partiellement) les zones inondables, qui sont parfois réduites à des "marges" très étirées le long des cours d'eau. Dans ce deuxième cas, on risque de masquer totalement les spécificités des zones inondables et de leurs évolutions. Si l'on veut par exemple établir une estimation de population en raisonnant en valeur relative par rapport à la surface, ces spécificités (densité de construction, par exemple) peuvent conduire à des biais importants et non décelables.

Les difficultés de ce type sont plus aigües encore lorsque les données sont référencées à des unités géographiques sur une mode "non physique". Ainsi, les statistiques sur les exploitations agricoles (Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural), portant notamment sur les surfaces affectées à différentes catégories de cultures, se réfèrent aux communes, cantons et régions agricoles. Mais les surfaces cultivées sont "affectées" à la commune où se trouve le siège de l'exploitation agricole les mettant en valeur, et non à la commune sur le territoire de laquelle elles sont situées.

Si l'on a insisté sur cette question particulière des références spatiales, c'est qu'elle est représentative de la difficulté rencontrée par toute analyse et toute mesure de gestion du risque d'inondation fluviale, pour intégrer des logiques multiples: physique (cycle de l'eau, topographie...), économique, administrative.

II.4.3. De la difficulté de recueillir de l'information a posteriori sur les inondations

Même si les inondations graves en un lieu donné sont -heureusement- rares, les événements réels constituent une source d'information privilégiée sur les aspects suivants:

- hydrologie et conditions de submersion;
- population et enjeux exposés;
- impacts, dommages, coûts.

Comme on l'a évoqué plus haut, une première difficulté pour l'exploitation de ces données concerne la non-stationnarité du risque d'inondation: évolution de l'aléa (notamment suite à des aménagements), évolution des enjeux exposés... Par ailleurs, les données de coûts recueillies peuvent présenter des doubles comptes, et plus souvent des lacunes identifiables ou non (BCEOM, 1967). Dans les faits, le recueil de telles informations nécessite une planification préalable, pour systématiser le recueil (qualitativement et quantitativement), et pour prévoir des validations des informations (les bilans officiels établis en temps réel sont rarement repris pour critique et complément).

En France, une circulaire interministérielle de 1976 prévoyait un recueil d'informations lors des événements d'inondations, par les Services Extérieurs de l'Etat (BCEOM, 1980-a; 1984; Jacq, 1987). Mais la mise en oeuvre progressive de cette circulaire a posé beaucoup de difficultés, malgré de grands soins et une préparation importante dans la structuration de ce projet. Parmi ces difficultés, on peut mentionner la disponibilité réduite des services locaux, le manque de spécialisation, et les problèmes objectifs posés par la coordination entre services et organismes aux domaines de compétence différents.

Recueillir des informations utilisables suite à un événement d'inondation requiert, à notre sens, les conditions suivantes:

- une structuration et définition des informations recherchées, avec une intervention forte par un organisme centralisé;
- des moyens humains spécifiques et formés, pour assurer le recueil ou en assurer une supervision détaillée;
- un archivage systématique de toute information dès le début de la crue;
- un suivi continu de l'inondation et de ses conséquences (relations avec les organismes détenteurs de données) jusqu'au moment d'un recueil global d'informations, suffisamment différé par rapport à l'événement lui-même.

Ces quelques idées générales ne sauraient en aucun être suffisantes pour définir une procédure de recueil d'informations a posteriori.

Si l'on souhaite, au travers d'une telle opération de collecte d'informations, analyser finement les dommages à différents types de parcelles ou de bâtiments pour transposer ces éléments à d'autres inondations potentielles, voire à d'autres sites, cela suppose de collecter des données détaillées et très structurées (Günther et Niekamp, document non daté). La partie B de ce mémoire illustre les exploitations qu'il est alors possible de faire de telles données (base de données constituée par le CERGRENE pour la Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'Environnement; Bagherzadeh-Borner, 1985; Torterotot, 1988), et les limites de ces exploitations. On évoque par exemple les difficultés liées à l'échantillonnage, et au délai écoulé entre l'inondation et l'enquête ("recueillir un bilan complet et pondéré, mais avant qu'il ne soit oublié").

III. LES POLITIQUES DE GESTION DU RISQUE D'INONDATION FLUVIALE ET LEUR EVALUATION

On appellera "politique de gestion du risque d'inondation fluviale" toute décision, programmation d'action ou action ayant pour objectif de modifier le risque d'inondation: conditions d'implantations en zone inondable, annonce de crue, protections individuelles ou collectives, contrôle des débits de crue... De telles décisions peuvent intervenir aussi bien en anticipation à long terme (planification), en réaction immédiate à l'événement, ou après l'inondation dans une phase de "retour à la normale" (Howe et al, 1991).

Les évaluations de dommages dus aux inondations ne trouvent leur sens que dans une optique décisionnelle, par rapport à différents modes de gestion du risque. Par exemple, il peut s'agir d'identifier les régions où approfondir l'analyse en priorité, au vu des dommages potentiels, pour permettre des décisions plus rapides que dans les régions moins menacées.

L'objet du présent chapitre est de placer l'évaluation des dommages dans le cadre logique dont elle dépend: l'évaluation des politiques de gestion du risque d'inondation. On commencera par présenter les différents types de modes de gestion, et les raisons qui conduisent à leur évaluation, avant de passer en revue différentes approches d'aide à la décision. Une dernière partie abordera plus spécifiquement les questions de risque et d'incertitude.

III.1. LES MODES DE GESTION DU RISQUE D'INONDATION FLUVIALE

III.1.1. Description et classification

Ces modes de gestion sont nombreux, ils peuvent prendre des formes très variables et sont associés dans des combinaisons multiples. On trouvera par exemple dans le texte de White (1982) une description des politiques menées aux Etats-Unis d'Amérique. Pour le cas français, on se référera à Jacq (1987) et Roche (1989-b), ainsi qu'au BCEOM (1977) pour une analyse prospective antérieure à la mise en place des politiques récentes. Insistons sur le fait qu'il ne faut pas considérer les politiques comme une addition de modes de gestion indépendants, même si notre présentation pourra le laisser penser. White (1964) a montré sur le cas de la ville de La Follette (Tennessee) qu'une combinaison de mesures "non rentables" séparément pouvait être "rentable" globalement.

Les modes de gestion auxquels on s'intéresse ont tous pour objectif de réduire les impacts et les dommages, pour une gamme d'aléa au moins, ou d'en répartir différemment la prise en charge. La description de ces modes de gestion s'est beaucoup appuyée sur une dichotomie "de base", que l'on exprimera dans les termes utilisés pour la schématisation de la figure II.2:

- les mesures structurelles modifient les conditions d'écoulement et de submersion, c'est-à-dire l'aléa;
- les mesures non structurelles modifient les enjeux exposés (en volume, en fragilité), les ressources disponibles pour réduire les impacts (délais d'alerte, moyens humains et matériels...), la répartition des coûts supportés dans le temps ou au sein de la société.

Ainsi, dans les mesures structurelles on compte les modes de gestion suivants:

- maîtrise du ruissellement sur le bassin versant par des mesures extensives (reforestation, pratiques culturelles...);
- diminution de l'intensité des crues par laminage dans des barrages-réservoirs (réduction du débit de pointe, ou de la durée des hautes eaux; ou des deux...); l'écrêtement peut être

réalisé par des barrages gérés en temps réel, en intégrant ou non des prévisions de débits (Roche, 1990);

- recalibrage du lit mineur ou dérivation pour augmenter le débit transité sans débordement;
- endiguements pour protéger des zones contre toute submersion -au moins jusqu'à un débit donné- en contenant l'eau dans un lit moyen; on peut ajouter ici les remblaiements importants sur une partie de vallée.

Toutes ces mesures conduisent à modifier l'aléa, et dans certains cas peuvent s'exprimer directement sur le risque, c'est-à-dire sur la fonction de fréquence des dommages.

Les mesures non-structurelles, par contre, ne modifient pas l'aléa, ou alors par effet induit à la marge. Distinguons les modes de gestion qui modifient la répartition des charges. Les assurances "classiques" permettent pour les sinistrés potentiels de "régulariser" dans le temps une partie des coûts subis. Les autres indemnités (solidarité, régimes d'assurance subventionnés) conduisent à des transferts entre membres de la société. Les autres mesures non-structurelles visent à réduire les impacts et les dommages dans l'absolu:

- modification ou orientation de l'occupation des sols et de leur usage (programmes de zonage, documents d'urbanisme avec ou sans servitudes d'utilité publique);
- règles constructives et mesures individuelles permanentes pour restreindre la valeur ou la "fragilité" des biens exposés (remblais, hauteurs de planchers, choix des matériaux, imperméabilisation des murs...); ces mesures peuvent concerner aussi bien des implantations existantes que futures;
- prévision et annonce de crues, et réponses individuelles ou collectives à la montée des eaux; évacuation, déplacements de biens, obturations d'ouvertures, pompes...; de telles mesures doivent pour certaines faire l'objet d'une préparation ou planification préalables, qui ne peuvent qu'en accroître l'efficacité (Towfighi, 1991);
- secours permettant de limiter les conséquences des impacts immédiats (services de santé, rétablissement d'axes de communication...).

On présente parfois l'information et la sensibilisation de la population exposée comme une mesure non-structurelle. Nous considérons qu'il s'agit là plutôt d'un moyen d'action, d'un instrument, pour inciter à divers modes de gestion du risque.

Ce début de classification ne saurait être considéré comme le seul possible. Ainsi, Siméon (1981) distingue la meilleure utilisation des zones inondables, la réduction des nuisances par rapport à l'état actuel de la zone inondable, la répartition des coûts et charges. El-Jabi et al (1982) proposent, pour leur part, de classer les modes de gestion en ouvrages d'art (mesures structurelles), en prévision et prévention, en aménagement rationnel des zones inondables (zonage, information, assurance...). Dachary (1990) divise les mesures non-structurelles en fonction du facteur temps, entre l'adaptation et la réparation (après l'événement).

En se basant sur les réflexions présentées par Yevjevich (1992) et Green et al (1993), on peut proposer un ensemble de critères permettant de classer les modes de gestion du risque d'inondation fluviale:

- mode d'action: modification de l'aléa, des enjeux exposés, des ressources, de la répartition des coûts; il ne faut pas oublier l'alternative du statu quo ("supporter les coûts", pour certains auteurs);
- partage des tâches: action collective, action individuelle, action individuelle avec aides et/ou incitations (par des outils économiques, des outils réglementaires, par un apport d'information...);
- phasage de l'action dans le temps par rapport à l'événement d'inondation: prévention (occupation des sols, assurances...), correction (barrages, annonce de crues...), réparation (secours);

- gamme de crues pour lesquelles il y a des retombées "positives", "neutres", ou négatives".

Illustrons ce dernier point par quelques exemples pour des mesures structurelles. Un recalibrage de cours d'eau va diminuer le volume d'eau débordant du lit mineur, pour toutes les crues (l'effet relatif pourra être faible, mais pas négatif localement). Un barrage écrêteur de crue aura a priori un effet toujours positif, pour peu qu'il ne se rompe pas et qu'il agisse sur les paramètres sensibles en regard des dommages: débit maximal et/ou durée. S'il s'agit de digues locales non insubmersibles, les crues les plus fortes auront des impacts amplifiés par la brutalité de la submersion, voire par le fait que l'évacuation de l'eau en fin de crue sera retardée. C'est pourquoi Green et al (1993) recommandent d'analyser toute la gamme possible des événements de crues, pour évaluer une politique, et de prêter une attention particulière aux modes de gestion qui ne présentent pas de *graceful failure*, c'est-à-dire pour lesquels l'action destructrice est renforcée pour les crues dépassant la "capacité", le "dimensionnement".

III.1.2. Pourquoi évaluer les modes de gestion des inondations ?

La mise en place de l'un ou de plusieurs des modes de gestion décrits plus haut va se traduire par des conséquences multiples, parmi les suivantes:

- modifier le risque actuel, c'est-à-dire la relation liant la fréquence aux impacts (ou aux dommages) de toutes natures;
- modifier l'évolution de l'occupation des sols, donc le risque futur et la production nette d'utilité de la zone inondable; ceci sera dû à la modification de l'aléa, ou sera une conséquence directe du mode de gestion (zonage, règles constructives...);
- modifier la répartition des coûts entre les individus, et/ou dans le temps;
- utiliser des ressources financières (investissements, fonctionnement), spatiales (surfaces occupées par les mesures structurelles), environnementales (consommation de ressources naturelles, modifications d'écosystèmes et de paysages).

Etant donné que les ressources économiques, sociales et environnementales dont on dispose sont limitées, tout mode de gestion des inondations va avoir à la fois des retombées positives et des retombées négatives, qui vont bien au-delà des impacts des inondations dont nous nous préoccupons ici. Par conséquent, toute décision nécessite un arbitrage, individuel ou collectif.

Il faut souligner que, dans la plupart des cas, le problème se pose à l'échelle collective, et dans le cadre de la politique publique. Davis (1988) présente les facteurs qui empêchent le secteur privé de prendre en charge différents modes de gestion (en particulier les mesures structurelles):

- le manque d'information du public pour prendre des décisions qui soient "rationnelles" sur un marché;
- l'incapacité du marché à réaliser des économies d'échelle, et la difficulté à mobiliser des capitaux très importants;
- le caractère de bien ou service collectif, dans la mesure où on ne peut pas exclure des bénéficiaires de certaines mesures;
- l'existence de nombreux effets externes, positifs ou négatifs.

Ces différentes considérations, et l'ampleur potentielle des retombées d'une gestion des inondations, ont conduit différents Etats à imposer des procédures d'évaluation (Buck et Lee, 1980). Ainsi, tout projet d'aménagement des cours d'eau doit faire l'objet d'une évaluation économique au Royaume-Uni (Parker et Penning-Rowsell, 1972; Henry, 1984) ou en Autriche (Danninger et Waldner, 1983). En fait, la planification et le dimensionnement de mesures structurelles comme les barrages ou les digues ont contribué au développement même de l'évaluation économique de projet, et constituent des cas d'application privilégiés (voir aussi van Dantzig, 1956, pour les digues côtières; Michel, 1976, pour la sécurité d'un barrage).

Mais d'autres modes de gestion intègrent l'évaluation économique dans leur conception: les assurances inondation encadrées par la FIA (Federal Insurance Administration, aux Etats-Unis), les Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles d'inondations, dont les délimitations spatiales et les mesures imposées s'appuient sur une étude de vulnérabilité (loi du 13 juillet 1982; Caude, 1987; Caude, 1988-a; DRM, 1990).

Dans ce domaine, l'historique le plus important est vraisemblablement celui des Etats-Unis d'Amérique (voir White, 1964; HEC, 1980; Rosen et Reuss, 1988; Shabman, 1988; Greely-Polhemus Group, 1991). Dès 1913, une analyse coûts-avantages est menée pour l'aménagement du bassin de la Miami River, l'avantage de la protection étant estimé par la variation de valeur foncière, et servant de clé de répartition des financements. Puis ce sera le tour de la Muskingum River, plus célèbre pour le modèle hydrologique qui y sera développé. La première loi fédérale définissant les partages des responsabilités et des financements, en matière d'inondations, date de 1917. Elle établit la variation de valeur foncière comme critère économique.

En 1936, dans le cadre du *New Deal* du Président Roosevelt, le célèbre *Flood Control Act* établit les conditions d'intervention technique (par le US Army Corps of Engineers) et financière de l'Etat fédéral pour les mesures structurelles: *if the benefits to whomsoever they may accrue are in excess of the estimated costs*. La méthodologie d'évaluation sera progressivement définie: les avantages seront d'abord considérés comme la somme des variations des valeurs foncières et des dommages (ceci constituant un double compte), en 1958, puis comme la variation d'utilité de la zone inondable (réduction des dommages, intensification...). Les avantages et coûts non-marchands seront également intégrés, et l'évaluation sera menée en adoptant un point de vue collectif fédéral (l'intérêt régional d'un projet étant différent de l'intérêt national).

Dans la partie qui suit, nous présentons rapidement diverses grandes méthodes d'aide à la décision, telles qu'elles ont été appliquées ou pourraient l'être aux modes de gestion du risque d'inondation.

III.2. L'AIDE A LA DECISION

III.2.1. Les méthodes d'aide à la décision

On peut décomposer la planification et la mise en oeuvre de modes de gestion du risque d'inondation (ou d'autres politiques, d'autres projets) selon les étapes suivantes (McAllister, 1980):

- identification du problème;
- conception de solutions alternatives (modes de gestion);
- évaluation (formalisée ou non) des alternatives;
- décision à travers un processus politique approprié;
- mise en oeuvre;
- mesure et analyse des résultats et des conséquences.

Même si l'évaluation n'est explicite que pour la troisième phase, elle intervient également ailleurs et peut influencer tout le processus.

Evaluer une politique ou un projet de gestion du risque d'inondation, c'est analyser dans quelles mesures les changements induits prévisibles nous rapprochent ou nous éloignent des objectifs

fondamentaux, par rapport à une situation de référence. Il faut ici insister sur deux aspects de cette définition:

- toute évaluation est subjective et repose sur des choix de valeurs; elle doit être cohérente avec les objectifs essentiels poursuivis par le décideur ou la communauté qu'il représente (efficacité économique, équité...; Tribus, 1972; Ray, 1984, Ward et al, 1991);
- toute évaluation est une comparaison à une situation de référence, correspondant préférentiellement au choix passif "ne pas mettre en oeuvre de nouvelle mesure", mais en considérant le cas échéant l'évolution possible (principe "with-without"; Howe, 1971; Squire et van der Tak, 1975).

Toute décision prise pourra conduire à un nouveau niveau de risque, que l'on qualifie souvent de "risque acceptable" (Fischhoff et al, 1981; Green, 1986-b): cette notion n'a rien d'absolu, le risque n'est acceptable que dans la mesure où il résulte d'un arbitrage entre les retombées positives et les inconvénients d'un mode de gestion du risque. A ce titre, le "risque acceptable" repose sur des jugements de valeur dont il faut bien être conscient.

La rapide présentation de méthodes qui suit se base notamment sur les synthèses de McAllister (1980), Fischhoff et al (1981), Parker et al (1987), Pearce et Markandya (1989).

Approches synthétiques

Une approche assez courante, dans le domaine des risques, est l'application d'une expertise individuelle (ou par un petit groupe). Pour des problèmes routiniers ou fréquents, cette approche bénéficie d'un retour d'expérience important et est légère de mise en oeuvre. Cependant, elle comporte des biais par rapport à la poursuite d'objectifs collectifs, dans la mesure où elle est mise en oeuvre par un nombre restreint de personnes qui partagent une formation, des pratiques professionnelles, voire des valeurs qui ne sont pas nécessairement représentatives des aspirations collectives.

Que cela se fasse par le biais de l'expertise professionnelle ou par d'autres approches, il arrive que la question du risque acceptable soit posée directement en terme de fréquence pour un niveau de sécurité, de protection. Peerbolte (dans EUROFLOOD, 1993; Peerbolte, 1993) discute le problème de la fixation d'une norme pour la sécurité des digues côtières. Dans l'optique de la fixation d'un seuil de débit ne devant pas être dommageable, Consuegra Zammit (1992) a développé une approche permettant de planifier des mesures structurelles cohérentes (sur le plan hydrologique) à différentes échelles d'espace sur un bassin. Mais il reste la difficulté de fixer *ex abrupto* une fréquence ou un niveau de sécurité, quand on considère la grande complexité des retombées d'un projet, face à des objectifs collectifs multiples.

Pour certains risques, notamment l'exposition à des produits toxiques, on utilise aussi la méthode du "bootstrapping" (Fischhoff et al, 1981), qui consiste à rechercher un niveau d'exposition considéré normal, tel qu'il existerait dans la nature, ou tel qu'il aurait été stabilisé au fil des siècles en un équilibre supposé acceptable. Cet exemple illustre la nécessité de bien faire apparaître le caractère purement subjectif de toute fixation a priori d'un seuil de sécurité ou de protection.

Analyses formelles

Ces approches se basent sur des fondements logiques et explicites, en structurant une question posée, en la décomposant et en l'analysant autant que possible pour arriver à des éléments qui puissent être appréhendés (énumération et quantification des retombées d'une action, par exemple), puis en synthétisant les résultats en un ensemble compréhensible. Ces méthodes sont nombreuses (voir aussi Jones-Lee, 1984, en plus des auteurs déjà cités):

- analyse coûts-avantages;
- analyse coûts-efficacité;
- analyse risque-avantages;

- analyse décisionnelle;
- analyse multi-critère;
- étude d'impacts.

En matière de gestion du risque d'inondation, les méthodes qui sont recommandées et appliquées sont l'analyse coûts-avantages (ACA; elle constitue une démarche obligatoire dans certains pays) et l'analyse multi-critère (AMC).

L'ACA compare les coûts et avantages économiques, considérés par comparaison avec une situation de référence, exprimés dans une unité monétaire, et ramenés à une valeur équivalente à la date actuelle (actualisation). L'ACA la plus courante considère un cadre économique néo-classique (voir le chapitre II), avec pour objectif l'efficacité économique. Des méthodes présentées notamment par Squire et van der Tak (1975), Ray (1984) ou Ward et al (1991) permettent de prendre en compte des objectifs d'équité (répartition des revenus), de structures de préférences par rapport au temps (arbitrage entre consommation et investissement). Un projet ou une politique sont jugés sur un critère unique, le bénéfice net actualisé.

Il faut noter que divers éléments de méthode et de mise en oeuvre de l'ACA relèvent de choix de valeurs, et constituent des enjeux entre acteurs du processus de décision (Henry, 1984; 1989). Green (1986-b) souligne les difficultés qui séparent la justesse théorique de l'ACA de la faisabilité pratique (voir aussi Mermet et Grandjean, 1987). Certains auteurs distinguent une ACA "économique", ne visant que l'efficacité économique, une ACA "sociale" intégrant les objectifs d'équité (actuelle et intergénérationnelle, par le biais de l'investissement), ainsi qu'une ACA "financière" dans laquelle les valeurs sont définies comme les flux monétaires correspondant aux échanges sur un marché réel.

L'AMC, quant à elle, quantifie des coûts et avantages d'un projet ou d'une politique par des grandeurs monétaires ou non, différentes méthodes étant utilisées par la suite pour normaliser les différentes unités considérées, puis pour donner des classements entre les situations que l'on compare (voir par exemple l'analyse critique de van der Veen et Wierstra, dans EUROFLOOD, 1993). L'intérêt certain de l'AMC réside dans le fait qu'elle peut intégrer une multiplicité de critères, et donc de natures d'impacts (DVWK, 1985; Buck et Pflügner, 1991). Un cas particulier concerne l'approche MOPE (Multiple-Objective Planning and Evaluation; Howe, 1971; Pflügner, 1984). Cette approche considère non seulement plusieurs critères, mais aussi plusieurs objectifs (représentés chacun par un jeu de critères), afin de constituer une aide à la décision et un support au débat. Si l'AMC est plus "complète" que l'ACA, sa formalisation masque une partie des choix de valeurs qui sont au moins aussi importants.

Expressions directes des choix individuels

Les méthodes évoquées jusqu'ici sont caractérisées par le fait que leur mise en oeuvre est concentrée entre les mains des détenteurs d'un savoir ou d'une représentation collective. Au contraire, dans le processus de décision décrit par Shabman et Stephenson (1992), un projet de protection contre les inondations a fait l'objet d'un référendum auprès de l'ensemble de la population d'une ville, afin d'arbitrer entre les avantages d'une protection d'une part, son coût financier (répercuté sur les impôts locaux) et les impacts environnementaux d'autre part.

La méthode d'inondabilité, proposée par le CEMAGREF (Gautier, 1991; Oberlin et Lambert, 1991; CEMAGREF, 1992), intègre également les préférences individuelles qui sont explicitées au travers d'une "norme" d'exposition à l'aléa ("besoin de protection", basé sur un triplet de valeurs fréquence, durée et hauteur). A l'échelle de chaque parcelle, ce seuil d'exposition demandé est cartographié pour être confronté au niveau d'exposition ("risque d'inondation") dans la situation actuelle ou pour différents scénarios d'aménagements. Cette approche constitue un outil d'aide à la conception de mesures de prévention et de protection face aux contraintes hydrauliques ("ajouter" de l'eau là où cela est possible, pour en enlever là où cela est nécessaire), et un outil de participation à la décision orienté vers la recherche d'un consensus. Cette approche peut s'articuler dans une démarche de gestion intégrée d'un cours d'eau.

III.2.2. Choisir une méthode

En se basant sur les travaux de McAllister (1980) et Fischhoff et al (1981), on peut proposer les critères suivants pour choisir une méthode d'aide à la décision:

- caractère complet (intégrant les facteurs influents) et systématique;
- cohérence logique;
- caractère explicite, ouverture à l'évaluation;
- facilité de mise en oeuvre (simplicité, délai, coût...);
- acceptabilité politique;
- acceptabilité légale, compatibilité institutionnelle;
- démarche d'apprentissage intégré.

Une décision repose nécessairement sur des valeurs et conduit nécessairement à des arbitrages économiques et sociaux en face de ressources limitées (Moatti, 1989). Il est donc important de pouvoir expliciter les valeurs, et bien les distinguer des faits. Par ailleurs, l'explicitation de l'analyse permet de limiter certains problèmes comme l'arbitraire de standards de protection, la non prise en compte d'adaptations possibles pour un projet ou pour une politique ... (Henry, 1989).

Ces diverses raisons, et le fait qu'elles peuvent permettre l'ouverture des processus décisionnels à la participation, nous amènent à préférer les analyses formelles dans le cas général. Nous n'entrerons pas ici dans le débat qui oppose les partisans de l'analyse coûts-avantages et les défenseurs de l'analyse multi-critère. L'ACA et l'AMC permettent toutes deux de prendre en compte des préférences et valeurs différentes pour différents décideurs. Les impacts exprimés comme coûts et avantages monétaires prennent-ils un poids plus important dans la décision (Carter et al, 1992)? Peut-on et doit-on tout ramener à une valeur monétaire?

Quelles que soient les réponses apportées à ces questions, il est important d'analyser tous les effets majeurs d'une politique et d'un projet, sous peine de les voir négliger (Penning-Rowsell, 1991). Ceci est plus important que le degré de précision de l'évaluation (Squire et van der Tak, 1975). Il faut renvoyer ici au problème particulier des impacts intangibles, évoqués dans les chapitres précédents. Même si des membres de la société considèrent des impacts comme non "valorisables", "échangeables" ou "quantifiables", la collectivité devra arbitrer globalement, en prendre en compte ces impacts au moins de façon implicite.

On a omis jusqu'ici deux caractéristiques auxquelles est confrontée toute décision en matière de gestion du risque d'inondation: l'incertitude sur l'évaluation des impacts des inondations ou sur l'évaluation de la décision elle-même, et le caractère aléatoire du risque. Ces points seront développés en III.3.

III.2.3. Quelques exemples d'évaluations

On mentionne ici quelques travaux illustrant l'évaluation économique ou financière de différents modes de gestion du risque d'inondation. On omettra les analyses de mesures structurelles, très répandues, et celles des systèmes de prévision et d'annonce des crues, qui font l'objet de considérations plus détaillées dans le chapitre V. Signalons les analyses macro-économiques menées sur le cas particulièrement sensible du Bangladesh, où le risque d'inondation et les projets d'aménagement constituent des enjeux d'une importance nationale évidente (Gagey, 1989; Maurice et Schubert, 1989-a; 1989-b).

Le choix du mode d'occupation des zones inondables, et la conception de réglementations d'urbanisme et de construction ont fait l'objet de nombreux travaux, visant à optimiser le niveau d'exposition des enjeux par rapport à la production des parcelles inondables (Day, 1970; Brown, 1972; Brown et al, 1972; Bialas et Loucks, 1978; Leblanc et Ouellette, 1988; Ouellette et al, 1988). Comme le recommandent les Nations Unies (ONU, 1978), les procédures françaises de réglementation des sols

intègrent des éléments économiques au travers de l'analyse de vulnérabilité (Caude, 1988-a; SAGERI, 1988; DRM, 1990).

Flack (1978), et Debizet et Caude (1986), évaluent les effets financiers de diverses mesures de réduction des dommages sur l'habitat.

Schaake et Fiering (1967) et Friedman (1984) présentent des simulations de programmes d'assurances "inondation", destinées à en évaluer le fonctionnement financier. C'est une question d'autant plus importante que des catastrophes comme les inondations sortent du champ habituel de l'assurance, car elles sont susceptibles de provoquer de grandes concentrations de sinistres dans le temps et dans l'espace.

Mentionnons pour finir des cas plus rares d'analyses multi-critères, telles celles présentées par Reitano et Rossi (1992) pour différents modes de gestion du risque d'inondation, en intégrant les impacts économiques, environnementaux et sociaux. L'objectif des AMC menées par Ayed (1985) et Horn (1987) est par contre d'identifier des zones prioritaires pour mettre en place différentes mesures (des Plans d'Exposition aux Risques, dans le cas de Ayed). Ces analyses intègrent chacune un grand nombre de variables, dont les caractéristiques des crues, les dommages observés ou indemnisés (en valeur absolue, ou en densité spatiale), les enjeux exposés et/ou leur évolution prévisible, les mesures déjà en place, l'exposition simultanée à plusieurs risques naturels...

III.3. FACE A LA PRISE DE DECISION: LE RISQUE ET L'INCERTITUDE

Jusqu'ici, on a évoqué différentes méthodes d'aide à la décision, sans se préoccuper de deux questions qui sont majeures dans le domaine qui nous concerne:

- l'incertitude sur la connaissance des retombées des modes de gestion du risque d'inondation; en particulier, et comme on l'illustrera dans les parties B et C de ce mémoire, les estimations de coûts de dommages présentent des incertitudes parfois très importantes (connaissance des effets des inondations, variabilité due par exemple au facteur humain, techniques d'estimation...);
- le risque; par nature, les événements d'inondations et les impacts (ou les dommages) engendrés sont aléatoires en occurrence et en intensité; ainsi en est-il également des dommages évités, qui entrent dans les critères d'évaluation d'une politique ou d'un projet.

Si les mêmes outils statistiques sont parfois employés pour traiter de l'incertitude et du risque, il faut bien distinguer les grandeurs déterministes incertaines des grandeurs aléatoires, stochastiques (Macgilchrist, 1985; Bernier, 1990; Lund, 1991):

- le premier cas correspond à une connaissance imparfaite de phénomènes ou grandeurs déterminés et univoques (actuels ou futurs); dans certains cas, on peut faire une détermination approchée d'une grandeur incertaine avec des hypothèses sur la distribution statistique de notre "connaissance" par rapport à la réalité (approche Bayésienne; Bernier, 1990); l'incertitude peut être réduite par l'apport d'informations;
- le second cas correspond à des phénomènes ou grandeurs dont on ne peut connaître que le comportement probabiliste, éventuellement sous la forme d'une loi de probabilité analytique (cette connaissance peut être incertaine...); par contre, on ne peut prévoir ni la date d'occurrence, ni l'intensité du prochain événement; le caractère aléatoire, en l'occurrence ici le risque, ne peut être réduit par un apport d'informations.

Lund (1991) illustre le fait qu'un modèle stochastique appliqué à l'une ou l'autre de ces situations n'apporte pas la même information pour la décision, dans la mesure où l'aléa n'est pas réductible, alors que l'incertitude peut l'être dans l'avenir.

L'incertitude et le risque (ou de façon plus générale l'aléa) représentent deux sources différentes d'éléments non connus, non maîtrisés. Selon la valeur que révéleront les grandeurs encore incertaines aujourd'hui, selon l'occurrence et l'intensité des inondations à venir (trois crues rares en

vingt ans, ou au contraire aucune inondation grave en quatre-vingts ans...), une politique ou un projet pourront afficher un bilan a posteriori "positif" ou "négatif". Toute la question est de prendre une décision aujourd'hui, l'attente ou le report de décision constituant des décisions véritables (on décide alors qu'il vaut mieux attendre plutôt que prendre une décision aux retombées trop incertaines).

Face à cela, la question posée est de prendre une "bonne" décision, par rapport aux connaissances disponibles. Les résultats de la décision peuvent se révéler "mauvais" en fonction de la levée de l'incertitude et des manifestations de l'aléa, mais cette éventualité même est prise en compte dans la "bonne" décision qui ne peut pas être jugée au vu d'informations postérieures (Tribus, 1972; Howard, 1983). *A good decision is one based on the information, values and preferences of a decision-maker. A good outcome is one that is favourably regarded by a decision-maker* (Matheson et Howard, 1983).

On peut considérer que le risque constitue une forme d'incertitude sur les événements à venir, et par conséquent le traiter comme tel, avec une similitude au moins partielle de critères ou d'approches. Cependant, il nous faut insister à nouveau sur le fait que le risque est une incertitude non réductible. Ceci interdit par exemple d'employer une approche comme l'analyse pré-postérieure, dans laquelle une décision est évaluée par rapport à la décision qui serait prise en situation d'information parfaite ("espérance a posteriori du regret"; Davis et Dvoranchik, 1971; Davis et al, 1979; Bernier, 1990). De même, le risque ne peut être traité dans le cadre d'approches itératives visant à "optimiser" le recueil et l'usage d'informations.

Notons que dans la suite de ce chapitre nous raisonnons sur des critères quantitatifs (dommages, ou fonctions objectif), quelle que puisse être leur unité.

III.3.1. Prendre en compte l'incertitude

De nombreux auteurs insistent sur la grande nécessité de prendre en compte les incertitudes dans l'évaluation, sans se contenter de considérer des situations moyennes (mais en considérant si possible la distribution statistique sur le critère), et en prenant garde aux dépendances qui peuvent exister entre sources d'incertitudes (voir notamment les chapitres X et XI; Squire et van der Tak, 1975; Henry, 1984; Ray, 1984; OCDE, 1985). L'incertitude est un facteur d'autant plus important que la décision peut induire des irréversibilités de diverses natures (Henry, 1984; Riebsame, 1991). La souplesse d'une politique ou d'un projet, c'est-à-dire sa capacité d'adaptation et d'évolution, constitue un élément de réponse à la situation d'incertitude.

En situation d'incertitude sur un critère de choix (fonction objectif), Macgilchrist (1985; 1988) propose divers types de décisions, en fonction des informations disponibles et des préférences du décideur:

- maximiser le bénéfice maximal envisageable: MAXIMAX;
- maximiser le bénéfice minimal envisageable (cela peut revenir dans certains cas à minimiser la perte maximale): MAXIMIN;
- maximiser le bénéfice en moyenne;
- minimiser le regret, c'est-à-dire minimiser la perte maximale par rapport à une décision pour laquelle on disposerait d'une information parfaite.

Des approches Bayésiennes

C'est ce dernier critère qui est considéré dans les approches Bayésiennes déjà mentionnées. Ces approches supposent déterminées des probabilités subjectives décrivant la connaissance de la réalité à partir des informations connues, par exemple une loi de probabilité sur la valeur d'une variable non mesurable.

Si on définit la perte d'opportunité comme la différence de valeur d'une fonction objectif (bénéfice net d'un projet, nombre de vies épargnées...) entre les situations "information réelle" et "information parfaite", on peut estimer l'espérance de cette perte d'opportunité, appelée "regret a

posteriori" (*expected opportunity loss*). C'est bien cette valeur que l'on cherche alors à minimiser. Dans ce cadre d'analyse, on peut définir la valeur d'une information nouvelle comme la diminution de l'espérance du regret a posteriori (diminuée du coût de la production d'information). En extension de cette approche, Davis et Dvoranchik (1971) déterminent la valeur d'une information future potentielle, à partir d'une estimation de sa loi de probabilité et par là de l'espérance de valeur de l'information future.

A priori, toute information nouvelle va réduire l'espérance de regret a posteriori. Cependant, Davis et al (1979) ont montré que ceci n'est vérifié que lorsque le modèle de décision n'est pas biaisé, et est optimal par rapport à l'information dont on dispose et que ce modèle de décision utilise.

Bernier et Miquel (1979) montrent, dans le cas des protections structurelles contre les crues, que les incertitudes conduisent à retenir un niveau de sécurité plus important que dans le cas d'une information "parfaite" et identifiée comme telle. Il faut noter que ces approches Bayésiennes supposent la détermination de lois de probabilités subjectives. D'autres approches essaient de s'appuyer sur des hypothèses moins restrictives, comme la méthode *Bayesian robustness* ou la méthode Dempster-Shafer (Caselton et Luo, 1992).

L'analyse de la décision "decision analysis"

L'analyse de la décision est une approche née de l'analyse systémique et de la théorie de la décision statistique (Howard, 1983; Matheson et Howard, 1983). Elle vise à répondre aux problèmes de décisions qui intègrent des incertitudes importantes, des horizons de temps lointains, et des valeurs multiples et complexes. Cette approche passe notamment par une expression quantitative des préférences lorsque l'on compare des retombées:

- de nature différente;
- échelonnées dans le temps;
- incertaines.

L'analyse de la décision est une démarche itérative qui s'appuie sur une modélisation numérique décrivant les conséquences d'une décision en fonction des variables incertaines, et estimant la valeur attribuée à ces conséquences. En affectant des lois de probabilité aux variables incertaines, il devient alors possible de simuler les différentes situations possibles en probabilité, et d'en déduire une loi de probabilité du bilan de la décision (bénéfice net actualisé, par exemple). On se retrouve ainsi placé dans une situation de risque (le phénomène aléatoire étant le bilan de la décision). Au travers d'un modèle économique des comportements en situation de risque (voir III.3.2), l'analyse de la décision attribue une valeur unique à une décision, dans une situation d'information donnée.

En analysant la sensibilité de cette valeur à la précision sur les variables incertaines, il devient possible de définir une stratégie de recueil d'informations supplémentaires; et d'itérer la démarche jusqu'à ce que la valeur de toute information supplémentaire soit inférieure au coût d'obtention. La modélisation peut et doit évoluer en fonction de l'ajout d'informations: *there is no such thing as a final or complete analysis; there is only an economic analysis given the resources available* (Howard, 1983). N'oublions pas qu'il n'existe pas d'information parfaite dans l'absolu.

III.3.2. Prendre en compte le risque

Critères et méthodes

On définit une situation générale de risque par la distribution statistique des valeurs prises par une fonction objectif, par exemple le coût des dommages évités grâce à une politique ou à un

projet, ou le coût résiduel des dommages. Pour une décision en situation de risque, Macgilchrist (1985; 1988) propose les critères suivants:

- la maximisation de l'espérance statistique de "gain"; ce critère suppose notamment que le décideur ait une attitude neutre face au risque (un gain de 1 avec la probabilité 1 étant alors équivalent à un gain de 100 avec la probabilité 0,01; de même pour les pertes...);
- la minimisation de la probabilité de ruine (correspondant à un seuil de pertes);
- l'utilité face au risque, issue des modélisations des comportements économiques en univers risqué; ces concepts s'appuient sur les théories développées par Von Neumann et Morgenstern, puis Savage, ainsi que sur les approfondissements et critiques développés par la suite (Maurice et Schubert, 1989-a; Munier, 1989-a; 1989-b); ces travaux visent à représenter les perceptions et préférences individuelles face à des situations de risque, en fonction de l'utilité attribuée à des gains ou pertes aléatoires.

Nous n'entrerons pas plus avant dans des considérations théoriques qui dépassent largement le cadre de ce travail, et nous limiterons à quelques commentaires moins formalisés.

Prendre en compte la fréquence

En s'intéressant au coût des événements d'inondation, ou à la réduction de ces coûts, on considère le plus souvent une variable aléatoire présentant une très forte dispersion relative. Pour le cas des Etats-Unis d'Amérique par exemple, Holmes (1961) présente cette très grande variabilité des bilans de dommages. En estimant un coût moyen annuel, ou un bénéfice moyen annuel, on agglomère donc des valeurs très différentes, en multipliant notamment des coûts très forts par des probabilités très faibles.

Cela repose implicitement sur l'hypothèse que, même pour les événements très rares, le coût estimé représente effectivement le poids collectif de l'événement d'inondation, y compris à l'échelle macro-économique. Et le calcul d'une valeur moyenne annuelle suppose également que la société dans son ensemble ait une attitude neutre face au risque (Maurice et Schubert, 1989-a).

Face aux doutes que soulèvent ces deux hypothèses, des auteurs proposent de "fractionner" la gamme des phénomènes d'inondation, en fonction de leur fréquence et de leur coût. Ainsi, Garola-Giuglaris (1984) propose de restreindre la notion d'espérance de coût aux événements assez fréquents, suffisamment "répétitifs", et de traiter les événements plus rares et plus intenses dans la logique de l'incertitude (voir III.3.1), du fait de notre méconnaissance partielle et du fait de leur rareté. L'approche PMRM (*Partitioned Multi objective Risk Method*; Karlsson et Haines, 1988-a; 1988-b; Haines et al, 1992) distingue plusieurs "tranches" de fréquence, sur chacune desquelles est estimée une espérance (partielle) de coût. Ces différentes espérances, représentatives respectivement des coûts fréquents, moyennement fréquents... jusqu'à très rares, sont ensuite intégrées au sein d'une procédure multi-critère.

Quelle que soit la façon dont on le formalise, il est important de pouvoir prendre en compte non seulement le comportement moyen, qui correspond à la meilleure "prévision" que l'on puisse faire, mais aussi la dispersion ou des valeurs "extrêmes". Ainsi, Thampapillai et Musgrave (1985) proposent des approches pour évaluer et "dimensionner" différents modes de gestion des inondations, en intégrant à la fois l'espérance et la variance des coûts ou réductions de coûts.

Ceci est d'autant plus important si, dans l'évaluation a priori d'un projet ou d'une politique, on actualise les "gains" futurs. En réduisant la valeur d'un même gain selon qu'il est éloigné dans le temps, on réduit de fait la durée sur laquelle est évaluée la décision, et donc l'effet de moyenne sur les différentes inondations à venir.

Un exemple simple

Considérons l'exemple d'une mesure ou d'une politique, mise en oeuvre sur une durée de N années, dont nous représenterons les coûts par un investissement initial I et un coût de fonctionnement F_i sur l'année i, les avantages par des réductions de dommages que l'on posera égales en valeur à G_i

sur l'année i . On peut supposer connaître I , N et F_i , mais pas G_i . Si r est le taux utilisé pour une actualisation "classique", le bilan de la mesure évaluée se traduit par le bénéfice net actualisé (BNA):

$$\text{BNA} = -I + \sum_{i=0}^N \frac{G_i - F_i}{(1+r)^i} \quad (1)$$

Selon que les aléas du climat conduisent à de fortes ou à de faibles valeurs de G_i dans les premières années, le BNA (supposé ici sans incertitude autre) prendra des valeurs très différentes. C'est pourquoi il faut non seulement considérer l'espérance statistique du BNA, mais aussi sa distribution statistique (BCEOM, 1967; Bernier, 1979; Rousselle et al, 1990; Moser, 1992-b).

Si l'on suppose que le nombre annuel d'inondations et la réduction de coût de chaque inondation sont des variables indépendantes, de moyennes respectives n et g et d'écart-types respectifs σ_n et σ_g , alors G_i suit une distribution d'espérance $GMA = n.g$ et de variance (Bernier, 1979):

$$\sigma^2 = n \cdot \sigma_g^2 + g^2 \cdot \sigma_n^2. \quad (2)$$

Avec ces hypothèses, le bénéfice net actualisé (BNA) a une espérance et un écart-type respectivement égaux à:

$$-I + \sum_{i=0}^N \frac{GMA - F_i}{(1+r)^i} = -I + (GMA - F) \frac{1+r - (1+r)^{-N}}{r} \quad \text{pour } F_i = F \text{ constant} \quad (3)$$

$$\sqrt{\sum_{i=0}^N \frac{\sigma^2}{(1+r)^{2i}}} = \sigma \sqrt{\frac{(1+r)^2 - (1+r)^{-2N}}{r^2 + 2r}} \quad (4)$$

Pour illustrer le facteur de variabilité sur le BNA, considérons une durée de vie illimitée (N infini), et intéressons-nous uniquement à l'avantage attendu (qui porte toute la variabilité):

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{G_i}{(1+r)^i} \quad (5)$$

d'espérance $GMA \frac{(1+r)}{r}$ et d'écart-type $\sigma \frac{1+r}{r\sqrt{1+2/r}}$.

Pour des taux d'actualisation de 0,05 et 0,10, le coefficient de variation (rapport écart-type sur espérance) vaut alors respectivement $0,16.\sigma/GMA$ et $0,22.\sigma/GMA$. On observe bien que la grande variabilité du coût (et de la réduction de coût) d'une inondation se répercute de façon sensible sur le bilan d'un projet ou d'une politique.

partie B

ANALYSE DES DOMMAGES A ECHELLE ELEMENTAIRE: LE CAS DES DOMMAGES MATERIELS A L'HABITAT

Cette partie du mémoire porte spécifiquement sur l'identification, l'analyse et l'évaluation à échelle élémentaire des dommages directs matériels à l'habitat. On qualifie d'échelle élémentaire ce qui se rapporte à une unité d'occupation des sols: parcelle, bâtiment, commerce ou logement par exemple.

Les dommages à l'habitat constituent l'une des composantes importantes des dommages dus aux inondations, mais pas nécessairement une composante majeure (selon qu'il y a plus ou moins d'infrastructures, d'équipements et/ou d'activités exposés dans une même zone). Cependant, les dommages à l'habitat constituent vraisemblablement la catégorie de dommages la plus étudiée, quantifiée et prise en compte (White, 1964; BCEOM, 1970; Penning-Rowse et Chatterton, 1977; D.V.W.K, 1985; Caude et Debizet, 1986; Handmer, 1986; McBean et al, 1986). Il nous semble que ceci peut être relié à deux facteurs:

- l'importance politique et sociale de ces dommages qui touchent un grand nombre de personnes et qui font l'objet de politiques de prévention et de protection nombreuses et variées; il faut bien noter que ces dommages matériels apparaissent conjointement avec des dommages intangibles (qui n'ont été évalués jusqu'ici qu'à titre exceptionnel) dont ils portent implicitement le poids (et avec lesquels ils sont corrélés);
- la "facilité relative" de l'évaluation de ces dommages, due à une variabilité moindre des biens exposés (et de leur vulnérabilité) par rapport aux infrastructures ou aux industries, due au bénéfice de la "loi des grands nombres" permettant de raisonner sur des moyennes (grand nombre d'unités exposées dans une même zone), due enfin à la familiarité de chacun avec les types de biens exposés et avec les processus potentiels d'endommagement.

Cependant, malgré les nombreux travaux de recherche et de développement réalisés, ce thème soulève en permanence de nombreuses questions et présente des lacunes dans les connaissances (White et Haas, 1975; EUROFLOOD, 1990). Ceci est dû notamment au fait que les dommages dépendent de nombreux facteurs physiques et humains. Non seulement ces facteurs et leurs influences réciproques sont loin d'être tous étudiés, mais encore ceux des facteurs qui sont analysés le sont pour une gamme spécifique de phénomènes: vitesses de courant et charge de l'eau en matières solides, types d'urbanisation... Ceci induit en particulier des difficultés pour la transposition de données de dommages d'une région (physique et humaine) à une autre. Ainsi, le travail présenté dans cette partie du mémoire ne saurait constituer qu'une synthèse partielle et qu'un apport de résultats ponctuels par rapport au vaste champ de recherche qui reste ouvert.

Le premier chapitre de cette partie expose la problématique générale de l'estimation a priori des dommages matériels à l'habitat, et présente les enquêtes réalisées en 1988 auprès de sinistrés sur huit sites: aires d'étude, procédure, résultats critiqués. Le chapitre suivant s'intéresse plus précisément au facteur humain, à son influence partielle sur les dommages et à ses éléments explicatifs. L'inévitable constat de lacunes dans nos connaissances conduit à proposer des orientations pour l'observation et l'analyse de ce facteur humain. Le dernier chapitre, enfin, analyse un champ particulier de la problématique générale, sur la base des données recueillies pour l'habitat individuel lors des enquêtes: quels sont les facteurs qui influencent les réponses individuelles à l'alerte et/ou à la montée des eaux, et comment ces réponses agissent-elles sur les dommages en regard d'autres paramètres explicatifs ?

Les travaux présentés dans les deux premiers chapitres (IV et V) ont bénéficié de soutiens financiers du Ministère de l'Environnement (et des départements ministériels qui l'ont précédé), au travers de la Délégation aux Risques Majeurs et du Service de la Recherche, des Études et du Traitement de l'Information sur l'Environnement. L'analyse présentée dans le chapitre VI s'inscrit dans le cadre du projet de recherche EUROFLOOD (Flood Hazard Assessment, Modelling and Management; voir 1990; 1992; Penning-Rowse et al, 1992), qui bénéficie d'un financement de la Commission des Communautés Européennes (programme E.P.O.C.H, Changement Climatique et Risques Naturels). Que ces organismes et leurs collaborateurs en soient remerciés. Les résultats des travaux de recherche effectués n'engagent que leur auteur.

L'essentiel des réflexions et résultats présentés dans cette partie émane de la réactualisation de documents de recherche du CERGRENE déjà publiés, auquel on priera le lecteur de se référer pour des informations plus détaillées:

- Organisation et réalisation d'enquêtes sur les dommages dus aux inondations, Secrétariat d'Etat à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs et Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement, 1988 (auteur Torterotot J.P.);
- Saisie et contrôle des données d'enquêtes sur les dommages dus aux inondations, Secrétariat d'Etat à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs et Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement, 1989 (auteur Torterotot J.P. et Thomas C.);
- Inondations et facteur humain: quelles orientations pour des observatoires?, Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, 1989 (auteur Torterotot J.P.; version actualisée en 1990);
- Analyse des réponses à l'annonce de crue et impact sur les dommages dus aux inondations dans plusieurs régions de France, projet EUROFLOOD, 1992 (document provisoire, auteur Torterotot J.P.);
- Analysis of individual responses to flood warning and influence on damage in various regions of France, projet EUROFLOOD, 1993 (auteur Torterotot J.P., dans EUROFLOOD, 1993; voir aussi Torterotot, Kauark-Leite et Roche, 1992).

IV. CONNAÎTRE L'OCCUPATION DES ZONES INONDABLES ET LES DOMMAGES A L'HABITAT

... it is only a slight exaggeration to claim that the easiest way of identifying floodplains is to map the locations of sheltered housing for the elderly and mobile home parks...
Green et Penning-Rowse, 1989

Dans ce chapitre, on présente la problématique générale de l'estimation des dommages matériels à l'habitat dus aux inondations, ainsi que des enquêtes effectuées par le CERGRENE sur huit sites, auprès de particuliers et d'entreprises sinistrés.

Ces enquêtes et leur première exploitation ont bénéficié des soutiens financiers du Ministère de l'Environnement, mentionnés précédemment. Le recueil des informations a également bénéficié du précieux soutien opérationnel des Directions Départementales de l'Équipement de Charente-Maritime, de l'Hérault, de Saône-et-Loire, de Seine-et-Marne et de la Vienne. Que ces organismes et leurs collaborateurs en soient vivement remerciés.

Enfin, la réalisation des enquêtes doit beaucoup à la coopération des personnes interrogées, ainsi qu'au travail et aux initiatives de douze enquêteurs: Mesdemoiselles Virginie Guédon, Agnès Pichon, Thérèse Pinçon, Christine Thomas et Messieurs Jean-Yves Bizot, Bernard Bourgue, Patrick Bricard, Eric Bruchet, Franck Cohen-Solal, Robert Davidson, Jean-Louis Perru, Nicolas Vigier. Le dépouillement des données recueillies et une partie de leur saisie informatique ont été assurés avec compétence par Christine Thomas.

IV.1. LES METHODES D'ESTIMATION DES DOMMAGES A PRIORI

IV.1.1. Les dommages matériels à l'habitat

Par dommages matériels à l'habitat dus aux inondations, on entend ici les dommages directs aux bâtiments à usage d'habitation et à leur contenu, non compris les véhicules motorisés. En particulier, on ne s'intéresse pas aux pertes de revenu ou de temps (dommages indirects) qui peuvent dépendre soit de la submersion du logement, soit de celle de ses abords, soit de celle du lieu de travail... Les coûts d'évacuation et de secours ne sont pas non plus pris en compte.

De même, on ne considère pas une catégorie importante de dommages que sont les dommages intangibles (voir I.2) Rappelons que les travaux du Flood Hazard Research Centre sur ces dommages ont permis, suivant une estimation grossière, de proposer d'attribuer aux dommages intangibles une valeur au moins égale à celle des dommages matériels directs, dans la mesure où les deux catégories d'impacts sont ressenties, par les sinistrés, avec des degrés de gravité au moins comparables (Parker et al, 1987; Green, 1988; Green et Penning-Rowse, 1989).

Enfin, on n'inclut pas ici les pertes en vies humaines. Les victimes sont (en France) heureusement rares, et les décès résultent d'enchaînements de circonstances qui rendent les bilans très aléatoires. Le faible nombre de victimes et ce caractère aléatoire sont tels que toute prévision, même à une échelle globale, ne pourrait s'appuyer sur une base crédible.

En ce qui concerne la définition du coût des dommages, on considère qu'il s'agit du coût des fournitures et du travail pour remettre l'habitat dans l'état initial antérieur à l'inondation (O.N.U, 1979, O.C.D.E; 1985). Pour un bien ou un aménagement qui serait remplacé à neuf, il faudrait donc:

- soit substituer "fictivement" au prix d'achat un prix d'achat d'occasion (avec l'ancienneté correspondant au bien initial);

- soit déduire du coût "remise à neuf" l'amélioration dont le sinistré "profite" par rapport à l'état initial, et que l'on peut considérer comme égale à la différence entre la valeur neuve et la valeur résiduelle au moment de l'inondation (vétusté déduite).

Les dommages directs matériels à l'habitat sont dus à différents mécanismes "destructifs":

- l'immersion: dégradation des matériaux, déformation, salissures, dépôts (boues, hydrocarbures, ...);
- l'érosion due au courant (vitesse, charge de l'eau en matériaux érosifs, ...);
- la pression et la poussée: destruction de structures ou de parois, de clôtures..., mais aussi arrachage de cuves vides du fait de la pression hydrostatique, voire déstabilisation de fondations étanches (tout le bâtiment pouvant être "soulevé");
- l'infiltration et l'humidité: capillarité dans les murs au-dessus du niveau de l'eau, pourriture au contact de l'air et de l'eau.

Les paramètres physiques de la submersion, qui donnent lieu à ces divers mécanismes, conditionnent plus ou moins les dommages:

- la hauteur de submersion, par rapport au terrain naturel (dommages aux abords, et au gros-oeuvre) et par rapport aux niveaux du bâtiment (dommages au second-oeuvre et aux biens mobiliers);
- la vitesse de l'eau;
- la durée de submersion;
- la charge de l'eau en sédiments et en substances polluantes (hydrocarbures, par exemple);
- les débris solides transportés (troncs d'arbres...).

Il est évident que les conditions climatiques du moment vont également conditionner la durée de séchage des structures.

Les paramètres de vulnérabilité potentielle définissent d'une part le capital exposé, d'autre part la "fragilité" (en valeur relative) des biens face à différentes conditions de submersion:

- valeur foncière et valeur des aménagements privés extérieurs;
- valeur immobilière des niveaux exposés (gros-oeuvre et second-oeuvre);
- valeur des biens mobiliers dans les niveaux exposés, et position de ces biens en altitude relative;
- vulnérabilité intrinsèque des matériaux; résistance des structures;
- aménagement intérieur prenant plus ou moins en compte le risque (position et protection des réseaux...).

Enfin, les paramètres de réponse humaine conditionnent les modalités et les effets des réactions à l'annonce de crue et/ou à la montée des eaux (Handmer, 1986):

- mode de mise en alerte (annonce par un tiers, observation individuelle, ...);
- délai disponible (en fonction de la brutalité de l'événement, du délai de prévision, de la diffusion);
- attitude face au risque (et à l'alerte): perception préalable du risque, expériences antérieures, degré de préparation, crédibilité accordée à l'alerte, ...;

- réponses face à la montée des eaux: mesures effectivement adoptées (avec des efficacités variables) qui dépendent notamment d'expériences antérieures et de la capacité matérielle à adopter ces mesures (âge, état de santé, nombre de personnes présentes dans le logement...).

IV.1.2. L'estimation des dommages

Dans cette présentation du problème de l'estimation des dommages, on insiste plus particulièrement sur les paramètres physiques et matériels qui en conditionnent la gravité. Les paramètres relatifs au facteur humain seront plus particulièrement analysés dans le chapitre suivant.

Les éléments qu'on expose ici concernent aussi bien la simple analyse des dommages observés que l'élaboration de fonctions de coût de dommages (en fonction de paramètres de submersion, de vulnérabilité potentielle, de réponses humaines). L'élaboration de ces fonctions peut répondre à deux logiques globales différentes (Parker et Penning-Rowse, 1972; Grigg et Helweg, 1975; Handmer, 1986; McBean et al; 1986):

- l'exploitation (en analyse de données) de résultats d'enquêtes sur les coûts réels subis, ou de bilans d'indemnisations (cas le plus fréquent);
- la simulation des coûts à partir d'une représentation de l'habitat (avec une typologie sur l'immobilier et le mobilier) et d'une expertise sur les coûts (Penning-Rowse et Chatterton, 1977; Suleman et al, 1988), ou à partir d'enquêtes sur les coûts potentiels qui se produiraient en cas d'inondation.

Pour les dommages à l'habitat, il apparaît dans la bibliographie que le paramètre de submersion le plus significatif est la hauteur de submersion, qu'elle soit considérée à partir du terrain naturel, ou autant que possible à partir des planchers des différents niveaux de bâtiments (Bhavnagri et Bugliarello, 1965; Penning-Rowse et Chatterton, 1977; El-Jabi, 1980; Debizet et Caude, 1986). Mais, selon des sources citées par Kiefer (1976), la hauteur et la valeur des biens exposés n'expliquent les dommages qu'à 54%.

McBean et al (1988-a; 1988-b) ont cherché à établir des relations entre les dommages et divers paramètres relatifs à la submersion et à la vulnérabilité (vitesse, durée...). Mais ils ont conclu sur le manque de corrélations significatives (à partir de l'échantillon analysé), et sur l'impossibilité d'établir une relation simple liant le dommage à ces paramètres.

Pour prendre en compte la vulnérabilité intrinsèque, la démarche "de base", recommandée et employée par beaucoup d'auteurs, consiste à analyser des coûts relatifs (endommagement) par rapport à la valeur de l'habitat (valeur totale, ou valeur immobilière...; voir Bhavnagri et Bugliarello, 1965; Grigg et Helweg, 1975; Appelbaum, 1985; Debizet et Caude, 1986): les corrélations avec la hauteur de submersion sont plus fortes avec l'endommagement qu'avec le montant absolu des dommages, et de surcroît la prise en compte de l'endommagement permet d'établir, a priori, des relations plus stables dans le temps et plus généralement applicables. Dans certains travaux, on a considéré qu'il existait une proportionnalité entre les valeurs immobilière et mobilière de l'habitat (El-Jabi, 1980).

Cela étant, il faut bien prendre conscience que les valeurs immobilières ne sont pas liées strictement au coût de construction et d'aménagement (donc potentiellement au coût de remise en état), et qu'elles dépendent notamment de facteurs relevant de l'urbanisme et du cadre de vie (Appelbaum, 1985; Donnelly, 1989). Par ailleurs, la prise en considération de coûts relatifs ramenés à la surface au sol (BCEOM, 1990) ou au périmètre extérieur du bâtiment (BCEOM, 1970) n'est pas apparue très prometteuse pour l'explication des coûts.

Quelles que soient les relations ou corrélations analysées pour expliquer les coûts des dommages et éventuellement établir des fonctions de coût, on observe de fortes variabilités des valeurs sur des échantillons réels, variabilités qui ne peuvent être ramenées de façon satisfaisante à un nombre limité de paramètres. De surcroît, si l'on cherche à simuler les dommages sur un site donné, le recueil d'un nombre suffisant de paramètres spécifiques par logement devient rapidement une tâche très lourde. Les paramètres de réponse humaine, que nous aborderons plus loin, ne constituent que l'une des causes de ces variabilités.

Les stratégies d'analyse et de représentation des dommages qui semblent apporter le meilleur caractère explicatif sont les suivantes:

- considérer une typologie assez (ou très) détaillée de l'habitat, qu'il s'agisse d'analyser des résultats d'enquêtes ou d'établir par simulation des fonctions de dommages (Penning-Rowse et Chatterton, 1977; Günther et Schmidtke, 1988; Günther et Niekamp);
- distinguer au moins les habitats avec et sans sous-sol, et détailler les dommages par niveau inondé (Kiefer, 1976; Debizet et Caude, 1986; D.R.E d'Ile-de-France, 1986).

Ces différentes conclusions nous serviront à orienter la quantification des dommages proposée au chapitre VI à partir des enquêtes présentées ci-dessous, et concernant des sinistres dus à des événements réels d'inondations.

IV.2. LES ENQUETES REALISEES

Ces enquêtes ont été réalisées au cours de l'été 1988, auprès de particuliers et d'entreprises ayant subi une inondation au cours des années précédentes, par le fait d'une crue fluviale importante. Dans un objectif d'estimation des dommages, les données recueillies sont de quatre types:

- caractérisation et valeurs des biens et activités exposés; mesures préventives; position des planchers par rapport au terrain naturel;
- paramètres physiques décrivant la submersion par rapport au terrain naturel (en ce qui concerne la hauteur);
- énumération des biens endommagés et chiffrage des coûts;
- alerte et réponses individuelles face à la montée des eaux.

IV.2.1. Les sites d'enquêtes

Les sites d'enquêtes (8 sur 5 départements) sont présentés plus loin avec les événements d'inondation de référence, leur localisation étant indiquée dans la figure IV.1. Les sites ont été choisis sur les critères suivants:

- existence d'un événement d'inondation de référence important dans les années qui précèdent, l'ensemble des événements en question ayant eu lieu entre décembre 1982 et décembre 1987;
- nombre important de bâtiments touchés, avec une densité spatiale suffisante pour faciliter la réalisation d'un grand nombre d'enquêtes (secteurs urbains et péri-urbains);
- variété des régions climatiques, et plus précisément des caractéristiques des crues concernées.

On présente ci-dessous des éléments descriptifs pour les sites retenus et les inondations auxquelles on se réfère.

SAINTES (Charente-Maritime) - fleuve Charente

- crue de la Charente de décembre 1982 (maximum le 24 décembre): période de retour de 100 ans, montée lente des eaux (2 cm par heure), annonce des crues efficace et bien diffusée; hauteurs de submersion jusqu'à 2m50 par rapport au terrain naturel (moyenne 80 cm), durée de submersion moyenne des bâtiments de 14 jours;

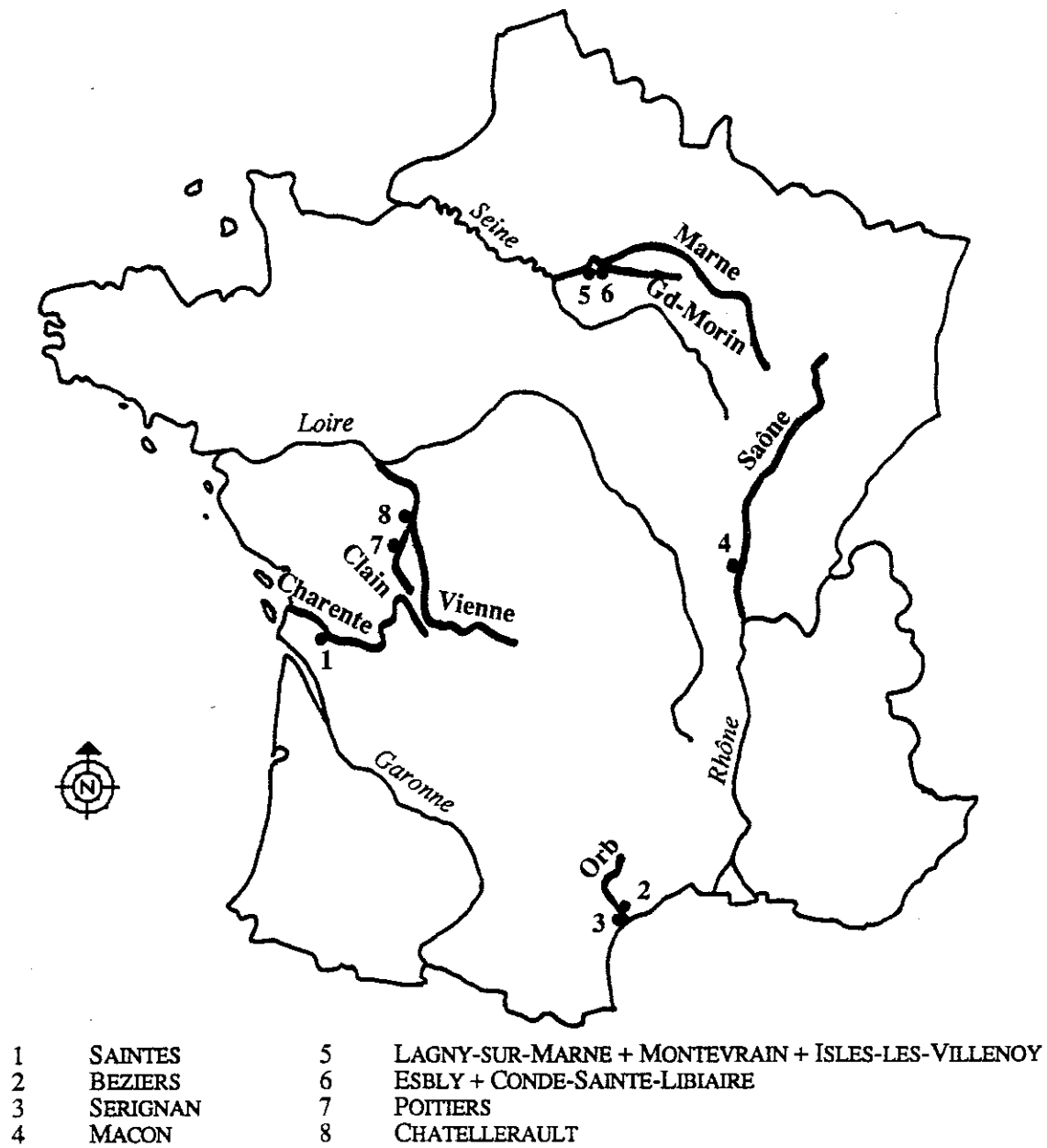


Figure IV.1. : localisation géographique des 8 sites d'enquêtes

- zone inondée: partie du centre urbain commerçant (bâtiments début du siècle), secteurs pavillonnaires urbains (années 1950, 1960), secteurs à dominante d'activités, secteur péri-urbain pavillonnaire.

BEZIERS (Hérault) - fleuve Orb

- crue de l'Orb des 4 - 5 décembre 1987: période de retour de l'ordre de 50 ans, submersion de courte durée (moins de 72 heures), montée rapide des eaux due à des pluies à l'amont (pas de pluies sur la plaine), prévision de la crue délicate à réaliser et problèmes d'alerte (incrédulité, ...), hauteurs de submersion jusqu'à 1m80 (moyenne 1m20), durée moyenne de submersion des bâtiments de 1 jour;
- zone inondée: quartier du Faubourg et anciens domaines viticoles en périphérie, habitat continu du début du siècle, ancien quartier du port (hangars reconvertis en habitat), secteur pavillonnaire (surtout années 1920 à 1940).

SERIGNAN (Hérault) - fleuve Orb

- crue: voir Béziers pour les caractéristiques hydrologiques, hauteur moyenne de submersion 60 cm, durée moyenne de submersion des bâtiments de 1 jour;
- zone inondée: agglomération confrontée assez fréquemment aux inondations par ruissellement; quasi toute l'agglomération inondée: centre ancien (XIXe) aux rues étroites, lotissements récents (1970) en périphérie.

MACON (Saône-et-Loire) - rivière Saône

- crue de la Saône de mai-juin 1983: période de retour de l'ordre de 30 ans, montée lente des eaux, submersion d'une durée de 15 jours, submersion par remontée dans les égouts et par débordement direct postérieur, annonce des crues bien diffusée et surveillance par les particuliers, hauteur de submersion moyenne de 75 cm, durée moyenne de submersion des bâtiments de 11 jours;
- zone inondée: partie du centre ville et du centre commerçant ancien (immeubles du XVII^e), artère principale coupée (nationale 6), petits secteurs d'habitat collectif ou individuel, zones industrielles et artisanales (la zone a été touchée en 1955, et en grande partie en 1981 et 1982); les enquêtes sur Mâcon ont essentiellement porté sur des entreprises et sur 4 logements. Les données recueillies concernant les particuliers ne sauraient donc être représentatives du site.

LAGNY-SUR-MARNE (Seine-et-Marne) + MONTEVRAIN + ISLES-LES-VILLENAY -
rivière Marne

- crue de la Marne d'avril 1983: période de retour de 10 à 25 ans, lente montée des eaux, hauteur de submersion moyenne de 40 cm; problèmes évoqués dans la diffusion de l'annonce des crues et dans l'alerte, durée moyenne de submersion des bâtiments de 17 jours;
- zone inondée: parties urbaines et péri-urbaines, quelques entreprises, un lotissement récent; habitat très hétérogène essentiellement pavillonnaire, avec des résidences secondaires, datant en moyenne du milieu du siècle.

ESBLY (Seine-et-Marne) + CONDE-SAINTE-LIBIAIRE - rivières Marne et Grand Morin

- crue de la Marne et du Grand-Morin (zone du confluent): voir Lagny, hauteur de submersion moyenne d'1 m, durée moyenne de submersion des bâtiments de 20 jours;
- zone inondée: secteurs essentiellement péri-urbains avec habitat pavillonnaire très hétérogène (datant en moyenne de 1940), beaucoup de résidences secondaires.

POITIERS (Vienne) - rivière Clain

- crue du Clain de décembre 1982 (maximum le 23 décembre): période de retour de 120 à 160 ans, montée des eaux assez rapide, hauteur de submersion moyenne de 1m60 (jusqu'à 3m); problèmes évoqués concernant l'alerte, durée moyenne de submersion des bâtiments de 3 jours;
- zone inondée: secteur péri-urbain enserrant le centre-ville, habitat essentiellement pavillonnaire ou continu individuel ou semi-collectif datant en moyenne de la fin du XIX^e, gare SNCF, hôpital.

CHATELLERAULT (Vienne) - rivière Vienne

- crue de la Vienne de janvier 1982: période de retour de l'ordre de 20 ans, hauteur de submersion moyenne de 90 cm, alerte bien diffusée auprès d'habitants sensibilisés, durée moyenne de submersion des bâtiments de 3 jours;
- zone inondée: un secteur en centre-ville et un secteur péri-urbain, habitat proche de celui de Poitiers.

Pour illustrer la variété des situations, on a établi des graphiques confrontant des paramètres globaux caractéristiques des huit sites:

- figure IV.2: période de retour (années) / délai (jours) entre le seuil approximatif de début de crue et le maximum de la crue (les points relatifs à certains sites sont confondus);
- figure IV.3: hauteur de submersion moyenne (centimètres) / durée moyenne de submersion (jours).

On trouvera dans (Torterotot, 1988) une description détaillée des sites, par types d'urbanisme et d'habitat, ainsi que des événements d'inondations auxquels on se réfère.

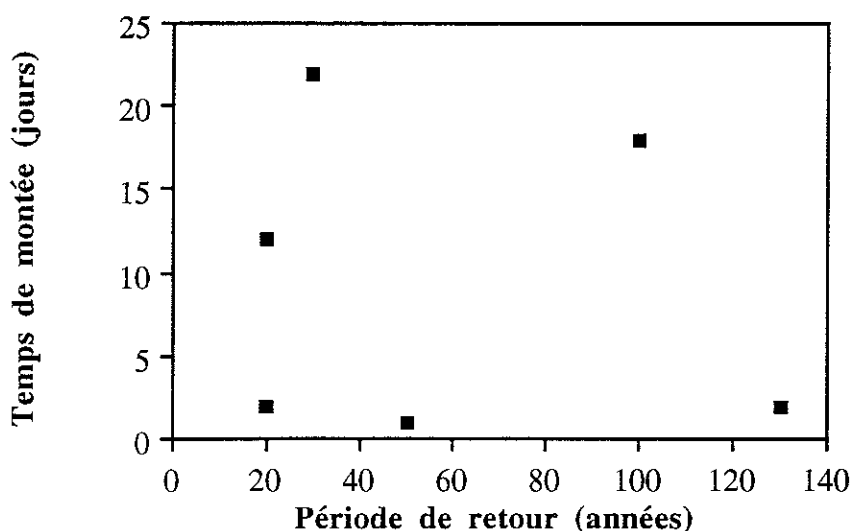


Figure IV.2. : paramètres caractérisant les crues sur les huit sites d'enquêtes - période de retour de la crue de référence et temps de montée (délai entre le dépassement du seuil de crue et le maximum de crue)

les points sont confondus pour deux groupes de deux sites

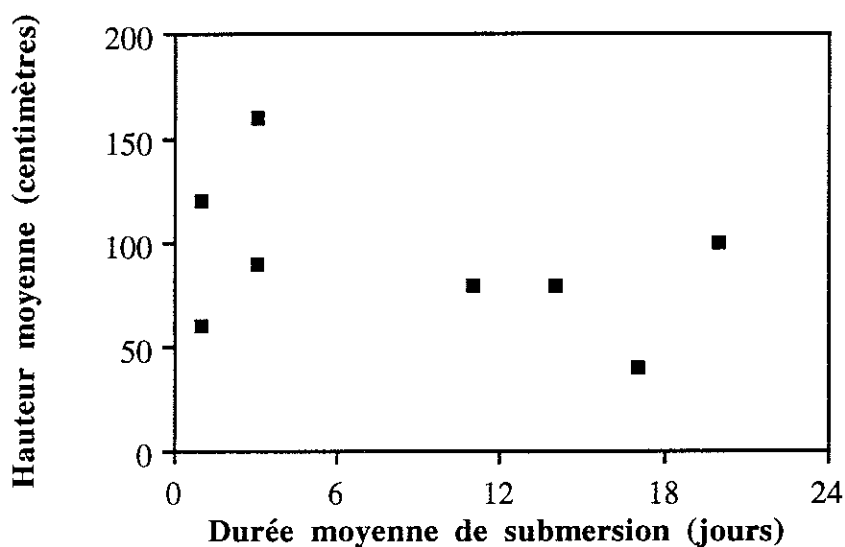


Figure IV.3. : paramètres caractérisant les submersions sur les huit sites d'enquêtes - durée moyenne de submersion des parcelles bâties et hauteur moyenne de submersion par rapport au pied des bâtiments

IV.2.2. La méthode d'enquête

Le recueil de données sur les dommages dus aux inondations peut prendre des modalités différentes, en termes de mode d'enquête (entretien direct, téléphone, courrier), de conception d'un questionnaire ou d'échantillonnage des personnes et/ou organismes interrogés (Mills et al, 1991). Les enquêtes réalisées ici ont utilisé un protocole défini suite aux enquêtes menées par le CERGRENE à Montauban (Bagherzadeh-Borner, 1985; Caude et Debizet, 1986; Debizet et Caude, 1986), et finalisé par J.P Vermersch pour la Délégation aux Risques Majeurs (questionnaires, bases de données...).

On peut résumer les grandes caractéristiques des choix de méthodes par les points suivants:

- les données recherchées concernent des ménages et des entreprises sinistrés lors d'une crue fluviale importante; on prend garde à ce que cet événement ne soit ni trop récent (tous les dommages non encore apparus ou réparés, contentieux avec les assurances ou avec les pouvoirs publics), ni trop ancien, c'est-à-dire antérieur de plus de cinq ou six ans (effets d'oubli, mobilité des personnes sinistrées...);
- ces données portent sur la caractérisation physique de la submersion (hauteur, durée...), la structure et la valeur du bâtiment (surfaces, positions de planchers, valeur immobilière vénale...), la localisation et la valeur du contenu, la nature et le coût des dommages, les indemnités, le mode d'alerte et les réponses (protection, déplacement d'objets...), les caractéristiques sociales des ménages;
- le recueil des données et informations est réalisé par entretien direct avec un enquêteur, si possible dans les locaux mêmes qui ont été inondés;
- sur une aire d'étude donnée, choisie suffisamment importante en taille, on cherche à enquêter auprès de tous les ménages et/ou entreprises disposés à répondre.

Les paragraphes qui suivent apportent des explications et des justifications de certains de ces choix (pour une présentation plus détaillée, voir Torterotot, 1988).

Le recours aux entretiens directs par des enquêteurs

De façon générale, les données recherchées sont assez nombreuses, et certaines présentent un caractère fastidieux, ou du moins leur intérêt réel peut-il être difficilement perçu au premier abord. L'intervention d'enquêteurs permet d'accélérer la mise en forme des informations (une heure par ménage, en moyenne, une heure et demi ou plus par entreprise), et de s'assurer de leur exhaustivité sans avoir à effectuer de relances lourdes et coûteuses en temps. Il s'est également avéré que les enquêteurs ont apporté non seulement une aide utile pour répondre aux questions posées, mais encore une aide de caractère social par rapport au risque d'inondation:

- en répondant aux questions de la population restées sans réponse (mécanismes physiques, réglementation en matière d'assurances...);
- en constituant parfois la première "écoute institutionnelle" de l'événement d'inondation tel qu'il avait été vécu et explicité par la population.

Cet aspect du déroulement des enquêtes a été facilité par le fait que les enquêteurs étaient tous étudiants, se spécialisant dans les domaines "eau", "environnement" ou "aménagement". Par ailleurs, la situation d'étudiant et l'indépendance vis-à-vis de toute partie prenante locale ou centrale ont facilité les contacts avec la population.

L'échantillonnage d'enquête

Comme on l'a précisé plus haut, on a cherché à recueillir des données auprès de toutes les personnes et entreprises concernées dans l'aire d'étude. Cela revient à dire qu'on n'a pas réalisé d'échantillonnage à proprement parler, pour deux raisons principales:

- la méconnaissance des critères d'échantillonnage pertinents dans l'absolu, par rapport aux problématiques "dommages", "réponses"....;
- le souci de "rentabiliser" le temps d'enquêtes en limitant les déplacements, et donc en recherchant la plus forte concentration géographique de sinistrés; en-dehors de certaines zones inondables urbaines ou péri-urbaines, les bâtiments inondés sont très dispersés le long d'un cours d'eau.

Ainsi, la représentativité de l'échantillon est conditionnée indirectement par les modalités des enquêtes. Les personnes interrogées présentent par conséquent les particularités suivantes:

- elles sont exposées aux inondations ayant une fréquence supérieure ou égale à la fréquence de l'événement de référence;
- elles n'ont pas déménagé entre la date de l'inondation et celle de l'enquête;
- elles ont accepté de recevoir les enquêteurs (disponibilité, intérêt pour le problème des inondations ou attente d'une réponse à ce sujet, d'une aide ou d'une explication...).

L'organisation des enquêtes

Les enquêtes ont eu lieu en juillet et août 1988, sur les zones inondables comprises strictement sur les territoires des communes présentées plus haut. On a évoqué le soutien apporté par les Directions Départementales de l'Équipement (correspondant "Plans d'Exposition aux Risques", service d'annonce de crue, subdivisions territoriales), qui a consisté en l'aide au choix des aires d'étude, l'accès aux documents techniques (PER en cours...) et aux contacts institutionnels, la mise à disposition d'un local et d'une adresse postale pour les enquêteurs. Les Collectivités Locales et leurs services, ainsi que les Chambres Consulaires et différents Services Extérieurs de l'Etat ont constitué autant de sources précieuses d'informations.

A partir d'une cartographie de l'inondation de référence, les enquêteurs ont délimité l'aire d'étude, divisée en secteurs homogènes en regard du type d'urbanisation et du mécanisme d'inondation en cause. Cette cartographie a également permis d'identifier, de façon approchée, les hauteurs de

submersion. Ainsi les estimations données par les sinistrés ont pu être affinées et critiquées au cours du déroulement des enquêtes.

L'identification cadastrale de la zone inondée ayant permis de définir les adresses des bâtiments touchés, les enquêteurs ont identifiés les personnes et entreprises à contacter à partir de fichiers mis à disposition par les Mairies. Cette méthode de préparation des enquêtes s'est révélée efficace pour identifier les "enquêtés potentiels", bien que relativement lourde. Toutefois, les enquêteurs ont parfois pu utiliser directement des listes de personnes sinistrées, établies par les Mairies, par les pompiers ou par des associations de défense des habitants.

Différents problèmes se posent pour une utilisation immédiate des listes ainsi constituées:

- imprécision relative des limites de la zone submergée;
- décrochements ponctuels de relief mettant un îlot de maisons hors d'eau, alors qu'il est situé au milieu de la zone inondée (à Sérignan notamment);
- identification des personnes installées postérieurement à la crue de référence ou ayant déménagé depuis (dans le cas où l'on utilise une liste de personnes sinistrées).

Les deux premiers problèmes dépendent de la finesse des renseignements hydrauliques et topographiques disponibles, et ne peuvent trouver une résolution "définitive" que par un repérage de terrain poussé.

Le problème de l'identification a priori des personnes s'étant installées postérieurement à la crue n'a pas pu être résolu de façon simple et systématique. A Saintes, un sondage rapide indique que 50% environ des habitants sinistrés en 1982 auraient déménagé avant l'été 1988. Quant au site de Mâcon, on y trouvait des habitations demeurant vides, ou occupées uniquement par une activité en rez-de-chaussée. Par contre, 80% des habitants présents en 1988 dans la zone y étaient déjà en 1983 (dans les étages, notamment).

Qu'il ait été possible ou non d'opérer des distinctions entre habitants ayant connu l'inondation et "nouveaux arrivants", les ménages et entreprises ont été contactés par un courrier émanant de la Délégation aux Risques Majeurs, distribué directement ou par voie postale, les informant des objectifs de l'enquête et leur demandant de proposer par courrier un rendez-vous aux enquêteurs. Les taux de réponse ont varié, selon les sites, entre 5% et 10% (de la population contactée, pas de la population réellement concernée). Les contacts ont été étendus ensuite par relance téléphonique, visites à domicile... Par rapport au nombre total d'enquêtés potentiels identifiés (particuliers et entreprises), le taux d'enquêtes a finalement été de 25% (538 sur 2130, de 21% à 31% selon les départements). Il est apparu que la période estivale a plutôt favorisé la réussite des enquêtes, et qu'au terme des deux mois passés sur le terrain les enquêteurs avaient pu interroger la quasi totalité des personnes de l'aire d'étude, concernées par l'inondation et disposées à répondre.

Les données recueillies

Les questionnaires utilisés pour les enquêtes sont présentés en annexe IV.A. Ils ont été utilisés conformément aux notices, à l'exception de points de détail qui ont été modifiés après les premières utilisations par les enquêteurs (dont la mention du temps passé au nettoyage; Torterotot, 1988). Ce format de données est conforme à celui de la base de données informatique FONCTENDOM de la Délégation aux Risques Majeurs, base dans laquelle les dossiers recueillis ont été saisis.

Il faut noter que toutes les données recueillies, en particulier les informations financières, se rapportent à l'année de l'inondation. Par ailleurs, le questionnaire permet d'opérer une distinction selon que les dommages sont estimés selon l'une des deux logiques suivantes:

- par la valeur de remise à neuf et de remplacement à neuf;
- par la valeur de remise en l'état initial, en tenant compte du degré de vétusté (ou remplacement par un bien d'occasion, de même âge).

Parmi les différents types de questions posées, l'estimation des valeurs globales immobilières et mobilières a été délicate pour les personnes interrogées comme pour les enquêteurs. Ces derniers ont donc été chargés, parallèlement aux enquêtes, de mener localement un petit travail de prospection sur ces valeurs auprès de notaires, d'experts d'assurances... Il s'agissait d'obtenir des valeurs moyennes locales (ramenées au mètre carré ou à la pièce d'habitation) correspondant aux différents types d'habitat rencontrés, pour compléter et critiquer les données recueillies.

Par ailleurs, la critique des hauteurs de submersion a posé peu de difficultés. Les enquêteurs disposaient d'indications de référence relativement fiables, et les déclarations des personnes interrogées présentaient de bonnes concordances (par rapport aux indications de référence et aux déclarations recueillies dans le voisinage).

De façon générale, le travail des enquêteurs a été facilité par le fait que les questionnaires abordent les dommages de façon détaillée: cela permet un inventaire exhaustif -ou presque- des dommages, alors qu'un simple chiffrage global sans plus de détail amènerait à les sous-évaluer. Il est bien évident que le chiffre d'ensemble, issu d'un décompte détaillé, est plus fiable que les chiffres de coûts obtenus pour chaque type de dommage.

IV.3. LES DONNEES RECUEILLIES ET LEUR ANALYSE

On ne reprendra pas ici l'analyse et la critique détaillées des données recueillies, telles qu'elles sont présentées par Torterotot et Thomas (1989). Les données concernent 528 bâtiments, abritant 415 logements et 188 activités commerciales, artisanales et industrielles. Par la suite, on s'intéressera uniquement à l'habitat. Signalons que tous ces dossiers ne sont pas totalement exploitables, du fait d'éventuelles lacunes dans les informations recueillies.

IV.3.1. Les contrôles effectués sur les données

Une première série de vérifications a porté sur les valeurs extrêmes des variables numériques importantes: valeurs des biens exposés, montants de dommages par grands postes (second oeuvre...), hauteurs de submersion, surfaces... De même, ont été vérifiés les dossiers pour lesquels des données importantes étaient manquantes ou prenaient des valeurs particulières: hauteur de submersion, prise en compte dans le dossier "logement" des dommages à l'immobilier, type de niveau, type de bâtiment, dépendances, dommages à l'immobilier, nombre de décès.

Ensuite ont été effectués des contrôles de cohérence sur les fichiers de la base de données constituée. Il serait fastidieux d'énumérer ici les contrôles précis effectués. Ils ont porté sur les points suivants:

- correspondance entre le code de présence/absence d'un dommage et le montant de ce dommage;
- vérification des additions lorsque des montants globaux de dommages ou des valeurs globales de biens exposés sont détaillés (si des montants par postes sont codés "absents", on vérifie que le total des postes n'excède pas le montant total indiqué);
- comparaison des valeurs exposées et des montants des dommages correspondants (détaillés par grands postes);
- cohérence entre montants de dommages et indemnisation (en tenant compte de la franchise);
- comparaison entre les surfaces occupées dans le bâtiment par un logement ou une activité inférieures et la surface totale (vérification pour chaque niveau du bâtiment);
- existence effective (indiquée dans les bâtiments) des niveaux occupés par les logements et activités;

- cohérence, pour le bâtiment, du linéaire total et de la surface totale.

Pour ce qui concerne la validité générale des données, il faut bien noter que certains types de dommages, lorsqu'ils se sont réellement produits, figurent peu ou pas dans les bilans de coûts: dégradations d'archives, fissures mineures des murs non réparées... Ni les enquêteurs, ni les sinistrés, ne disposaient des moyens permettant d'attribuer une valeur à des dommages matériels lorsque celle-ci se démarque conceptuellement d'une valeur de réparation ou de remplacement.

En matière d'habitat, les principaux doutes ou difficultés sur les données sont les suivants:

- la notion de sous-sol repose sur des critères de localisation par rapport au terrain naturel (niveau enterré sur au moins trois côtés, et sur au moins les trois quarts de sa hauteur); lorsqu'un niveau de bâtiment a été défini comme sous-sol au vu de son affectation d'usage, il a fallu rétablir la définition formelle au vu des autres paramètres descriptifs du bâtiment;
- l'estimation des valeurs immobilières étant difficile à effectuer par les personnes interrogées, les enquêteurs se sont basés en tant que de besoin sur des informations fournies par des professionnels (il demeure toutefois 11% de valeurs manquantes);
- l'estimation des valeurs des biens mobiliers exposés a posé plus de difficultés encore (valeur globale et/ou décomposée par étage), ainsi que la détermination des surfaces aménagées; dans certains cas, les valeurs ont été estimées forfaitairement, sur la base de valeurs types indiquées par des professionnels, mais au vu du logement (au moins de façon partielle);
- dans les dommages au second-oeuvre ont été inclus, autant que possible, les coûts du nettoyage effectué par les occupants d'un logement, en se basant sur le coût horaire du salaire minimum;
- lorsque le nombre d'occupants a été déclaré nul, cette situation peut correspondre à un logement inoccupé à l'époque de l'inondation, ou à des interprétations erronées (absence momentanée, résidence secondaire...).

IV.3.2. L'occupation des zones inondables vue au travers des données recueillies

Le type d'habitat

Sur les huit sites d'études, on a enquêté 528 bâtiments, dont 385 (73 %) abritent un logement unique, 20 (4 %) plusieurs logements, 69 (13 %) logements et activités, 54 (10 %) une ou plusieurs activités. On relève donc une forte prédominance de l'habitat individuel pavillonnaire ou semi-continu, dans des zones urbaines et péri-urbaines. Cette prédominance s'observe pour tous les sites (60 % à 95 % des bâtiments enquêtés, 68 % à Montauban) à l'exception de Mâcon dont l'échantillon est principalement tourné vers les activités (19,4 % des bâtiments seulement n'abritent que des logements).

Cela se traduit sur le nombre moyen de niveaux des bâtiments, de 2,1 à 2,7 suivant les sites (3,2 à Mâcon). Seuls 8 bâtiments sur 528 ont plus de 4 niveaux. Pour l'habitat individuel, les surfaces hors-oeuvre totales (avec sous-sol...) varient beaucoup à l'intérieur de chaque site. Les moyennes par sites (à l'exclusion de Mâcon - trop petit nombre de dossiers concernés) vont de 140 à 190 mètres carrés (220 à Béziers du fait d'un habitat très particulier sur deux secteurs: anciens hangars réaménagés, et domaines agricoles actuellement en exploitation ou non). Notons que les écart-types varient, selon les sites, de 75 à 130 mètres carrés (sauf 240 à Béziers).

La qualité des bâtiments, toutes catégories confondues, a été estimée par un indice de 1 (état neuf) à 4 (vétuste). Pour l'ensemble des bâtiments, on obtient un indice moyen de 2,4 (écart-type de 0,74). Sur les sites, cet indice moyen varie de 2,1 (Sérignan) à 2,9 (Béziers), avec 5 valeurs entre 2,3 et 2,4 (écart-type de 0,56 pour Béziers, à 1,1 pour Sérignan).

Il semble bien qu'on observe ici un phénomène relevé dans d'autres études (McBean et al, 1988-a) à savoir qu'une équipe d'enquêteurs -sur un site donné- utilise toute la gamme de l'indice qui permet alors bien de discriminer les bâtiments d'un même site entre eux. Par contre, le "calage" de l'indice est propre à chaque site, et il n'est par conséquent pas possible de différencier les sites sur la qualité des bâtiments. Par ailleurs, les études citées ont établi que deux équipes différentes d'enquêteurs attribuent - sur un même site - les indices de qualité de façon proche. Notons qu'ici, les indices moyens de qualité trouvent leurs valeurs extrêmes sur deux sites (Béziers et Sérignan) étudiés par une même équipe d'enquêteurs.

Pour établir une classification "absolue" en matière de qualité des bâtiments, il faudrait qu'une même personne "note" un sous-échantillon représentatif (par rapport aux qualités estimées) de bâtiments sur chacun des sites d'enquêtes. La confrontation de cette échelle "absolue" avec les échelles propres à chaque équipe d'enquêteurs permettrait alors de décaler et déformer le barème propre à l'équipe pour rendre tous les dossiers d'enquêtes homogènes.

Les logements enquêtés constituent à 91% des résidences principales (97% à 100%, en-dehors des sites de Seine-et-Marne). Les 36 résidences secondaires proviennent essentiellement de Lagny (17% de l'échantillon, soit 6) et surtout d'Esbly (37%, soit 25).

Les valeurs exposées

Pour l'habitat individuel, on obtient -en moyenne- des valeurs immobilières très comparables entre sites, à l'exception de Châtellerault, Mâcon (non représentatif) et Sérignan (tableau IV.1). Sur ce dernier site d'enquêtes, on a effectivement rassemblé un grand nombre de dossiers sur des pavillons récents (voir la qualité des bâtiments). Le petit nombre de dossiers rassemblés sur Châtellerault interdit de se lancer dans des interprétations. Si l'on compare avec d'autres études, on trouve les valeurs suivantes (en valeur courant août 1988):

- sur Montauban: moyenne de 3 810 F/m² (écart-type 2 050);
- sur La Réole (D.D.E de la Gironde et A.D.E.R.C.A.V, 1986) et en Seine-et-Marne (D.D.E de Seine-et-Marne, 1986): utilisation des valeurs types de 1 080 à 4 320 F/m² et 2 460 à 8 560 F/m² (par rapport à la surface habitable).

Tableau IV.1. : valeurs immobilières au mètre carré de surface hors-oeuvre pour l'habitat individuel (en Francs, valeur courante août 1988)

Site	Nombre de réponses	Valeur moyenne	Ecart-type
Saintes	54	3340	1460
Béziers	61	3150	1250
Sérignan	26	4530	1870
Mâcon	1	1650	/
Lagny	27	3390	1950
Esbly	68	3550	2400
Poitiers	118	3380	3040
Châtellerault	12	2320	1500
TOTAL (ensemble des enquêtes)	367	3280	2480

Une enquête de l'I.N.S.E.E. en 1984 a établi une valeur moyenne d'achat des logements d'occasion de 4 450 francs (valeur août 1988) au mètre carré habitable (Eenschooten et Leroy, 1988). Les ordres de grandeurs ressortant des données de nos enquêtes sont donc tout-à-fait cohérents avec ceux ressortant d'autres travaux menés, mais ne permettent pas de tirer des conclusions sur la caractérisation des zones inondables: ces valeurs sont influencées par le marché immobilier local, et

par des facteurs extérieurs (proximité de centres urbains...). De surcroît, on n'a pas étudié d'échantillon-test de bâtiments à l'extérieur de la zone inondable.

Des informations globales recueillies auprès de professionnels de l'immobilier à Saintes et à Poitiers, où les crues ont eu le caractère le plus exceptionnel, indiquent que les inondations ont été suivies d'une moins-value immobilière de 20 à 25 % sur la zone touchée. Par contre, on ne dispose pas d'informations sur une éventuelle influence du risque, antérieurement à l'événement d'inondation considéré.

Le tableau IV.2 présente les valeurs recueillies pour le mobilier présent dans les logements. On observe, sur cette variable difficile à estimer, une grande variabilité sur chaque site, et entre sites différents. Un très petit nombre de ces "logements" correspond en réalité à des dépendances de logements.

Tableau IV.2. : valeurs du mobilier présent dans les logements enquêtés (en milliers de Francs, valeur courante août 1988)

Site	Nombre de réponses	Valeur moyenne	Ecart-type
Saintes	54	133	98
Béziers	66	95	60
Sérignan	26	85	50
Mâcon	0	/	/
Lagny	26	142	108
Esbly	45	127	188
Poitiers	124	202	186
Châtellerauld	14	261	291
TOTAL (ensemble des enquêtes)	355	151	158

L'occupation de l'habitat

Comme on l'a constaté, la très grande majorité des 415 logements enquêtés correspond à de l'habitat individuel. Il s'agit à 91 % de résidences principales: 63 % à Esbly, 83 % à Lagny, de 97 % à 100 % sur les autres sites. Cela n'est guère surprenant si l'on considère le caractère urbain des sites, et malgré la vocation touristique de Béziers et Sérignan. Les occupants des logements interrogés en sont le plus souvent les propriétaires (à 92 %), les 35 locataires contactés se concentrant principalement sur les sites de Poitiers (15 sur 138) et Béziers (12 sur 67). L'ancienneté moyenne d'occupation des logements à la date de l'inondation de référence est de 19 ans. Si cette ancienneté est hétérogène sur chacun des sites (écart-type de 18), on observe une certaine homogénéité entre les sites: ancienneté moyenne de 16 à 22 ans, sauf 11 ans à Esbly.

Ces différentes caractéristiques appellent des commentaires sur le mode d'enquête. Toutes les données concernent des particuliers ayant accepté de répondre aux enquêteurs, et n'ayant pas déménagé entre la date de l'inondation et celle de l'enquête. Qui sont les autres personnes touchées par l'événement de référence ? Sur Saintes, les enquêteurs ont établi un taux de déménagement de l'ordre de 50 % dans les 4 années ayant suivi l'inondation. On peut raisonnablement supposer que les personnes ayant quitté la zone inondable à cause du risque:

- sont plutôt locataires;
- ont les moyens de se reloger ailleurs;
- ont été plus éprouvées, même si cela ne se traduit pas nécessairement en terme de dommages matériels.

On peut donc craindre que le taux de propriétaires observé (et donc l'ancienneté d'occupation) soit sur-évalué. Par contre, le délai plus court entre l'inondation et l'enquête (8 mois) sur les sites de Béziers et Sérignan permet de considérer que les ordres de grandeurs -qui sont homogènes sur les sites- sont représentatifs de la situation au moment de l'inondation.

Le nombre de personnes occupant les logements à la période de l'inondation est très variable sur chaque site (écart-type de 43% à 85% de la valeur moyenne). Selon les sites, le nombre moyen va de 1,8 à 3,7 personnes (2,7 en moyenne générale, avec un écart-type de 1,8).

Le tableau IV.3 présente les catégories socio-professionnelles des chefs de famille (à partir de la classification I.N.S.E.E.). Le tableau IV.4 présente les taux de retraités par sites. Ces résultats appellent plusieurs commentaires. Tout d'abord, plusieurs de ces sites bénéficient d'un cadre de vie attractif: bords de Marne et proximité de Paris pour Lagny et Esbly, proximité du centre-ville à Saintes, proximité relative du centre-ville et calme à Poitiers... La répartition socio-professionnelle semble donc bien traduire l'existence du risque.

Tableau IV.3. : catégories socio-professionnelles des chefs de famille, pour les logements enquêtés (classification I.N.S.E.E)

C S P	Nombre de réponses	Pourcentage
Retraité - retiré des affaires	183	45,4 %
Employé	64	15,8 %
Artisan, petit commerçant	31	7,7 %
Cadre moyen	18	4,5 %
Inactif non retraité	18	4,5 %
Personnel de service	17	4,2 %
Ouvrier qualifié	17	4,2 %
Autre actif	13	3,2 %
Profession libérale	11	2,7 %
Cadre supérieur	10	2,5 %
Contremaître	7	1,7 %
Ouvrier spécialisé	7	1,7 %
Agriculteur exploitant	7	1,7 %
Agriculteur salarié	1	0,2 %
Industriel	0	0,0 %
Gros commerçant	0	0,0 %
TOTAL (ensemble des enquêtes)	404	100,0 %

Ensuite, il faut souligner la forte proportion de retraités. On pourrait craindre qu'il s'agisse d'un effet d'échantillonnage des enquêtes, les retraités étant plus disponibles pour recevoir des enquêteurs. Une étude sur plusieurs communes dans le secteur de la Réole, en Gironde, a mis à jour un taux de retraités de 38 % sur une population totale de 1.025 personnes exposées aux inondations (D.D.E de la Gironde et A.D.E.R.C.A.V, 1986). Cette importance de la présence des personnes âgées en zone inondable est également mentionnée dans des études britanniques (travaux du Flood Hazard Research Centre).

Il faut néanmoins signaler que les sites d'enquêtes ne comprennent pas (ou peu) de secteurs d'urbanisation récente, et on peut émettre l'hypothèse qu'on observe un "vieillissement" de la population lié en partie à une urbanisation ralentie des zones à risque. Quoi qu'il en soit, il faut tenir compte du problème de l'âge des occupants en zone inondable, ainsi que des structures sociales. Ces facteurs influencent la capacité physique à déplacer des biens à l'abri de l'eau, la capacité financière pour se reloger ou pour prendre des mesures individuelles de prévention, la connaissance des mécanismes mis en jeu par l'assurance...

Tableau IV.4. : taux de chefs de famille retraités (ou retirés des affaires)

Site	Nombre de réponses	Taux de retraités
Saintes	61	46 %
Béziers	67	48 %
Sérignan	30	53 %
Mâcon	2	(100 %)
Lagny	29	38 %
Esbly	64	38 %
Poitiers	137	49 %
Châtelleraut	14	21 %
TOTAL (ensemble des enquêtes)	404	45,4 %

Quelles conclusions ?

Notons tout d'abord que les données concernant le mode d'alerte et les réponses individuelles à la montée des eaux seront analysées dans les deux chapitres qui suivent.

Si l'on a présenté ces quelques résultats relatifs à l'habitat en zone inondable urbaine ou péri-urbaine, c'est qu'ils nous apparaissent refléter quelques caractéristiques d'une réalité trop peu analysée. On peut faire l'hypothèse que les zones inondables urbanisées présentent des spécificités en termes d'habitat ou de population (Montz, 1992). Ainsi, nos enquêtes font apparaître des taux moyens de retraités qui sont significatifs, notamment dans l'optique de différentes politiques et mesures de prévention face aux inondations. Cela a des conséquences potentielles aussi bien sur l'évacuation des personnes que sur des mesures de sensibilisation s'appuyant sur les transactions immobilières, par exemple (mobilité moindre des retraités).

Nous ne saurions présenter nos résultats comme représentatifs au-delà des sites d'étude. Mais autant la variabilité que l'on a observée sur certaines données, que la spécificité de certaines autres, constituent une incitation à mieux connaître l'occupation des zones inondables.

V. L'IMPORTANCE DU FACTEUR HUMAIN, SOURCE DE VARIABILITE ET D'INCERTITUDE

If there's water in my living room, I must be in a floodplain.

Rossmiller, 1991, p. 72

Dans le chapitre précédent, nous avons essentiellement évoqué les dimensions physiques des dommages matériels à l'habitat: les paramètres naturels avec les conditions de submersion, les paramètres d'occupation des sols et de capital matériel exposé aux inondations. Si ces derniers paramètres se manifestent sur un mode physique, ils résultent cependant d'un processus de décisions multiples, individuelles et/ou collectives. Et il ne s'agit là que de la première des nombreuses manifestations de facteurs psychologiques et sociologiques. L'adaptation éventuelle des biens exposés pour en réduire la vulnérabilité, les réactions face à la montée des eaux... sont autant de comportements qui influencent les dommages. Et ces comportements se fondent aussi bien sur des attitudes propres à la question des inondations que sur des attitudes plus générales.

Il est bien évident que les dommages intangibles relevant de la santé individuelle ou des structures sociales sont fortement conditionnés par le facteur humain. Sauf mentions ponctuelles, nous avons choisi de nous concentrer sur les dommages matériels à l'habitat, et sur les comportements qui les influencent, c'est-à-dire sur les actes concrets ou verbaux (Boudier, 1983). Nous entrerons moins dans le champ des attitudes, c'est-à-dire des opinions, croyances et sentiments qui exercent une influence directrice ou dynamique sur les actes (une influence parmi d'autres seulement). Si l'on peut espérer avancer quelques hypothèses sur les attitudes à partir des comportements observés, il est beaucoup plus hasardeux d'essayer de prévoir les comportements à partir d'attitudes exprimées (Fischhoff et al, 1981).

Pour aborder la problématique du facteur humain face au risque d'inondation, et de l'influence sur les dommages, on commence en première partie de ce chapitre par traiter des réponses individuelles à l'alerte de crue et à la montée des eaux. Ce thème est l'un des plus abordés dans la littérature scientifique, et nous y apporterons une contribution spécifique dans le chapitre suivant (VI). La synthèse présentée ici est fondée sur la bibliographie et sur les résultats des enquêtes évoquées au chapitre précédent (données recueillies, mais aussi informations provenant des discussions informelles en marge de l'enquête stricte). Par la suite, on élargira la perspective aux différentes composantes du facteur humain, en cherchant à en identifier les caractéristiques majeures. Ce rapide état des lieux nous conduira à conclure en proposant quelques pistes privilégiées pour l'observation et l'analyse du facteur humain.

V.1. QUELQUES RESULTATS SUR LES REponses A L'ALERTE DE CRUE ET A LA MONTEE DES EAUX

Le plus souvent, les réponses humaines ont été analysées par rapport à l'ensemble du système de prévision et d'annonce de crue, avec pour objet d'estimer les "bénéfices" de ces systèmes, ou plus généralement "l'efficacité" du système "prévision-diffusion-réponse" (Sniedovich et Davis, 1977). Nous n'allons pas ici entrer dans la problématique générale de la prévision et de l'annonce de crue (voir O.N.U, 1976; Handmer et Ord, 1986; Penning-Rowsell et Handmer, 1986; Neal et al, 1989; Grunfest et Huber, 1989; Mitchell, 1990, pour le cas des villes des pays les moins développés), mais nous limiter à la partie qui concerne directement l'alerte de la population et les réponses individuelles.

On se rattache à l'optique "service apporté à un usager", dans laquelle ont été menés les travaux du Flood Hazard Research Centre sur l'annonce de crue (Neal et al, 1989; Parker et Neal, 1990; Parker et Tunstall, 1991). En particulier, les indicateurs suivants ont été avancés comme critères possibles pour juger de la performance de l'ensemble d'un système:

- le pourcentage de personnes alertées avant l'arrivée de l'eau;

- les dommages évités;
- le degré de satisfaction de la population.

En ce qui concerne l'évaluation de la réduction des dommages, on dispose de méthodes pour les dommages tangibles directs et indirects. Cependant, l'existence et le fonctionnement de systèmes d'annonce sont à même de réduire de façon sensible des dommages intangibles. Mais si ces dommages sont très fortement ressentis, on n'en est qu'aux débuts de leur analyse quantitative. Les "bénéfices intangibles" de l'annonce de crue sont peut-être les plus importants, mais on ne dispose pas aujourd'hui de données sur cela (Parker et Neal, 1990).

L'annonce et les réponses ont bien sûr pour objet affiché et ressenti de réduire l'importance des dommages dus aux inondations, au-delà d'un premier objectif majeur de préservation des vies humaines. Cette réduction va dépendre d'un grand nombre de facteurs, parmi lesquels:

- le délai entre l'annonce (ou la perception de la montée des eaux) et l'arrivée effective de l'eau au niveau du logement; le délai total disponible pour différentes mesures;
- si message il y a, les caractéristiques de forme et de contenu du message (identité de l'émetteur du message, nombre et redondance des annonces transmises par un ou plusieurs canaux, paramètres annoncés (délai/hauteur), présence ou non de conseils quant aux réactions à adopter, spécificité locale et degré de détail de l'annonce...); pour Dombrowsky (1990), les informations transmises constituent des équivalents fonctionnels de temps ou d'espace pour réagir;
- les caractéristiques individuelles en matière de perception du risque (conscience du risque d'inondation, expériences passées sur le même site ou ailleurs, crédibilité accordée au message);
- le processus individuel de choix des réponses à apporter (intégration dans une culture locale du risque, expériences passées) et la capacité à réagir (état de santé et âge, nombre de personnes valides présentes...).

Et chacun de ces facteurs dépend à son tour d'un certain nombre d'autres paramètres, pour lesquels on ne dispose que d'une liste qualitative a priori. N'oublions pas que les réponses en "temps réel" s'intègrent dans un ensemble de comportements face au risque et de stratégies d'ajustement (Burton et al, 1978; Torterotot, 1989). En particulier, certaines réponses apportées face à la montée des eaux dépendent d'une préparation relevant de la prévention: stockage des matériaux nécessaires, modifications du bâtiment... La préparation à la crise et la sensibilisation préalables jouent un rôle majeur (Roche, 1990).

Ferrel et Krzysztofowicz (1983) ont élaboré un modèle théorique intégrant les phases suivantes dans un cadre de temps complet:

- perception du risque, et de la vulnérabilité;
- crédibilité accordée à l'annonce en fonction de cette perception;
- stratégie individuelle de réponse;
- apprentissage après l'événement, et évolution de la perception du risque et de la vulnérabilité.

Ce modèle a été intégré dans un modèle général du système prévision-annonce-réponse (Krzysztofowicz et Davis, 1983 -a -b -c), dont il constitue le "maillon" le moins bien connu et peut-être le plus important pour évaluer l'efficacité globale du système. Le modèle proposé par Bhavnagri et Bugliarello (1966) n'intègre pas une description explicite du processus de décision, mais par contre la dynamique et la variabilité des réponses en fonction de l'altitude au sein de la zone inondable.

En se concentrant plus spécifiquement sur le processus individuel de choix en temps réel, Mileti (1992) propose une description de la décision selon les étapes suivantes:

- entendre l'alerte ou non;
- la comprendre ou non;
- la croire ou non;
- se sentir soi-même menacé ou non;
- décider ou non de réagir et choisir une réponse;
- disposer ou non des moyens pour cette réponse.

Dans cette description, les variables individuelles essentielles du processus sont la capacité à gérer l'information, l'accès aux réseaux physiques et sociaux, le niveau d'incitation à la vigilance et à la réaction, les contraintes limitant la capacité de réponse. Par ailleurs, on observe que la première information reçue ou la première perception de la situation influencent la perception tout au long de l'événement, et filtrent toute information ultérieure (de Vanssay, 1992). On reprend ci-dessous, de façon plus spécifique, différents aspects de l'alerte et des réponses individuelles.

V.1.1. L'alerte

La diffusion de l'alerte et la crédibilité de l'annonce jouent un rôle majeur qu'il est difficile de chiffrer. La crédibilité, notamment, dépend du mode de diffusion et de la perception préalable du risque, mais également des performances antérieures de l'annonce. Dans une même population, on peut rencontrer la confiance totale d'une part, et l'incrédulité complète d'autre part (Roche, 1990).

Une enquête réalisée en Grande-Bretagne après une inondation (Penning-Rowell, 1981) a révélé que 46% des personnes interrogées n'avaient pas réagi à l'annonce de crue. Parmi elles:

- 24% étaient physiquement incapables de réagir;
- 50% étaient incroyables;
- 10% avaient une confiance excessive dans les aménagements de protection;
- 16% n'avaient pas réagi pour des raisons autres.

Des enquêtes plus récentes ont révélé des taux de personnes alertées (par rapport à la population occupant ou exploitant des parcelles inondées) de 26 à 99% (Parker et Tunstall, 1991; Green et al, 1993).

Les enquêtes menées en 1988 sur plusieurs sites en France comportaient des questions sur l'alerte (au cours de l'inondation de référence), les résultats étant présentés dans le tableau V.1. Rappelons que les références faites à ces enquêtes concernent exclusivement l'habitat. Sur l'ensemble de l'échantillon, 36% des occupants ayant répondu à cette question déclarent n'avoir pas été alertés (de 0% à Châtelleraut à 68% à Poitiers), 38% avoir été alertés par un tiers, avec un délai moyen de 17 heures avant la submersion, et 26% avoir été alertés en surveillant la montée des eaux.

Sur l'ensemble de l'échantillon comme pour chaque site, les valeurs du délai sont très dispersées et en nombre restreint. Les moyennes correspondent toutefois à la gamme de vitesse de montée de chacune des crues:

- moins de 4 heures à Béziers et Sérignan;
- moins de 12 heures à Poitiers et Châtelleraut;
- de l'ordre de 20 heures à Saintes;

- de l'ordre de 48 heures à Mâcon, Lagny et Esbly.

Tableau V.1. : mode d'alerte des particuliers (pourcentages de foyers suivant les modes d'alerte)

SITE (cours d'eau)	Nombre de personnes	1	2	3
Saintes (Charente)	60	63 %	30 %	7 %
Béziers (Orb)	67	6 %	51 %	43 %
Sérignan (Orb)	30	7 %	70 %	23 %
Mâcon (Saône)	4	75 %	25 %	0 %
Lagny (Marne)	29	69 %	17 %	14 %
Esbly (Marne et Grand-Morin)	68	35 %	49 %	16 %
Poitiers (Clain)	137	12 %	20 %	68 %
Châtellerault (Vienne)	14	7 %	93 %	0 %
TOTAL	409	26 %	38 %	36 %

1: alerte par la surveillance de la montée des eaux

2: alerte par un tiers

3: pas d'alerte.

De la même manière, c'est pour les inondations "lentes" que le pourcentage de personnes alertées en surveillant la montée des eaux est le plus fort (63% à Saintes, 69% à Lagny, 35% à Esbly contre 7 à 12% ailleurs) et le pourcentage de personnes non prévenues le plus faible. Les sites sur lesquels les pourcentages de personnes non alertées sont les plus forts sont: Poitiers (68%), Béziers (43%) et Sérignan (23%). Pour Poitiers, on observe une manifestation des problèmes rencontrés dans la diffusion de l'alerte en décembre 1982, problèmes dont les personnes rencontrées ont fait état.

Des travaux menés sur le degré de satisfaction de la population alertée (Tunstall et Bossman-Aggrey, 1988; Neal et al, 1989) ont révélé que les qualités attendues vis-à-vis de l'annonce étaient en priorité les suivantes:

- un délai au moins égal à 2 heures (dans le contexte hydrologique britannique, les crues sont en moyenne plus rapides qu'en France);
- la présence, dans le message d'annonce, de conseils sur les réactions et mesures à adopter.

La question de la crédibilité de l'annonce est soulevé par de nombreux auteurs, qui recommandent de multiplier les canaux de transmission de l'alerte, de multiplier le nombre de messages successifs, d'apporter des informations locales spécifiques et détaillées. Handmer (1991) souligne les risques de délais trop longs, qui multiplient à l'excès les communications (saturation) et augmentent la possibilité d'informations contradictoires.

Face à l'alerte, se pose en particulier le problème de populations ou d'individus marginaux (Handmer et Ord, 1986; Dombrowsky, 1990) auxquels l'alerte parvient moins aisément ou pas du tout. De façon générale, l'alerte a une dimension sociale: c'est un acte de sociabilité et de cohésion dont on accepte très mal d'être privé.

V.1.2. Les réactions et mesures de protection

Sur le plan collectif, les réactions à la survenue de l'inondation obéissent (selon les témoignages et les observations) à deux principes:

- on relève peu de comportements de panique, c'est-à-dire de comportements précipités et désordonnés; au contraire, beaucoup de gens réagissent avec une lucidité et une maîtrise de soi accrues par le danger (Dombrowsky, 1990; de Vanssay, 1992);

- la solidarité et l'entraide sont très importantes, bien plus importantes qu'avant l'événement et qu'après l'événement.

Le processus de choix des mesures est mal connu, et il est très variable (Krzysztofowicz et Davis, 1983-a et -c). Selon Burton et al (1978), ce choix obéit peu à une "minimisation des pertes" (y compris le coût des mesures adoptées), dans la mesure où les gens ne considèrent qu'un nombre limité de stratégies de réponses, qu'ils analysent sur un seul critère à la fois.

Les différentes analyses quantitatives, qui ont été mentionnées plus haut, concluent sur l'importance du délai d'alerte, ou plutôt du temps disponible pour réagir (en particulier, les réactions se poursuivent après l'arrivée de l'eau; cf. Handmer et al, 1988): délai entre l'alerte et l'arrivée de l'eau, vitesse de montée de l'eau... Un accroissement de ce délai apporte plus qu'un gain en précision sur la prévision (Sniedovich et Davis, 1977). En analysant le cas de la ville de Milton (Pennsylvania), Krzysztofowicz et Davis (1983-c) ont estimé à environ 4% les réductions des dommages dans le délai disponible, en intégrant les différents niveaux de perception du risque et degrés de réponses. Si l'adoption de mesures n'était pas limitée par une contrainte de temps, la réduction serait de l'ordre de 31%.

Un autre facteur à considérer ici concerne l'expérience que la population a des inondations, et de façon plus générale le degré de préparation. Smith (1986-b) propose des abaques définissant -pour un logement australien standard- la réduction des dommages en fonction du délai d'alerte et du degré de préparation de la population aux inondations, ce dernier facteur ayant une influence importante (voir aussi Ericksen, 1986). Ainsi, pour un délai de 10 heures, la réduction relative des dommages varie de 10 à 60%, en fonction du degré de préparation.

Enfin, il faut prendre en compte le fait qu'une partie plus ou moins importante de la population n'est pas physiquement capable de prendre des mesures (âge, état de santé, ...):

- 20% selon des résultats de Chatterton et al (1979);
- 24% selon des résultats de Penning-Rowell (1981);
- 39% selon des résultats de Neal et al (1989);
- 25% selon des résultats de Parker (Green et al, 1993).

Le fait de disposer des moyens de réponse ne suffit pas pour qu'il y ait effectivement réponse, et réponse efficace. Il n'est pas surprenant qu'on observe des disparités entre diverses études. Par contre, il ressort clairement que ce phénomène est loin d'être négligeable. Dans les enquêtes menées par le CERGRENE, plus de 40% des chefs de famille de l'échantillon étaient retraités, et des vérifications réalisées sur l'un des sites d'enquêtes ont révélé des ordres de grandeur au moins comparables pour l'ensemble de la population résidant dans la zone inondable.

Par rapport à cela, il faut mentionner les résultats de Owen et Wendell (1981), qui avancent des taux de réponses globaux importants, à partir d'études de cas aux Etats-Unis: 60% à 80% de la population réagit à la première alerte, 90% à 95% avec les alertes suivantes. Quelle que puisse être la transposabilité de telles valeurs, ceci souligne l'importance de la répétition et de la redondance, pour un apport efficace d'informations. Les mêmes auteurs soulignent le rôle important d'expériences antérieures.

Le tableau V.2 présente la façon dont ont été adoptées diverses mesures sur les sites d'enquête (pas de données obtenues sur le site de Mâcon). Il faut faire un commentaire particulier sur Châtellerault, où le petit nombre de personnes interrogées sont très exposées aux inondations, et où l'alerte se révèle efficace. Par ailleurs, les durées de submersion sont compatibles avec l'efficacité d'une obturation des ouvertures.

On peut remarquer qu'à Béziers et Sérignan, la brutalité de l'inondation est à mettre en relation avec les plus faibles taux de "prises de mesures", à l'exception de l'obturation des ouvertures qui est typique d'un phénomène brusque: c'est la mesure la plus immédiate, et précisément elle ne trouve son efficacité que pour des submersions de courte durée (comme à Châtellerault). Comme on pouvait s'y attendre, ce sont les mesures les plus coûteuses en temps qui sont le moins prises, à savoir le démontage et le déplacement d'appareils fixes ou très lourds.

Tableau V.2. : mesures immédiates de protection (pourcentages de logements où ces mesures ont été prises)

SITE (cours d'eau)	OBT	VEH	DEP	DEM
Saintes (Charente)	15 %	81 %	95 %	57 %
Béziers (Orb)	46 %	56 %	66 %	18 %
Sérignan (Orb)	67 %	38 %	67 %	20 %
Mâcon (Saône)	/	/	/	/
Lagny (Marne)	17 %	79 %	79 %	59 %
Esbly (Marne et Grand-Morin)	4 %	93 %	81 %	50 %
Poitiers (Clain)	8 %	66 %	69 %	33 %
Châtellerault (Vienne)	71 %	100 %	100 %	93 %
TOTAL	22 %	72 %	76 %	39 %

OBT = obturation des ouvertures

VEH = éloignement des véhicules terrestres à moteur

DEP = déplacement des biens mobiliers

DEM = démontage et déplacement d'appareils fixes ou très lourds.

V.1.3. La réduction des dommages par les réponses humaines

Les premiers travaux sur ce sujet remontent à 1964 (White) et 1965 (Kates), et concernent l'habitat et les activités industrielles et commerciales. Ils ont été menés par analyse des réactions humaines d'ajustement au risque sur des cas particuliers (enquêtes détaillées, établissement de courbes de dommages propres à chaque bâtiment par "simulation").

Une étude citée dans un rapport de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (O.M.M, 1990) propose une expression "analytique" de la réduction des dommages sous la forme $D(1 - 2Cv)$, où D est une fonction croissante du délai d'annonce et Cv l'erreur relative sur le délai annoncé. Dans les autres résultats établis, la réduction des dommages est liée au délai d'annonce ou au délai disponible, et éventuellement à la hauteur de submersion.

Les seuls résultats français dont on dispose se rapportent à une étude du BCEOM (1971) sur le cas d'une crue très rare de la Corrèze à Tulle et Brive: pour un délai de 4 heures, les dommages sont réduits de 43% pour les logements, et de 28 à 35% pour les entreprises.

Les données britanniques proviennent notamment d'une étude conduite sur la ville de Nottingham (Chatterton et al, 1979): la réduction des dommages sans alerte, par réaction spontanée, est de 7%. Pour une hauteur de submersion de 1 mètre, cette réduction varie de 7% pour un délai d'une demi-heure (après alerte), à 25% pour 2 heures et 50% pour 4 heures (résultats établis par simulation des réactions, en considérant que le logement est occupé par une famille en bonne santé). En faisant l'hypothèse d'un taux de réponse de 70% et d'un taux d'imperméabilisation efficace des bâtiments de 33% (pour une hauteur d'eau inférieure ou égale à 0,3 mètre), Penning-Rowsell (1981) propose les valeurs de réductions relatives de dommages présentées dans le tableau V.3 (en fonction de la hauteur h et du délai d).

Pour ce qui concerne les résultats australiens, on a cité plus haut les conclusions de Smith (1986-b): de 10 à 60% de réduction pour un délai de 10 heures, de 5 à 40% pour 5 heures. Handmer et al (1988) avancent une réduction de 25% pour les dommages dus à l'inondation de Sydney en 1986.

Les données nord-américaines font état (en moyenne) de réductions de dommages moindres par rapport aux valeurs observées en Europe. On peut avancer face à cela l'hypothèse qu'en Amérique du Nord, une fraction plus importante des dommages est liée à l'immobilier, dans la mesure où une proportion clairement plus importante des bâtiments est entièrement ou partiellement en bois.

Tableau V.3. : réductions des dommages en fonction du délai d et de la hauteur de submersion h (Penning-Rowsell, 1991)

h (mètres)	d < 2 (heures)	2 < d < 4 (heures)
0,1	44 %	44 %
0,3	50 %	55 %
0,6	17 %	26 %
0,9	20 %	27 %
1,2	18 %	25 %

Friedman (1984) avance une estimation portant sur 5540 agglomérations aux Etats-Unis: sans intensification et développement de différents modes de gestion du risque d'inondation, le coût moyen annuel des dommages augmenterait de 20% en 20 ans, contre une réduction potentielle de 13% sur la même période dans le cas d'un développement "accélééré" de l'annonce. En appliquant leur modèle du système "prévision-annonce-réponse" à la ville de Milton (Pennsylvania), Krzysztofowicz et Davis (1983c) déterminent les réductions "réelles" des dommages moyens annuels à moins de 10% (les habitants disposant en moyenne de 20 heures après la première alerte). Sur diverses collectivités du bassin de la Connecticut, Day et Lee (1976) proposent par contre des réductions potentielles de coûts moyens annuels de 25 à 56%.

En ce qui concerne les dommages pour une crue donnée, McBean et al (1988-a -b) avancent -pour un délai compris entre 6 et 12 heures- des réductions potentielles de 16% lorsqu'il subsiste un étage non submergé, de 4% sinon. Enfin, Handmer et Ord (1986) citent des résultats établis sur la ville de Boulder (Colorado), où les réductions de dommages sont estimées en fonction de la période de retour T de la crue (en années) et du délai d'alerte d (en heures). Ces résultats ont été établis sous l'hypothèse d'un taux de réponse de 100% et d'une efficacité maximale des mesures (tableau V.4).

Tableau V.4. : la réduction des dommages par l'annonce de crues à Boulder, en fonction du délai d et de la période de retour de la crue T (cité par Handmer et Ord, 1986)

	T = 25 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
d = 1/2 heure	7 %	18 %	23 %
d = 3/4 heure	19 %	28 %	33 %
d = 1 heure	29 %	38 %	43 %

D'autres auteurs encore citent des chiffres de réductions de dommages, issus de diverses synthèses: 2 à 5% selon Tai (1975), 10 à 15% selon Smith (1989), de 14% pour 6 heures de délai à 22% pour 12 heures et 35% pour 48 heures (Davis, 1988; à partir de travaux de H. Day).

Le Tableau V.5 présente une synthèse schématique de résultats concernant la réduction des coûts des dommages par les réponses individuelles à l'alerte de crue et à la montée des eaux. On ne peut ici que souligner la grande disparité des résultats, qui doit nous inciter à relativiser toute conclusion ayant une ambition trop générale. Par ailleurs, il est difficile d'isoler les réductions de dommages qui seraient dues spécifiquement à l'alerte (voir notamment Parker et Neal, 1990):

- les personnes les plus attentives à l'alerte sont a priori conscientes du risque et même préparées;
- même sans alerte (ou avant l'alerte) on peut éviter plus ou moins une partie des dommages pendant que l'eau monte.

Tableau V.5. : la réduction des coûts des dommages par les réponses individuelles à l'annonce de crue et à la montée des eaux

zones considérées	événement de crue considéré	délai disponible pour les réponses (heures)	hauteur d'eau au-dessus du plancher (cm)	autres conditions	réduction des dommages (%)	méthodologie	références			
Tulle et Brive (Corrèze France)	événement réel de crue importante	4	-	-	43%	enquête	BCEOM, 1971			
								de 6 à 12	-	-
Connecticut Basin (U.S.A.)	espérance (coût moyen annuel)	0,5	100	familles présentes et en bonne santé	7%	enquête et simulation	Chatterton et al. 1979			
								2	100	70% de réponses et étanchéification efficace à 33%
Nottingham (Royaume-Uni)	crues importantes	4	100	-	50%	enquête et simulation	-			
								< 2	10	44%
								< 2	30	50%
								de 2 à 4	10	44%
Royaume-Uni	crues quelconques	de 2 à 4	30	-	55%	enquête et simulation	-			
								< 2	60 à 120	18%
								de 2 à 4	60 à 120	18%
								de 2 à 4	60 à 120	26%
Milton (Penn., U.S.A.)	espérance (coût moyen annuel)	20 (moyenne)	-	divers degrés de préparation de délai	4%	enquête et simulation	Krzysztofowicz et Davis 1983c			
								20 (moyenne)	-	pas de contraintes de délai
Australie	espérance (coût moyen annuel)	5	-	peu de préparation	5%	enquêtes et simulation	Smith 1986b			
								10	-	10%
								5	-	40%
								10	-	60%
								0,5	-	7%
Boulder (Col., U.S.A.)	crue de période de retour 25 ans	1	-	100% de réponses avec 100% d'efficacité	29%	simulation des scénari de réponses	Downing 1977 cité par Handmer et Ord 1986			
								0,5	-	18%
								1	-	38%
								0,5	-	23%
								1	-	43%
Prov. de l'Ontario (Canada)	crues quelconques	de 6 à 12	-	tous étages inondés un étage non inondé	4%	enquête sur les dommages potentiels et simulation	McBean et al. 1988			
								de 6 à 12	-	16%

Par ailleurs, nous n'avons considéré que les dommages matériels. Il est vraisemblable que l'annonce de crue réduise les impacts intangibles des inondations (Penning-Rowse, 1986; Green et Penning-Rowse, 1989), notamment au travers de la réduction du stress (Dombrowsky, 1990), comme cela a été montré sur un site par Doizy (1991). Cela étant, Hansson et al (1982) considèrent que l'alerte précoce peut aggraver l'angoisse et le stress, pour des personnes qui ne disposent pas des moyens de répondre et sont réduites à attendre l'inévitable. Mais ceci sort du champ de notre travail, comme du champ des phénomènes qu'il est aujourd'hui possible de quantifier avec certitude.

V.2. LES CARACTERISTIQUES DU FACTEUR HUMAIN FACE AU RISQUE D'INONDATIONS

On a évoqué plus haut la question spécifique des comportements "en temps réel", soit les réponses à l'alerte de crue et à la montée des eaux. On aborde à présent d'autres composantes du facteur humain influant sur les dommages, avant de se placer dans un cadre plus général pour analyser la perception du risque d'inondation, et s'interroger sur les possibilités d'analyser et de prévoir les comportements.

V.2.1. Les comportements individuels d'occupation des zones inondables et de prévention

L'occupation des zones inondables

Dans le chapitre II, on a tenté de caractériser sur le plan économique le processus collectif d'occupation des zones inondables, et évoqué les méthodes hédonistes qui proposent une évaluation économique du risque à partir des différentiels de valeurs immobilières (ou de valeurs foncières, ou de loyers). En appliquant de telles méthodes, il apparaît que la valeur attribuée à un logement ou à une parcelle dépend de paramètres nombreux: les caractéristiques propres du logement ou de la parcelle, celles du site (paysage...), la proximité des services et infrastructures, la valeur de placement, le voisinage... (Thompson et Stoevener, 1983; Tobin et Newton, 1986; Montz et Tobin, 1986; Burby et al, 1988; Donnelly, 1989).

Le risque d'inondation se traduit également plus ou moins sur ces valeurs, mais seulement dans la mesure où il est perçu (on ne considère pas ici des événements déterminés, mais la situation d'exposition au risque). Le risque constitue un facteur négatif de bien-être social, parmi d'autres facteurs liés à la localisation spatiale (Yezer et Rubin, 1987). Et il entre notamment en compétition avec les attraits paysagers offerts par la proximité de la rivière (Fordham et al, 1989).

S'il y a unanimité sur la nature des facteurs qui influencent l'occupation des parcelles inondables, les importances relatives de ces facteurs varient en fonction des auteurs et des cas d'études. En particulier, face à un affichage explicite du risque (zonage officiel), Park et Miller (1982) ont observé une baisse sensible des valeurs immobilières, traduisant le fait que la perception antérieure du risque était partielle. Cette perception s'est révélée dépendre de l'altitude des bâtiments et de leur distance par rapport à la rivière (alors que dans ce cas les dommages n'en dépendaient que très peu). Par contre, Montz (1992) a observé peu de variation des valeurs lors d'un affichage sur un autre site, ce qui peut traduire soit une perception préalable "réaliste" du risque, soit une mauvaise communication. Parallèlement, on a observé sur ce second cas que l'habitat présentait des spécificités dans la zone inondable, spécificités corrélées au niveau d'exposition au risque.

Burby et al (1988) ont mené, sur dix villes des Etats-Unis ayant appliqué le programme fédéral de zonage des vallées inondables, une étude en vue de déterminer les motivations des différents acteurs du développement urbain: propriétaires fonciers, lotisseurs, entrepreneurs, acheteurs, occupants. Il apparaît que deux facteurs ont une influence très forte: la pression foncière (donc la demande) et des expériences antérieures d'inondations. Le risque, dans sa composante financière, influence plus les décisions des investisseurs que celles des occupants futurs (espoir de résoudre le problème par des mesures simples, attente de protections collectives... ?).

Les mesures individuelles de prévention

Des travaux ont été menés sur la rentabilité économique de différentes mesures individuelles (Flack, 1978): étanchéification de parois, renforcement des ancrages sur les fondations... Si un ensemble trop "complet" de mesures n'est pas nécessairement rentable, on peut trouver des "jeux de mesures raisonnables" qui dégagent un bénéfice net sur quelques années en terme de dommages évités par rapport aux coûts de mise en oeuvre. Sur des données collectées à Montauban, Debizet et Caude (1986) ont établi des courbes d'endommagement (rapport "dommages sur valeur totale" en fonction de la hauteur de submersion) pour des résidences présentant différents degrés de prévention et de protection. Au vu des résultats obtenus, ils évaluent un taux de réduction de dommages de l'ordre de 50% pour des mesures de prévention sur l'habitat existant, et pour des submersions qui ne présentent pas un caractère trop exceptionnel.

Au cours des enquêtes réalisées en 1988, une question portait sur la prise en compte du risque dans la conception du bâtiment à l'origine, ou lors de modifications importantes. On a considéré que le bâtiment était conçu "en fonction du risque" si sa courbe "endommagement - hauteur de submersion par rapport au premier niveau" s'en trouvait modifiée. On exclut ainsi les cas où le bâtiment a été placé sur une petite butte, ou implanté dans la partie haute de la parcelle... Ces cas correspondent à une prise en compte effective du risque, mais qui se traduit par la diminution de la fréquence des événements dommageables, et non par une diminution de la vulnérabilité intrinsèque du bâtiment (comme ce serait le cas par occupation saisonnière du premier niveau, implantation des équipements sensibles à l'étage...) Le tableau V.6 présente cette prise en compte des risques en fonction des sites.

Tableau V.6. : la prise en compte du risque dans la conception des bâtiments (en pourcentage des bâtiments enquêtés)

SITE	Nombre de bâtiments	1	2	3	4
Saintes	93	82 %	10 %	4 %	4 %
Béziers	89	87 %	2 %	9 %	2 %
Sérignan	37	86 %	11 %	3 %	0 %
Mâcon	29	52 %	14 %	24 %	10 %
Lagny	31	32 %	55 %	10 %	3 %
Esbly	70	47 %	43 %	7 %	3 %
Poitiers	150	91 %	4 %	5 %	0 %
Châtelleraut	15	80 %	13 %	7 %	0 %
TOTAL (ensemble des enquêtes)	514	76 %	15 %	7 %	2 %

1: pas de prise en compte
3: après une crue

2: dès la construction
4: en "prévision"

Il apparaît que la majorité des bâtiments, soit 76%, n'ont pas été conçus ni modifiés en fonction du risque (suivant les sites, de 32% à Lagny à 91% à Poitiers). Les modifications après une crue concernent 7% de l'échantillon (de 4 à 24%), celles "en prévision" d'une crue 2% (de 0 à 10%). Les bâtiments modifiés après construction "en prévision" représentent systématiquement les sous-populations les plus faibles.

Suivant les sites, les bâtiments enquêtés occupent des emprises d'inondations de fréquences différentes, ce qui semble avoir une influence sur le comportement "moyen" observé en matière de prévention. Ainsi, le risque est pris en compte à 68% à Lagny, à 53% à Esbly, à 48% à Mâcon (pour moitié après la crue rare de 1955 et les crues importantes de 1981 et 1982), où la fréquence des crues de référence correspond à une période de retour de moins de 35 ans. Par contre, la prise en compte est la plus faible pour les sites correspondant aux événements de référence les plus rares: Poitiers, Béziers, Sérignan, Saintes.

En dehors du cadre du questionnaire utilisé, les enquêteurs ont relevé les mesures individuelles de prévention pour 407 logements. Ces données ont été exploitées par Bourgue et Bruchet (1988). De telles mesures ont été prises pour 119 logements, soit 29%:

- pour 32% des occupants lorsque le chef de famille est actif (67 sur 210);
- pour 26% des occupants lorsque le chef de famille est inactif (52 sur 197).

Ces valeurs ne permettent pas de conclure d'une différence de comportements entre actifs et inactifs. Parmi les actifs, on obtient les pourcentages de "prises de mesure" suivantes en fonction des catégories socio-professionnelles:

- profession libérale : 58% (7 sur 12);
- cadre moyen : 46% (12 sur 26);
- cadre supérieur : 38% (3 sur 8);
- ouvrier : 32% (6 sur 19);
- employé : 26% (19 sur 73);
- artisan : 26% (9 sur 35);
- personnel de service : 26% (7 sur 27).

Sans accorder une validité exagérée à ces résultats, on peut raisonnablement soutenir l'hypothèse que la prise de mesures de prévention dépend du revenu actuel ou passé (cas des retraités). Cela correspond par ailleurs à des observations qualitatives des enquêteurs.

Le coût n'est pas le seul frein à l'adoption de mesures de prévention. Ainsi, des occupants âgés seront peu enclins à investir pour se protéger contre des événements rares. Par ailleurs, certaines mesures peuvent dégrader le confort du logement (remplacer le papier peint par un enduit peint, éviter le matériau bois, ôter la moquette...). On observe que les mesures individuelles sont souvent réalisées par les occupants eux-mêmes, quand cela leur est possible techniquement.

Nous n'allons pas ici nous lancer dans une liste des mesures de prévention rencontrées, dont certaines relèvent de la tradition locale, tandis que d'autres sont nées de l'imagination individuelle (Torterotot, 1988). Rappelons toutefois l'importance du contexte hydrologique (rapidité de la montée de crue, durée de submersion...) qui rend inefficaces sur une zone des mesures précieuses ailleurs.

L'assurance

L'assurance, volontaire ou obligatoire, ne constitue pas en soi une réduction absolue des dommages, mais une répartition des coûts dans le temps et/ou entre acteurs économiques. Quand cette assurance résulte d'une démarche volontaire, elle constitue un révélateur -au moins partiel- de comportement.

Kunreuther (1984) a étudié les freins à l'assurance individuelle contre les catastrophes naturelles aux Etats-Unis. Cette assurance (ou extension d'assurance) n'y est pas obligatoire comme en France (loi du 13/07/82), mais certaines conclusions présentent un intérêt pour la situation dans notre pays. Les choix effectués en matière d'assurance (facultative) résultent moins d'analyses coûts-avantages personnelles que d'éléments plus subjectifs: connaître quelqu'un qui est assuré, par exemple... Ainsi, la probabilité estimée de subir des dommages n'est pas corrélée avec le fait d'être assuré. Par ailleurs, parmi les personnes non assurées mais connaissant l'existence de polices d'assurance "catastrophes naturelles", certaines ont déclaré qu'elles seraient prêtes à payer une prime qui est en fait supérieure aux primes proposées par les compagnies d'assurance.

Burby et al (1988) ont observé que le taux de ménages assurés diminuait avec le temps (après la mise en place d'une cartographie des risques et d'un encadrement des régimes d'assurances), et que les décisions individuelles dépendaient d'expériences antérieures. Duclos (1988) propose une explication des réticences à l'assurance volontaire contre les catastrophes naturelles: *pour vivre dans des conditions de confort moral suffisantes, il ne faut pas que l'on vous rappelle constamment que vous habitez dans une zone "spéciale", "handicapée", ce que symbolise le "tribut" à payer aux assurances.* Ces résultats conduisent à s'interroger sur certains modèles de décision, supposant que chaque ménage maximise son utilité de revenu et d'épargne (Karlinger et Attanasi, 1980). On peut

s'interroger de même sur des propositions visant à baser l'information relative au risque sur l'affichage de coûts potentiels (James et Hall, 1986).

V.2.2. La perception du risque d'inondation

Boudier (1983) définit la perception comme la manière dont on prend conscience d'un fait et dont on comprend ce fait.

La perception des risques

La perception des risques fait -et a fait- l'objet de nombreuses études, orientées le plus souvent vers les risques technologiques ou sociétaux (Fischhoff et al, 1981; Lagadec, 1981; Slovic, 1987; Duclos, 1988; Fischhoff, 1988; Theys, 1988). Parmi les facteurs affectant la perception des risques, hormis la personnalité propre de l'individu, on distingue notamment:

- les caractéristiques formelles du risque (fréquence, importance...), l'importance probable étant plus ressentie que la fréquence;
- les manifestations du risque, et leurs conséquences sur l'homme (effets réels, caractère impressionnant...);
- les expériences vécues relatives à ce risque;
- la publicité faite autour des événements;
- la possibilité de contrôle du risque ou de ses conséquences.

Il faut noter que ces différents facteurs influent différemment sur la perception en fonction des gammes de risques concernées (Green, 1986-a). Selon Fischhoff (1988), la perception des risques est caractérisée par plusieurs éléments qui orientent les attitudes:

- la simplification du problème posé quand il a trop de composantes différentes ou qu'il est trop complexe;
- la difficulté à modifier des opinions établies;
- l'importance des expériences vécues;
- la difficulté à déceler des omissions dans les informations diffusées sur le risque;
- la propension à l'interprétation face à des informations ambiguës;
- la difficulté à définir le risque, et à le mesurer;
- la grande difficulté à appréhender les aspects probabilistes du risque.

La perception est indissociable de l'acceptation du risque. Cette acceptation est conditionnée par (Theys 1988):

- le caractère volontaire de l'exposition au risque;
- la fréquence et les conséquences (on préfère les risques dont les manifestations sont fréquentes mais "légères");
- le caractère familier ou inconnu du risque;
- l'existence ou non d'alternatives;
- le délai d'apparition des effets, et la réversibilité de ces effets;

- l'amélioration de la sécurité dans un domaine quelconque, ce qui accroît la demande générale de sécurité;
- les moyens de protection mis en oeuvre, toute baisse du niveau de risque faisant paradoxalement moins bien supporter le risque résiduel (Dourlens et al, 1991).

On observe de façon générale un besoin de se sentir rassuré, en sécurité, qui amène à sous-estimer spontanément le risque (Lagadec, 1981).

Percevoir les probabilités

Un certain nombre de risques se traduisent -de façon plus ou moins directe- sous forme probabiliste. Ainsi, en un endroit donné, on peut établir une relation entre des caractéristiques hydrologiques de l'inondation (le plus souvent la hauteur d'eau ou le débit) et la fréquence de l'événement (exprimée le plus souvent en période de retour).

Il apparaît que les gens ont le plus souvent du mal à appréhender et percevoir les problèmes probabilistes, qu'ils réduisent à des concepts connus issus de leur propre expérience. Ainsi, la crue centennale peut être comprise comme la plus forte crue présente dans les mémoires des anciens, ou comme la crue qui ne se reproduira pas avant 100 ans. De surcroît, les probabilités "extrêmes" en matière de risque sont faussement perçues, de façon quasi-systématiques. Ainsi, sur le cas des taux de mortalité, l'unité dans laquelle on exprime les probabilités influe sur les réponses (taux de survie, proportion de décès...), et par ailleurs les probabilités faibles sont surestimées, les probabilités fortes sous-estimées (Fischhoff et al, 1981).

Green et al (1990) soulignent le fait que le public recherche des interprétations causales "déterministes" plutôt que probabilistes (nous le verrons pour le cas particulier du risque d'inondation), et que sa perception est différente de celle des questionnaires ou des scientifiques.

Le cas du risque d'inondation

De façon générale, il faut souligner que l'inondation est perçue, dans les pays industrialisés occidentaux, avec une gravité moindre que beaucoup d'autres menaces (Duclos, 1988). Des travaux menés dans les zones exposées aux risques naturels ont établi que ces derniers ne constituaient pas une préoccupation de première importance pour les élus et les responsables (De Vanssay, 1988-a; -b). Une enquête de grande envergure menée aux Etats-Unis auprès de responsables et d'élus (Rossi et al 1982) place les risques naturels dans les 7 dernières préoccupations sur une liste de 18: le risque d'inondation vient après l'inflation, le chômage, la criminalité... (note de "gravité" de 4 sur une échelle croissante de 1 à 10). La même enquête menée auprès de 900 particuliers californiens a donné des résultats comparables.

L'étude de Rossi et al (1982) a cherché à identifier des facteurs explicatifs pour la perception de la gravité du risque naturel (par analyse des données). Les facteurs déterminants se sont révélés être la localisation géographique (exposition réelle) et les expériences passées, à moindre titre la tendance politique, le revenu (l'intensité de la perception décroît par rapport au revenu), l'âge (l'intensité de la perception décroît par rapport à l'âge).

Les expériences vécues antérieurement se sont révélées les plus déterminantes, par leur fréquence et par leur importance. Ainsi, les responsables au niveau des Etats sont apparus plus préoccupés par les risques naturels que les responsables au niveau local. Si chaque événement revêt une importance relative moindre pour les premiers, ils se trouvent confrontés plus souvent aux manifestations des risques naturels (puisqu'ils agissent à une échelle géographique plus vaste).

Ferrel et Krzysztofowicz (1983) ont développé un modèle quantitatif de réponse humaine à l'annonce des crues, dont une partie s'intéresse à l'évolution dans le temps de la perception du risque. Ils ont ainsi fait l'hypothèse que la survenue d'une inondation rapproche le risque perçu du risque réel, et qu'ensuite le degré de perception décroît exponentiellement avec le temps... jusqu'à l'inondation suivante. Ils ont modélisé de la même manière la probabilité perçue de subir des dommages dus aux inondations.

Cet effet de "décroissance dans le temps" apparaît d'autant plus fort si l'on considère la perception subjective "instantanée" du risque, qui est très exagérée. Ainsi, l'inondation de Nîmes en octobre 1988 a donné lieu à de fortes rumeurs exagérant le nombre de victimes, tant la violence perçue ne pouvait ni "s'accommoder" du nombre réel (et inespéré ?) de huit victimes directes, ni trouver un écho dans des dommages matériels assez rapidement effacés sur le plan visuel (Dourlens, 1989; Hansen, 1989).

Sur les zones d'enquêtes décrites au chapitre précédent, on a pu identifier les effets à la fois de la fréquence et de l'importance des inondations. Ainsi, la crue importante de 1983 à Mâcon a été précédée par une crue exceptionnelle en 1955, et par des crues (comparables à la plus récente) en 1981 et 1982. En 1983, les dommages sont restés limités du fait de la prise en compte du risque: rez-de-chaussée non habités, surveillance individuelle de la montée des eaux... Par contre, Saintes a subi en 1982 une crue centennale de la Charente avec des dommages conséquents à l'habitat. Ce cours d'eau déborde plusieurs fois par an, et touche des habitations de l'agglomération tous les 3 à 5 ans. Mais face à l'événement très rare de 1982, des personnes ont refusé de croire les prévisions -pourtant fiables et abondamment diffusées- et se sont laissées surprendre par un niveau de l'eau qu'ils ne croyaient pas possible, au vu d'expériences répétées mais d'intensité bien moindre.

Les expériences vécues d'inondations rendent la perception du risque plus intense. Par contre, des événements dont l'ampleur dépasse le champ de ces expériences sont moins facilement envisagés. Et la perception des probabilités reste une difficulté majeure. Suite à une crue sur l'amont du Danube, en 1988, d'une période de retour proche de 30 ans, 55% des personnes interrogées ont estimé cette période de retour à 10 ans ou moins (et 28% de 10 à 30 ans; Geipel, 1990).

Cette perception liée aux caractéristiques et à l'histoire locales -au-delà des réactions individuelles face à la situation de risque- engendre une culture locale du risque, dans le cadre plus général des relations à l'environnement (Nunes-Correia et al, 1990). Cette culture se traduit dans les comportements individuels, dans les mesures de prévention, dans les réactions face à la montée des eaux. Il serait particulièrement intéressant de pouvoir observer la naissance et l'évolution d'une telle culture, l'effet d'une inondation exceptionnelle, l'effet d'une longue période sans inondation...

Sur le plan individuel, la perception du risque est confrontée à la conviction d'être individuellement moins exposé et moins vulnérable (on ne croit pas forcément qu'une nouvelle inondation est possible; Fordham et al, 1989). Ainsi, des enquêtes menées sur trois zones inondables (Ferrel et Krzysztowicz, 1983) ont montré que si de 37% à 58% (selon les zones) des personnes interrogées sont conscientes de vivre dans la zone inondable, seules de 14% à 31% d'entre elles sont convaincues qu'elles risquent effectivement d'être touchées par l'inondation. Cela se traduit en particulier par une sur-estimation de la sécurité apportée, et par un "refus" des causes d'événements "naturelles", donc non maîtrisables et répétables (Dourlens, 1989; Torterotot, 1989; Green et al, 1990). La croyance en des responsabilités et défaillances humaines (travaux sur la rivière, gestion de barrages...) permet de croire "qu'un tel événement ne se reproduira plus si l'on y prend garde".

V.2.3. Peut-on interpréter les attitudes et prévoir les comportements ?

On a souligné, dans les paragraphes qui précèdent, la complexité et la variabilité des facteurs qui influencent les attitudes (au travers notamment de la perception du risque) et les comportements. Notons que Burton et al (1978) classent les éléments de comportement en quatre catégories:

- "absorber le risque, c'est-à-dire ne pas le reconnaître;
- "accepter" le risque, sans rien modifier;
- "réduire" l'aléa (fréquences, paramètres de submersion);
- "changer" la vulnérabilité.

Les études menées à ce jour sont restées, le plus souvent, sur un plan qualitatif. Ainsi, les travaux sur l'occupation humaine des zones inondables ont été initiés par White en 1945, à l'Université

de Chicago (Kates, 1971; Burton et al, 1978; Waddell, 1977), pour emprunter différentes approches successives au fil des décennies (Marston, 1983):

- l'approche traditionnelle repose sur un modèle écologique humain dans lequel on s'intéresse à l'individu pris isolément, en étudiant le processus d'ajustement au risque dans le cadre de l'interaction homme-nature (Kates, 1971);
- l'approche libérale intègre les contraintes institutionnelles et économiques pour expliquer les comportements individuels;
- l'approche radicale élargit le champ d'explication aux processus politiques et sociaux;
- l'approche plus récente par la relation homme-nature place le comportement face au risque dans le cadre de cette relation influencée par le travail et les modes de production.

Jusqu'ici, on n'a pas pu identifier de modèle satisfaisant de décision individuelle face au risque d'inondation. Ce processus de décision se base sur des connaissances hétérogènes, sur des phénomènes de perception dépendant de seuils (seuils d'impact, de fréquence...), sur des critères multiples. Il est en outre soumis à des influences multiples de natures politiques, économiques, sociales, psychologiques (Penning-Rowsell, 1991). Munier (1989, 1992) souligne notamment les limites des modèles économiques de décision face au risque.

Il n'entre pas dans nos compétences de proposer une orientation pour des modèles de comportements, ni de faire une critique scientifique des approches sociologiques empruntées. Mais il nous a semblé opportun et important de souligner cette dimension de la question des inondations, qui influent notamment sur les dommages, et à laquelle on est inmanquablement confronté.

V.3. DES PROPOSITIONS POUR DES DEMARCHES D'OBSERVATION ET DE RECUEIL D'INFORMATIONS

En tentant de caractériser le facteur humain en matière d'inondations et de déterminer les paramètres susceptibles de l'influencer, on identifie un grand nombre d'objets d'analyse et de problématiques au-delà de la seule estimation des dommages. Nous avons cherché ici à sélectionner certains thèmes, qui nous sont apparus répondre à des questions majeures dans une optique plus large d'évaluation et de gestion du risque d'inondations.

Les différents objets d'études qui se dégagent de l'analyse menée peuvent être regroupés sous les rubriques suivantes:

- la spécificité des zones inondables: mode d'occupation, type d'habitat, caractéristiques socio-professionnelles des occupants, valeurs immobilières, mobilité des occupants;
- les comportements face au risque: perception du risque, mesures de prévention, comportements en matière d'assurance;
- les réactions à l'événement d'inondation: alerte (efficacité, crédibilité...), réponses (mesures immédiates de protection...).

Ces objets d'étude sont à rapprocher notamment de différents facteurs "collectifs" susceptibles de les influencer:

- le degré d'exposition de la zone délimitée;
- les caractéristiques des crues: rapidité, durée...;
- l'histoire hydrologique locale des dernières décennies (fréquence et importance des crues en général, et des crues dommageables en particulier) qui est à l'origine de la culture locale du risque;

- l'existence de protections structurelles;
- l'existence et les caractéristiques de l'annonce de crue;
- la réglementation (PERi...), l'information, la sensibilisation.

L'influence de certains de ces facteurs est à considérer à la fois sous l'angle "statique" et sous l'angle "dynamique", en ce qui concerne la spécificité des zones inondables (occupation, urbanisme...) et les comportements face au risque (individuels ou collectifs). En particulier, les modifications intervenant dans l'occupation de la zone et dans les comportements, suite à la survenue d'une inondation importante, ou suite à la mise en place de protections structurelles, ou encore suite à l'entrée en vigueur d'une réglementation spécifique, sont difficiles à cerner. Pourtant, la connaissance même grossière de ces tendances est d'un grand intérêt opérationnel.

Il faut noter que le suivi d'une zone particulière dans le temps à l'aide d'enquêtes pose un problème spécifique, en ce sens que les enquêtes sont fortement susceptibles de modifier les comportements et les attitudes individuels (prise de conscience du risque, rôle inévitable de conseil...). Or seule la "spécificité d'occupation des zones inondables" pourrait être abordée sans enquêtes directes auprès de la population (à partir de sources statistiques détaillées...).

Parmi les différentes voies d'études qui s'offrent, cinq problématiques nous apparaissent présenter un intérêt opérationnel ou scientifique particulier:

- a la perception du risque et la prévention en fonction de l'histoire locale des inondations (une zone menacée mais épargnée au cours des dernières décennies, à comparer à une zone touchée récemment par une inondation rare...);
- b l'évolution de la perception du risque et de la prévention face à différentes actions de sensibilisation: enquêtes seules, Plan d'Exposition aux Risques d'Inondation (en s'assurant que les enquêtes n'apparaissent pas comme un contrôle de l'Etat), information, offre de diagnostic gratuit pour des mesures individuelles de prévention...;
- c les conséquences de la mise en place d'un Plan d'Exposition aux Risques d'Inondation sur les zones faisant l'objet de la réglementation: urbanisme, habitat (valeurs immobilières...);
- d la conséquence du risque sur les valeurs immobilières et les caractéristiques socio-professionnelles; l'évolution de ces paramètres dans le temps en fonction des événements d'inondation;
- e l'efficacité (en termes de satisfaction, de réduction des dommages...) du processus "prévision des crues -> annonce -> diffusion de l'alerte -> réponses de la population", en fonction de son organisation et de son contexte.

Ce dernier point est l'un des thèmes spécifiques étudiés dans le cadre du projet EUROFLOOD, auquel le chapitre suivant est une contribution. Par ailleurs, il faut bien noter que les questions (c) et (d) sont liées: une réglementation d'occupation des sols porte sur une zone plus ou moins conditionnée par le risque et par des événements ponctuels. En affichant ce risque, en imposant des mesures de prévention, en laissant présager de la meilleure maîtrise du risque (individuelle et/ou collective), la réglementation va influencer sur les mêmes paramètres que le risque, dans le même sens ou dans le sens opposé. C'est sur cette problématique nécessairement intégrée que le CERGRENE a réalisé une première analyse de faisabilité pour un observatoire sur l'habitat en zone urbaine inondable (Zech et al, 1992).

Que ces différents sujets d'analyse soient ou non liés à l'analyse d'une politique ou d'une mesure, les voies d'études identifiées appellent des méthodologies employées notamment pour l'évaluation des politiques publiques (Angelmar, 1984; Deleau et al, 1986; Cordeiro-Netto et Barraqué, 1991):

- études comparatives de populations soumises pour des degrés différents à un risque ou à une politique (coupes transversales);

- études comparatives d'une même population au cours du temps, en analysant les évolutions progressives ou les effets d'événements ponctuels (coupes longitudinales);
- imbrication de paramètres quantitatifs et qualitatifs; mesures de perceptions et d'opinions (recours à des échelles psychologiques -Likert, Guttman- telles celles présentées par Bailly, 1977; Green, 1988).

Le nombre de facteurs intervenant dans ces problématiques est tel qu'une étude commence par une délimitation parfois drastique du champ d'analyse, et par des hypothèses sur les liens entre attitudes et comportements (Bailly, 1977; 1978). Par ailleurs, le peu de travaux sociologiques dont on dispose sur le risque d'inondation impose de réserver une place importante à la définition des problématiques analysées: phases de reconnaissance, pré-enquêtes, identification des représentations... (GRAIE, 1991). Il nous semble qu'il y a beaucoup à gagner, en matière de gestion du risque d'inondations, à élargir et approfondir nos connaissances sur le facteur humain, malgré les difficultés méthodologiques que cela soulève. Toute politique doit pouvoir s'appuyer sur ces connaissances, à commencer par les actions d'information et de sensibilisation de la population (Roche, 1989-a; Lalo, 1992).

VI. LES REPONSES INDIVIDUELLES A L'ALERTE ET LEUR ACTION SUR LES DOMMAGES: ANALYSE ET MODELISATION

Les eaux de la Neva montaient. Et le sang, comme relié à elles par des veines souterraines, lui aussi montait.

Zamiatine, 1988, p. 15

VI.1. LES OBJECTIFS ET LE CONTEXTE

Dans le chapitre précédent, consacré au facteur humain par rapport aux dommages à l'habitat, on a beaucoup insisté sur la phase "en temps réel" des comportements: l'alerte (ou son absence) et sa prise en compte, les réponses individuelles destinées à réduire les impacts de l'inondation annoncée ou en cours. De fait, les collectivités et les décideurs se préoccupent toujours d'améliorer l'efficacité de la prévision et de l'annonce des crues, qui constituent la mesure non-structurelle la plus répandue face au risque d'inondations, accompagnées de la mise en oeuvre fréquente de mesures collectives (évacuation, distribution de matériaux...).

Mais en regard des investissements que cela représente, se pose la question de l'évaluation de l'efficacité, voire des "bénéfices" d'un système d'annonce et d'alerte par divers critères envisageables (Penning-Rowse et Handmer, 1986; Neal et al, 1989; Roche, 1989-b): précision de la prévision hydrologique, pourcentage de population prévenue dans un délai donné, degré de satisfaction des usagers, dommages évités... Dans le domaine de la recherche comme dans celui de la pratique, force est de reconnaître que ce sont l'alerte de la population et les réponses individuelles qui sont le moins bien connues (qualitativement ou quantitativement).

L'objet de ce chapitre est de présenter une tentative d'analyse des facteurs qui influencent les réponses individuelles à la montée des eaux et à l'alerte, ainsi que l'effet de ces réponses sur les dommages à l'habitat. Ce travail se base sur les enquêtes effectuées en 1988 auprès de sinistrés, et présentées dans les deux chapitres qui précèdent.

On a souligné plus haut la multitude de facteurs sociologiques et psychologiques qui influencent les comportements individuels, et présenté quelques unes des difficultés méthodologiques pour des analyses de ces comportements. De surcroît, à ces aspects intrinsèques s'ajoute le fait que le thème du risque d'inondation interfère avec des sujets de conflits potentiels comme l'occupation des sols, l'urbanisme... Les données sur lesquelles on se base et leur méthode d'analyse n'échappent pas à ces pièges méthodologiques. Les entretiens directs d'enquêtes ont été menés avec un délai que l'on espère suffisant pour que les réactions émotionnelles se soient dissipées ou du moins "stabilisées". Mais l'orientation majeure des enquêtes sur les dommages matériels n'a pas permis de mettre en oeuvre des techniques élaborées d'enquêtes sociologiques, qui auraient peut-être mis en lumière des conflits sociaux portant sur les inondations.

Par ailleurs, toute procédure d'enquête influence l'objet d'observation par le choix des questions, les hypothèses implicites sur les variables importantes et les types d'attitudes "prévisibles" ... (D.R.I, 1991). Si nous insistons ici sur différents problèmes méthodologiques susceptibles de se poser, c'est qu'une analyse plus complète de la question posée aurait nécessité un travail d'analyse sociologique et psychologique de terrain que nous n'étions pas en mesure de réaliser. Nos sources dans ce domaine, telles qu'elles apparaissent notamment dans le chapitre précédent, sont uniquement bibliographiques.

Dans les travaux qui sont mentionnés plus haut, on observe une forte hétérogénéité des conclusions quantitatives portant sur la réduction des coûts de dommages par l'alerte en général ou par certaines réponses en particulier. Ces analyses prennent en compte différents facteurs explicatifs (chacune en considérant un nombre limité), mais leur confrontation est rendue périlleuse par le fait que les résultats reposent sur des conditions hétérogènes (identifiées ou non): caractéristiques de l'habitat et de la submersion, méthodes d'évaluation, hypothèses sous-jacentes...

Malgré les faiblesses relatives de notre base de données, que nous avons évoquées plus haut, il nous est apparu que cette base constituait un support intéressant pour analyser l'alerte et les réponses individuelles. En effet, les données recueillies présentent les caractéristiques suivantes:

- elles recouvrent des conditions variées de submersion;
- elles recouvrent des conditions variées d'habitat, avec une diversité sociale des ménages;
- elles recouvrent des conditions variées d'alerte et de réponses;
- elles ont été définies et recueillies selon une procédure homogène (en-dehors de la variabilité pouvant provenir des différentes équipes d'enquêteurs).

Comme cela a été indiqué en introduction à cette partie du mémoire, le travail présenté ici a été mené dans le cadre du projet EUROFLOOD bénéficiant d'un soutien financier de la Commission des Communautés Européennes (Torterotot, 1992; dans EUROFLOOD, 1993; Torterotot et al, 1992). Par ailleurs, le travail d'analyse des données a bénéficié d'une aide très précieuse de la part de Luiz Augusto Kauark-Leite qui doit en être vivement remercié.

Dans le corps de ce chapitre, on présente successivement une analyse qualitative des facteurs affectant le processus "alerte - réponses - dommages" (par la méthode de l'analyse factorielle des correspondances multiples), puis une quantification rudimentaire des dommages matériels à l'habitat en fonction de facteurs explicatifs, dont les réponses individuelles. Précisons que les analyses présentées ne portent que sur l'habitat individuel, dans la mesure où l'habitat collectif est trop peu représenté dans notre échantillon d'enquêtes.

VI.2. UNE ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE DU PROCESSUS "ALERTE - REPONSES - DOMMAGES" ET SON INTERPRETATION

L'objectif précis de cette analyse est d'identifier, au travers des dossiers d'enquêtes, les relations qualitatives entre les paramètres caractérisant respectivement la crue et la submersion, l'habitat et ses occupants, l'alerte et les mesures de protection et de prévention, les dommages au mobilier et à l'immobilier.

VI.2.1. Les variables considérées

Nous pouvons classer les variables analysées en cinq groupes en fonction du type d'information qu'elles apportent: (1) données sur la crue et sur l'alerte, (2) données sur l'inondation et sur l'habitat, (3) données sur les dommages, (4) données sur les mesures de protection et de prévention et (5) données caractérisant le ménage occupant le logement.

Nous n'avons pris en compte que les dossiers d'enquêtes ne présentant pas de valeurs manquantes (ici 143 sur 385, et un nombre plus important -plus de 200- dans l'analyse présentée en VI.3). Par ailleurs, le codage des variables quantitatives a été réalisé en essayant d'avoir une distribution uniforme des dossiers dans chacune des classes de valeurs. Précisons que toutes les données économiques et financières ont été réactualisées en valeurs au deuxième trimestre 1991. Dans certains dossiers d'enquête (minoritaires), les dommages étaient estimés en coût de remise à neuf, et non en coût de remplacement. Il y a une différence entre les deux coûts sur l'ensemble des biens mobiliers, et sur une partie non quantifiable des biens immobiliers. Pour revenir au coût de remise en état sur ces dossiers, on a choisi de modifier les valeurs concernées de la façon suivante:

- en divisant par 2 les coûts relevant du mobilier, lorsqu'ils sont connus (en moyenne, amortissement de la moitié de la valeur);
- en réduisant de 25% les coûts totaux dont on ne connaît pas le détail (cela revient à accorder le même poids aux dommages immobiliers et mobiliers, et en fait on observe en

moyenne des ordres de grandeur comparables); cette hypothèse intervient très peu dans la suite de l'analyse.

Le tableau VI.1 rappelle les variables décrites ci-dessous, avec leur codage.

Tableau VI.1. : variables considérées pour l'analyse du processus "alerte - réponses - dommages"

Crue et Alerte		Endommagement	
SITE(*):	(1) Charente; (2) Orb; (3) Marne; (4) Clain; (5) Vienne.	DEMO:	(1) $0 < DEMO < 1\%$; (2) $1 < DEMO < 5\%$; (3) $5 < DEMO < 15\%$; (4) $DEMO > 15\%$;
CRUE:	(1) lente; (2) rapide.	DEIM:	(1) $0 < DEIM < 1,5\%$; (2) $1,5 < DEIM < 4\%$; (3) $4 < DEIM < 9\%$; (4) $DEIM > 9\%$.
ALER(*):	(1) oui; (2) non.	DETO(*):	(1) $0 < DETO < 2\%$; (2) $2 < DETO < 4,5\%$; (3) $4,5 < DETO < 10\%$; (4) $DETO > 10\%$.
DÉL:	(1) pas d'alerte; (2) alerte par la montée des eaux; (3) délai ≤ 2 heures; (4) délai > 2 heures.	Mesures de protection	
Inondation et Habitat		MSTR:	(1) présence; (2) absence.
HAB:	(1) un niveau; (2) un niveau + sous-sol; (3) deux niveaux; (4) deux niveaux + sous-sol.	OBT:	(1) présence; (2) absence.
HSUB:	(1) $H_{SS} < 80$ cm; (2) $H_{SS} > 80$ cm et $H_1 < -10$ cm; (3) -10 cm $< H_1 < 80$ cm; (4) 80 cm $< H_1 < 160$ cm; (5) $H_1 > 160$ cm.	VEH:	(1) présence; (2) absence.
Dommages		DEP:	(1) présence; (2) absence.
DMO:	(1) $DMO = 0$ KF; (2) $0,0 < DMO < 0,5$ KF; (3) $0,5 < DMO < 1,5$ KF; (4) $1,5 < DMO < 4$ KF; (5) $DMO > 4$ KF.	DFX:	(1) présence; (2) absence.
DIM:	(1) $0 < DIM < 1$ KF; (2) $1 < DIM < 2$ KF; (3) $2 < DIM < 5$ KF; (4) $DIM > 5$ KF.	REFU(*):	(1) présence; (2) absence.
DTOT(*):	(1) $0 < DTOT < 2$ KF; (2) $2 < DTOT < 5$ KF; (3) $5 < DTOT < 10$ KF; (4) $DTOT > 10$ KF.	Ménages	
		RESI(*):	(1) résidence principale; (2) résidence secondaire.
		ANCI(*):	(1) ANCI < 6 ans; (2) $5 < ANCI < 15$ ans; (3) ANCI > 15 ans.
		NBR(*):	(1) NBR = 0 personne; (2) NBR = 1 personne; (3) NBR = 2 personnes; (4) NBR = 3 personnes; (5) NBR ≥ 4 personnes.
		CSP(*):	(1) employé; (2) cadre; (3) retraité.

H_{SS}: hauteur de submersion à partir du plancher du sous-sol et *H₁*: hauteur de submersion à partir du plancher du premier niveau aménagé

(*) variables supplémentaires pour l'analyse générale (AFCM)

Les données sur la crue et sur l'alerte

Les variables utilisées pour caractériser la crue et la procédure d'alerte sont le site, **SITE**, le type de crue, **CRUE** (*i.e.*, la vitesse de montée des eaux), l'absence ou non d'alerte, **ALER**, et le délai d'alerte, **DEL**.

Les sites ont été nommés en fonction de la rivière concernée, *i.e.*, Charente, Orb, Marne, Clain et Vienne. Etant donné le très faible nombre de questionnaires complets sur la ville de Mâcon, nous ne l'avons pas prise en compte dans l'analyse. La variable type de crue caractérise la vitesse de montée des eaux et elle a été codée en deux modalités: lente (< 10 cm/h) et rapide (> 10 cm/h). Le délai d'alerte a été codé sur quatre modalités, *i.e.*, pas d'alerte, alerte par la montée des eaux, délai d'alerte par un tiers inférieur à deux heures et délai d'alerte par un tiers supérieur à deux heures.

Les variables **SITE** et **ALER** ont été mises en éléments supplémentaires, c'est-à-dire qu'elles ne participent pas à la détermination des axes factoriels, mais sont projetées sur ceux-ci d'après leurs profils (voir plus loin). Ceci permet d'apprécier les rapports entre ces variables et le dommage lui-même ainsi que les variables explicatives des dommages. Ces deux variables sont redondantes (partiellement) avec **CRUE** et **DEL** respectivement.

Les données sur l'inondation et l'habitat

La variable **HAB** indique le nombre de niveaux dans le bâtiment. Comme nous avons seulement travaillé avec des maisons individuelles, cette variable traduit également la répartition des biens dans le bâtiment ainsi que l'existence ou non d'une pièce refuge pour le déplacement des biens mobiliers.

HAB a été codé en quatre modalités: un seul niveau aménagé, un niveau aménagé plus sous-sol, deux niveaux aménagés et deux niveaux aménagés plus sous-sol. Nous avons considéré qu'il y avait équivalence entre le fait qu'un niveau soit placé en sous-sol (*i.e.*, enterré au moins sur trois côtés et au moins sur les trois quarts de sa hauteur) et le fait qu'il ne soit pas aménagé. Si l'on peut raisonnablement considérer que les sous-sols ne sont pas "aménagés", par contre des niveaux non-enterrés peuvent n'être pas que bien faiblement aménagés.

La variable hauteur de submersion, **HSUB**, indique le niveau de l'eau atteint dans le bâtiment. **HSUB** a été codé en cinq modalités permettant de prendre en compte la nature du niveau inondé: hauteur de submersion du sous-sol (H_{SS}) inférieure à 80 cm, hauteur de submersion du sous-sol supérieure à 80 cm et inférieure à -10 cm par rapport au premier plancher aménagé, hauteur de submersion supérieure à -10 cm et inférieure à 80 cm à partir du premier plancher aménagé (H_1), hauteur de submersion supérieure à 80 cm et inférieure à 160 cm à partir du premier plancher aménagé, hauteur de submersion supérieure à 160 cm à partir du premier plancher aménagé.

Les données sur les dommages et l'endommagement

Nous avons regroupé les dommages en dommages au mobilier, **DMO** (*i.e.*, meubles, appareils électro-ménager, TV, hi-fi, photo, vidéo, informatique, rideaux, tapis, moquettes, revêtements plastiques, lingerie, effets d'habillement, denrées alimentaires, pharmacie, livres, collections, objets précieux, outils, cycles, ...) et dommages aux biens immobiliers, **DIM** (*i.e.*, gros-oeuvre et abords immédiats, second-oeuvre: revêtements de murs et des sols, équipements fixes, ...). Le dommage total, **DTOT**, est la somme des dommages au mobilier et aux biens immobiliers. Ce dernier a été pris comme élément supplémentaire car l'information est redondante avec celles de **DMO** et **DIM**. **DMO** a été codé en cinq modalités: égal à 0 KF, entre 0 KF et 0,5 KF, entre 0,5 et 1,5 KF, entre 1,5 et 4 KF et supérieur à 4 KF (KF = kilofranc = 1000 francs). **DIM** a été codé en quatre modalités: entre 0 KF et 1 KF, entre 1 et 2 KF, entre 2 et 5 KF et supérieur à 5 KF. **DTOT** a été codé en quatre modalités: entre 0 KF et 2 KF, entre 2 et 5 KF, entre 5 et 10 KF et supérieur à 10 KF.

L'endommagement (le rapport entre la valeur des dommages et la valeur des biens) a été calculé par rapport à la valeur des biens immobiliers, car d'une part l'incertitude sur cette valeur est plus faible et d'autre part nous avons moins de valeurs manquantes sur cette variable. L'endommagement au mobilier, **DEMO**, a été codé en quatre modalités: entre 0 et 1%, entre 1 et 5%,

entre 5 et 15% et supérieur à 15%. L'endommagement aux biens immobiliers, **DEIM**, a été codé en quatre modalités: entre 0 et 1,5%, entre 1,5 et 4%, entre 4 et 9% et supérieur à 9%. L'endommagement total, **DETO**, a été codé en quatre modalités: entre 0 et 2%, entre 2 et 4,5%, entre 4,5 et 10% et supérieur à 10%.

Les données sur les mesures de prévention et protection

Ces données concernent d'une part les mesures structurelles prises avant l'événement, c'est-à-dire la prise en compte du risque dans la conception du bâtiment lui-même, et d'autre part les mesures immédiates de protection prises à partir du moment où les personnes sont alertées quant au risque d'une inondation imminente.

La variable mesures structurelles, **MSTR**, a été codée en deux modalités: présence ou absence. Pour ce qui concerne les mesures de protection prises juste avant ou pendant la submersion, les questionnaires prévoyaient quatre types de comportements: obturation des portes et fenêtres, éloignement des véhicules, déplacement des biens mobiliers vulnérables et déplacement des appareils fixes ou lourds. Chacune de ces mesures, **OBT**, **VEH**, **DEP** et **DFX** ont été respectivement codées comme une variable ayant deux modalités: présence ou absence. Il est possible qu'une réponse négative quant à l'éloignement des véhicules (**VEH**) corresponde à l'absence de véhicule.

Comme l'adoption des deux dernières mesures de protection dépend de l'existence d'une pièce refuge, nous avons créé une variable auxiliaire, **REFU**, qui indique la présence ou l'absence d'un niveau capable d'abriter temporairement les biens pendant la submersion. Cette variable a été également prise comme élément supplémentaire.

Les données complémentaires sur les ménages

Ces données complémentaires sur les ménages concernent les informations sur le type de résidence, l'ancienneté dans le quartier, le nombre de personnes vivant habituellement dans le foyer, et la catégorie socio-professionnelle du chef de famille. Ces variables ont été mises en éléments supplémentaires afin de caractériser les dommages non seulement par rapport aux variables liées à l'inondation et aux biens exposés, mais aussi par rapport aux variables extrinsèques.

Le type de résidence, **REST**, a été codé en deux modalités: résidence principale et résidence secondaire, l'ancienneté dans le quartier, **ANC**, en trois modalités: inférieure à six années, entre six et quinze années et supérieure à quinze années, le nombre de personnes, **NBR**, en cinq modalités: 0, 1, 2, 3 et 4 ou plus et la catégorie socio-professionnelle du chef de famille, **CSP**, en trois modalités: employé, cadre et retraité. La modalité "employé" correspond approximativement aux travailleurs n'ayant *a priori* pas une formation supérieure, la modalité "cadre" correspond à ceux ayant *a priori* une formation supérieure ou aux chefs d'entreprise (ou assimilés).

VI.2.2. L'analyse factorielle des correspondances multiples

L'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) est une méthode d'analyse des données adaptée aux situations où l'on mélange des variables continues -quantitatives- et des variables binaires -qualitatives- (Benzécri, 1980; Fénelon, 1981; Voile, 1985). Les variables continues sont d'abord discrétisées en un ensemble de variables binaires de type "valeur appartenant à un intervalle donné" (forme disjonctive complète, voir ci-dessus). La matrice de contingence (tableau de Burt) de ce nouveau jeu de variables est alors analysée par une méthode factorielle en considérant la métrique du khi². On définit ainsi les vecteurs propres d'une "matrice d'inertie". Ces vecteurs représentent les directions privilégiées structurant les nuages de points des "logements", localisés dans l'espace défini par les variables. En d'autres termes, ces directions privilégiées révèlent les liens majeurs entre les variables. L'AFCM permet notamment de mettre à jour des relations non linéaires entre variables.

La valeur propre attachée à chaque vecteur propre, ou "axe factoriel", représente alors la part de l'inertie totale du nuage de points, que l'on peut expliquer le long de ce vecteur ou axe. L'AFCM impose d'augmenter le nombre de variables pour que celles-ci soient toutes mises sous une forme disjonctive complète. C'est pourquoi les valeurs propres qui se dégagent ici constituent une "mesure"

plutôt pessimiste de l'information portée par chaque axe, par rapport à d'autres méthodes factorielles. Le codage des données présenté plus haut conduit à considérer 60 variables.

Dans l'analyse, il est recommandé de ne considérer que les axes factoriels de plus haut rang, en vérifiant en outre que ces axes "majeurs" constituent un ensemble stable: on s'assure pour cela que le dernier axe considéré et le suivant présentent des valeurs propres suffisamment disjointes (dans le cas contraire, un petit écart dans les données d'entrée pourrait modifier l'ordre des axes et donc la nature des axes "majeurs" considérés).

Un couple "variable v - axe A" peut être interprété au travers de trois paramètres:

- la projection de v sur A (dans le nouvel espace repéré par les axes factoriels);
- la corrélation entre v et A;
- la contribution de la variable v à l'inertie portée par l'axe A.

Cette interprétation, dont un exemple détaillé est donné en annexe VI.A, se fait selon les étapes suivantes:

- les positions (par rapport à l'axe) des variables présentant une forte contribution conduisent à la définition de la signification de cet axe;
- au contraire, les variables qui ne sont que corrélées à cet axe peuvent être partiellement expliquées par cet axe;
- des variables supplémentaires peuvent être ajoutées dans un second temps, après identification des axes, pour être interprétées dans l'espace repéré par les axes.

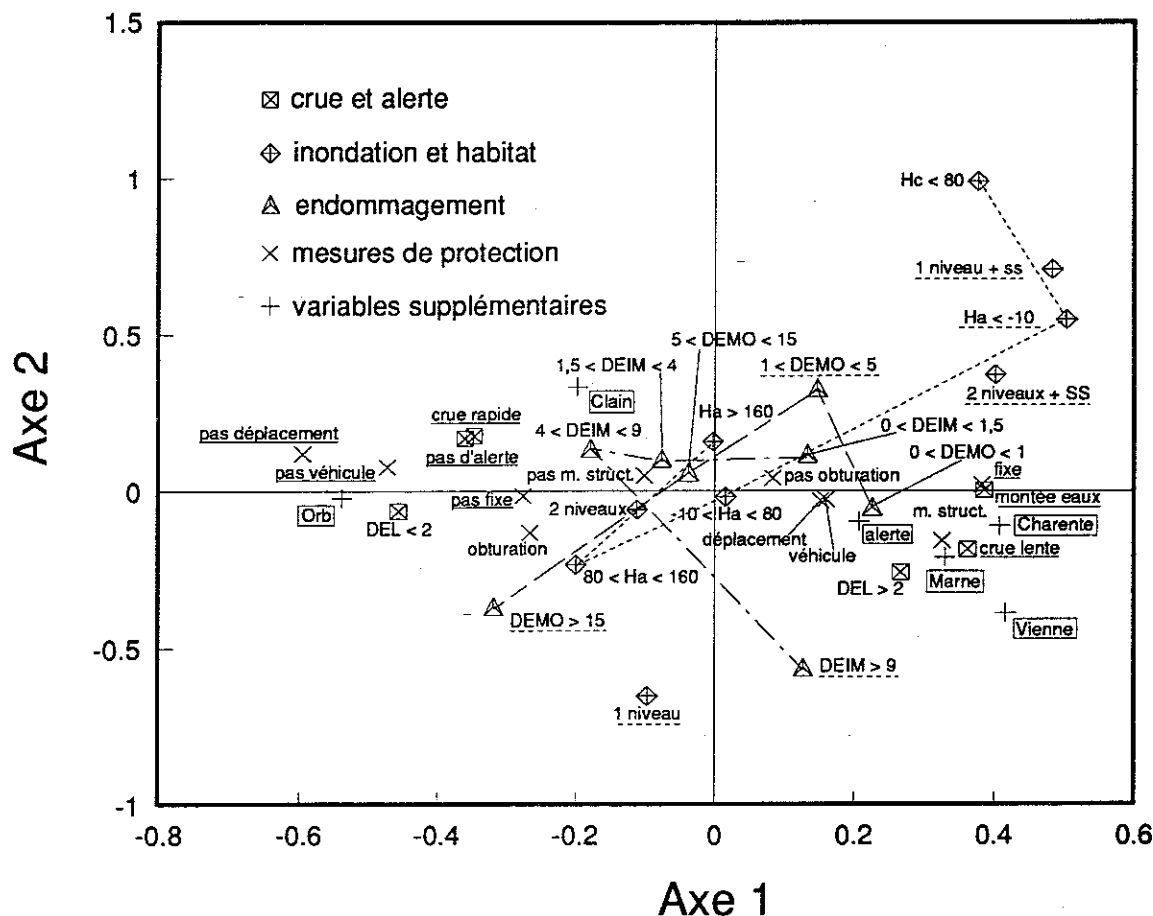
Les variables supplémentaires considérées a priori sont présentées dans le tableau VI.1. Ces variables ont été choisies selon deux critères: d'une part la redondance d'information par rapport à d'autres variables, d'autre part le fait d'avoir contribué le moins aux axes majeurs lors d'une première AFCM générale.

L'analyse a été menée sur les 143 dossiers d'enquêtes, pour lesquels on disposait de données complètes sur les variables considérées. Quatre tableaux ont été analysés successivement:

- le tableau "Dommages": toutes les variables principales initiales (tableau VI.1) à l'exception des endommagements;
- le tableau "Endommagements": toutes les variables principales initiales à l'exception des dommages;
- le tableau "Alerte - crue rapide" en ne considérant que les logements touchés par une crue rapide: les variables principales considérées sont les mesures de protection et de prévention, les données sur la crue et l'alerte, les données sur les ménages;
- le tableau "Alerte - crue lente" en ne considérant que les logements touchés par une crue lente: les variables principales considérées sont les mesures de protection et de prévention, les données sur la crue et l'alerte, les données sur les ménages.

L'AFCM a été réalisée à l'aide du logiciel d'analyse des données ADDAD (version micro 98.1; voir ADDAD, 1989). Nous avons utilisé plus particulièrement les programmes TABACO (construction d'un tableau croisé, c'est-à-dire le tableau de Burt), ANCORR (analyse des correspondances) et AIDAFIC (aide à l'interprétation d'une analyse des correspondances). L'analyse détaillée du premier tableau est présentée en annexe VI.A (résultats complets détaillés dans Torterotot, 1992; dans EUROFLOOD, 1993). La figure VI.1 présente, pour chaque tableau analysé, les variables par rapport aux deux premiers axes.

Figure VI.1. (suite)



(b) tableau "Endommagements"

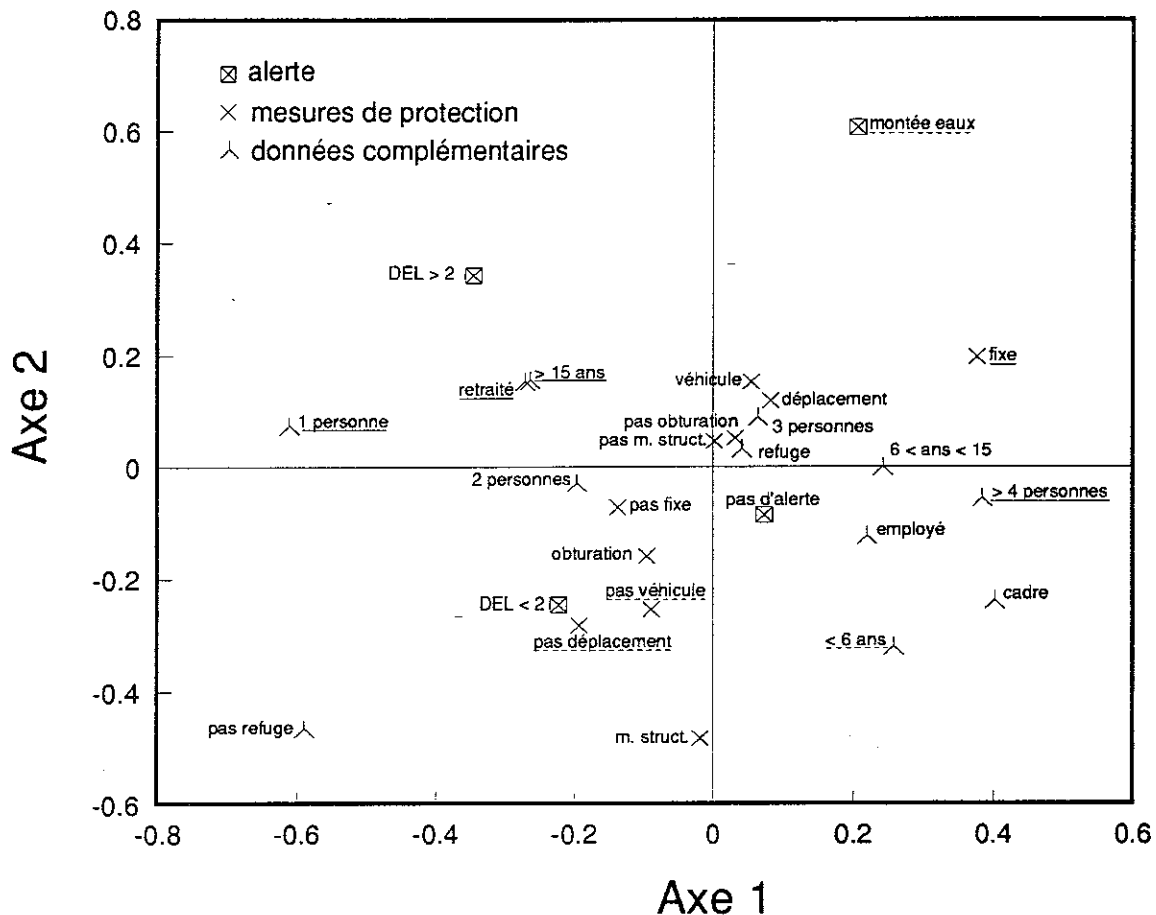
L'analyse du tableau "Endommagements"

On a discuté, dans le chapitre IV, le fait que les dommages pouvaient, en première approximation, être considérés proportionnels à la quantité de biens matériels exposés (surface, nombre de meubles...) et liés à la nature de ces biens. Ainsi, une analyse qui porterait uniquement sur les dommages absolus négligerait cette source de variabilité importante que constitue la "richesse" du logement. Comme cela a été présenté plus haut, nous avons considéré comme endommagement le dommage en coût absolu divisé par la valeur immobilière (trop de données manquantes sur les valeurs mobilières exposées). Cela revient à s'appuyer sur l'hypothèse implicite que les valeurs du mobilier sont proportionnelles aux valeurs immobilières (car conditionnées par un même niveau de richesse d'un ménage; voir IV.1).

Les résultats sont qualitativement les mêmes que pour l'analyse du tableau "Dommages", le premier axe étant défini par la vitesse de montée de la crue et le second par la présence d'un sous-sol. Cette analyse montre ou confirme les points suivants:

- les dommages (endommagements) importants à l'immobilier sont liés aux crues lentes (une crue "lente" correspond également à des durées de submersion longues);
- les dommages (endommagements) importants au mobilier sont liés aux crues rapides;

Figure VI.1. (suite)



(c) tableau "Alerte - crue rapide"

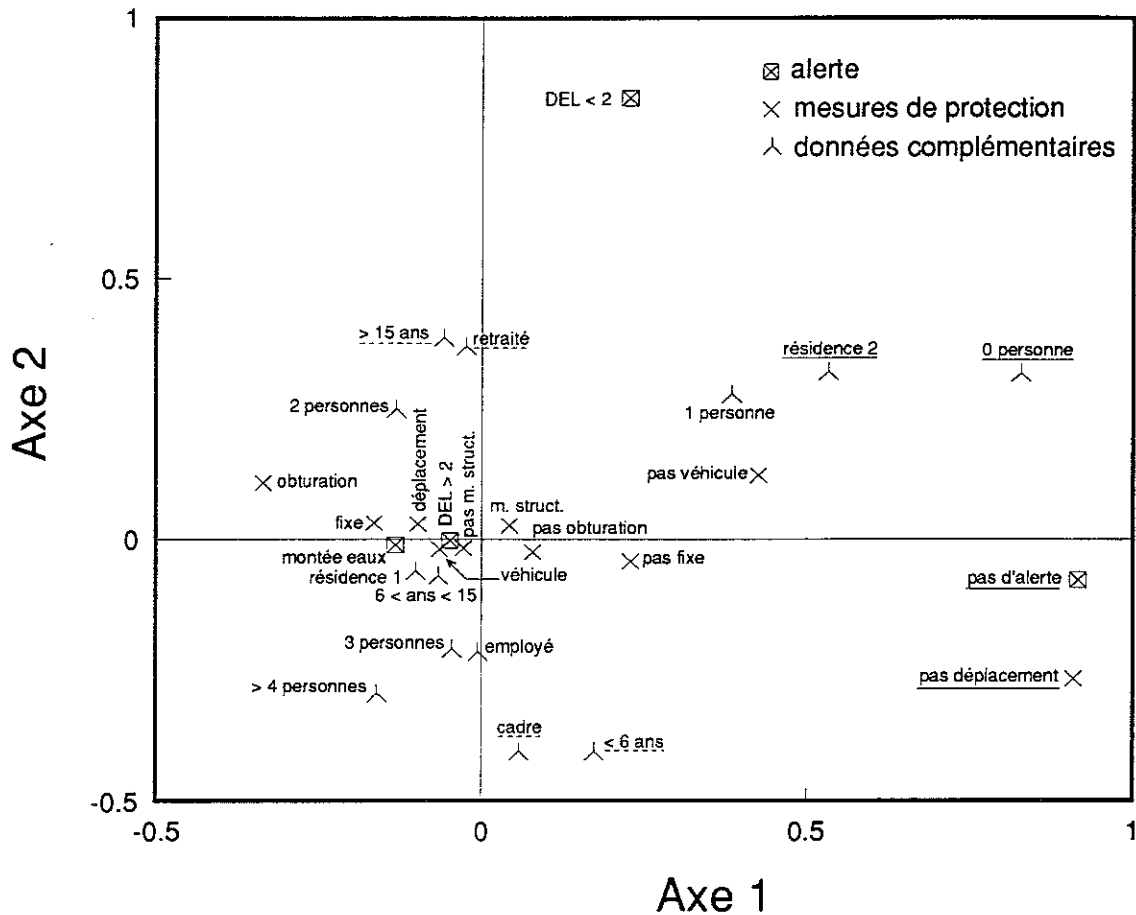
- les endommagements importants sont plutôt liés aux maisons à un seul niveau et sans sous-sol, les endommagements faibles aux maisons avec sous-sol; il faut noter que pour les maisons avec sous-sol considérées ici, les premiers niveaux habités ont rarement été inondés, d'où il ressort que les valeurs exposées dans la réalité ne sont pas comparables entre les types de maisons;
- la hauteur de submersion a , au mieux, une influence secondaire sur les phénomènes décrits par le jeu de variables complet; mais il est bien évident qu'en moyenne, les dommages augmentent en fonction de cette hauteur de submersion pour un ensemble de maisons donné.

Les deux premières analyses soulignent l'importance du facteur mixte "vitesse de montée de la crue - durée de submersion" pour approfondir les relations entre variables. Pour focaliser l'analyse sur les réponses (qui nous intéressent en premier lieu ici), les analyses suivantes distinguent les dossiers d'enquêtes selon le type de la crue.

L'analyse du tableau "Alerte - crue rapide"

Le premier axe est défini avant tout par le nombre d'occupants du logement (à la période de l'inondation). Un nombre d'occupants important se révèle lié au fait de démonter et déplacer des appareils fixes ou lourds, un nombre faible à la situation de retraité et à une ancienneté de résidence

Figure VI.1. (suite)



(d) tableau "Alerte - crue lente"

importante. On propose d'interpréter cet axe en fonction de la capacité physique à mettre des mesures en oeuvre.

Le deuxième axe est défini par le délai d'alerte, dont les faibles valeurs sont liées avec le fait de ne déplacer ni le véhicule, ni le mobilier "courant".

Le troisième axe met en relation d'une part des délais d'alerte courts avec l'obturation des ouvertures, d'autre part l'absence d'alerte avec l'absence d'obturation, l'absence de déplacement de mobilier, les résidences secondaires (donc vraisemblablement l'absence des occupants lors de l'événement qui est "rapide"). L'obturation nécessite un délai minimal, même si ce délai peut être court (il ne faut pas que l'eau ait commencé d'entrer dans la maison). Cette réponse peut être "spontanée", à partir d'objets aisément disponibles (serpillères...).

L'analyse du tableau "Alerte - crue lente"

Le premier axe est défini de façon très forte, d'un même côté, par l'absence d'alerte, l'absence de réponse, et l'absence de tout occupant.

Le deuxième axe est défini par la capacité physique à mettre des mesures en oeuvre. Cependant, cette capacité physique n'apparaît pas liée aux réponses ou mesures elles-mêmes. L'absence totale de réponse ne correspond dans les faits qu'aux résidences secondaires.

Les conclusions des analyses effectuées

Les résultats que l'on a présenté pour les quatre analyses conduisent à différentes orientations pour poursuivre l'étude de l'impact des réponses sur les dommages:

- les dommages à l'immobilier et les dommages au mobilier doivent être analysés séparément, dans la mesure où des mêmes facteurs n'y exercent pas les mêmes influences;
- on a apporté une justification supplémentaire au fait de distinguer les maisons avec sous-sol de celles qui n'en ont pas;
- aucun "modèle", permettant d'expliquer de façon satisfaisante les réponses sur un mode quantitatif, ne se dégage ici; on basera donc la suite de l'analyse sur les réponses effectivement observées plutôt que sur leurs facteurs explicatifs; on privilégiera pour cela des réponses qui soient discriminantes et représentatives des ressources (physiques et temporelles) dont disposent les ménages pour réagir;
- la distinction basée sur la vitesse de montée de la crue s'impose pour les analyses ultérieures, car cette distinction correspond à des types de phénomènes distincts à la fois pour les réponses et les dégâts matériels;
- on considèrera les endommagements plutôt que les dommages absolus, car les endommagements contribuent légèrement plus à l'inertie des axes principaux, ils sont plus cohérents d'un point de vue logique pour notre analyse, et ils se sont révélés mieux corrélés aux conditions de submersion (Bhavnagri et Bugliarello, 1965; Grigg et Helweg, 1975; Debizet et Caude, 1986).

VI.3. UNE TENTATIVE DE QUANTIFICATION DES DOMMAGES EN FONCTION DES PARAMETRES EXPLICATIFS

L'objet de cette dernière phase d'analyse est de représenter les dommages directs, causés par les inondations sur l'habitat individuel, en fonction de divers facteurs explicatifs. Le but est en particulier de chercher à identifier les effets -sur les dommages- des réponses individuelles à l'alerte de crue et/ou à la montée des eaux. On s'est basé sur les mêmes données d'enquêtes que précédemment, en éliminant trois cas qui, dans l'analyse effectuée, se sont révélés présenter des valeurs extrêmes (pour ne pas dire anormales) et dont deux se trouvaient à ce titre très sur-représentés au sein du petit sous-échantillon "crue rapide - maison sans sous-sol". L'échantillon de dossiers pris en compte ici est plus important que pour l'analyse précédente (VI.2), dans la mesure où on considère moins de variables et où il y a donc moins de lacunes.

VI.3.1. Les hypothèses de travail et la nature de l'analyse effectuée

Les paramètres analysés

En fonction de l'analyse bibliographique et de l'analyse des données effectuées, on a choisi d'établir des relations entre l'endommagement E (dommage relatif, ramené à un indicateur de valeur totale exposée) et la hauteur de submersion H par rapport au premier niveau du bâtiment hors sous-sol (en première approche, le rez-de-chaussée). Ces relations, qui font la distinction entre les dommages à l'immobilier (gros-oeuvre et second-oeuvre) et les dommages au mobilier, se rapportent spécifiquement à des sous-échantillons d'enquêtes.

Ces sous-échantillons sont déterminés par le croisement de trois critères:

- un critère lié à la typologie de l'événement hydrologique: *crue de vitesse de montée lente ou rapide*; ce critère qualifie à la fois la durée de submersion (les crues lentes sont "longues", les crues rapides "courtes") et la capacité de réponse individuelle (avant et pendant la submersion);
- un critère lié à la typologie de l'habitat: la présence ou non d'un sous-sol (c'est-à-dire un niveau du bâtiment qui, sur trois côtés au moins, est enterré au minimum sur 75% de sa hauteur);
- un critère lié à la réponse: le fait que tout ou partie du mobilier ait pu être déplacé (ce type de réponse est apparu à la fois comme l'un des plus significatifs dans la réduction des dommages, et celui qui permettait le mieux de diviser la population enquêtée en sous-échantillons de taille exploitable); ce dernier critère ne concerne pas les dommages immobiliers.

La définition de l'endommagement

On a considéré trois définitions différentes de l'endommagement E. Dans les données d'enquêtes, l'information "valeur du mobilier" (valeur totale ou décomposée selon les niveaux du bâtiment) était plus souvent absente que les informations "dommages" ou "valeur immobilière". Reprenant en cela une pratique assez fréquente utilisée dans des travaux antérieurs, on a implicitement considéré que la valeur totale de l'habitat et de son contenu était -en première approche- proportionnelle à la valeur immobilière. On a par conséquent défini l'endommagement par rapport à la valeur immobilière. D'où les trois définitions de E qui suivent.

$$E_b \text{ endommagement brut} \quad E_b = \frac{\text{dommage}}{V_b} = \frac{\text{dommage}}{VI} \quad (6)$$

$$E_e \text{ endommagement par étage} \quad E_e = \frac{\text{dommage}}{V_e} = \frac{\text{dommage}}{\frac{VI}{n}} \quad (7)$$

$$E_s \text{ endommagement intégrant la surface aménagée} \quad E_s = \frac{\text{dommage}}{V_s} = \frac{\text{dommage}}{\frac{VI}{n} \times \frac{SA1}{ST1}} \quad (8)$$

où VI représente la valeur immobilière, n le nombre de niveaux du bâtiment, Ve la valeur immobilière moyenne d'un niveau, Vs la valeur immobilière moyenne d'un niveau pondérée par la proportion de surface aménagée (au premier niveau), SA1 la surface aménagée du premier niveau, ST1 la surface hors-oeuvre; on ne considère ici que les maisons pour lesquelles SA1 n'est pas nulle.

Ee intègre le fait qu'un bâtiment de 4 étages n'a pas 2 fois plus de dommages qu'un bâtiment de 2 étages, à partir du moment où les biens réellement submergés sont comparables (les cas de destructions de structures par la seule action de l'eau sont rarissimes en France métropolitaine). La définition Es n'a été appliquée qu'aux maisons sans sous-sol, qui présentent une assez forte disparité en terme de surface aménagée (c'est-à-dire hors garages, celliers, ateliers...). Lorsqu'il y a un sous-sol, la surface aménagée (en termes de logement) est le plus souvent nulle. Il faut observer qu'en analysant l'endommagement Es, on ne peut pas prendre en considération les maisons présentant une surface aménagée nulle en rez-de-chaussée.

En particulier, l'utilisation que l'on fait des valeurs d'endommagements et le mélange de dossiers provenant de divers sites reposent sur une hypothèse implicite et forte: la valeur immobilière des bâtiments traduit uniquement la richesse du bâtiment et de son contenu (ou plus simplement la valeur absolue des biens exposés), à l'exclusion d'effets locaux de marchés immobiliers régionaux qui ne se trouveraient pas dans une même situation d'équilibre (voir IV.3).

Par ailleurs, lorsque l'on souhaite transformer différentes relations d'endommagement $E = f(H)$ en relations déterminant les dommages absolus pour un bâtiment "de valeur moyenne", on est amené à multiplier E (selon les cas Eb, Ee, Es) par la valeur moyenne du bâtiment, de l'étage, ou de la surface aménagée (Vb, Ve, Vs). A ce moment se pose la question de savoir si l'on multiplie diverses

relations f (avec ou sans sous-sol...) par une même valeur moyenne, ou par des valeurs moyennes correspondant aux sous-échantillons considérés respectifs.

En annexe VI.B figurent les caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type, nombre de valeurs) des dénominateurs V_i pour divers sous-échantillons: (a) selon les critères respectifs *crue Lente/Rapide, Avec/Sans sous-sol, réponse Oui/Non* (c'est-à-dire déplacement de mobilier) (b) selon les sous-échantillons considérés par croisement de ces critères. En ce qui concerne la prise en compte isolée de chacun des critères, les seuls cas où l'on puisse affirmer à 95% de certitude que les valeurs moyennes diffèrent concernent:

- la distinction Avec/Sans sous-sol avec $V_b = V_i$;
- la distinction crue Lente/Rapide avec $V_s = \frac{V_i}{n} \times \frac{SA1}{ST1}$
(différence significative à 99%);

(de façon "limite" la distinction réponse Oui/Non avec V_s). On reviendra sur ces considérations au cours de l'analyse.

Le choix de la forme de la relation $E = f(H)$

Les différents travaux menés sur les courbes de dommages $E = f(H)$ pour l'habitat individuel ont conduit à des formes de la relation f très variables: formes analytiques pour l'exploitation de données réelles, formes établies "point à point" par les démarches de simulation... Cela étant, la configuration et la disposition internes (immobilière et mobilière) de deux maisons voisines peuvent être éminemment variables, se traduisant par des relations f très différentes. Il suffit pour s'en convaincre d'examiner l'aspect des nuages de points (H,E) présentés en annexe VI.B. Cela tient bien évidemment à la multiplicité des paramètres qui conditionnent les dommages.

La seule certitude que l'on puisse former concerne la monotonie de la relation $E = f(H)$, toutes choses égales par ailleurs. Par contre, aucune forme particulière de f ne peut à notre avis être retenue avec certitude (même en moyenne) si l'on considère un nombre limité de paramètres explicatifs. Dans ce contexte, on a choisi de retenir une forme linéaire pour f , non pas parce qu'elle est plus plausible qu'une autre, mais parce qu'elle permet simplement d'estimer la qualité (toute relative) d'un ajustement de la régression et de comparer des courbes différentes. Les régressions linéaires ont été calées sur le critère des moindres carrés (minimisation de l'erreur quadratique moyenne).

VI.3.2. Les commentaires d'ensemble sur les relations $E = f(H)$ établies

L'annexe VI.B présente de façon détaillée les éléments suivants:

- les caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type, nombre de valeurs) des *dénominateurs des endommagements* V_b, V_e, V_s en fonction des sous-échantillons considérés; ces grandeurs sont exprimées en milliers de francs au deuxième trimestre 1991);
- les caractéristiques statistiques des paramètres H et E_i sur les sous-échantillons considérés (voir VI.3.1); il s'agit du nombre de valeurs, des moyennes, des écarts-types, du coefficient de détermination R^2 (carré du coefficient de corrélation);
- les paramètres des régressions $E_i = a H + b$ (E en pourcents % et H en centimètres cm) calées sur le critère des moindres carrés; les indicateurs de qualité des calages (erreurs quadratiques moyennes, dispersions sur les paramètres estimés, significativités de la non nullité du paramètre multiplicatif "a" à 80% et 99% de probabilité).

Les différents calculs effectués, correspondant aux sous-échantillons considérés, sont liés aux critères sur lesquels on a discriminé les maisons. Le codage des sous-échantillons correspond à une suite de lettres explicitant dans l'ordre:

- la vitesse de montée de crue, L pour *lente* ou R pour *rapide*;

- la présence d'un sous-sol, A pour *avec* ou S pour *sans*
- le fait que tout ou partie du mobilier ait été déplacé, O pour *oui* ou N pour *non* ("-" signifie que le critère n'a pas été considéré);
- la nature de l'endommagement considéré, B pour *brut*, E pour *par étage* ou S pour *intégrant la surface aménagée*.

Il faut tout d'abord souligner que les ajustements des relations $E_i = a H + b$ sont en moyenne de faible qualité, comme on pouvait s'y attendre. En particulier, on peut en juger en considérant la significativité de la non nullité du paramètre "a" (avec des probabilités de 80 et 99%), les erreurs quadratiques moyennes ou encore les coefficients de détermination.

Par ailleurs, il faut prêter attention à la nature des *endommagements* que l'on analyse, en particulier si l'on souhaite comparer les positions relatives de relations correspondant à divers sous-échantillons. Si l'on considère E_b on observe que la valeur immobilière est très variable, avec cependant des caractéristiques statistiques le plus souvent comparables selon les critères pris séparément. Mais de façon générale, on observe que sur le plan logique, E_b est a priori un indicateur moins représentatif que E_e du processus de dommage. Par ailleurs, les ajustements pour E_b sont de moins bonne qualité que pour les autres endommagements. On ne prêtera pas grande attention par la suite aux relations $E_b = f(H)$, au vu des limitations présentées ici et plus haut.

L'endommagement E_e ramené à la valeur immobilière par étage constitue un indicateur plus satisfaisant sur le plan logique, avec toutefois l'hypothèse implicite que les valeurs exposées (immobilières et mobilières) à chaque niveau sont les mêmes. Si on observe les caractéristiques statistiques des E_e par rapport aux critères considérés isolément, on n'observe jamais de différence significative (à 95% de certitude). De même, en dehors des sous-échantillons *LSN* (crue Lente, Sans sous-sol, Non déplacement de mobilier) et *RSN* (crue Rapide...), les valeurs moyennes par sous-échantillons s'écartent de la moyenne générale de moins de 10% (moins de 20% pour les deux autres).

Par contre, l'endommagement E_s (intégrant la proportion de surface aménagée en rez-de-chaussée, lorsqu'elle est non nulle) présente une variabilité plus significative entre sous-échantillons. Si l'on considère les ajustements de relations linéaires respectivement pour E_e et E_s , les performances sont comparables (en termes de non nullité significative du coefficient "a" ou en termes de coefficient de détermination R^2).

Ainsi, lorsque l'on compare des relations $E_e = f(H)$ sur différents sous-échantillons, le raisonnement mené en valeur relative, c'est-à-dire en endommagement, pourra en première approche être repris en valeur absolue (en raisonnant sur un bâtiment moyen). Par contre, les comparaisons relatives à $E_s = f(H)$ devront être considérées avec plus de prudence, dès lors que l'on voudra les transposer aux dommages en valeur absolue.

VI.3.3. Les dommages immobiliers

Les figures VI.2.(a) et (b) présentent les droites calées respectivement pour les maisons avec sous-sol et pour les maisons sans sous-sol. Il en ressort tout d'abord que les droites $E_b(H)$, $E_e(H)$ et (éventuellement) $E_s(H)$ sont disposées comme on pouvait l'attendre: $E_b < E_e < E_s$. Par ailleurs, les coefficients multiplicatifs "a" déterminés sont significativement non nuls, avec 80% de certitude, sauf pour deux des relations $E_b(H)$.

On observe que les dommages, pour les maisons sans sous-sol, débutent avant que l'eau n'ait atteint le plancher (fondations touchées et bas des murs extérieurs, voire infiltrations par capillarité...). Ceci est conforme aux observations et résultats de la bibliographie.

Il ressort également que les dommages immobiliers sont plus forts pour les crues lentes que pour les crues rapides, à partir d'une certaine hauteur d'eau. On pense pouvoir expliquer ce phénomène, déjà apparu dans l'analyse de données préalable, par deux considérations:

- les dommages immobiliers augmentent avec la durée de submersion qui est liée à la vitesse de montée de crue, et qui sur les sites étudiés peut prendre des valeurs importantes

(quand cela correspond à des hauteurs de submersion conséquentes);

- les crues rapides laissent moins de possibilité pour les réponses de protection; cela étant, on a déjà constaté que c'est pour les crues rapides qu'on observait le plus fréquemment des mesures d'obturation des ouvertures, et c'est dans ce contexte que l'obturation peut éventuellement avoir quelque efficacité sur le second oeuvre notamment (pour des crues lentes, et donc de longue durée, l'obturation des ouvertures sert au mieux à filtrer l'eau qu'on ne peut longtemps empêcher d'entrer dans un bâtiment).

Par ailleurs, il faut noter que pour les crues lentes, les dénominateurs respectifs de E_e et E_s (V_e et V_s) ont des moyennes proches (pour les maisons sans sous-sol; les moyennes diffèrent de moins de 10%). De fait, les droites $E_e(H)$ et $E_s(H)$ sont proches. Par contre, la différence est plus accentuée pour les crues rapides. De même, la distinction Lente/Rapide introduit en soi une différence significative sur la distribution de V_s , non sur celle de V_e .

Cela revient à dire que, en moyenne, les premiers niveaux des maisons individuelles sans sous-sol sont plus aménagés sur les sites touchés par des crues lentes, que sur les sites touchés par des crues rapides. Par contre, on ne dispose pas d'éléments qui permettraient d'affirmer que cette constatation, établie sur notre échantillon d'enquêtes, peut être extrapolée pour proposer un lien entre vitesse de montée de l'eau et degré d'aménagement des rez-de-chaussées. On pourrait certes avancer l'idée que face au risque de crues rapides qui permettent une réponse moindre, l'occupation des bâtiments serait plus prudente. Mais cette hypothèse est trop séduisante pour qu'on n'ose vraiment l'avancer.

VI.3.4. Les dommages mobiliers

Habitat individuel avec sous-sol

Les courbes $E_i = aH + b$ établies sont présentées en figure VI.2.(c). Le sous-échantillon *LAN* (cruie Lente, Avec sous-sol, Non réponse) n'a pas été considéré, car il ne comprenait que 3 logements. Les ajustements des régressions (pour E_b comme pour E_e) sont de "mauvaise" qualité. En particulier, aucun des coefficients multiplicatifs "a" n'est significativement non nul à la probabilité 80%. Deux des trois courbes $E_b(H)$ présentent une pente négative. Par ailleurs, il faut souligner la taille relativement faible des sous-échantillons concernés ici.

Enfin, les dommages mobiliers qu'on a analysés concernent essentiellement le contenu des sous-sols. Les valeurs, absolues ou relatives, des coûts sont nettement plus faibles que celles des dommages immobiliers.

Habitat individuel sans sous-sol: Crues lentes

La figure VI.2.(d) présente les régressions $E_i = aH + b$ établies pour les crues lentes et des maisons sans sous-sol.

En ce qui concerne le sous-échantillon *Non réponse*, le coefficient "a" n'est pas significativement non nul (ni à 99% ni à 80% de probabilité). Par contre, le coefficient de détermination reste supérieur à 0,1. Les relations, sur ce sous-échantillon, doivent être considérées avec beaucoup de prudence pour plusieurs raisons:

- les ajustements de régressions ne permettent pas de considérer les droites comme représentatives; le sous-échantillon comporte selon les calculs de 7 à 11 maisons;
- malgré la présence de surfaces aménagées relatives importantes (en moyenne), il n'y a pas eu déplacement de mobilier, et pourtant les dommages sont modestes; ceci conduit à considérer ces situations (marginales en nombre) comme très spécifiques;
- enfin, les droites *Oui réponse* font l'objet d'ajustements plus sûrs (qualité, tailles de sous-échantillons de 77 à 95 selon les calculs...); or, tout indiquerait qu'on devrait observer des

dommages moins forts (pour $H > 80$ cm) du fait même de la réponse; mais peut-être faut-il privilégier dans l'analyse la zone $H < 100$ cm.

On propose par conséquent de ne pas retenir le sous-échantillon LSN (crue Lente, Sans sous-sol, Non réponse).

En ce qui concerne l'alternative *Oui réponse*, les trois régressions $E_i = aH + b$ présentent des degrés de qualité meilleurs: coefficient de détermination supérieur à 0,1 et coefficient multiplicatif "a" significativement non nul (à 80% de certitude pour E_b , et 99% pour E_e et E_s). On observe au travers de ces calages, comme dans le cas des dommages immobiliers, que les valeurs moyennes des dénominateurs V_e et V_s sont proches. On remarque que la hauteur pour laquelle E_i est nul est proche de zéro. Sans grande surprise (mais peut-être sans grande significativité), les dommages commencent au-delà du seuil $H = 0$.

Habitat individuel sans sous-sol: Crues rapides

La figure VI.2.(e) présente les relations $E_i = aH + b$ correspondantes pour les crues rapides. Pour E_e et E_s , les valeurs de "a" sont significativement non nulles à 80%, mais pas pour E_b . Le coefficient de détermination ne dépasse 0,1 que pour E_e et E_s dans le cas *Non réponse*.

On observe ici une différence sur les endommagements liée au fait que du mobilier (en tout ou partie) a été déplacé. Pour H inférieur à 50 centimètres toutefois, les endommagements *Non réponse* sont légèrement inférieurs. Il y a lieu ici de faire la part entre ce qui relève des données, et ce qui relève du choix d'une forme linéaire $E(H)$.

De même, l'ajustement conduit à des dommages non nuls en $H = 0$. Il faut prendre en considération l'erreur de détermination sur le coefficient "b" (mais hormis le cas *RSNS*, l'écart-type est inférieur à b, voire inférieur à $b/2$), ainsi que la covariance négative entre "a" et "b". L'influence du choix de la forme de relation linéaire est d'autant plus évident si l'on examine les nuages de points sur lesquels les régressions ont été calées (annexe VI.B ou annexe 5 de Torterotot, 1992): il y a accumulation de points sur l'axe $S = 0$ mais pas sur l'axe $H = 0$. Le fait que "b" soit positif est un artifice de calcul (cela se justifie par contre pour les dommages immobiliers).

Rappelons que les valeurs moyennes respectives des dénominateurs V sur les sous-échantillons *Oui réponse* et *Non réponse* sont significativement différents à 90% de probabilité (mais pas à 95%). La conclusion sur l'endommagement ne peut être automatiquement transposée au dommage absolu. Sur notre échantillon, les valeurs exposées apparaissent moindres pour les maisons où il n'y a pas eu déplacement de mobilier.

Par ailleurs, observons à nouveau, comme dans l'analyse des endommagements immobiliers, que la valeur moyenne du dénominateur V_s de E_s est plus faible que dans le cas des crues lentes. La différence entre E_e et E_s ont donc ici nettement plus sensible, traduisant un plus faible taux de surface aménagée en rez-de-chaussée.

Habitat individuel sans sous-sol: Synthèse

Les figures VI.2.(f) et (g) présentent respectivement les droites $E_e(H)$ et $E_s(H)$ pour les trois situations suivantes:

- crue Lente et Oui déplacement de mobilier *LSO*;
- crue Rapide et Oui déplacement de mobilier *RSO*;
- crue Rapide et Non déplacement de mobilier *RSN*.

Si l'on analyse les régressions $E_e(H)$, on observe que:

- dans le cas où il y a déplacement de mobilier, les endommagements s'en trouvent bien évidemment réduits (cf. discussion précédente);

- pour H inférieur à 150 centimètres, les endommagements sont moindres pour les crues lentes que pour les crues rapides (en cas de réponse); ceci est plutôt conforme aux attentes a priori;
- pour H supérieur à 150 centimètres, c'est l'inverse que l'on obtient.

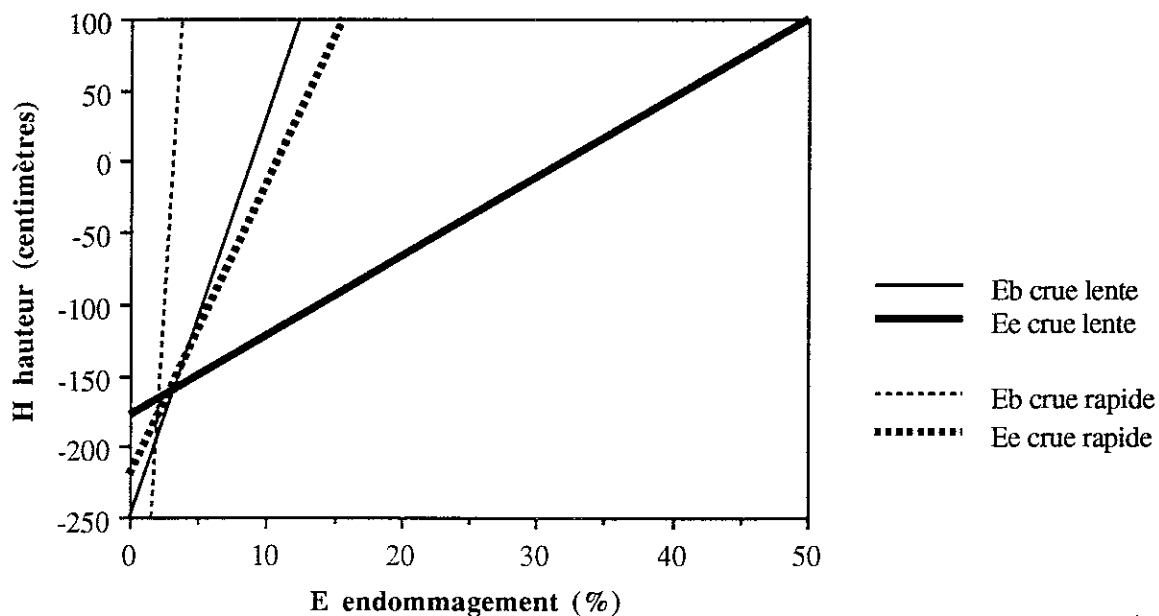
L'analyse sur $E_s(H)$ conduit aux mêmes conclusions, à ceci près que les endommagements restent systématiquement inférieurs pour les crues lentes, par rapport aux crues rapides. Si l'on se réfère à nouveau au fait que les taux de surface aménagée en rez-de-chaussée sont sensiblement plus faibles pour les crues rapides, cela revient à proposer les conclusions suivantes:

- les dommages relatifs, qui sont a priori le mieux représentés par E_s , sont inférieurs dans le cas des crues lentes par rapport aux crues rapides, même avec déplacement de mobilier dans les deux cas;
- les dommages absolus le sont également, du moins dans la plus grande gamme rencontrée en matière de hauteurs de submersion; pour des hauteurs relativement fortes, les courbes calées présentent des valeurs supérieures (écart restreint) pour les crues lentes.

Etant donné la covariance négative entre "a" et "b", les résultats qualitatifs que l'on indique ici resteraient les mêmes si l'on avait imposé une valeur non positive pour E au seuil $H = 0$. Peut-être même cela aurait-il conduit à des relations $E_e(H)$ systématiquement supérieures dans le cas des crues rapides par rapport aux crues lentes. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que dans la distinction entre crues lentes et rapides, on intègre de fait au moins deux facteurs:

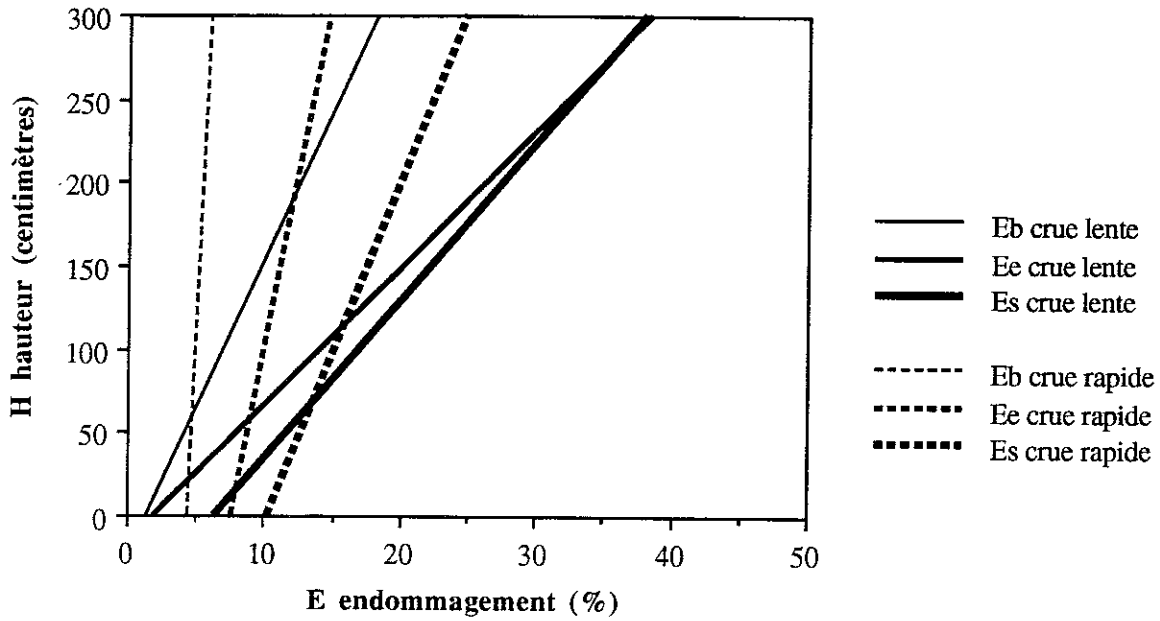
- la vitesse de montée de l'eau conditionne à la fois le délai de prévision et d'alerte (en moyenne), et le temps disponible pour prendre des mesures même après que l'eau ait atteint le niveau du plancher;
- la vitesse de montée est liée à la durée moyenne de submersion; or cette durée va avoir un effet contraire à celui du temps de montée, en aggravant les dommages au mobilier non déplacé ou trop peu surélevé (gros mobilier pouvant se trouver "irrécupérable" lorsque la submersion dure); comme on l'a déjà souligné, ce phénomène est patent en ce qui concerne les dommages immobiliers.

Figure VI.2. : fonctions d'endommagement calées pour l'immobilier et le mobilier

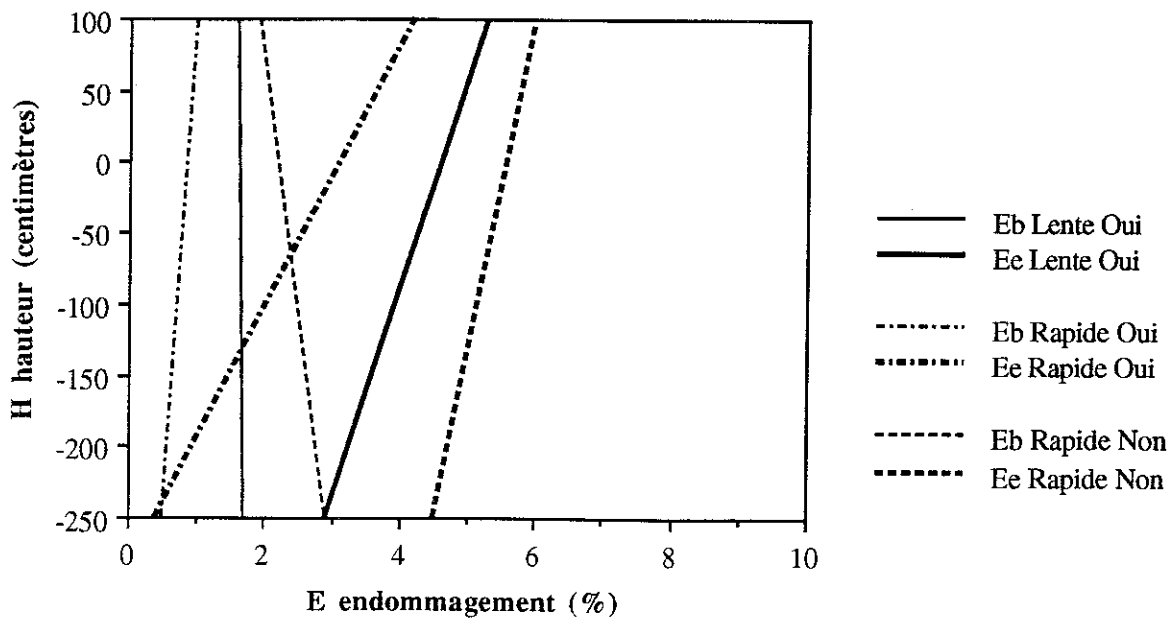


(a) endommagements immobiliers aux maisons avec sous-sol

Figure VI.2. (suite)

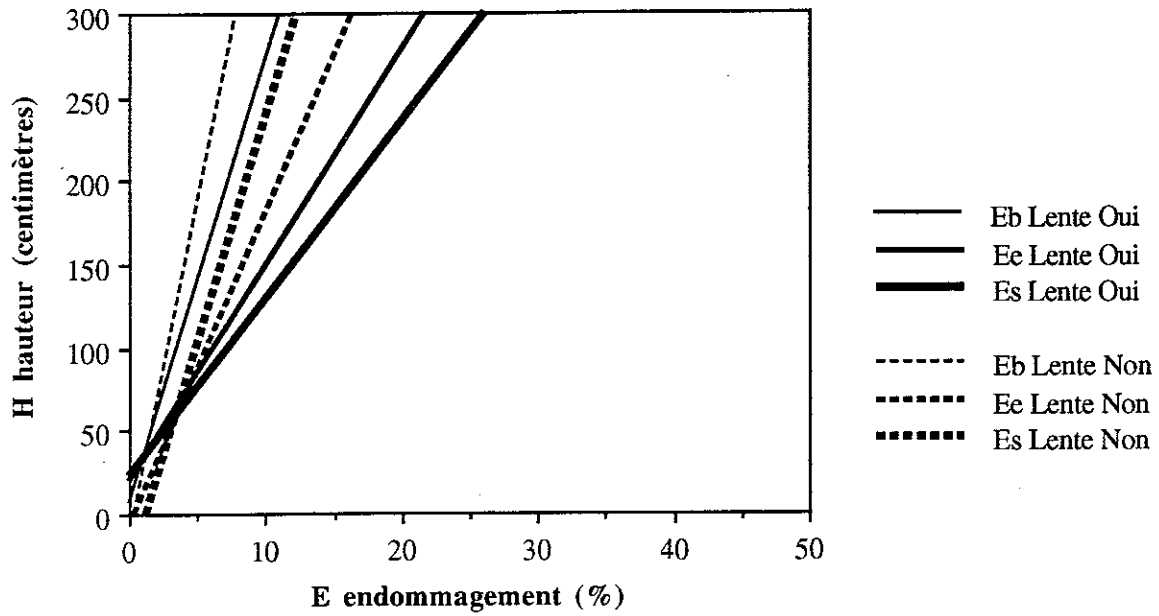


(b) endommagements immobiliers aux maisons sans sous-sol

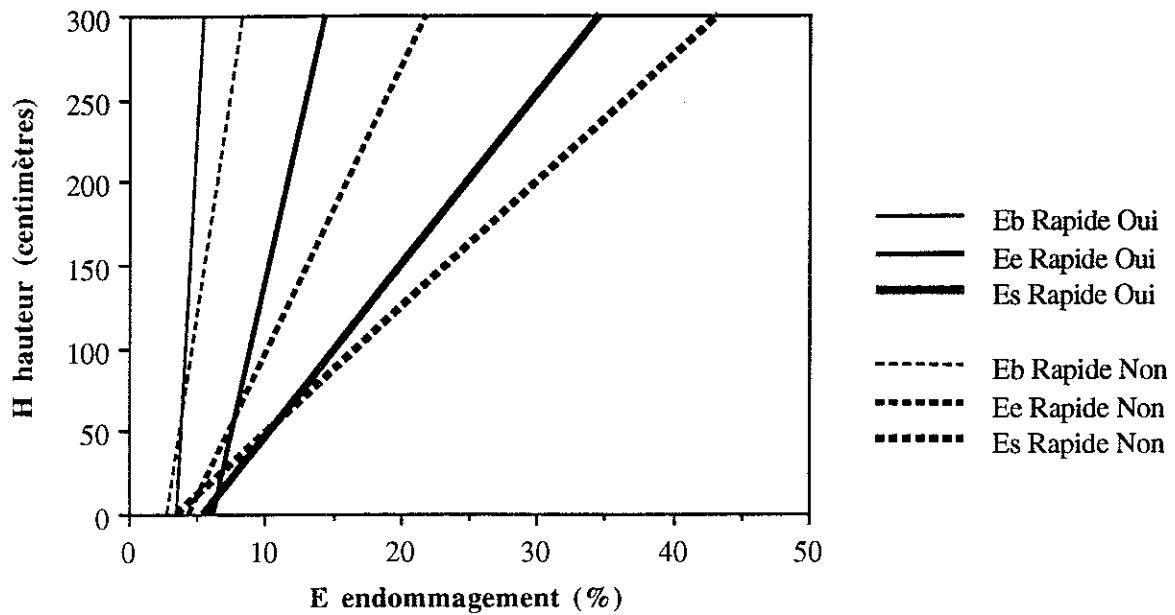


(c) endommagements mobiliers aux maisons avec sous-sol

Figure VI.2. (suite)

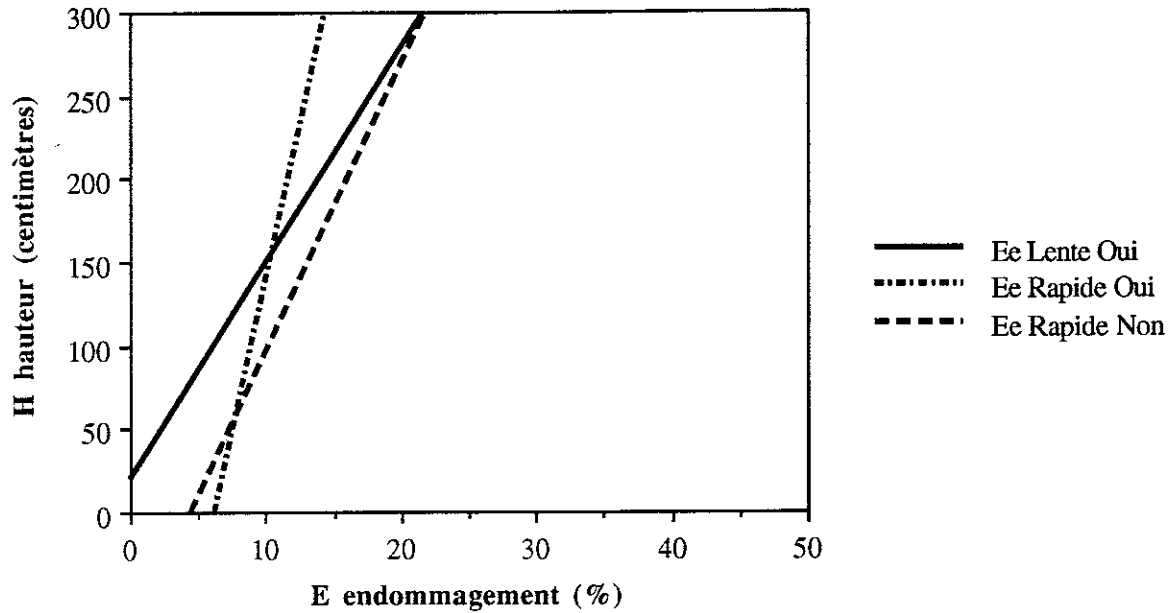


(d) endommagements mobiliers aux maisons sans sous-sol, pour des crues lentes

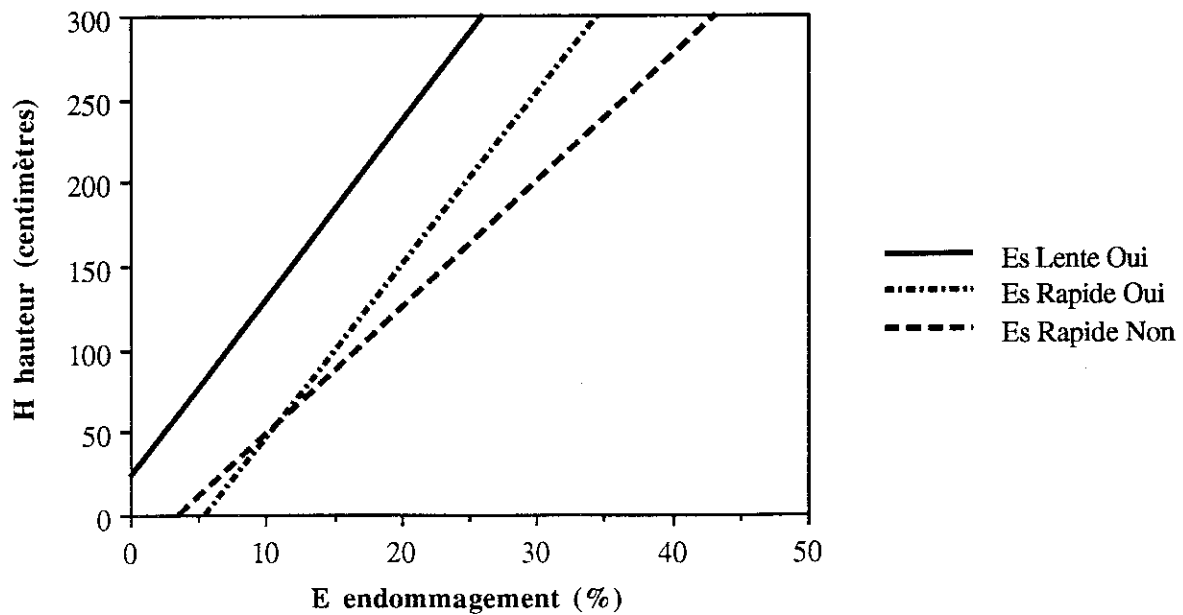


(e) endommagements mobiliers aux maisons sans sous-sol, pour des crues rapides

Figure VI.2. (suite)



(f) endommagements mobiliers (par rapport à la valeur immobilière par niveau) aux maisons sans sous-sol



(g) endommagements mobiliers (intégrant les surfaces aménagées) aux maisons sans sous-sol

VI.3.5. Les fonctions de dommages à l'habitat individuel

Avant toute autre considération, on propose de s'en tenir, hormis la distinction Avec/Sans sous-sol, à considérer les différents cas de crues rapides, et les seuls cas de crues lentes où il y a déplacement de mobilier (c'est en fait l'immense majorité). On a argumenté plus haut ce choix, qui s'impose notamment du fait de la petitesse des sous-échantillons *crue Lente Non réponse*. On considère ici des fonctions de dommages pour un habitat de valeur moyenne.

Le cas des maisons avec sous-sol

Pour tous les calculs considérés dans ce cadre, la nette majorité des valeurs analysées correspond à des situations où l'eau n'a pas atteint le rez-de-chaussée ($H < 0$). Les relations représentent donc d'autant mieux les dommages spécifiques aux sous-sols et les dommages aux rez-de-chaussées pour H proche de 0 (plancher du rez-de-chaussée). Par contre, l'utilisation des relations établies pour des valeurs de H qui dépasseraient sensiblement la valeur 0 apparaît a priori plus sujette à caution.

On propose donc, pour établir des courbes de dommages $D = g(H)$, de suivre la proposition de Debizet et Caude (1986) en distinguant deux parties:

- la relation établie pour $H < 0$;
- pour $H > 0$, la relation correspondante *Sans sous-sol* (correspondant au rez-de-chaussée) décalée de telle sorte qu'il y ait coïncidence et continuité des relations $D(H)$ en $H = 0$.

On verra sur les résultats que les "ruptures de pente" en $H = 0$ sont modestes sur les dommages totaux, ce qui aurait tendance à conforter les diverses régressions établies.

Le choix d'une famille de relations d'endommagement

Il s'agit ici de choisir à partir de quelle relation $E = f(H)$ (E_b , E_e , E_s) et par quelle transformation, on va se ramener à des fonctions de dommage absolu $D = G(H)$, pour un bâtiment "moyen".

On a développé plus haut différents arguments qui conduisent à rejeter l'endommagement brut E_b . Par conséquent, il s'agit de retenir l'une des deux possibilités suivantes pour déterminer des relations $D = g(H)$: $D_e(H) = E_e(H) \times \text{moyenne}(V_e)$ ou $D_s(H) = E_s(H) \times \text{moyenne}(V_s)$.

Il faut noter que les relations $E_s = f(H)$ ne concernent que les maisons dont la surface aménagée en rez-de-chaussée n'est pas nulle. Elles ne sont donc pas représentatives d'une maison moyenne. Par ailleurs, les ajustements établis pour E_s ne sont pas "meilleurs" que ceux établis pour E_e , et les caractéristiques statistiques de V_e sont beaucoup plus homogènes (sur les différents sous-échantillons) que celles de V_s .

Ceci nous conduit par conséquent à retenir l'endommagement E_e pour établir des relations de dommage absolu (pour un bâtiment de valeur moyenne). Cela étant, une question reste posée: peut-on multiplier les relations d'endommagement $E_e(H)$ par une même valeur moyenne générale de la valeur immobilière par niveau (représentant une maison individuelle moyenne) ? On a vu plus haut que ces valeurs moyennes étaient significativement différentes pour les maisons sans sous-sol exposées aux crues rapides, selon qu'il y a ou non déplacement de mobilier. Si l'on compare de façon plus générale la moyenne globale aux moyennes relatives aux différents sous-échantillons, on ne peut pas affirmer avec une probabilité de 60% qu'il y a différence significative (le plus souvent pas même à 40% de probabilité). Ceci est vérifié pour tous les sous-échantillons, excepté celui relatif aux crues rapides, sans sous-sol, sans déplacement de mobilier (RSN).

On revient ainsi à émettre l'hypothèse qu'en moyenne l'absence de tout déplacement de mobilier est liée à des valeurs exposées moindres (mesurées d'après les valeurs immobilières par niveau). Peut-être faut-il voir là un même effet d'une variable socio-économique sous-jacente. Cette hypothèse propre à l'échantillon d'enquêtes peut-elle être extrapolée de façon générale ? On propose de considérer que ce "biais" observé est propre à notre échantillon, en gardant toutefois à l'esprit que, a

contrario, le fait de ne pas déplacer son mobilier peut être lié en partie à une valeur moindre des biens exposés. On définit donc les fonctions de dommages $D = g(H)$ par les fonctions d'endommagements par étage correspondantes, $Ee(H)$ (exprimée cette fois-ci en valeur absolue, et non en pourcents), multipliées par la valeur moyenne d'un étage de logement, soit 225000 Francs (valeur au deuxième trimestre 1991).

Les courbes de dommages retenues

L'annexe VI.C présente la forme analytique des fonctions de dommage ainsi déterminées. La figure VI.3 présente les courbes correspondantes pour les cas respectifs des maisons avec et sans sous-sol.

On observe que pour $H = 0$, la différence entre maisons avec et sans sous-sol n'est pas importante pour ce qui concerne les crues rapides. Rappelons que ceci est lié au fait que les relations calées pour les dommages mobiliers sans sous-sol font apparaître des valeurs non négligeables en $H = 0$.

Pour les crues rapides, la réduction des dommages par déplacement partiel du mobilier est assez faible en valeur relative. Si l'on considère qu'il y a déplacement partiel du mobilier, en l'absence de sous-sol, le délai supplémentaire apporté par les crues lentes permet une réduction sensible des dommages pour des hauteurs H inférieures à 1 mètre: au-delà, le poids des dommages immobiliers fait que les dommages sont plus forts pour les crues lentes (pour des hauteurs supérieures, on a vu que les dommages mobiliers aussi prenaient des valeurs supérieures à celles obtenues pour les crues rapides).

VI.4. QUELQUES ELEMENTS DE CONCLUSION

Les analyses présentées dans ce chapitre, quoique trop sommaires à notre goût du fait de la nature des données recueillies et de la taille de l'échantillon, présentent l'intérêt de prendre en compte des situations très variées (crues et submersions, habitat et occupants, alerte...) décrites par des données homogènes (définition des paramètres, procédure de recueil...). Même de façon rudimentaire, on a pu analyser conjointement des paramètres de natures très différentes, et ainsi confirmer des résultats déjà établis et hypothèses largement répandues. Des conclusions plus nouvelles se dégagent également.

En matière de réponses à l'alerte de crue et à la montée de l'eau, pour des crues lentes les occupants des logements peuvent mettre en oeuvre des réponses peu limitées par les conditions d'alerte, le délai ou les capacités physiques. Même après que l'on ait remarqué la montée de l'eau, il est encore possible d'agir pour continuer à réduire les dommages. Et on dispose généralement de temps pour trouver de l'aide extérieure. Pour ces crues, l'obturation des ouvertures présente une faible efficacité, si ce n'est pour filtrer l'eau. A l'opposé, dans le cas de crue à montée rapide, l'obturation des ouvertures constitue la réponse la plus immédiate et elle peut être efficace, mais cela nécessite un délai minimum (alerte ou observation de la crue) avant l'arrivée de l'eau dans le logement. Des réponses plus "élaborées", comme le déplacement de mobilier ou d'appareils lourds, dépendent beaucoup de la capacité physique des occupants du logement à mettre de telles mesures en oeuvre dans un temps limité.

Les dommages, et leur variabilité, sont conditionnés par un nombre conséquent de facteurs. Ainsi, si l'on souhaite établir une relation entre l'endommagement et la hauteur de submersion, cela suppose de considérer une typologie de l'habitat et de la crue pour expliquer une part sensible de la variabilité: présence ou non d'un sous-sol, vitesse de montée de l'eau, durée de submersion. Cette durée se révèle influencer significativement les dommages, en particulier pour ce qui concerne l'immobilier. Le rôle de la durée est peu apparu jusqu'ici dans la bibliographie (de façon quantitative). Nous pensons que ceci est lié à deux particularités qui caractérisent les contextes d'une grande part des recherches menées jusqu'ici:

- une hétérogénéité moindre des durées, et des relations "hauteur - durée" (cas du Royaume-Uni, par exemple);

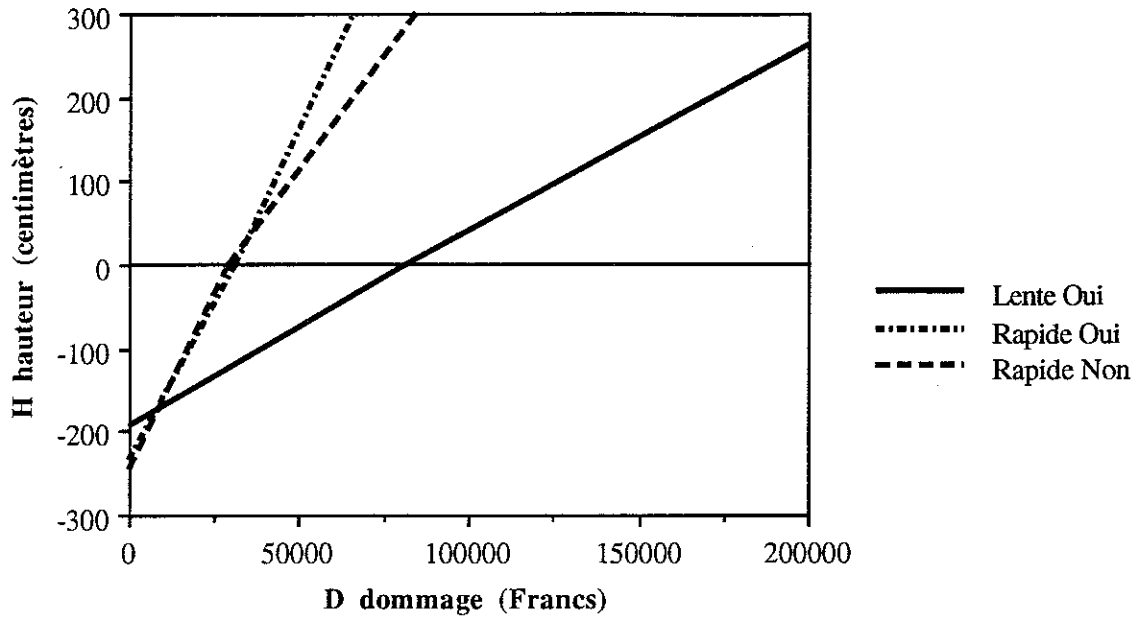
- une plus grande vulnérabilité de l'immobilier dès les courtes durées de submersion, du fait d'une forte proportion de maisons à structure bois (cas des Etats-Unis, du Canada, de l'Australie).

La vitesse de montée de l'eau conditionne la nature des réponses et leurs efficacités, apparemment plus que ne le fait le délai d'alerte. En moyenne, et pour des crues rapides, le déplacement de mobilier ne réduit pas sensiblement les dommages face à des hauteurs de submersion faibles ou moyennes. Il faut vraisemblablement en déduire ici que ce déplacement ne concerne qu'une petite part des biens vulnérables, pour les situations analysées. Il faut également noter que dans l'absolu les hauteurs enregistrées dans notre échantillon sont conséquentes.

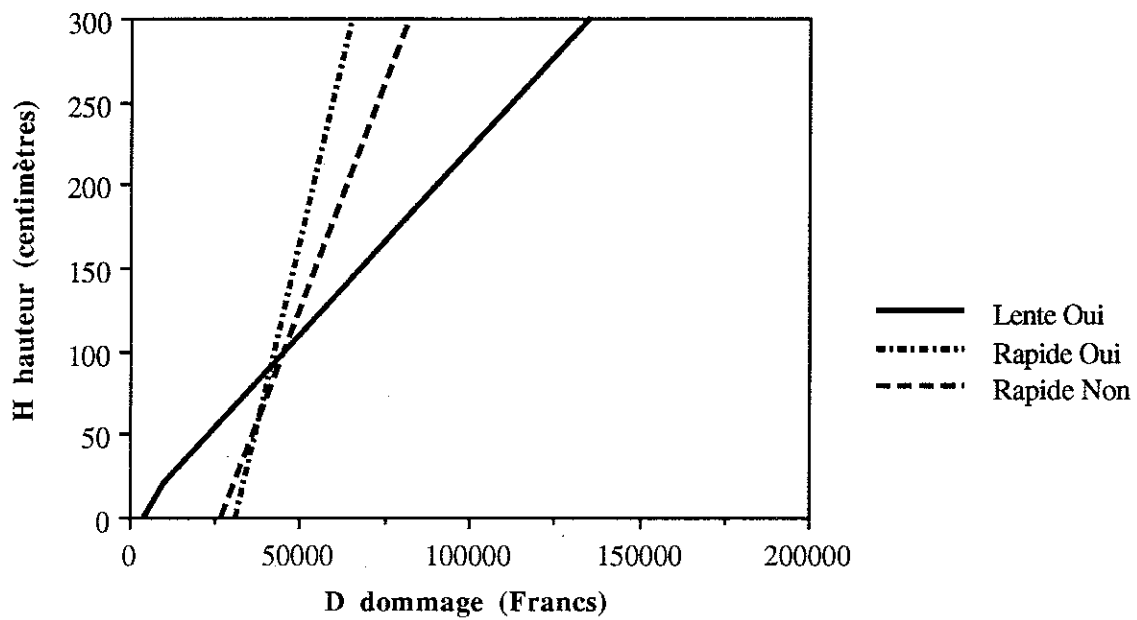
Ces diverses conclusions partielles ne peuvent déboucher que sur la définition d'investigations ultérieures. Nous avons tenté de souligner, tout au long de cette analyse, les nombreuses incertitudes qui obèrent les résultats. C'est pourquoi il nous semble falloir approfondir cette problématique d'une part en élargissant le jeu de facteurs "potentiellement explicatifs" que l'on considère, d'autre part en augmentant la taille et l'hétérogénéité des échantillons d'enquêtes (donc leur représentativité). Ceci suppose bien évidemment que la définition et la procédure de recueil des informations soient homogènes.

Pour élargir l'analyse à de nouveaux facteurs, et assurer la cohérence de ces facteurs, on a besoin d'un cadre conceptuel global et cohérent pour décrire la prévision et l'annonce des crues, les réponses et les dommages. L'élaboration d'un tel cadre est notamment l'un des objectifs du projet EUROFLOOD (Fordham, dans EUROFLOOD, 1992; Fordham et al, dans EUROFLOOD, 1993).

Figure VI.3. : fonctions de dommage total pour l'habitat individuel (maison de valeur moyenne)



(a) maisons avec sous-sol



(b) maisons sans sous-sol

partie C

**MODELISATION ET ESTIMATION
DES COUTS DE DOMMAGES
SUR UNE AIRE GEOGRAPHIQUE:
ECHELLES LOCALE ET REGIONALE**

Nous avons illustré, en première partie, les différents besoins et contextes décisionnels en matière d'estimation des dommages dus aux inondations fluviales. Que l'on s'intéresse à diverses notions de coûts de ces dommages, ou à la variation des coûts due à un projet ou à une politique, la question posée est de quantifier des impacts que l'on n'a pas pu mesurer. En effet, soit on ne dispose d'aucune information (c'est notamment le cas lorsque l'on considère des crues hypothétiques futures), soit les données dont on dispose sont incomplètes, ou obsolètes. Par ailleurs, les décisions que l'on cherche à éclairer portent le plus souvent sur une aire géographique dont les dimensions varient du quartier (ou de l'ensemble de parcelles) à un bassin ou à un pays entier.

Si l'on souhaite mener des évaluations de coûts de dommages à échelle géographique fine, et que l'on dispose de données et/ou de moyens en conséquence pour les études, les problèmes de méthode se posent relativement peu en matière de description physique des impacts des inondations. La démarche est toute tracée: analyse hydrologique et modélisation hydraulique détaillées, localisation précise des biens exposés et enquêtes sur leur vulnérabilité (au besoin avec l'aide d'experts d'assurances...), simulation des crues et calcul des coûts de dommages correspondants. Par ailleurs, de telles approches posent le problème de leur réactualisation: cela nécessite de mettre en place une procédure systématique et lourde de mise à jour des données, à moins d'accepter de recommencer -au bout de quelques années- des phases entières d'études.

Dans la pratique, ces conditions idéales sont rarement réunies pour des études. De surcroît, on risquerait de mettre en oeuvre des énergies et des moyens disproportionnés pour des études qui seraient "trop précises", en termes d'échelle géographique et/ou de finesse des résultats (par exemple pour évaluer la rentabilité d'un aménagement de protection contre les crues, au stade de la planification). Ainsi, lorsqu'on s'intéresse à des échelles géographiques plus larges, ou à des valeurs plus ou moins approchées en matière de coûts, il s'agit de trouver un juste compromis entre :

- les données d'entrée à recueillir ou à estimer (en volume comme en précision);
- le degré de précision recherché à une échelle géographique donnée.

C'est l'estimation des dommages dans ces contextes-là qui fait l'objet du présent travail de recherche. Comme on essaiera de le montrer dans les chapitres qui suivent, ce type de problématique est à la fois courant dans la pratique sans pour autant y faire l'objet d'approfondissements conceptuels ou méthodologiques, et relativement rare dans la recherche, où les questions de fond sont analysées sur des cas théoriques ou sur un nombre restreint de sites réels.

Il faut dès à présent citer les méthodes développées par le Flood Hazard Research Centre (Penning-Rowse et Chatterton, 1977; Parker et al, 1987; Penning-Rowse et al, 1988) qui répondent explicitement à différents niveaux de disponibilité des données et de besoins de précision, en prenant en compte différents niveaux de description de la localisation et de la vulnérabilité des biens situés en zone inondable. La "simplification" de méthodes d'estimation peut conduire jusqu'à formaliser des "estimations de coin de bureau" ("desk-top analysis") réalisées à partir d'informations générales préexistantes (Davis et Burnham, 1988).

Nous nous intéressons ici au problème de la représentation du processus "aléa hydrologique - impacts" débouchant sur des coûts de dommages. Comme nous l'avons évoqué, ces coûts peuvent avoir diverses définitions et significations sur les plans économique ou -plus généralement- décisionnel. Ainsi, l'échelle géographique et institutionnelle à laquelle on se place conditionne la nature des dommages et donc des coûts à considérer. Mais cette diversité ne change pas la nature du problème de modélisation que nous posons ici, à savoir établir une représentation du processus d'apparition des impacts, en fonction de l'aléa, afin de pouvoir estimer par simulation les coûts dus à des événements potentiels (liés ou non à des scénarios de politiques ou d'aménagements).

Dans les cinq chapitres qui suivent, nous passerons sous silence la question de la définition des coûts, définition qui est conditionnée par la nature et le niveau d'une décision devant s'appuyer sur l'estimation de ces coûts. Pour les études de cas et applications, nous avons considéré que les coûts correspondaient à la somme des pertes financières totales (sans déduction d'indemnités) subies par les particuliers et entreprises sinistrés.

Cette troisième partie du mémoire s'articule sur les points suivants :

- l'analyse des modèles d'estimation des coûts des inondations sur une aire géographique (problématique, pratiques, typologie des modèles et état de l'art);
- la présentation du modèle local que nous avons conçu et développé, à l'échelle d'un secteur de vallée inondable;
- la présentation de la procédure mise en oeuvre pour collecter les données nécessaires au modèle sur des zones inondables du bassin de la Loire;
- l'analyse des incertitudes dans le modèle local par simulation;
- la présentation d'une démarche de mise en oeuvre du modèle sur une région regroupant de nombreux secteurs, en illustrant la problématique des cohérences spatiales de diverses natures auxquelles on est confronté en pareille situation.

VII. MODELISER ET ESTIMER LES DOMMAGES A DIFFERENTES ECHELLES GEOGRAPHIQUES

Dans l'oeuvre de la science seulement on peut aimer ce que l'on détruit, on peut continuer le passé en le niant, on peut vénérer son maître en le contredisant.

Bachelard, 1977, p. 252

VII.1. LA PRATIQUE ET LA PROBLEMATIQUE

VII.1.1. Les objectifs

On a évoqué en partie A le contexte et les motivations menant à des évaluations des dommages dus aux inondations, et en partie B des questions relatives à l'analyse des dommages élémentaires (la personne, le logement...). Le plus souvent, la demande en matière d'évaluation dépasse très largement cette échelle, et porte sur un quartier, une partie de vallée, voire un bassin fluvial ou un pays dans son ensemble.

Selon les questions posées au processus de décision, et selon l'approche retenue pour l'analyse, l'objectif de l'évaluation concerne:

- l'estimation des enjeux exprimés au travers des coûts engendrés par un ou plusieurs événements d'intensité donnée, ou au travers du coût moyen annuel CMA; l'évaluation du CMA peut être directe ou passer par l'évaluation de coûts dus à des événements de fréquence données permettent d'approcher le CMA;
- l'estimation de ces mêmes coûts pour différents scénarios d'aménagement et de gestion du risque d'inondation;
- l'estimation de la réduction des coûts permise par un projet ou une politique.

On n'abordera pas ici le problème lié aux prévisions d'évolution dans le temps: évolution de l'aléa hydrologique que l'on considère à la lumière des scénarios de changement climatique (Carter et al, 1992), évolution de l'occupation des sols sans et/ou avec l'influence de la politique de gestion des inondations que l'on analyse... La nature des paramètres dont on veut prévoir l'évolution est, bien évidemment, liée à la nature des paramètres pris en considération dans l'évaluation: occupation des sols, coûts, valeurs des biens...

La question de "l'extrapolation" concerne également la gamme d'intensité des événements de crue que l'on considère, et donc l'emprise physique de l'inondation prise en compte. Pour analyser des crues rares non observées assez récemment, la détermination de la zone inondée est un exercice parfois très difficile. Mais lorsque l'on cherche à estimer le CMA, cela soulève un problème de fond: jusqu'à quelle fréquence d'événement peut-on extrapoler l'intensité de l'aléa et son emprise, existe-t-il une crue maximale, une emprise maximale ? Dans la pratique, comme dans les travaux de recherche, on se limite à des phénomènes dont la durée de retour n'excède pas une à quelques centaines d'années. A ce niveau déjà, il faut s'interroger sur la significativité des éléments que l'on considère, car ils correspondent à des extrapolations ou à des fréquences estimées sans moyen de validation rigoureuse (Klemes, 1989; Bouleau, 1991).

Par ailleurs, il est d'autant plus difficile d'estimer les coûts indirects pour des événements rares, du fait de la complexité et de l'étendue des circuits économiques (au sens le plus large) qui se trouvent perturbés par des conjonctions de phénomènes. Ainsi les effets de la destruction de deux ponts routiers correspondent-ils à la somme des effets de la destruction respective de chacun des ponts?

L'évaluation des dommages sur une zone inondable est une pratique courante, résultant soit de demandes d'organismes financeurs de projets, soit d'obligations légales:

- obligation d'une évaluation économique pour les projets d'aménagement de cours d'eau au Royaume-Uni (action des Water Authorities et des Ministères, débats sur l'aménagement de la Soar; Parker et Penning-Rowse, 1972; Henry, 1984);
- intervention fédérale technique et financière, aux Etats-Unis, pour les projets de protection contre les inondations, en fonction de l'intérêt économique (cf. Flood Control Act de 1936; Rosen et Reuss, 1988);
- recommandations de la FIA-Federal Insurance Administration- aux Etats-Unis pour le calcul des primes d'assurance en zone inondable (Johnson, 1985; Arnell, 1986);
- étude de vulnérabilité dans le cadre des Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles d'inondations, pour le zonage du risque d'inondation et la définition des réglementations d'occupation de l'espace en fonction de leur opportunité économique (cf. loi du 13 juillet 1982 sur les catastrophes naturelles; Jacq, 1987; Caude, 1987; DRM et STU, 1990).

Parmi les études de grande envergure réalisées en France ou en cours de réalisation, on peut citer les nombreux travaux du BCEOM (1969, 1977, 1980-b...), visant notamment des évaluations à l'échelle nationale, l'évaluation réalisée sur la Loire moyenne (OTU, 1965), les estimations faites sur les bassins de la Meurthe et de la Moselle (BCEOM, 1990), ou encore l'étude en cours sur toute l'agglomération continue de la région d'Ile-de-France (inondations de la Seine et de la Marne; I.I.B.R.B.S, 1992).

VII.1.2. L'évaluation passe par une modélisation

Lorsqu'on évalue le coût des dommages dus à un événement d'inondation qui s'est effectivement produit, dans des conditions et à une date qui correspondent à la situation que l'on veut décrire, il est bien sûr possible de procéder à l'estimation des coûts par recensement systématique de tous les impacts, et affectation d'une valeur correspondant au cadre d'analyse. Dans un tel cas, la question de la "modélisation" ne se pose pas, pour peu que l'on ait les moyens d'assurer l'exhaustivité de la démarche, sans aucune hypothèse a priori.

Mais cette situation est marginale, et notamment l'hypothèse d'exhaustivité est toujours mise en défaut: les données d'indemnisations ne correspondent pas à l'ensemble des coûts, les enquêtes sont rarement exhaustives... Et dès lors que l'on extrapole des coûts estimés sur des bâtiments "représentatifs", cela revient à faire des hypothèses pour représenter, évaluer une réalité que l'on ne maîtrise pas dans sa totalité. Par ailleurs, la question posée dépasse le plus souvent un ou quelques événements réellement observés: autres événements de crue potentiels, hypothèses d'aménagement...

Ainsi, sauf cas très particulier, l'évaluation suppose que l'on donne une représentation de la réalité s'appuyant sur des hypothèses. L'exemple le plus simple est le fait d'affecter tous les bâtiments inondés d'un même coût moyen. Pour Lliboutry (1985), un modèle est une schématisation de la réalité qui offre prise aux calculs: on isole une partie aussi autonome que possible de la réalité, en ne retenant que les processus et grandeurs essentiels, en lissant les formes et les valeurs, en choisissant des échelles d'espace et de temps.

Citons également Loucks (1992). "Modelling involves the development of a mathematical or computational framework for describing a particular system and its operation in order to study, identify and evaluate possible solutions to problems in that system. It is a process or procedure intended to focus and force clearer thinking and to promote better decision making". Ces auteurs, tout comme Somlyódy et Varis (1992) insistent sur le fait qu'un modèle dépend de la question que l'on cherche à éclairer, et qu'il reflète également un état des connaissances, un degré de disponibilité des données ...

Si le recours aux concepts de la modélisation est systématique pour les travaux de recherche, cela est bien plus rare pour les évaluations réalisées par des praticiens. Il s'ensuit que des hypothèses de représentation restent implicites, et que leurs conséquences sur les résultats et sur les fiabilités des

résultats ne sont pas souvent analysées. Les hypothèses les plus "raisonnables" et "nécessaires" émanant du plus profond "bon sens" se traduisent nécessairement par une imprécision même minimale, et dans certains cas par un risque d'inadéquation à un cas donné. Le recours au formalisme de la modélisation s'impose par la nature de l'exercice, et ouvre sur une utilisation complète de la démarche d'évaluation: validation de la démarche, production d'un support et non d'un substitut à la réflexion (Somlyódy et Varis, 1992), adaptation de la représentation au but recherché en termes d'aide à la décision (Lliboutry, 1985; Loucks, 1992).

Les modèles d'évaluation des coûts des dommages dus aux inondations cherchent à représenter une chaîne de processus réels de natures différentes (figure VII.1). La représentation d'ensemble peut être plus ou moins décomposée. Il nous est apparu que la logique de ce types de modèles, ou plutôt les logiques que pouvaient adopter ces types de modèles, étaient comparables à celles mises en oeuvre en matière de qualité des eaux, ou de processus hydrologiques complexes... On doit cependant noter une particularité de taille pour l'évaluation des dommages dus aux inondations: on manque le plus souvent de données auxquelles on pourrait comparer les résultats du modèle. Ceci restreint notamment les propriétés que l'on peut demander à un tel modèle, par rapport à celles mentionnées par Kauark-Leite (1990):

- cohérence rationnelle;
- ajustement aux données expérimentales (cette propriété est ici toute relative);
- unicité ou identifiabilité (cette propriété aussi suppose que l'on puisse valider le modèle en mesurant la réalité qu'il décrit);
- minimalité;
- falsifiabilité (cette propriété revient à supposer que toute hypothèse fautive peut être mise en défaut pour peu que l'on dispose des moyens d'observation suffisants);
- pouvoir de prévision pour des situations non observées.

VII.2. UNE TYPOLOGIE DES REPRESENTATIONS

Rappelons que les représentations, ou modèles, que l'on considère ici n'incluent pas la définition économique du coût des dommages. On considère des modèles du processus "crue -> coût" indépendamment de la nature économique du coût. Les critères généraux de classification s'inspirent de la typologie proposée par Valiron et al (1988).

VII.2.1. Modèle statique ou dynamique

Actuellement, les modèles d'évaluation des dommages ne prennent pas en compte des aspects dynamiques comme l'évolution des conditions d'écoulement dans la rivière, ou la modification de l'occupation de la zone suite à des événements de crue.

Le seul aspect dynamique intégré dans certaines approches concerne des hypothèses "exogènes" d'évolution de l'occupation des sols et d'évolution des valeurs unitaires des biens exposés. Différentes évaluations ayant fait l'objet d'analyses "ex-post" ont présenté des erreurs importantes en matière de prévision (pour la prévision de prix, voir par exemple Fortin et Mc Bean, 1984), erreurs accrues par le fait que les zones exposées aux risques d'inondations présentent des spécificités (mode d'occupation, habitat...). Et l'analyse de ces spécificités requiert un investissement conséquent, dans la mesure notamment où les limites des zones inondables ne correspondent pas aux découpages administratifs (impossibilité d'avoir recours de façon simple à des données statistiques générales).

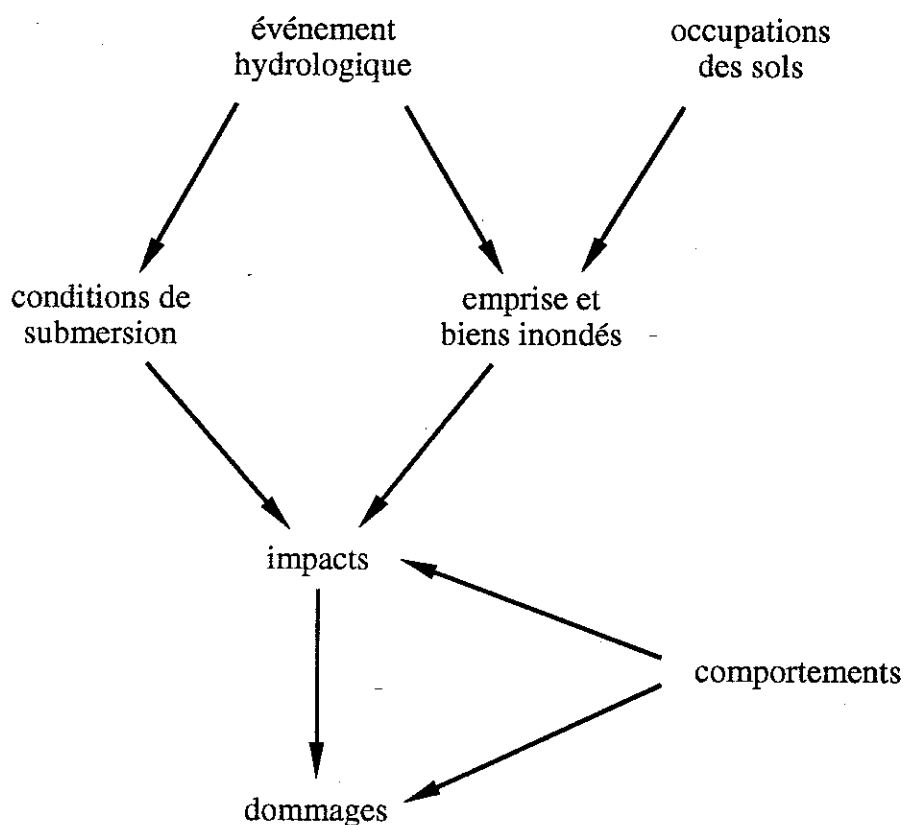


Figure VII.1. : les processus en jeu dans la formation des dommages dus aux inondations

VII.2.2. Modèle déterministe, conceptuel ou statistique

Un modèle déterministe a l'ambition de représenter exactement les phénomènes réels, ses erreurs n'étant dues qu'à l'imprécision sur les paramètres d'entrée. En ce qui concerne l'évaluation des dommages sur une zone inondable, cela suppose une connaissance fine de lois de dommages, et pour la mise en oeuvre cela nécessite une description physique très détaillée des personnes, biens et activités exposés, et des paramètres de l'inondation. Un modèle parfaitement déterministe est difficile à imaginer dans ce contexte, et on qualifiera plutôt de quasi-déterministes les modèles assurant une représentation physique -quoique simplifiée- de la zone exposée, de l'inondation, des dommages, en décomposant le processus crue -> coût des dommages (conditions de submersion, biens et activités exposés avec leur vulnérabilité...). Un tel modèle repose sur un degré minimal de décomposition des phénomènes représentés (hydrologie, hydraulique, occupation des sols, quantification des dommages...; voir plus loin).

Un modèle conceptuel consiste en une intégration de facteurs complexes, en une agrégation permettant une représentation simplifiée. Une telle approche suppose alors un calage des paramètres du modèle qui ne correspondent pas à des facteurs de signification physique. Cela suppose également que le modèle soit bien conditionné, c'est-à-dire que le calage aboutisse à un choix unique du jeu de paramètres. En matière de modélisation de zone inondable, un modèle conceptuel peut être calé sur des événements réels (historiques), ou sur des événements simulés. Dans le dernier cas, cela suppose qu'on dispose d'un modèle déterministe "lourd" qu'on mettrait en oeuvre sur quelques crues. Dans le premier cas, se trouve posé le problème de la validité des bilans "historiques" de dommages et celui de leur réactualisation (BCEOM, 1980-b). La nature des données que l'on considère pour le "calage" d'un modèle conceptuel est un facteur important pour la validité et les caractéristiques de ce modèle.

Un modèle statistique, ou "boîte noire", est a priori détaché de toute description physique, et n'est basé que sur l'analyse statistique du système auquel on s'intéresse. Sauf exception, les

phénomènes de crues dommageables ne sont pas suffisamment fréquents pour qu'on puisse s'intéresser uniquement à un modèle statistique sans des hypothèses minimales (forme d'une courbe "fréquence - coût"...) qui en font en fait un modèle conceptuel.

VII.2.3. Modèle distribué ou global - échelles d'espace

Un modèle distribué représente la diversité spatiale des mécanismes en jeu (ici de la relation inondation - coût) à l'intérieur de la zone inondable, le comportement d'une cellule étant représentable à partir de paramètres propres identifiables. Un modèle global, pour sa part, représente de façon agrégée la composition de "comportements géographiques hétérogènes". Ce critère de classification peut revêtir une importance particulière lorsque l'objet de l'évaluation est d'analyser des mesures de prévention ou de protection correspondant à une logique spatiale: réglementation de l'usage des sols et règles constructives, protections locales (digues...). Certains modèles d'évaluation se présentent sous forme de logiciels permettant l'analyse de telles mesures (Penning-Rowell et al, 1987, Smith, 1986-a).

Ce critère est lié à un autre critère, plus "opérationnel", à savoir la ou les échelles d'espaces considérées. On peut être amené à prendre en compte des échelles différentes dans différentes composantes du modèle.

Par ailleurs, lorsque l'on considère une aire d'analyse constituée de plusieurs "zones inondables élémentaires" sur lesquelles on effectue des évaluations, se posent différentes questions relatives aux "cohérences régionales": cohérence de l'aléa hydrologique (cohérences spatiales des occurrences et des intensités), cohérence de certaines sources d'erreurs et d'incertitudes, constitution des coûts régionaux par agrégation des impacts locaux et de leurs retombées. Ces questions de cohérence régionale et d'agrégation des résultats font l'objet plus particulièrement du chapitre XI.

VII.2.4. Niveau de décomposition - structure des sous-modèles

Les différentes catégories de modèles peuvent faire l'objet d'une décomposition en sous-modèles, lorsque les composantes qui s'en dégagent sont plus accessibles à l'analyse (approche "holistic", selon Somlyódy et Varis, 1992). Ces composantes doivent pouvoir être recomposées en une structure qui privilégie les éléments essentiels, et qui reproduise les interdépendances majeures.

Ainsi, les modèles d'évaluation des dommages dus aux inondations les plus courants distinguent le sous-modèle hydrologique (fréquence-débit ou fréquence-cote), le sous-modèle hydraulique (emprise inondée, paramètres de submersion: hauteur, durée...), le sous-modèle d'occupation des sols (surfaces), le sous-modèle de quantification des dommages "unitaires" (par unité de surface, par bâtiment, en proportion de la valeur...).

Ces deux derniers sous-modèles sont souvent présentés comme un seul sous-modèle "économique" (voir par exemple Moser, 1992-a et b). Nous proposons de réserver le qualificatif "économique" au parti pris général de l'évaluation: nature de l'évaluation (la question posée), impacts pris en compte, nature du décideur auquel on se réfère... Ces éléments conditionnent ensuite différentes composantes du modèle en général, et des sous-modèles quand ils existent.

Lorsque les sous-modèles existent, la nature de chacun d'eux est un élément de classification. On décrit ci-dessous quelques caractéristiques qui permettent d'opérer de telles distinctions.

a) Sous-modèles hydrologique et hydraulique

- prise en compte ou non des hauteurs de submersion, des durées; il faut souligner ici que lorsque l'on relie les dommages à plusieurs paramètres hydrauliques et/ou hydrologiques, l'analyse fréquentielle des événements d'inondation doit porter sur ces différents paramètres ou sur des grandeurs dont ils dépendent de façon univoque (débit de pointe, volume de la crue lorsque la forme de l'hydrogramme en dépend strictement...), à moins que des hypothèses acceptables permettent de définir entièrement un événement (en regard de ses impacts) par une grandeur;

- estimation des hauteurs d'après un modèle hydraulique bidimensionnel, ou d'après la cote de l'eau en lit mineur perpendiculairement à l'écoulement, ou d'après un point de référence "index point" en considérant que les lignes d'eau sont soit horizontales soit parallèles (voir Plazak, 1986).

b) Sous-modèle d'occupation des sols

- distinctions et typologie des occupations des sols;
- sous-échelle d'espace (parcelle, cellules homogènes, cellules hétérogènes, discrétisation par points ou par mailles...);
- sources de données (repérages de terrain, densités globales, télédétection, recensement; Penning-Rowsell et al, 1992);
- quantification du capital exposé (nombres, valeurs...);
- localisation en altitude (valeurs moyennes par cellule, distribution...).

c) Sous-modèle de quantification des dommages unitaires

- typologie des biens et surfaces considérés;
- paramètres de submersion considérés;
- source des fonctions de dommages (données locales ou non, issues d'un échantillonnage ou établies sur des biens types...; Arnell, 1986; Penning-Rowsell et al, 1988).

Certaines de ces questions sont illustrées dans la partie VII.3 qui suit, au travers de la présentation de différents modèles.

VII.3. L'ETAT DE L'ART

VII.3.1. Modèles statistiques

Le BCEOM (1967 et 1980) a proposé une première approche, qui consiste à "tracer" une courbe "fréquence - coût" (F-C) à partir d'événements réels (coûts réactualisés), dont une crue "extrême" et la crue seuil de débordement. Cela suppose, sur chaque cellule rattachée à une station hydrométrique, de choisir une relation F-C "plausible" à partir de trois points.

Des travaux menés par Rousselle et El-Jabi (1977), puis Ouellette et al (1986; 1988) ont consisté à générer des séries de dommages à partir de séries de débits maximum de crues, en utilisant pour cela un modèle conceptuel global présenté plus loin. Les séries de dommages ont ensuite été analysées avec la théorie des valeurs extrêmes, en intégrant la répartition saisonnière des crues.

VII.3.2. Modèles conceptuels globaux

Des prémisses d'une approche conceptuelle ont été posés par Roder et Berry (1961). Pour 104 zones inondables urbaines non protégées ont été analysées des relations liant les dommages (estimées préalablement), l'hydrologie et le bassin versant, l'urbanisation et son évolution. Si l'analyse factorielle a permis d'identifier des tendances générales et des "comportements" régionaux, cela n'a pas donné lieu à une représentation quantitative des dommages.

Le BCEOM (1977) a proposé une démarche se rapprochant plus des modèles déterministes, mais fournissant directement une évaluation du CMA à l'échelle de biefs de rivières. A partir d'un Atlas des zones inondables (BCEOM, 1969) présentant -par biefs- les différents types de surfaces (agricoles, urbaines...) submergés par la plus forte inondation connue, un facteur correctif permet de définir des "surfaces moyennes annuelles submergées" auxquelles on applique une fonction de coût

(par type de surface) linéaire et indépendante des conditions hydrauliques de submersion. Seules des durées moyennes de submersion et des répartitions saisonnières sont prises en compte pour les dommages aux cultures.

On a mentionné plus haut un modèle conceptuel qui avait -entre autres- permis une approche statistique. Ce modèle consiste en une relation analytique reliant la cote de crue et le dommage ramené à la valeur totale exposée (El-Jabi, 1980; El-Jabi et Rousselle, 1987). Cette fonction, dont la forme résulte de représentations analytiques simples des phénomènes, est paramétrée par deux paramètres calés à partir de bilans de coûts réels.

VII.3.3. Modèles semi-déterministes globaux

Dans cette catégorie, on peut considérer le modèle simple proposé par James (1972), puis Grigg et Helweg (1975), à l'échelle de la zone inondable, où le coût est défini par:

$$C = K . H . M . U . A \quad (9)$$

où:

- K est l'endommagement (dommage relatif) - supposé uniforme - par unité de hauteur de submersion ;
- H est la hauteur moyenne de submersion sur la zone touchée;
- M est la valeur des biens exposés par unité de surface;
- U est la proportion de la zone qui est urbanisée;
- A est la surface totale de la zone inondable.

Ce modèle ne fait pas de distinction entre types d'impacts, ni entre modes d'occupation du sol.

Dans l'étude réalisée sur la Loire moyenne entre les confluent de l'Allier et de la Maine (OTU, 1965), les biens inondés pour une crue historique avaient été soit recensés (entreprises) soit estimés par des ratios en surface (logements, cultures), et les coûts avaient été estimés par une valeur moyenne (logement) ou pour des conditions de submersion uniformes a priori (hauteur d'un mètre et durée de sept jours). De même, des coûts moyens par rapport aux conditions de submersion ont été considérées sur les vallées de la Meurthe et de la Moselle (BCEOM, 1990).

Par contre, pour l'évaluation des dommages réalisée sur Bangkok par Tang et al (1992), la zone inondable a été divisée en 227 cellules où ont été définies les conditions moyennes de submersion appliquées aux différentes occupations des sols présentes. Une telle approche, dans notre classification, peut relever des modèles globaux lorsque les cellules sont définies "au hasard", ou des modèles distribués si les conditions physiques sur chaque cellule sont assez homogènes (cf. prochain paragraphe; SAGERI, 1988).

Les approches proposées par Edinger (1964) et Bhavnagri et Bugliarello (1965) consistent à diviser la zone inondable en "tranches" d'altitude. Pour Edinger, les limites entre tranches correspondent à des contours d'inondations. Pour Bhavnagri et Bugliarello, ces tranches sont "horizontales", définies en altitude absolue. Sur chacune de ces cellules, la valeur totale des biens exposés est supposée placée à une même altitude moyenne, et se voit appliquer une fonction d'aménagement unique (dommages/valeur totale) en fonction de la hauteur moyenne de l'eau sur la cellule.

Cette démarche de décomposition d'une zone inondable en "tranches concentriques" a été reprise assez souvent, parce qu'elle facilite la prise en compte de crues de différentes intensités (lorsque l'eau monte, la hauteur de submersion augmente sur les parties déjà inondées, et de nouvelles surfaces sont submergées progressivement). Par ailleurs, plusieurs auteurs ont insisté sur le fait que les parties "basses et moyennes" d'une zone inondable (emprise d'une inondation vingtennale) pouvaient contribuer très majoritairement au CMA (Maistre et Siméon, 1968; Ramirez et al, 1988). De même, le CMA sur un bâtiment est beaucoup plus variable en fonction de l'altitude (position par rapport à l'emprise d'une crue décennale) dans les parties "basses et moyennes" d'une zone inondable (Johnson, 1985; Arnell, 1986).

Ainsi, cette "logique des tranches" a été retenue par Schaake et Fiering (1967), qui ont considéré un découpage des zones inondables limité par les emprises des crues de durées de retour 10,

25 et 100 ans. Pour effectuer des simulations de régimes d'assurances sur un grand nombre de sites dont seule la valeur totale exposée était connue, ils ont uniformément réparti cette valeur entre les quatre tranches selon les pourcentages 11 %, 15 %, 41 %, 33 %.

Sur les zones inondables de la Tet (Pyrénées Orientales), le BCEOM (1977) a considéré des "tranches" de zone inondable en se référant à la plus forte emprise d'inondation connue, et en supposant que la surface totale inondée augmentait linéairement avec la cote de l'eau (à partir du seuil de débordement), les biens exposés étant uniformément répartis sur la surface totale.

Dans un objectif "d'optimisation" des occupations des sols en zone inondable, Bialas et Loucks (1978) ont élaboré un modèle où l'intensité de la crue est définie en volume: la topographie de la zone inondable est discrétisée en "marches" assorties de coefficients surfaciques d'occupation par des constructions. En considérant que les lignes d'eau sont parallèles au fond du lit de la rivière, ils déterminent ainsi la cote qu'atteint l'eau pour un volume donné, et par suite les dommages qui en découlent sur chaque "marche" de zone inondable.

Quelle que soit l'approche que l'on retient pour définir physiquement des "tranches" de zone inondable, il se pose la question de quantifier l'occupation des sols. L'une des options est de s'en tenir à considérer que les densités de diverses occupations des sols sont uniformes sur toute la zone inondable considérée. Lorsque la zone et les tranches ont été délimitées sans considérer de critère d'occupation des sols, cela peut conduire à des biais sensibles que l'on illustrera plus loin: par "chance", on trouve plus souvent les prairies dans les parties les plus basses, et les centres urbains dans les parties plus hautes. C'est pourquoi, dans le cadre d'un stage effectué par Jean-Christophe Dugon au Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, on a testé une approche pour quantifier les logements présents dans des emprises inondées sur un même val. On a utilisé des données de recensement dont le découpage géographique était clairement incompatible avec les limites physiques des inondations (Torterotot, 1990-a).

En rupture avec cette "logique des tranches", le Flood Hazard Research Centre a développé le modèle BOCDAM pour évaluer les dommages sur des secteurs de vallées inondables (FHRC, 1987; Penning-Rowse et al, 1988). Sur une section représentative de chacun de ces secteurs, sont identifiées les surfaces de diverses natures et leur répartition en altitude. Cette description des zones inondables est ensuite étendue au secteur entier, en la faisant varier (surfaces et altitudes) de façon aléatoire (tirage par la méthode de Monte-Carlo). Il est ainsi possible d'approcher l'incertitude générée par la prise en compte détaillée d'une section "représentative" seulement.

VII.3.4. Modèles semi-déterministes distribués

L'approche proposée par SAGERI (1988) se base sur l'identification de secteurs homogènes en termes de hauteur de submersion et de typologie urbaine (en isolant des modes particuliers d'occupation des sols), secteurs pour lesquels sont définies des données de valeurs exposées (ramenées à l'unité de surface) et d'endommagements (dommages relatifs). Cette approche peut constituer une modélisation globale ou distribuée, selon la finesse du découpage que l'on fait, par rapport à la variabilité spatiale des modes d'occupation des sols et du phénomène de submersion.

Dans la majorité des modèles semi-déterministes, on distingue chaque bâtiment et/ou chaque parcelle: modèles ESTDAM et travaux du Flood Hazard Research Centre (Penning-Rowse et Chatterton, 1977, Parker et al, 1987, Penning-Rowse et al, 1987, Penning-Rowse et al, 1988), modèle ANUFLOOD et travaux du Centre for Resource and Environmental Studies (Handmer, 1986, Smith 1986-a, Penning-Rowse et al, 1988), modèle proposé par Debizet et Caude sur Montauban (1986)... Dans ces approches, chaque bâtiment est identifié avec son altitude, et par une typologie physique et économique plus ou moins détaillée (liée à des jeux de courbes de coût de dommages, en fonction de la hauteur de submersion). On obtient ainsi une véritable description physique et économique de la zone inondable, les dommages pouvant être évalués à partir de représentations physiques hydrauliques plus ou moins détaillées de l'inondation (hauteur en un point de référence, profil en long, cartographie en deux dimensions des hauteurs...).

Ainsi, Twohig et al (1988) ont estimé pour plus de 500 bâtiments les hauteurs de submersion pour les crues de durées de retour 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 et 500 ans. Ce type d'approches suppose que l'on recueille des informations détaillées: recueils d'informations systématiques lors des événements de crues (Chojnacki et al, 1992), ou repérages de terrain (les chercheurs australiens ont

défini une méthode de repérage permettant de caractériser chaque bâtiment depuis un véhicule parcourant les rues, et d'opérer en temps réel la saisie informatique des paramètres décrivant les bâtiments pour l'utilisation du modèle ANUFLOOD).

Une approche de même niveau de détail a été menée dans la vallée du Gers sur des groupes homogènes de parcelles de cultures par Macgilchrist (1985), à partir d'une cartographie des cultures par photographie aérienne, et à partir d'un modèle hydraulique permettant de simuler hauteurs et durées de submersion sur les parcelles.

L'échelle de la parcelle a également été retenue par le CEMAGREF pour estimer non pas des coûts de dommages, mais le critère d'inondabilité qui représente la relation liant la fréquence, la durée et la hauteur de submersion et est défini par la mise en oeuvre d'un modèle hydrologique et d'un modèle hydraulique (Oberlin et Lambert, 1991; Gautier, 1991; CEMAGREF, 1992). Ce critère d'exposition à l'aléa peut ensuite être confronté à la nature de l'occupation de chaque parcelle, pour différents scénarios d'aménagement.

On peut enfin distinguer les approches reposant sur des bases existantes de données spatiales, par exemple sur des données de recensement établies sur des découpages en grilles (Davis et Webb, 1978; Das et Lee, 1988; travaux du Hydrologic Engineering Center - Penning-Rowse et al, 1987). Sur chaque cellule on dispose du mode d'occupation du sol, et on calcule une courbe globale agrégée dommage-hauteur de submersion. Suivant les cas, on considère que toute la cellule est placée à une altitude moyenne, ou alors la valeur exposée est répartie selon plusieurs altitudes (discrètes) à l'intérieur de la cellule (Das et Lee, 1988). Ici encore, différentes représentations hydrauliques du champ d'inondation sont possibles et aboutissent à l'évaluation des dommages (modélisation bidimensionnelle pour le HEC, hypothèse de parallélisme des lignes d'eau pour les autres auteurs). Contrairement aux approches évoquées jusqu'ici, le découpage en cellules géographiques ne respecte aucune logique de type hydraulique (homogénéité...). Mais le découpage est, en général, assez fin pour que l'on puisse qualifier ces approches de "distribuées".

L'étude lancée en 1992 sur les inondations de la Seine et de la Marne dans l'agglomération continue d'Ile-de-France (I.I.B.R.B.S, 1992) utilise un système d'informations géographiques (SIG) permettant de confronter a) la topographie au travers d'un modèle numérique de terrain sur maillage; b) les paramètres de submersion issus dans un premier temps d'observations historiques et de diagnostics (peut-être dans un deuxième temps, de modèles hydrauliques); c) l'occupation des sols issue d'un SIG urbain identifiant une large typologie de surfaces sur des polygônes irréguliers. Ce travail doit aboutir à des estimations de dommages réalisées sur la base d'un maillage de 25 mètres couvrant plus de 200 kilomètres de vallées urbanisées.

Pour finir ce tour d'horizon rapide citons des travaux proches, développés pour estimer les impacts de ruptures de barrages (Marche et al, 1990 et 1991). Les différentes données spatiales (topographie, enveloppe des surfaces inondées, valeurs des biens exposés, populations exposées...) font l'objet d'un krigeage, c'est-à-dire sont exprimées sous la forme d'une fonction analytique définie en tout point de la surface inondable: cela permet soit de revenir à une représentation par un maillage, soit d'effectuer des calculs de coûts de façon analytique.

Des modèles spécifiques aux inondations côtières de polders sont en cours de développement dans le cadre du projet de recherche EUROFLOOD (1992; 1993; Penning-Rowse et al, 1992), liés par exemple aux travaux de Peerbolte (1993).

VII.4. LES PRINCIPES DE MODELISATION RETENUS

Dans la quasi-totalité des cas, les modèles d'évaluation des dommages sur une zone inondable ne peuvent être confrontés à des bilans de coûts, à des fins de calage ou de validation... Cela suppose que ces modèles ne peuvent être jugés que sur leurs caractéristiques propres, sans référence extérieure (voir VII. 1.2.):

- la cohérence rationnelle;

- la minimalité (ne pas compliquer le modèle sans présomption suffisante de son amélioration);
- la falsifiabilité (capacité de diagnostic des hypothèses);
- le pouvoir de prévision.

Les critères de choix de modèle proposés par El-Jabi (1980) sont les suivants:

- apporter une bonne représentation physique du système;
- réaliser une utilisation simple des données disponibles;
- simuler des résultats ayant une précision correcte;
- être applicable à des zones très différentes.

Fowler (1988) mentionne pour sa part la possibilité d'adapter le modèle à différents degrés de précision, en fonction des enjeux sur chaque zone considérée. Il s'agit d'utiliser un modèle "économique", adapté aux besoins qualitatifs et quantitatifs de résultats.

En fait, un modèle ne peut être évalué que par l'information qu'il apporte dans un processus de décision, ou face à une question. Cette information peut consister en un ensemble de résultats critiqués, en une identification des sources d'incertitudes majeures ou des paramètres et valeurs qui conditionnent une décision... (Loucks, 1992).

Nous revenons ici aux concepts de "l'analyse de la décision" (cf. IV.3): le modèle est un outil de représentation destiné à permettre de répondre à une question donnée, dans un processus itératif de recherches d'informations et de diagnostic sur la valeur des connaissances produites. En ce qui concerne notre démarche, il ne s'est pas agi de répondre à une question donnée ou d'alimenter un processus de décision déterminé. Par contre, l'ambition est bien de proposer une démarche de modélisation pouvant répondre à un type de questions clairement identifiées. Les points que l'on va aborder de façon générale, ou au travers d'exemples, sont par conséquent des questions qu'il faut reposer dans la spécificité de chaque situation.

Les principes que nous vous proposons de retenir, pour l'élaboration d'un modèle d'évaluation des dommages sur une zone inondable, sont énumérés ci-dessous.

1° utilisation maximale des données, informations et expertises disponibles:

on a été amené plus haut à évoquer les différentes limites qui obèrent les informations disponibles, et imposent de n'en rien laisser perdre, ni de se priver de toute possibilité de validation;

2° explicitation de toutes les hypothèses sous-tendant le modèle:

il s'agit bien ici de permettre la critique du modèle par rapport aux connaissances concrètes sur la situation que l'on décrit; c'est un premier pas vers la falsifiabilité, et la seule garantie du pouvoir de prévision (les hypothèses du modèle que l'on applique sur un nouveau site sont-elles "raisonnables": parallélisme des lignes d'eau, ou représentativité de la typologie des occupations du sol...);

3° possibilité d'estimer l'incertitude sur les résultats et la contribution de différentes sources à ces incertitudes, et capacité d'évolution du modèle en précision:

l'incertitude sur de tels résultats est un élément essentiel, dans la mesure notamment où elle peut modifier un processus de décision par rapport à la seule prise en compte d'un résultat "moyen": décision différente, ou approfondissement des connaissances si la valeur de l'information supplémentaire espérée le justifie; comme on l'évoquait, on peut également être amené à mettre en oeuvre un même modèle avec différents niveaux de "précision" (ou "d'imprécision") sur divers secteurs, ou successivement à des degrés de précision croissant sur un même secteur; selon les cas, ces degrés de précision pourront

dépendre de la précision numérique de données d'entrée ou de la finesse de l'échelle géographique considérée pour améliorer l'homogénéité des phénomènes représentés;

4° possibilité d'intégrer des scénarios d'évolution des zones inondables et possibilité de réactualisation du modèle:

d'une part l'évaluation du coût des dommages peut intervenir dans des décisions jouant sur le moyen et le long termes (ouvrages d'art, réglementations...), d'autre part une réactualisation aisée d'études déjà menées permet d'économiser beaucoup d'énergies; les réactualisations et scénarios d'évolution peuvent concerner aussi bien l'hydrologie que l'hydraulique, l'occupation des sols (densité, valeur...), ou la vulnérabilité des biens; l'une des "réactualisations" par excellence concerne la capacité à évaluer différents types de politiques de gestion du risque d'inondation.

Par rapport à ces différents objectifs et principes que nous proposons de nous fixer, seules des structures de modèles semi-déterministes suffisamment décomposées peuvent être retenues. Les connaissances et informations sur le processus "crue-dommages" étant fragmentées, un modèle trop agrégé ne peut être "validé", pas même par un jugement "de bon sens".

Ainsi, une décomposition distinguant entre des sous-modèles hydrologique, hydraulique, d'occupation des sols, et de dommages permet a priori d'intégrer les données disponibles les plus détaillées. Par ailleurs, certaines informations pouvant recouper cette décomposition (par exemple le nombre de logements inondés par une crue dont on ne connaît que la fréquence), il importe de pouvoir les intégrer, soit en les décomposant, soit dans un processus de validation interne ou de "recalage" des paramètres et/ou valeurs plus détaillés. Par ailleurs, un modèle conceptuel ou agrégé ne saurait simuler des conditions futures que si elles se traduisent par une modification univoque de la relation "intensité de l'aléa-dommage":

- densification uniforme de l'habitat;
- modification de la loi de fréquence du paramètre hydrologique supposé lié au dommage de façon univoque...

Mais, comme on l'a évoqué, les politiques de gestion du risque d'inondation sont très variées, et leurs effets ne se limitent pas à cela.

Les objectifs généraux présentés au début de la partie C excluent a priori de considérer des modèles distribués. Par contre, il est bien évident que pour exploiter les informations disponibles et tenir compte d'hétérogénéités géographiques identifiables (en ce qui concerne le processus "crue - coûts"), les évaluations peuvent être réalisées à une échelle plus fine que l'ensemble de la zone considérée. On a déjà mentionné la question des cohérences régionales de divers ordres qu'il faut respecter pour agréger des coûts estimés sur différents secteurs. Ainsi, la prise en compte de cohérences hydrologiques suppose que l'on sache qualifier des événements hydrologiques globaux au niveau de chaque secteur et, le cas échéant, analyser puis simuler la composition de ces événements: cohérence ou non des fréquences entre l'amont et l'aval, cohérence des occurrences et/ou des intensités des crues aux confluent... De même, l'existence de cohérences dans les sources d'incertitudes suppose que l'on puisse les traduire, sans devoir nécessairement supposer que les incertitudes sont totalement indépendantes entre secteurs, ou au contraire complètement corrélées.

Dans le chapitre qui suit, on présente l'approche de modélisation retenue, reposant en première instance sur un découpage de l'espace spécifique au risque d'inondation et sur un modèle "local" destiné à évaluer les dommages sur chaque unité géographique identifiée. Ce découpage de l'espace a pour objectif de tenir compte des hétérogénéités qui nous sont apparues comme les plus importantes au sein du processus "crue - coûts". Le chapitre XI aborde les questions relatives à l'agrégation spatiale des résultats locaux.

VIII. LA STRUCTURE DU MODELE LOCAL D'ESTIMATION DES DOMMAGES

Que ceux qui croient qu'un modèle mathématique, "démarche de l'esprit à buts prédictifs, et se traduisant par des calculs", est ce qu'il y a de plus élevé et respectable dans la pensée humaine songent qu'un horoscope est aussi un modèle mathématique: il n'a que le tort de ne correspondre à aucune réalité, présente ou future!

Lliboutry, 1985

L'objet de ce chapitre est la présentation du modèle d'estimation des dommages sur une zone inondable, tel qu'il a été conçu à partir de l'analyse de modèles existants et du choix de principes d'orientation. Rappelons que ses objectifs sont d'apporter une estimation des coûts des dommages dus à des crues de différentes fréquences, ce qui permet également d'estimer le coût moyen annuel (CMA) des dommages.

Il s'agit du modèle local, dans le sens où on va s'attacher ici à l'échelle élémentaire considérée dans notre démarche, le secteur. La prise en considération d'échelles plus larges, correspondant à des ensembles de secteurs, fait l'objet du chapitre XI. Les paragraphes qui suivent présentent respectivement la structure générale du modèle (à commencer par le découpage géographique), une description plus détaillée par sous-modèles, enfin une synthèse sur les données d'entrée et leur traitement. Pour alléger la lecture, certains développements particuliers ont été placés en annexes.

VIII.1. LA STRUCTURE GENERALE DU MODELE

VIII.1.1. La définition des unités géographiques

Cette définition a reposé sur des considérations de deux ordres. Il s'agit d'une part d'éviter d'agglomérer des phénomènes très hétérogènes, notamment pour que les données d'entrée et leur exploitation puisse faire l'objet d'une critique "heuristique". D'autre part, la démarche doit s'adapter aux données et expertises disponibles ainsi qu'aux unités géographiques auxquelles le risque d'inondation est analysé ou potentiellement géré. En particulier, les objectifs généraux que l'on s'est fixé, tout comme la nature des informations pouvant être recueillies, interdisent de considérer un modèle distribué à la parcelle ou au bâtiment.

On a ainsi été amené à considérer un découpage à deux niveaux, en fonction de l'échelle spatiale des données et des phénomènes pris en compte, dans le cadre d'un modèle qui présente un certain niveau de décomposition.

a) le bief inondable

Sur une vallée, il est défini comme une unité hydrologique et hydraulique par rapport au lit mineur du cours d'eau: régime hydrologique uniforme en crue, absence de point de contrôle hydraulique influençant la ligne d'eau en crue plus de que façon locale. L'objectif poursuivi est de pouvoir se baser sur deux hypothèses majeures:

- le débit en crue est uniforme sur le bief;
- les enveloppes des lignes d'eau sont parallèles sur le bief, pour des crues d'intensités différentes.

A ces critères on a ajouté le respect des limites administratives départementales, pour le recueil des données, et le cas échéant pour certaines exploitations de résultats.

En particulier, on cherche pour chaque bief une ou deux stations hydrométriques de référence, qui peuvent se trouver à l'extérieur du bief (du fait du découpage administratif, ou parce que l'on manque -dans la situation présente- d'une station suffisamment représentative sur le plan physique, même si les critères retenus amènent à considérer un bief "indépendant"). Le fait de considérer jusqu'à deux stations hydrométriques de référence repose d'une part sur la possibilité de donner une information hydrologique plus spécifique au sein d'un bief (relations fréquence-débit et débit-cote), d'autre part sur la possibilité ainsi offerte de pallier à des manques d'informations intégrées en considérant des relations respectives fréquence-débit et débit-cote en des stations différentes.

b) le secteur inondable

Un bief inondable est divisé en secteurs selon deux critères qui nous sont apparus comme représentatifs d'une part des hétérogénéités dans la formation des coûts, d'autre part des unités de gestion du risque d'inondation:

- un critère hydraulique: la submersion d'un secteur correspond à un mécanisme unique, même si sa nature évolue quand l'intensité de la crue augmente (débordement direct, rupture de digue, déversement par-dessus une digue précédé ou non d'un phénomène de remous...); ceci est d'autant plus important que différents mécanismes sont susceptibles d'apparaître à des seuils très différents (en fréquence, en cote...);
- un critère de vulnérabilité: en première approche, la répartition des occupations des sols dans le secteur est uniforme par rapport au risque d'inondation, c'est-à-dire que sur deux surfaces inondées correspondant respectivement à deux débits de crues différents, la proportion de surface occupée par de l'habitat pavillonnaire (ou du blé d'hiver, ou de la zone industrielle...) est la même.

Par rapport à ce deuxième critère, il est bien évident que des établissements ou équipements très ponctuels (un hôpital ou une voie de chemin de fer, par exemple) ne sauraient entrer en compte. Ils sont susceptibles de concentrer une part sensible des dommages, et à ce titre une prise en compte en "pourcentage" de surface n'a pas grand sens (car elle conduit à répartir le "risque" sur toute une gamme de fréquence, alors que l'établissement est situé en un point et une altitude précis).

Tout comme le bief, le secteur peut avoir une dimension très variable, car cette dimension n'a pas de lien direct -dans l'absolu- avec les critères de découpage. La figure VIII.1 présente une illustration du découpage géographique retenu pour les zones inondables. Au sein d'un bief, chaque secteur inondable est rattaché à une station hydrométrique de référence.

VIII.1.2. La décomposition du modèle - structure générale

Conformément aux principes avancés dans le chapitre précédent, nous avons opté pour un modèle décomposé permettant 1°) d'intégrer toutes les informations et données disponibles 2°) d'explicitier les hypothèses de modélisation en regard des phénomènes, afin d'en permettre une critique d'ensemble, ainsi qu'une critique spécifique sur chacun des secteurs considérés. La structure retenue est la suivante:

- le sous-modèle hydrologique établit les relations "période de retour T - débit de pointe Q - cote maximale H" pour les crues considérées, et notamment pour un ensemble de crues spécifiques au secteur, pour lesquelles on estimera les coûts;
- le sous-modèle hydraulique produit une estimation des surfaces inondées, et détermine les paramètres de submersion pour chaque crue, sur une représentation discrétisée de la zone inondée;
- le sous-modèle d'occupation des sols localise ces différentes occupations des sols par rapport aux emprises des crues considérées;
- le sous-modèle de dommages estime les coûts pour les différentes crues considérées, ainsi que le coût moyen annuel (CMA).

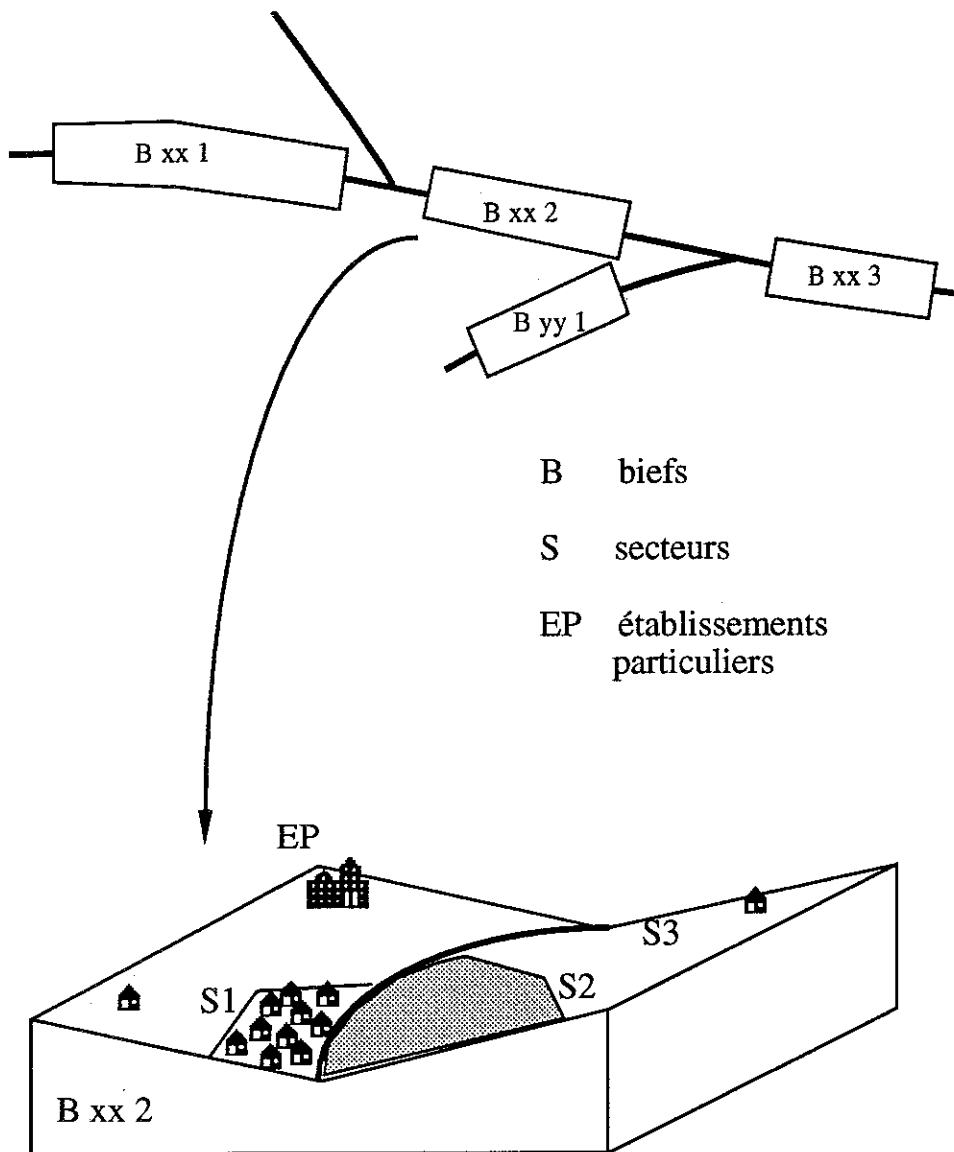


Figure VIII.1. : le découpage géographique en biefs et secteurs inondables

Les figures VIII.2 à VIII.6 présentent la structure d'ensemble du modèle et des sous-modèles. La structure logique des programmes de calcul figure dans l'annexe VIII.E. Dans la suite du texte, on présente tour à tour ces différents sous-modèles dans leurs grandes lignes.

VIII.2. LE SOUS-MODELE HYDROLOGIQUE

Ce sous-modèle a pour objectif de "choisir" les crues (que nous appellerons "de base") qui seront prises en compte spécifiquement sur un secteur donné, et d'estimer les relations entre période de retour T, débit de pointe Q, cote maximale H pour ces crues. A partir de ce tableau T-Q-H, on estime selon le même principe toutes les valeurs de cote H correspondant aux intensités de crues considérées comme références dans les données d'entrée: crue inondant une surface donnée, crue inondant un nombre de logements... La figure VIII.3 présente une schématisation des fonctions de ce sous-modèle.

Figure VIII.2. : la structure d'ensemble du modèle local (voir page ci-contre)

légende pour les figures VIII.2 à VIII.6

<i>C</i>	coût des dommages pour une crue donnée
<i>CMA</i>	coût moyen annuel des dommages
<i>d</i>	durée de submersion
<i>dtn</i>	hauteur de plancher par rapport au terrain naturel
<i>F</i>	fréquence de dépassement de crue
<i>f</i>	fonction de coût élémentaire (rapporté à la surface) pour un type donné d'occupation des sols
<i>H</i>	cote hydrométrique maximale de crue
<i>h</i>	hauteur de submersion
<i>Hris</i>	seuil (en cote) d'apparition du risque de rupture de digue
<i>Hrup</i>	seuil (en cote) de rupture certaine de digue
<i>p</i>	probabilité de rupture de digue
<i>Q</i>	débit de pointe de crue
<i>S</i>	surface inondée pour une crue donnée, sur un secteur
δS	surface d'une tranche de secteur inondable
<i>T</i>	période de retour de crue
<i>U</i>	proportion de surface, sur une tranche de secteur inondable, portant un type d'occupation des sols donné
<i>v</i>	fraction des crues dommageables se produisant au cours d'une saison donnée

l'indice i se rapporte aux crues de base, j aux tranches de secteurs, k aux types d'occupations des sols, m aux saisons

Cette figure présente les différents sous-modèles mis en oeuvre, avec les principales données utilisées et les résultats qui sont transmis d'un sous-modèle à l'autre. Le sous-modèle hydrologique définit les crues de base considérées, en période de retour T_i , en débit de pointe Q_i (éventuellement) et en cote maximale H_i . Il estime également les cotes pour toutes les intensités de crue référencées dans les données d'entrée. Le sous-modèle hydraulique estime, pour ces crues de base, les surfaces inondées S_i et les paramètres de submersion (h_{ij} , d_{ij}) sur une représentation discrétisée du secteur inondable (en "tranches" de surfaces δS_j). Différents mécanismes de submersion sont pris en compte, avec leurs seuils respectifs. Le sous-modèle d'occupation des sols définit les types d'occupations des sols entre lesquels se répartissent les surfaces des différentes tranches (pourcentages de surface U_{jk}). Le sous-modèle de dommages estime, au travers des crues de base, la relation "période de retour T - coût C " et le coût moyen annuel des dommages (CMA). Si le coût au niveau du seuil d'apparition des dommages présente une valeur non négligeable, une nouvelle consigne de répartition est mise en oeuvre dans le sous-modèle d'occupation des sols.

Figure VIII.2. (voir ci-contre)

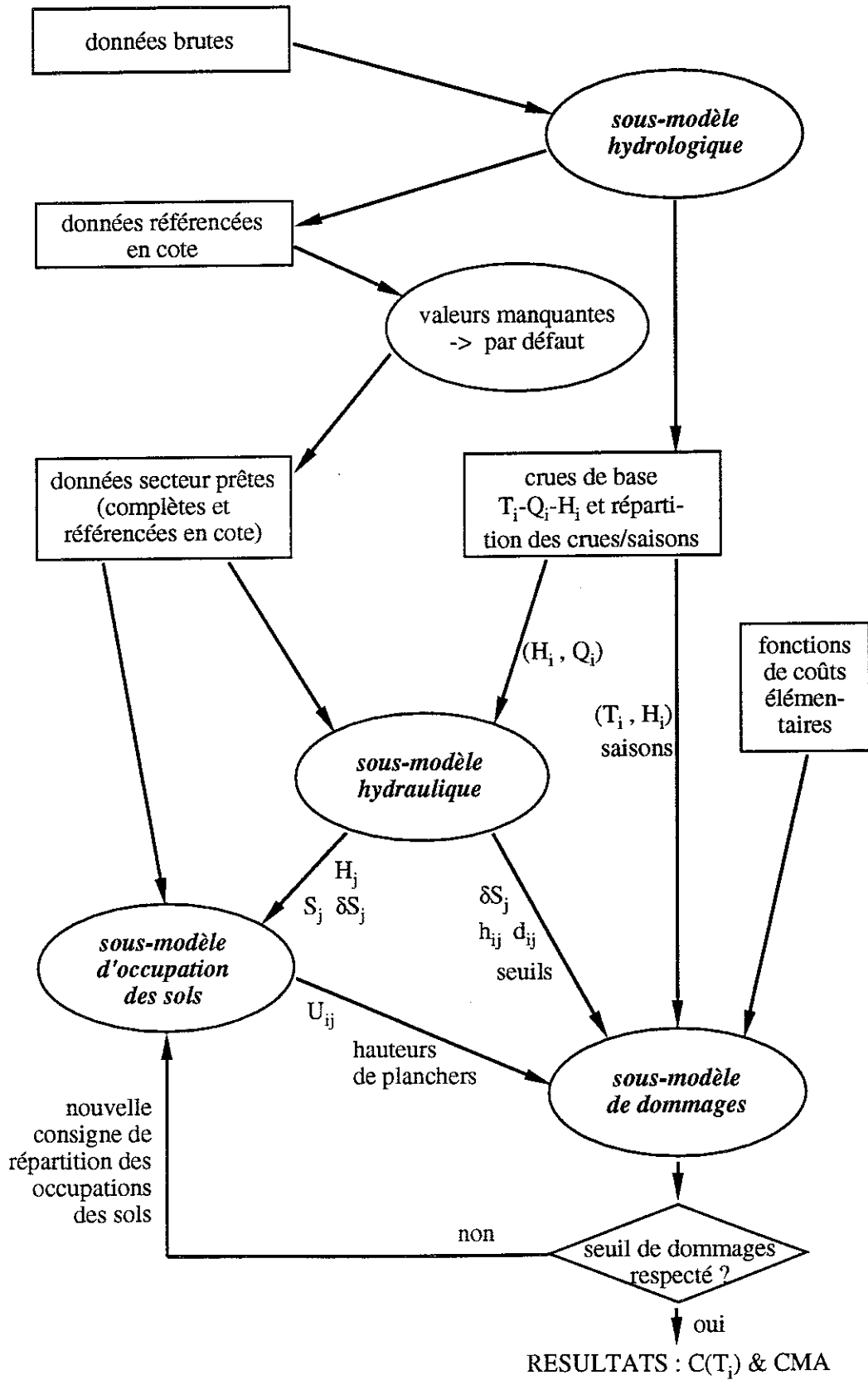


Figure VIII.3. : la structure du sous-modèle hydrologique (voir page ci-contre)

légende: cf. figure VIII.2

Ce sous-modèle établit, sur chaque station hydrométrique, un premier tableau "période de retour - débit de pointe - cote maximale" T-Q-H par interpolation et extrapolation, à partir de valeurs H-Q, H-T et/ou Q-T connues. Ensuite, pour le secteur, les intensités de crues référencées sont toutes estimées en cote à partir de ce tableau, et on définit les crues de base propres au secteur (T_i , Q_i , H_i), pour lesquelles seront estimés les coûts des dommages.

VIII.2.1. Le choix des crues de base

Les crues considérées sur chaque secteur, ou "crues de base", sont les suivantes:

- les crues de périodes de retour 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ans, pour autant qu'elles donnent lieu à inondation;
- les crues seuils correspondant à certains mécanismes hydrauliques (débordement ou remous, déversement, apparition du risque de rupture de digue, rupture certaine...; voir VIII.3); ceci permet de prendre en compte des points potentiels de "discontinuité" dans la relation "fréquence - coût";
- lorsqu'elle est connue, la crue correspondant au seuil à partir duquel apparaissent des coûts de dommages.

Ces crues sont celles pour lesquelles on estime les coûts, mais elles servent également à diviser la zone inondable en unités élémentaires en fonction de leurs emprises respectives (voir VIII.3).

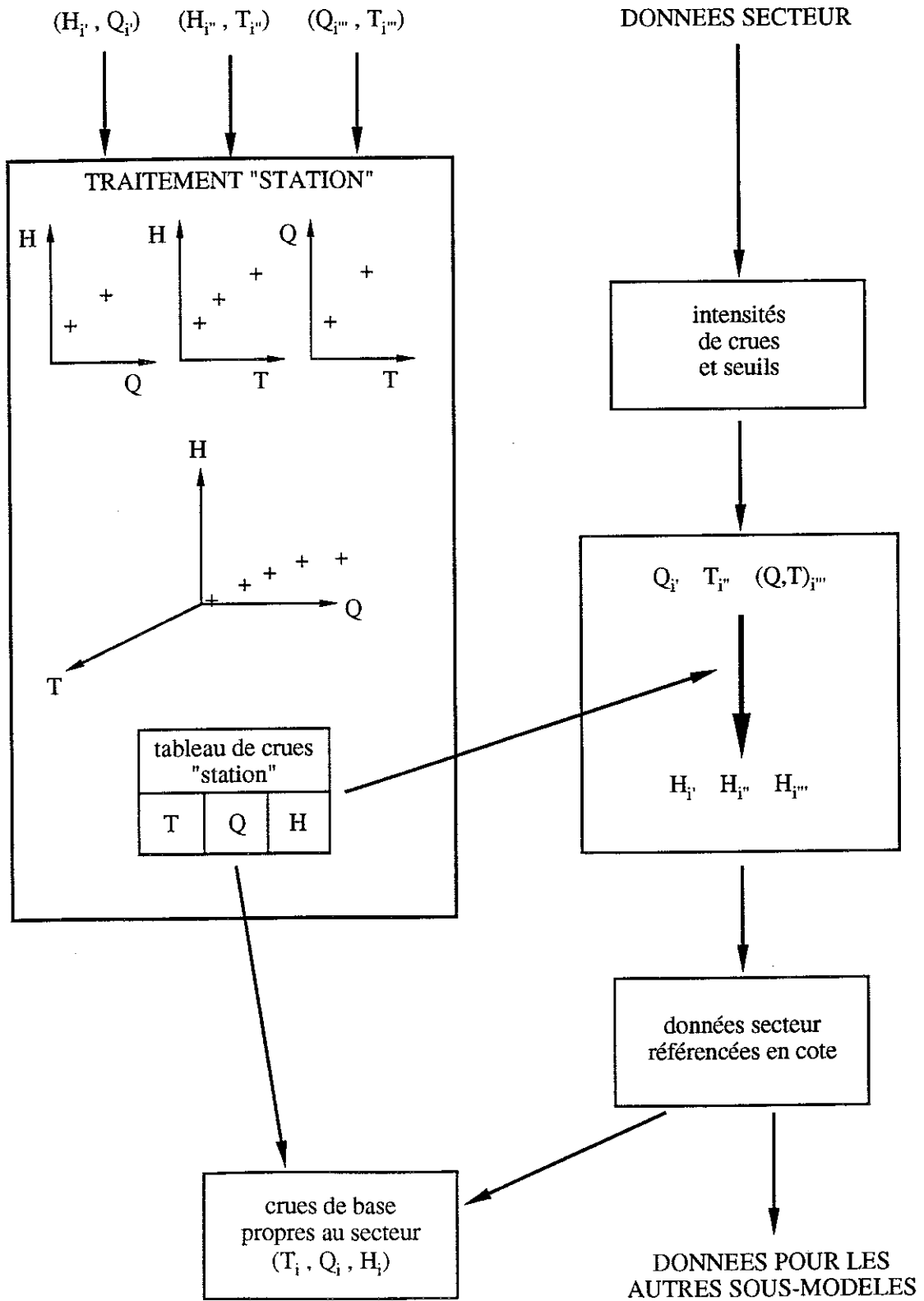
Ce choix appelle deux observations, issues notamment des résultats établis avec Ziegler (1991):

- les crues fréquentes sont très représentées dans cette liste, car pour des secteurs fréquemment inondés elles peuvent contribuer fortement au CMA; par ailleurs, les surfaces peuvent varier fortement (en valeur relative) dans cette gamme de phénomènes;
- on prend en compte ici des crues très rares, par rapport à l'échelle des échantillons de crues disponibles et des analyses statistiques réalisées; si pour la plupart des vallées ces crues atteignent les coteaux et qu'ainsi les surfaces se trouvent être "bornées" asymptotiquement (il ne faut pas chercher ici la rigueur mathématique que le vocabulaire pourrait laisser supposer), les relations T-Q-H sont très mal ou pas connues; même si on dispose d'observations d'événements historiques de très fortes intensités, les analyses statistiques que l'on effectue sont hautement sujettes à caution car elles conduisent à des extrapolations de valeurs à partir d'extrapolations de lois statistiques non justifiables (Bernier, 1979; Bouleau, 1991; Cohen, 1992); le fait de prendre en compte des inondations aussi rares doit être considéré comme un mode particulier d'extrapolation.

VIII.2.2. L'estimation des relations "période de retour - débit de pointe - cote maximale" T-Q-H

Les données dont on dispose en entrée sont des couples de valeurs connus (issus d'études techniques et en nombre variable) T-Q, Q-H, T-H, pour la station de référence. En préalable au calcul de chaque secteur, on établit un premier tableau T-Q-H pour la station, dont on extraira le tableau des crues de base du secteur (en interpolant au besoin quelques valeurs manquantes; voir plus loin). Le calcul effectué sur chaque station est présenté ci-dessous.

Figure VIII.3. (voir ci-contre)



Par interpolations et extrapolations, on établit un tableau complet T-H-Q (quand cela est possible et cohérent) regroupant les crues suivantes:

- les crues de périodes de retour 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ans;
- les crues correspondant aux valeurs connues dans les tableaux H-T et Q-T;
- les crues correspondant aux couples extrêmes H-Q connus, pour autant que ceux-ci sont situés hors du champ des crues définies ci-dessus.

Les interpolations et extrapolations sont effectuées en calant les paramètres a, b, c de différentes fonctions correspondant à des formes assez communément admises :

* pour H-Q (voir Roche, 1963):

$$Q = a H^2 + b H + c \quad (10-a)$$

ou

$$Q = a H^2 + c \quad \text{si la première forme ne reste pas croissante sur l'intervalle considéré, ou si l'on ne dispose que de deux couples (H,Q) connus} \quad (10-b)$$

* pour Q-T :

$$Q = a \text{Ln}(T) + b \quad \text{avec Ln}(T) \text{ logarithme népérien de } T \quad (11)$$

* pour H-T :

$$\text{Ln}(T) = a H^2 + b H + c \quad (12-a)$$

ou

$$\text{Ln}(T) = a H^2 + c \quad (\text{cf. remarque pour l'équation 10-b}) \quad (12-b)$$

Le programme TRTM, qui réalise ce calcul, est présenté en organigrammes simplifiés en annexe VIII.A. Il ne réalise que les interpolations ou extrapolations pour lesquelles on dispose de données d'origine adéquates, et vérifie évidemment la cohérence des résultats :

- monotonie stricte du tableau produit;
- cohérence d'ordre par rapport aux données d'origine;
- positivité des valeurs de Q et T.

Les principes globaux du calcul sont les suivants, dans les cas où la détermination d'un paramètre n'est ni unique ni impossible (ces principes sont bien évidemment subordonnés aux cohérences énoncées) :

- une interpolation est à privilégier par rapport à une extrapolation;
- entre deux interpolations possibles, on privilégie celle qui est issue du plus petit intervalle; en cas de non concordance, on teste la seconde interpolation, puis la moyenne des estimations et enfin le milieu de l'intersection des intervalles d'interpolation;
- entre deux extrapolations, on privilégie celle issue de la valeur connue la "plus extrême", ou celle pour laquelle l'écart "valeur calculée - valeur connue" est moindre; en situation d'indétermination, on privilégie les relations H-Q et Q-T par rapport à H-T (qui dispose d'une base physique moindre).

VIII.3. LE SOUS-MODELE HYDRAULIQUE

Ce sous-modèle a pour objectif d'estimer, pour chacune des crues de base, les surfaces inondées, ainsi que les paramètres de submersion (hauteur et durée) définis pour chaque crue, sur une discrétisation du secteur inondable (figure VIII.4). On présente tout d'abord la typologie établie sur les secteurs, en fonction des mécanismes hydrauliques qui provoquent la submersion et en conditionnent les caractéristiques. Par la suite sont exposés les principes généraux mis en oeuvre dans le modèle, et le problème particulier de la prise en compte des ruptures de digues. Le dernier paragraphe présente une vision globale de l'estimation des surfaces et des paramètres de submersion, en fonction des mécanismes hydrauliques définissant l'inondation (une présentation plus détaillée est donnée en annexe VIII.C).

VIII.3.1. La typologie hydraulique des secteurs

En fonction des mécanismes de submersion entrant en jeu sur un secteur, les données susceptibles d'alimenter le sous-modèle hydraulique sont différentes, ainsi que les calculs effectués. En particulier, les seuils des phénomènes doivent être identifiés pour chaque mécanisme (les seuils donnent l'intensité de la crue "limite", en période de retour, débit de pointe ou cote maximale).

On peut distinguer trois grands types de phénomènes hydrauliques à l'origine des submersions:

- le *débordement* : ce type regroupe un ensemble continu de situations allant du *débordement généralisé* tout au long des rives d'un tronçon de cours d'eau au *remous aval* (ou remontée) qui inonde toute la zone par l'intermédiaire d'un point de communication localisé avec le lit mineur ou moyen du cours d'eau; si l'on regarde de façon fine comment se produisent les écoulements hors du lit mineur, on peut observer toutes les situations entre ces "extrêmes"; par contre, si le "débordement" s'accompagne d'un déversement ou d'un risque de rupture de digue (cf. ci-dessous), on peut considérer qu'il s'agit bien d'un remous aval, puisque la zone est endiguée;
- le *déversement* submerge, à partir d'un seuil donné, une zone "protégée" située en contre-bas de ce seuil, que le déversement se produise par-dessus une digue ou par un déversoir aménagé;
- la *rupture de digue* submerge elle aussi une zone située en contre-bas du niveau de l'eau (au moment de la rupture).

Ces deux derniers phénomènes conduisent a priori à des submersions beaucoup moins progressives que lors d'un débordement. Cela étant, il semble excessif de considérer systématiquement que dès le début du déversement ou de la rupture, les niveaux de l'eau "devant" et "derrière" la digue s'égalisent.

Comme on l'a déjà évoqué, ces différents phénomènes peuvent se combiner pour produire les submersions en un même secteur. On a ainsi retenu la typologie suivante:

- A débordement seul (débordement généralisé, remous aval...);
- B déversement seul;
- C risque de rupture de digue seul;
- D remous aval et déversement;
- E remous aval et risque de rupture;
- F déversement et risque de rupture;
- G remous, déversement et risque de rupture.

Cette typologie se doit d'être fonctionnelle plutôt que descriptive, c'est-à-dire intégrer les phénomènes qui conditionnent effectivement la submersion:

- il n'y a pas lieu de considérer une rupture de digue si celle-ci ne modifie plus en rien la submersion déjà produite par d'autres mécanismes;
- de même pour un déversement par-dessus une digue, qui peut se révéler ne modifier qu'à la marge et de façon brève la submersion d'un secteur par remous ou par rupture en un autre point de la digue.

Figure VIII.4. : la structure du sous-modèle hydraulique (voir page ci-contre)

légende: cf. figure VIII.2

Ce sous-modèle estime, pour chaque crue de base H_i , la surface inondée S_i . Le secteur est discrétisé, divisé en tranches de surface δS_j , comprises entre les emprises de crues H_{j-1} et H_j . En fonction des mécanismes hydrauliques de submersion, le sous-modèle calcule pour chaque crue et sur chaque tranche la hauteur de submersion h_{ij} et la durée de submersion d_{ij} , à partir d'hypothèses sur les lignes d'eau et sur les formes des hydrogrammes. Pour les secteurs soumis à un risque de rupture de digue, les deux scénarios "non rupture" et "rupture" sont modélisés, et leurs probabilités respectives estimées pour chaque crue de base.

VIII.3.2. Les hypothèses de base

Comme pour un certain nombre des modèles développés, nous faisons ici deux hypothèses majeures sur l'hydraulique des inondations, à l'échelle de chaque secteur:

- la station hydrométrique de rattachement est représentative des écartements des lignes d'eau dans le lit mineur au droit du secteur, et ces lignes d'eau correspondant à différents débits sont parallèles;
- la surface de l'eau est horizontale perpendiculairement au lit mineur.

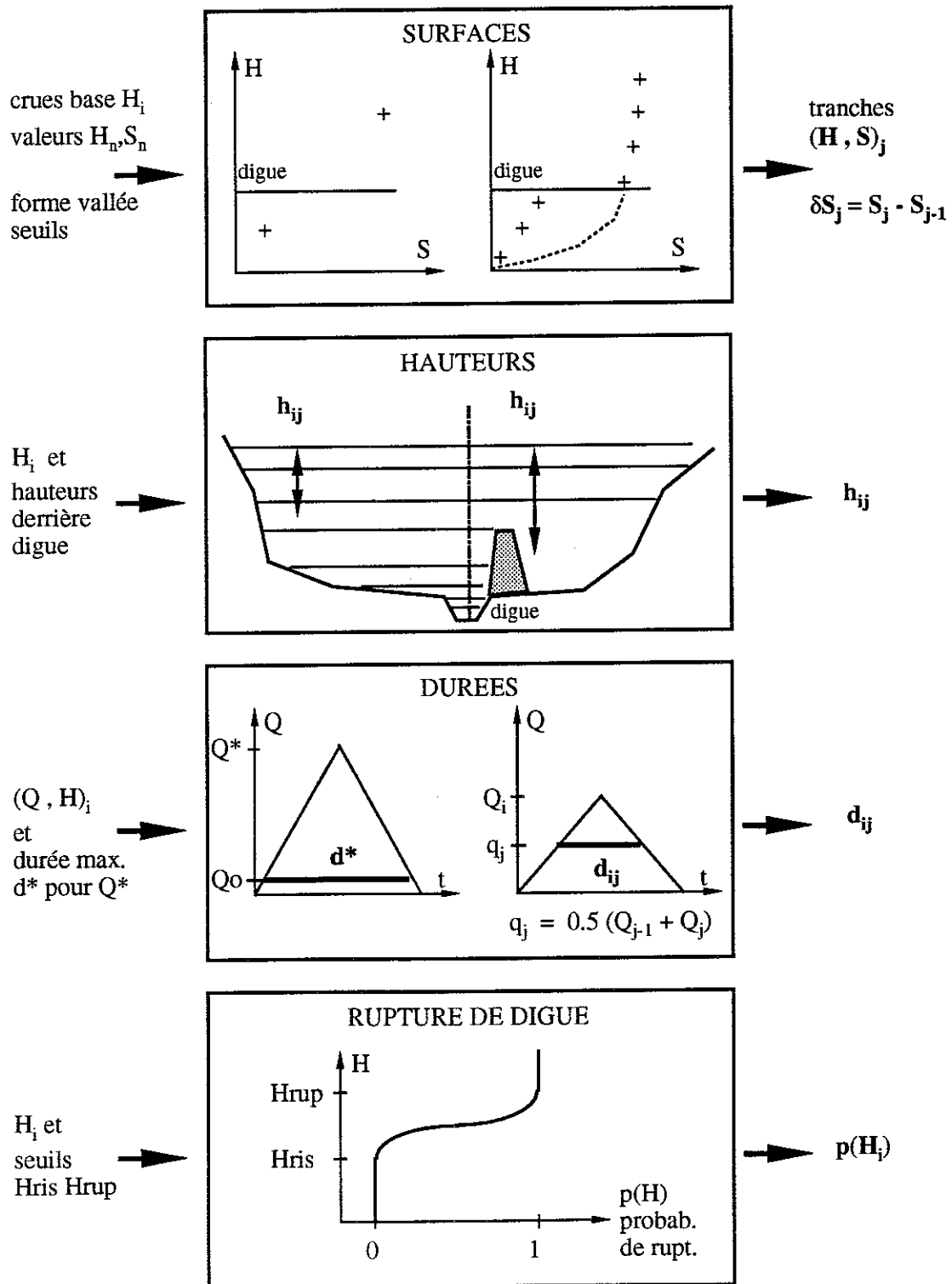
Il ne s'agit pas pour nous de considérer ces hypothèses comme justes dans l'absolu, mais elles correspondent aux présupposés indispensables pour pouvoir utiliser les informations couramment disponibles. Ces deux hypothèses, correspondant à l'approche "index point" (Plazak, 1986), répondent à l'absence courante de données fines sur l'hydraulique dans le lit majeur (Bialas et Loucks, 1978; Das et Lee, 1988; Davis et Webb, 1978; Edinger, 1964). Par ailleurs, si l'on dispose d'informations plus précises sur la relation locale Q-H (en lit mineur ou même en lit majeur), il est tout-à-fait possible de considérer une "station hydrométrique de rattachement fictive". On reviendra au chapitre X sur la confrontation de ces hypothèses aux calculs d'un modèle hydraulique (Ziegler, 1991).

En s'appuyant sur ces hypothèses, toute l'information utilisée et la description que l'on fait de la zone inondable (surfaces, occupations des sols) sont référencées par rapport aux inondations, dont les intensités sont définies en cote. Sur cette base, on "discrétise" le secteur par rapport aux crues de base, en "tranches" comprises entre les limites des emprises inondées par deux crues de base voisines (voir figure VIII.4b).

VIII.3.3. La prise en compte du risque de rupture de digue

Ce point fait l'objet d'une présentation plus détaillée en annexe VIII.B. Lorsqu'un secteur inondable est protégé par une digue (il s'agit le plus souvent de digues en terre, dans les bassins auxquels on s'intéresse), il peut être submergé par une rupture de cette digue. Les mécanismes

Figure VIII.4. (voir ci-contre)



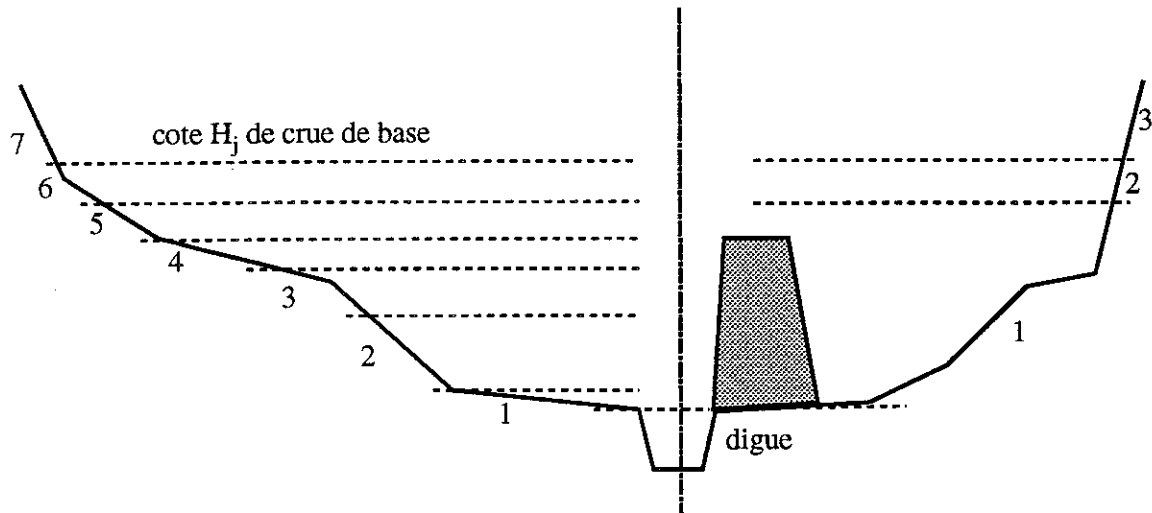


Figure VIII.4b. : la discrétisation d'un secteur inondable par rapport aux crues de base

(schématisation d'une coupe transversale à l'axe du cours d'eau)

conduisant à cette rupture sont multiples (Bogardi et al, 1975; Duncan et Houston, 1983; Starosolszky, 1992; Toth, 1992-b; Tung et Mays, 1981):

- déversement par-dessus une crête de digue non protégée;
- infiltration dans le corps de digue ou au niveau des fondations et formation d'un renard (érosion régressive le long des interstices d'infiltration);
- glissement de talus;
- érosion par le courant;
- mouvements différentiels des couches du sol situées sous la digue.

Ces différents phénomènes dépendent de nombreux paramètres relatifs à la digue et relatifs à l'événement d'inondation: hauteur atteinte par l'eau, durée de contact avec l'eau pour différentes parties de la digue... Par ailleurs, la rupture est un phénomène progressif, dont la dynamique est mal connue et a été peu modélisée jusqu'ici (par exemple, logiciel RUPRO dans le cas des barrages en terre; CEMAGREF). Du fait des nombreuses incertitudes sur les connaissances, même les plus avancées, relatives aux ruptures de digues, on doit considérer ce phénomène comme probabiliste. Cela étant dit, même la loi statistique représentant la connaissance du risque ne peut être déterminée de façon satisfaisante.

Les données dont on dispose ne se transposent pas à d'autres digues, et les données historiques localisées sont dans la plupart des cas -heureusement- rares et -malheureusement- non réactualisables. Ainsi, Konieczny (1992) présente une procédure -assistée par un programme informatique- permettant de recueillir l'expertise des personnes qui connaissent le mieux les digues: celles qui en assurent l'entretien et le contrôle. Cette démarche conduit à faire estimer par étapes successives:

- les points les plus faibles d'une digue;
- les causes possibles de rupture en ces points, en considérant différentes cotes H de l'eau;
- le classement en probabilité subjective de ces causes à H donnée;

- une probabilité subjective de ces différentes ruptures, pour les différentes cotes H.

Bien évidemment, la multiplicité des causes et des points de rupture "préférentiels", alliée à la nature probabiliste de notre connaissance des phénomènes, ont pour conséquence que la probabilité de rupture d'une digue est supérieure à la probabilité de rupture en le plus point le plus faible.

Dans notre approche on a considéré une démarche moins ambitieuse, en se basant sur deux grandeurs à recueillir auprès des personnes qui connaissent et gèrent les digues. Ces paramètres sont les suivants:

- la crue seuil d'apparition du risque de rupture (représentée par la cote H_{ris}); sous ce niveau, on considère que la rupture ne peut pas se produire (la probabilité p de rupture est nulle pour H < H_{ris});
- la crue seuil H_{rup} à partir de laquelle la rupture est certaine (la probabilité p de rupture vaut 1 pour H > H_{rup}); selon les cas, H_{rup} correspond au niveau de la crête de digue (une digue en terre non protégée se rompt au plus tard dès qu'il y a surverse), ou à une valeur inférieure.

Pour finir de définir la probabilité p de rupture en fonction de la cote H, nous avons choisi arbitrairement de considérer une fonction croissante (de 0 à 1), présentant des dérivées nulles en H_{ris} et H_{rup}: on ne dispose d'aucun résultat permettant d'apprécier la forme de la fonction p(H), et ce choix tient compte à la fois de l'imprécision sur les seuils H_{ris} et H_{rup} et de l'absence théoriques de limites "discontinues" pour le risque de rupture.

La forme proposée pour la fonction de probabilité p(H) est la suivante:

$$\text{- pour } H < H_{ris} \quad p = 0 \quad (13-a)$$

$$\text{- pour } H_{ris} < H < H_{rup} \quad p = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{H - H_{ris}}{H_{rup} - H_{ris}}\right) \quad (13-b)$$

$$\text{- pour } H_{rup} < H \quad p = 1 \quad (13-c)$$

Lorsqu'on considère une crue (H) et qu'on fait l'hypothèse qu'il y a rupture, cela revient en fait à supposer qu'il y a eu rupture pour l'une des crues comprises entre H_{ris} et H. La probabilité p(H) (introduite plus haut) d'une telle hypothèse s'écrit donc:

$$p(H) = \int_{H_{ris}}^H p'(h) dh \quad (14)$$

L'espérance du coût des dommages devrait alors s'écrire (dans l'hypothèse où la rupture se produit effectivement):

$$C(H) = \frac{1}{p(H)} \cdot \int_{H_{ris}}^H c(h;H) p'(h) dh \quad (15)$$

où c(h,H) est le coût dû à une crue de cote H, lorsque la rupture s'est produite à la cote h.

Pour les dommages dépendant de la hauteur de submersion, on suppose que l'emprise de la crue H ne dépend pas du moment de la rupture (à défaut de pouvoir représenter le phénomène de façon plus précise), et que donc les hauteurs de submersion ne dépendent elles aussi que de H. Pour ce qui concerne les dommages conditionnés par les durées, on est limité par la méconnaissance du mécanisme de ressuyage, qui portera a priori sur une durée d'un ordre supérieur au temps de montée de la crue entre H et h. On a supposé ici que le rôle variable de la durée pouvait être négligé. Par

rapport à ces considérations, on propose l'hypothèse qu'en première approximation le coût $c(h,H)$ ne dépend que de H :

$$C(H) = \frac{1}{p(H)} \cdot \int_{H_{ris}}^H c(h;H) p'(h) dh = \frac{1}{p(H)} \cdot c(H) \cdot \int_{H_{ris}}^H p'(h) dh \quad (16)$$

soit $C(H) = c(H)$.

Ainsi, pour toutes les crues H comprises entre H_{ris} et H_{rup} , l'estimation complète des dommages est menée pour les deux scénarios 1°) rupture intervenue à partir de la cote H_{ris} 2°) pas de rupture. Les coûts respectifs sont alors pondérés par leurs probabilités $p(H)$ et $1-p(H)$.

VIII.3.4. L'estimation des surfaces, hauteurs et durées de submersion

On va ici donner ici les principes généraux selon lesquels opère le sous-modèle. Une description plus précise est présentée en annexe VIII.C. Les données utilisées pour ces calculs sont les suivantes:

- a les seuils de phénomènes hydrauliques conduisant à l'inondation, exprimés en cote (débordement ou remous, déversement, submersion complète du secteur, apparition du risque de rupture, rupture certaine);
- b les couples "cote-surface inondée" lorsqu'il n'y a pas rupture de digue (en nombre variable);
- c les couples "cote-surface inondée" lorsqu'il y a rupture de digue (en nombre variable);
- d la durée maximale de submersion pour une crue forte d'intensité connue;
- e les couples "cote-hauteur maximale de submersion derrière la digue" (s'il y a lieu).

Pour que le calcul puisse être mené, les données (a), (b), (c) et (d) sont indispensables. On a développé des procédures permettant de s'affranchir de la dernière catégorie de données (e), ainsi que des données (b) pour un secteur inondable à la fois par rupture et par un autre mécanisme.

Les surfaces sont représentées à travers les couples de valeurs (H_i, S_i) , H_i étant les cotes des crues de base, d'où l'on déduit les surfaces des "tranches" de secteur. Ces couples de valeurs sont obtenus par interpolation et extrapolation à partir des valeurs H-S connues (au moins $H_0-S=0$, et H-S pour une crue rare). Dans le cadre du travail de Ziegler (1991), nous avons confronté le sous-modèle à un modèle hydraulique ayant simulé plusieurs crues sur des secteurs réels. Il est ainsi apparu que la relation $H(S)$ était, parmi diverses formes analytiques simples, le moins mal représentée par une expression logarithmique:

$$S = a \cdot \log(H - H^* + 1) + b \quad (H^* \text{ seuil de débordement}). \quad (17)$$

C'est la forme analytique qu'on a retenue pour interpoler et extrapoler les surfaces inondées par débordement direct, ou inondées derrière les digues par déversement et/ou rupture (on suppose qu'on "retrouve" instantanément le lit majeur original).

Par contre, pour les surfaces inondées par remous, on peut considérer que S augmente moins avec H qu'en l'absence de digue. On a ici considéré des interpolations et extrapolations linéaires à partir des surfaces connues.

Dans le cas du débordement direct, on a ouvert la possibilité d'intégrer une description simplifiée du profil général du lit majeur (profil en travers approché par des segments de droites, voir annexe VIII.C). Par ailleurs, pour les secteurs inondés d'abord par remous, puis par déversement ou rupture, les calculs sont menés séparément sur le sous-secteur inondé par remous et sur le reste du secteur.

En ce qui concerne les hauteurs de submersion, on a appliqué les hypothèses générales dans le cas des secteurs ou sous-secteurs en contact direct avec le lit mineur (débordement direct ou zone de

remous): pour la crue H_j , la tranche de secteur comprise entre les emprises des crues H_{j-1} et H_j est soumise à la hauteur de submersion moyenne:

$$h_{i,j} = H_j - 0.5 \cdot (H_{j-1} + H_j) \quad (18)$$

Une telle hypothèse n'apparaît pas fondée pour des secteurs ou sous-secteurs inondés par rupture de digue ou par déversement. La procédure spécifique à ce cas est présentée en annexe VIII.C.

La détermination des durées de submersion pose un premier problème de fond: la durée de submersion dépend de la forme de l'hydrogramme de crue (qui varie pour un même débit de pointe), de l'existence éventuelles de "cuvettes" (problèmes de micro-topographie), de la présence d'une digue qui peut retarder l'évacuation de l'eau après en avoir retardé l'arrivée. Par ailleurs, si l'on considère les cultures agricoles, sensibles avant tout à la durée et à la date de la crue, la durée significative pour les dommages est la durée d'asphyxie des racines, qui dépend de la durée de submersion en surface, mais aussi de la topographie, de la texture du sol...

Il faut ajouter à cela que l'on dispose généralement de peu d'informations sur la durée de submersion d'un secteur (l'information se limitant souvent à l'hydrogramme relevé à une station hydrométrique). Nous avons ainsi fait l'hypothèse d'hydrogrammes de forme triangulaire:

- lorsque l'on connaît les débits de crue, on considère que la base ($Q = 0$) est la même pour toutes les crues;
- dans le cas contraire, on ne peut se rattacher à cette hypothèse "communément admise", et on considère alors que les pentes des côtés du triangle sont constantes pour toutes les cotes maximales de crue.

En ajoutant l'hypothèse que la "tranche" de secteur H_{j-1} - H_j est inondée pendant la durée pendant laquelle le débit (respectivement la cote) est supérieur à la valeur moyenne de Q_{j-1} et Q_j (respectivement H_{j-1} et H_j), on peut entièrement définir les hydrogrammes à partir de la connaissance de la durée de submersion pour une forte crue, et en déduire des durées de submersion pour les crues de base (pour plus de détails, se reporter à l'annexe VIII.C).

VIII.4. LE SOUS-MODELE D'OCCUPATION DES SOLS

L'objectif de ce sous-modèle est de définir les types d'occupations des sols entre lesquels se répartissent les surfaces inondées. Ces surfaces sont décomposées en "tranches" de secteur délimitées par les emprises des crues de base. L'un des critères de définition d'un secteur est l'uniformité de la répartition des occupations des sols (par exemple, même pourcentage de zones pavillonnaires sur deux emprises différentes). Cependant, il apparaît que le respect de ce principe est partiel (pour des raisons de disponibilité d'informations, de finesse du découpage...), et on analyse ici l'enjeu de non uniformités de répartition qui seraient négligées. L'importance de ces enjeux amène à utiliser les informations témoignant de non uniformités réelles. On présente les procédures conçues pour cela, qui conduisent à estimer des répartitions des occupations des sols différentes sur différentes tranches de secteur. Ces procédures sont illustrées dans la figure VIII.5.

VIII.4.1. La structure de base

Rappelons que l'un des critères de découpage géographique des zones inondables est l'homogénéité de la répartition des modes d'occupation des sols. Comme on ne considère pas ici les établissements particuliers (que l'on pourrait "localiser" spécifiquement par rapport à l'aléa), cela permet en première approche de faire l'hypothèse que sur chaque "tranche" de secteur se trouve la même proportion surfacique de chaque type d'occupation des sols. Nous verrons plus loin comment cette hypothèse du découpage géographique, qui ne doit pas être considérée comme respectée de façon absolue, peut être modulée sur la base d'informations plus précises que l'on peut recueillir et intégrer au modèle.

Figure VIII.5. : la structure du sous-modèle d'occupation des sols (voir page ci-contre)

légende: cf. figure VIII.2

Ce sous-modèle définit la répartition des surfaces inondées selon les types d'occupations des sols k . Selon les hypothèses de base, cette répartition est uniforme sur les différentes tranches de secteur j et donne lieu à des pourcentages de surfaces U_{jk} uniformes par rapport à j . Lorsque les nombres de logements touchés par une crue ou présents dans son emprise sont connus, les pourcentages U_{jk} sont modulés en conséquence, de façon uniforme ou non. Lorsque l'on connaît une crue seuil d'apparition des dommages ou une crue dont l'emprise ne contient aucun logement, les types d'occupations des sols sont répartis de façon non uniforme sur les différentes tranches, pour tenir compte de l'information disponible.

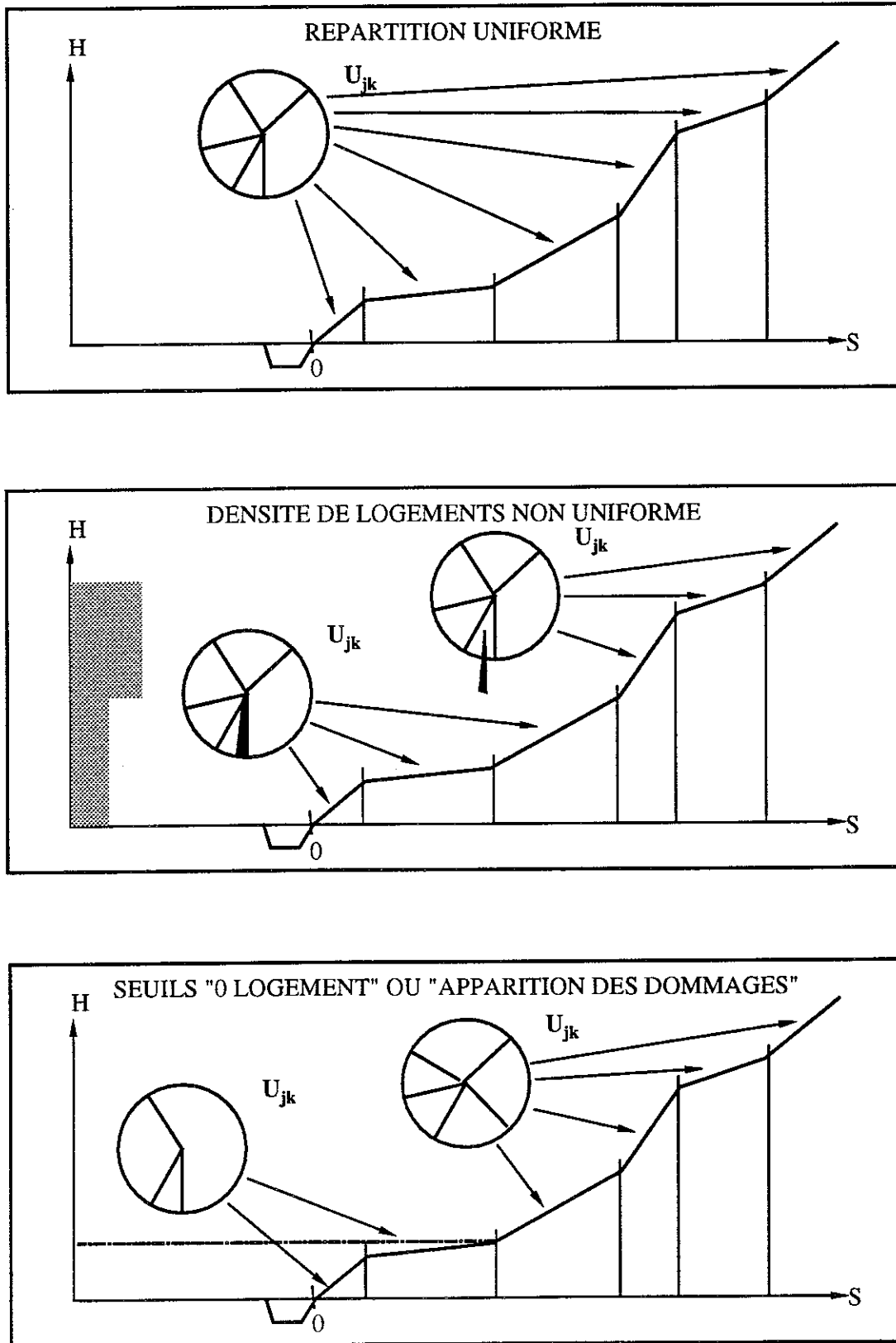
Les données d'entrée pour ce sous-modèle sont les suivantes:

- la définition des "tranches" de secteur, avec leurs limites H_j (en termes d'emprises) et leurs surfaces $\delta S_j = S_j - S_{j-1}$; lorsqu'il y a risque de rupture de digue, on peut considérer deux secteurs différents correspondant respectivement aux deux scénarios "non rupture" et "rupture" (c'est sur la base de ce second scénario qu'on définit l'occupation des sols);
- le seuil de crue H_{sap} au-delà duquel apparaissent les dommages;
- la plus forte surface inondée connue, sur la base de laquelle a été définie a priori la répartition des occupations des sols (et sur laquelle on peut raisonner en valeurs absolues de surfaces);
- le pourcentage de surface correspondant à différents types d'occupation des sols (voir tableau VIII.1); la densité des logements pour les surfaces de type "habitat dispersé";
- pour les différents types d'urbanisation, la hauteur moyenne des planchers par rapport au terrain naturel;
- le nombre de logements soit inondés par une crue H (c'est-à-dire "mouillés" dans la partie d'habitation), soit présents dans la zone inondable par une crue H (le bâtiment contenant le logement a sa base mouillée); en particulier, ceci peut inclure une information sur des seuils "zéro logement touché" ou "zéro logement présent".

Tableau VIII.1. : les types d'occupation des sols pris en compte par le modèle local

habitat aggloméré	----->	centre-ville urbain dense	serres horticulture
habitat dispersé		urbain non continu grand collectif	cultures maraîchères légumes frais en champ
zone artisanale et commerciale		pavillonnaire centre bourg/village	vignes vergers six espèces autres cultures permanentes
zone industrielle			blé et orge d'hiver maïs grain
cultures agricoles (Surface Agricole Utilisée)	----->		autres céréales maïs fourrage autres cultures fourragères
forêts et bois exploités			plantes sarclées cultures industrielles
autres surfaces vulnérables			surface toujours en herbe autres
autres surfaces non vulnérables			

Figure VIII.5. (voir ci-contre)



Comme on le verra dans le chapitre IX portant sur le recueil des données d'entrée, nous avons également prévu la possibilité d'intégrer des établissements et équipements particuliers "ponctuels", définis chacun en "taille" (surface au sol, nombre d'usagers desservis..) et localisés en fonction de l'aléa (seuil de début de submersion). L'objectif était ainsi de pouvoir préciser l'allocation des types de surfaces comme "zone industrielle" ou "zone vulnérable autre"... mais aussi de prendre en compte de façon plus précise des enjeux économiques ou sociaux qui peuvent se révéler être très importants en regard de l'ensemble du secteur. Si les données recueillies n'ont souvent pas permis une prise en compte "raisonnable" de ces établissements et équipements particuliers, leur intégration dans un modèle comme celui que nous avons développé ne poserait aucune difficulté de fond. Il en est de même en ce qui concerne les sièges d'exploitations agricoles. La question majeure reste la disponibilité des informations, et la connaissance des coûts élémentaires.

L'occupation des sols "serres" figure à la fois dans les répartitions surfaciques (voir tableau VIII.1), et dans les établissements particuliers. Lorsque des serres sont référencées en tant qu'établissements particuliers, avec une position par rapport à une cote de crue, on traite ces serres de façon spécifique, en les situant en totalité dans la tranche de secteur correspondante. Sinon, elles sont ajoutées à la surface globale de serres sur le secteur.

La prise en compte de la position des planchers par rapport au terrain naturel (les planchers sont supposés être de plain-pied pour les activités industrielles, artisanales et commerciales situées en rez-de-chaussée) répond à deux préoccupations évoquées dans la partie B de ce document:

- les dommages aux bâtiments et à leur contenu dépendent beaucoup du niveau de l'eau par rapport aux planchers, plutôt que par rapport au terrain;
- la position du plancher peut varier beaucoup sur un site, et entre différents sites; selon l'hydraulique du cours d'eau, cette variabilité peut conditionner pour une part assez importante le degré de submersion effectif des niveaux des bâtiments.

VIII.4.2. Retour sur le principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols

Revenons à présent sur le principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols. A partir du moment où l'on construit un modèle global et non un modèle distribué, ce principe est nécessairement mis en oeuvre à une échelle ou à une autre, de façon explicite ou implicite. Le respect de ce principe va dépendre de l'état des connaissances, et du degré de découpage géographique qui sera jugé "raisonnable" par les détenteurs des informations (découpage plus fin dans les zones représentant de forts enjeux...). Il faut bien être conscient du fait que ce critère de découpage est contraignant. Mais autant il faut chercher à s'en rapprocher, autant cela demanderait un découpage très fin et des connaissances ou expertises précises, pour que sur un secteur donné les densités de logements soient les mêmes dans les emprises décennale et centennale.

Ainsi, sur certains secteurs réels étudiés, on a observé un seuil d'apparition des dommages clairement supérieur au seuil de début de submersion, sans que les hauteurs de planchers vulnérables puissent tout expliquer. Ce dernier type de cas recouvre des situations très diverses :

- secteurs pour lesquels le "décalage" en cote entre les seuils correspond à un aléa non dommageable (décalage inférieur à la distance au sol des niveaux habités, durées correspondantes non dommageables pour les cultures existantes, du moins pour les crues d'hiver qui seraient fortement majoritaires); c'est là, avec des secteurs qui seraient intégralement non vulnérables, la seule situation pour laquelle l'hypothèse d'uniformité de la répartition des occupations des sols peut ne pas être remise en cause;
- secteurs pour lesquels les bâtiments seraient systématiquement placés sur les parties hautes des parcelles (ce serait somme toute logique !) ou pour lesquels les distances entre plancher et terrain naturel seraient mal estimées (notamment mal estimées "par défaut"; par ailleurs on considère une valeur moyenne qui peut recouvrir une grande diversité, notamment en fonction de la proximité de la rivière);
- secteurs pour lesquels l'hypothèse d'uniformité n'est pas respectée : dans la "tranche" de surface correspondant à l'emprise de la crue seuil d'apparition des dommages, ne sont

situés que des bâtiments "surélevés", des zones non vulnérables, des cultures pour lesquelles la durée dommeable n'est pas atteinte...

A cela, il faut ajouter l'imprécision sur les valeurs, mais surtout sur les "définitions" conceptuelles, qui touche les seuils respectifs de débordement et d'apparition des dommages.

Face à un secteur "problématique", "incohérent", on peut vérifier s'il s'agit ou non de la première situation. Si certains des secteurs entrent clairement dans ce cas (ou présentent pour la crue seuil d'apparition des dommages des coûts tout-à-fait négligeables), d'autres nous laissent face à la contradiction. De quel "scénario" alternatif s'agit-il ? Et comment, le cas échéant, "redistribuer" les surfaces selon "l'altitude" dans la zone inondable ?

Parmi les secteurs considérés (voir chapitre IX), on peut ainsi citer LO1/7 (agglomération de Cloyes-sur-le-Loir), où on considère à 100% une zone agglomérée dense, et un écart entre les deux seuils (débordement et dommages) de 60 centimètres. Comme second exemple, citons LA7/2 (agglomération de Roanne/le-Côteau), où avec un écart de 1,50 mètre entre seuils, la zone est occupée à 40% par de l'habitat aggloméré (avec des hauteurs moyennes de plancher de 0,20 à 1,50 mètre), à 30% par de l'habitat dispersé, et à 30% par des activités artisanales et commerciales. Les surfaces inondées au niveau du seuil représentent respectivement 15 hectares sur 39 (LO1/7) et 12 sur 160 (LA7/2).

On doit à ce niveau faire un choix de fond par rapport à la représentation que l'on propose pour les zones inondables :

- faut-il se tenir au principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols, en incohérence avec certaines données recueillies;
- faut-il à l'opposé abandonner ce principe, pour aboutir à une représentation vraisemblablement plus réaliste de la zone inondable; il est en effet vraisemblable que les surfaces non exploitées soient en moyenne plus proches du cours d'eau, et que les bâtiments inondables soient plus "surélevés"; et il est non moins vraisemblable que, malgré les conditions définies pour le découpage des biefs en secteurs, les non-uniformités soient mal délimitées dans l'espace, ou non prises en compte car non "chiffrables".

Mais dès lors que l'on abandonne le principe de répartition uniforme, on peut selon les cas donner différentes représentations du secteur inondable : en regroupant les surfaces non ou peu vulnérables dans le "bas" (au moins en-dessous du seuil d'apparition des dommages, en répartissant uniformément le "reliquat" au-delà), en surélevant les bâtiments, en considérant une densité de biens dommeables nulle sous le seuil d'apparition des dommages, et une densité accrue au-delà...

Par ailleurs, pour tout secteur, on est amené à s'interroger sur les incertitudes, et sur le biais systématique éventuel, qu'apportent le principe d'uniformité. Même s'il n'y a pas contradiction flagrante, une répartition uniforme des occupations des sols risque de sur-estimer a priori la vulnérabilité dans les zones "basses" des secteurs. Or, ces zones basses influent beaucoup sur les coûts des dommages pour des secteurs homogènes, dans la mesure où elles subissent systématiquement les submersions les plus intenses, et sont placées dans une gamme d'aléa où la relation cote-surface est susceptible d'être le plus sensible. Pour ces secteurs homogènes, les zones basses contribuent fortement au coût moyen annuel. On a essayé ci-dessous de cerner les enjeux portés par le principe d'uniformité de répartition des occupations des sols.

On a considéré un secteur "fictif", sur lequel le phénomène d'inondation et de dommeage est décrit par (cf. chapitre 7 du rapport de stage de Ziegler, 1991):

$$\text{débit} \quad Q = \frac{Q_1}{\ln(12 \cdot T_1)} \cdot \ln(12 \cdot T) \quad T_1=10 \quad Q_1=1500 \quad (19)$$

$$\text{cote} \quad H = H_2 \cdot \sqrt{\frac{Q - Q_0}{Q_2 - Q_0}} \quad Q = Q_0 \text{ pour } T = 1 \quad (20)$$

$$H_2=4,1 \quad Q_2=2500$$

$$\text{coût} \quad C = \int_{\text{seuil}}^H (H - h) \cdot \frac{dS}{dh} \cdot dh \quad (21)$$

où $S(h) = \frac{S_3}{\ln(H_3 + 1)} \cdot \ln(h + 1)$ est la surface inondée et pour $T = 100$ ans, $S_3=100$ et $H_3=3,86$

En considérant une répartition uniforme, le dommage par hectare vaut "1 X hauteur de submersion". En faisant varier le seuil d'apparition des dommages de la crue annuelle à la crue vingtennale, on a regroupé à chaque fois un même "capital" de biens vulnérables au-dessus du seuil (en accroissant la "densité"). On aboutit aux coûts des crues $C(T)$ et CMA présentés dans le tableau VIII.2.

Tableau VIII.2. : simulation de coûts de dommages en fonction de la localisation des biens vulnérables au-dessus d'un seuil de crue (crues exprimées en période de retour)

coûts	seuil	T = 1	T = 2	T = 5	T = 10	T = 20
C(T=1)		0	0	0	0	0
C(T=2)		48	0	0	0	0
C(T=5)		98	16	0	0	0
C(T=10)		132	37	7	0	0
C(T=20)		163	62	23	6	0
C(T=50)		203	96	52	29	12
C(T=100)		231	123	77	53	33
C(T=130)		242	134	88	63	43
CMA		60,9	11,3	3,7	1,9	1,1

Il faut toutefois signaler que ces calculs présentent une vision "pessimiste" des enjeux:

- on fait ici varier le seuil d'apparition des dommages sur une très grande amplitude;
- la description de la vallée où le débordement est "précoce" (T=1) et le fond assez plat répond à une situation où les "zones basses" influent beaucoup sur les coûts.

Ce type de question a également été abordé par Bhavnagri et Bugliarello (1965). Sur un site donné, ils ont mis en oeuvre un modèle de zone inondable divisant cette zone en "tranches" (limitées par des emprises de crue). Une seule occupation des sols est représentée, et on considère un paramètre θ de densité surfacique des biens vulnérables. Quatre répartitions des biens (à capital total constant) sur la zone inondable ont été testées au travers de quatre fonctions $\theta(H)$ (H cote de crue):

- 1° $\theta(H)$ linéaire décroissante (jusqu'à zéro);
- 2° $\theta(H)$ constante (densité uniforme);
- 3° $\theta(H)$ présentant un maximum en $H=H_m$ (au "milieu" de la zone inondable);
- 4° $\theta(H)$ linéaire croissante (à partir de zéro).

Par rapport au choix 2 (densité uniforme), les effets sur le CMA et sur l'écart-type σ du dommage annuel sont les suivants:

	fonction $\theta(H)$			
	1	2	3	4
CMA	166%	100%	73%	34%
σ	156%	100%	90%	46%
σ/CMA	1,97	2,09	2,59	2,81

On a également évoqué, dans le chapitre VII, le modèle BOCDAM développé par le Flood Hazard Research Centre. Pour un secteur inondable, l'occupation des sols est déterminée sur une section représentative, puis extrapolée à tout le secteur. Le calcul intègre une simulation aléatoire de différentes répartitions de ces types de surfaces en altitude, et il s'avère que cela induit une très forte dispersion sur les coûts estimés (Green, communication personnelle).

VIII.4.3. Les dérogations au principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols

Dans le sous-modèle d'occupation des sols, on a cherché à intégrer toute information qui pourrait permettre de prendre en compte les écarts à ce principe. Trois indications éventuelles, parmi les données d'entrée, peuvent conduire à cela:

- le seuil H_{sap} au-dessus duquel apparaissent les dommages;
- les seuils "zéro logement touché" ou "zéro logement présent dans l'emprise inondée" (ce second type de seuil sur les logements peut être ramené au premier en considérant la distance maximale des planchers au terrain naturel);
- des couples de valeurs "H - nombre de logements touchés/présents" (en se ramenant aux crues de base les plus proches des valeurs H, et en ajustant les nombres de façon proportionnelle).

Pour ce dernier point, le modèle pondère les proportions surfaciques "habitat aggloméré" et "habitat dispersé" dans chaque tranche de secteur, de telle sorte qu'en appliquant les densités de logements aux surfaces inondées (telles qu'elles ont été définies pour les fonctions de coût, voir annexe VIII.D), on retrouve effectivement les nombres de logements indiqués. Il n'est pas apparu possible de combiner des informations de types respectifs "logements touchés" et "logements présents". Aussi, on a choisi de se limiter à ce second type d'information lorsqu'on disposait des deux types.

Les informations "zéro logement présent pour le seuil H" (et/ou "zéro logement touché" retraduites) sont prises en compte au travers du processus suivant, en se référant aux surfaces absolues des diverses occupations des sols à l'intérieur de la plus forte emprise inondée connue:

- estimation de la surface "habitat" absolue S_h (sur la plus grande emprise connue) et de la surface S_d inondée entre le seuil H et cette emprise maximale;
- si S_h est inférieure à S_d , on répartit toutes les surfaces habitat sur S_d , c'est-à-dire au-dessus du seuil H; les surfaces absolues correspondant aux autres occupations des sols sont alors réparties de façon proportionnelle sur les surfaces encore disponibles (au sein de la plus grande emprise connue), au niveau de chaque tranche de secteur; au-delà de l'emprise maximale connue, on applique la nouvelle répartition des occupations des sols obtenue pour la plus haute tranche située dans cette emprise;
- si S_h est supérieure à S_d , on "remplit" S_d (partie de l'emprise maximale connue située au-dessus du seuil H) avec les surfaces "habitat" (en priorité centre ville, urbain dense, centre

bourg/village) et on extrapole ces répartitions d'occupations des sols sur les tranches supérieures du secteur; ensuite, on localise les surfaces "habitat" absolues restantes directement sous le seuil H; pour finir, les autres types d'occupations des sols sont répartis dans la partie basse du secteur.

Venons en pour finir à la dernière "dérogation" possible au principe d'uniformité de la répartition des occupations des sols: lorsque le seuil H_{sap} est supérieur au seuil de début d'inondation (débordement, remous, déversement, rupture). Comme pour le cas des logements, on propose une démarche de prise en compte de cette non-uniformité en raisonnant sur les surfaces absolues au sein de l'emprise maximale connue:

- répartition des surfaces absolues "centre ville", "urbain dense", "centre bourg/village" dans les tranches de secteur comprises entre H_{sap} et l'emprise maximale connue; à défaut, le reliquat des surfaces est localisé dans les premières tranches situées sous H_{sap};
- idem pour les surfaces "zone artisanale et commerciale", "zone industrielle", "urbain non continu", "grand collectif";
- idem pour "serres", "horticulture", "cultures maraîchères", "légumes frais en champ";
- répartition des autres types de surfaces en proportion sur les surfaces encore disponibles;
- extrapolation de la répartition modifiée (de la plus haute tranche) au-delà de l'emprise maximale connue.

L'objectif est ici de situer au-dessus de H_{sap} les occupations des sols pour lesquelles on peut raisonnablement supposer que toute submersion est dommageable. Comme l'indique la figure VIII.2, ce calcul peut être itéré. En effet, il est possible que le premier calcul débouche sur un coût non négligeable pour la crue H_{sap}: nous avons retenu, pour cette notion de "non négligeable", le seuil de 1/1000 du coût de la crue centennale (ou de la crue "cinq-centennale" si le seuil H_{sap} correspond à un événement au moins centennal). Dans ce cas, on itère sur les sous-modèles d'occupation des sols et de dommages. La procédure présentée plus haut inclut alors une étape supplémentaire, conduisant à regrouper dans la partie la plus basse de la zone inondable (sous H_{sap}) les occupations des sols les moins vulnérables: dans l'ordre "autres surfaces non vulnérables", "autres cultures", "surface toujours en herbe", puis "forêts et bois exploités", puis "cultures" (hormis les quatre premières et deux dernières du tableau VIII.1), puis "autres surfaces vulnérables".

Toutes les procédures que l'on a présentées ici comportent une part d'arbitraire, dans la mesure où elles tentent d'exploiter des informations "parasites" en contradiction avec les hypothèses de départ. Mais le fait d'ignorer ces informations peut conduire, selon nous, à des erreurs encore plus importantes. C'est pourquoi on cherche ici à limiter, de façon systématique, les biais prévisibles du modèle élaboré. Par ailleurs, le caractère "abrupt" de certains choix résulte du fait que le modèle doit exploiter de façon systématique (pour ne pas dire "de façon aveugle") des informations non totalement standardisées.

VIII.5. LE SOUS-MODELE DE DOMMAGES

Ce dernier sous-modèle, présenté dans la figure VIII.6, estime les coûts dus à chaque crue sur chaque tranche de secteur, à partir des résultats des sous-modèles hydrologique, hydraulique et d'occupation des sols. Les coûts sont estimés pour chacun des scénarios (s'il y a lieu) "non rupture" et "rupture de digue", puis combinés pour chaque crue en fonction de leurs probabilités respectives. De même, les coûts estimés pour chaque saison (dans le cas des cultures) sont pondérés par la probabilité qu'une crue dommageable se produise au cours de cette saison. A partir de la relation "cote - coût" C(H) établie de la sorte sur les crues de base, et à partir de la relation "période de retour - cote" T-H, on estime la relation C(T) et le coût moyen annuel CMA, selon une procédure décrite.

Après la présentation générale de ces principes, on rappelle quelle est la nature des coûts estimés, et quelle est l'origine des fonctions de coûts élémentaires mises en oeuvre (coût à l'hectare ou au logement, en fonction des paramètres de submersion; voir l'annexe VIII.D).

VIII.5.1. Le principe des calculs effectués

Les données d'entrée du sous-modèle de dommages sont les suivantes:

- la hauteur de submersion $h_{i,j}$ et la durée de submersion $d_{i,j}$ sur la tranche H_{j-1} - H_j , pour la crue H_i ;
- la surface totale δS_j de cette tranche, et la répartition de cette surface $U_{j,k}$ entre les différentes occupations des sols k ; les différentes hauteurs de planchers;
- les couples "période de retour - cote" T_i - H_i pour les crues de base; les seuils du risque de rupture;
- la répartition saisonnière des crues dommageables, en considérant les quatre trimestres du calendrier civil comme approximation des saisons; cette information a pour objectif de prendre en compte la variabilité saisonnière de la vulnérabilité des cultures agricoles en pondérant les dommages moyens sur chaque saison par la probabilité estimée que la crue se produise en cette saison; nous sommes conscients de toutes les limites d'une telle approche, qui notamment ne distingue pas entre les répartitions saisonnières de crues d'intensités différentes (ces répartitions sont si imprécises qu'il serait sans objet, sauf cas particulier, de vouloir les affiner);
- les fonctions de coût élémentaires, dont la détermination est présentée en annexe VIII.D, et qui portent sur les occupations des sols considérées.

Ce sous-modèle, à partir des résultats établis par les sous-modèles précédents, estime pour chaque crue de base les coûts sur chaque tranche de secteur: pour chaque occupation des sols, on multiplie la surface absolue concernée sur la tranche (pourcentage $\times \delta S_j$) ou le nombre d'unités (logements pour l'habitat dispersé) par une fonction de coût élémentaire, dépendant de la hauteur et/ou de la durée de submersion. Le coût total, obtenu par sommation, peut être présenté:

- par famille d'occupations des sols (habitat, activités non agricoles, cultures);
- selon différentes hypothèses de rupture de digues (rupture "probabilisée" conduisant à une espérance de coût, rupture intervenant dès qu'on dépasse le seuil H_{ris} , rupture n'intervenant que lorsque l'on dépasse le seuil H_{rup}).

Et, pour chacune de ces décompositions ou pour chaque scénario, on estime le coût moyen annuel (CMA) à partir des couples "fréquence F ($F = 1/T$, fréquence annuelle de dépassement) - coût C ". Si l'on connaissait une fonction analytique $C(F)$, on obtiendrait le CMA en intégrant cette fonction:

$$CMA = \int_0^{F_0} C(F) dF \quad (22)$$

où F_0 correspond au seuil d'apparition des dommages.

Comme ce n'est pas le cas, on propose d'approcher la fonction de probabilité des coûts par des segments de droites reliant les points F - C , ce d'autant plus qu'on n'a a priori aucune raison (tirée de la théorie ou de l'expérience) de chercher à caler une relation qui aurait une expression analytique donnée (cf. figure VIII.6b).

La difficulté consiste à estimer la fonction au-delà de la plus forte crue considérée (fréquences $F < F_m$, pour nous $F_m = 1/500$), en tablant sur l'hypothèse que la fonction $C(F)$ est intégrable pour les fréquences faibles.

Figure VIII.6. : la structure du sous-modèle de dommages (voir page ci-contre)

légende: cf. figure VIII.2

Le sous-modèle de dommages estime, pour chaque crue de base H , les coûts de dommages C_n et C_r correspondant aux deux scénarios "non rupture" et "rupture de digue", en additionnant les coûts sur chaque type d'occupation des sols et chaque tranche de secteur. Les fonctions de coûts élémentaires f (coût à l'hectare ou au logement) dépendent des conditions de submersion (hauteur nette dépendant de la hauteur de plancher d_{tn} , et durée) et de la saison. Elles sont pondérées par la répartition saisonnière des crues dommageables v , et multipliées par la surface absolue de chaque type présente sur chaque tranche ($U \times \delta S$). Le coût total $C(H)$ est défini comme l'espérance de coût par rapport au risque de rupture de digue. Il est ensuite référencé par rapport à la période de retour, $C(T)$, pour l'estimation du coût moyen annuel (CMA).

On peut proposer trois estimations du CMA qui, a priori, constituent toutes trois une sous-estimation (cf. figure VIII.6b), et dépendent de la fréquence F_m de la plus forte crue considérée :

$$CMA1 (F_m) = \sum_{i=1}^m (F_{i-1} - F_i) \times \frac{C_{i-1} + C_i}{2} \quad (\text{zone A sur la figure}) \quad (23)$$

en ne considérant que les crues de fréquence $F > F_m$

$$CMA2 (F_m) = CMA1 (F_m) + F_m \times C_m \quad (\text{zones A et B}) \quad (24)$$

Cette forme correspond à la méthode utilisée notamment par le Ministère de la Construction du Japon (avec six fréquences de 1/6,3 à 1/200; Yoshimoto et Kinouchi, 1992).

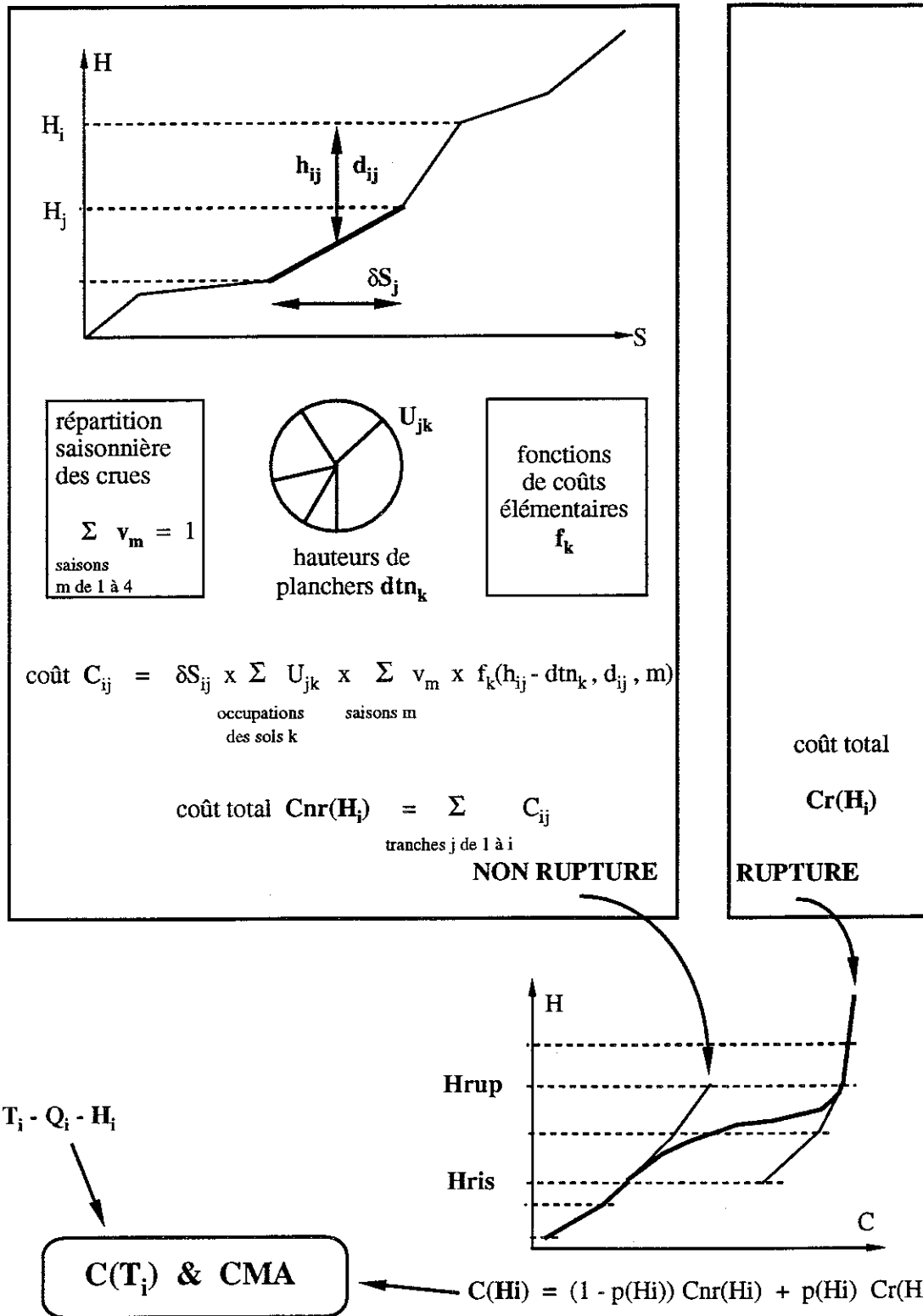
$$CMA3 (F_m) = CMA2 (F_m) + \frac{1}{2} \times F_m^2 \times \frac{C_m - C_{m-1}}{F_{m-1} - F_m} \quad (\text{zones A, B et C}) \quad (25)$$

La valeur CMA3 est obtenue en prolongeant linéairement la courbe C-F jusqu'à l'axe $F = 0$.

C'est cette troisième forme que nous avons choisi d'adopter, dans la mesure où elle nous semble constituer l'estimation la moins biaisée. Elle répond en particulier à l'avis de Handmer (1986), pour qui la forme CMA2 constitue une estimation minimaliste. Davis et al (1988), en proposant la forme CMA1, insistent sur le biais susceptible d'être induit par la "discrétisation" et la "linéarisation" de la relation entre fréquence et coût. Ils recommandent de considérer un nombre suffisant de crues, et en particulier celles qui correspondent aux "points anguleux", soit aux discontinuités. C'est dans cet esprit que nous avons conçu le modèle local.

Par ailleurs, comme on l'a signalé en VIII.1.5, on effectue une vérification sur le coût correspondant à la crue seuil d'apparition des dommages. Si ce coût n'apparaît pas négligeable, cela conduit à une nouvelle répartition des occupations des sols sur les différentes tranches du secteur inondable.

Figure VIII.6. (voir ci-contre)



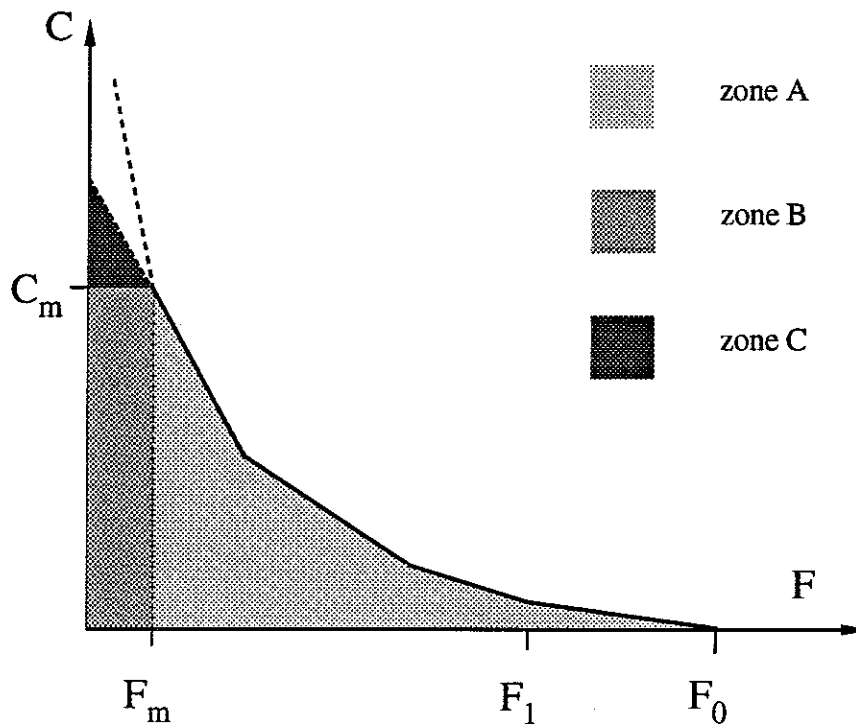


Figure VIII.6b. : estimation du coût moyen annuel des dommages

VIII.5.2. La nature des coûts estimés

En fonction des éléments dont nous disposons et de l'exploitation qu'il a été possible d'en faire, les coûts estimés concernent:

- les dommages directs (matériels) pour l'habitat;
- les dommages directs et les pertes d'exploitation pour les activités non agricoles directement inondées;
- les pertes de récolte pour les cultures, corrigées par le surcroît ou la réduction de frais d'exploitation (modification du parcours technique, traitements, récolte...), et corrigées également lorsque la destruction de la culture permet une autre production (impliquant éventuellement un surcroît de travail).

Cette liste brève révèle, par différence, l'ensemble des dommages non pris en compte ici: dommages indirects aux ménages, stérilisation (ou fertilisation) de terres agricoles et dommages fonciers, dommages matériels autres aux activités agricoles, dommages aux équipements publics et infrastructures, dommages indirects dans la zone inondable (hormis les pertes d'exploitation) et hors de la zone inondable, coûts des secours, dommages intangibles...

Les fonctions de coût élémentaires proviennent des sources suivantes (les détails sont présentés en annexe VIII.D):

- dommages matériels à l'habitat en fonction de la hauteur et de la durée de submersion: densités type de logements par catégorie de quartier estimées à partir de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations, mise au point en 1988 par SAGERI pour le Ministère de l'Environnement (Délégation aux Risques Majeurs); dommages à chaque

logement à partir des travaux présentés dans la partie B (voir aussi Torterotot et al, 1992; Torterotot, dans EUROFLOOD 1993);

- dommages aux cultures en fonction de la durée de submersion et de la répartition saisonnière des crues dommageables: synthèse de résultats obtenus par enquêtes ou expérimentations dans diverses régions, et réactualisation (pour la plus grande partie, cette synthèse résulte d'un travail d'élèves de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, encadré par le CERGRENE; Deleuze et al, 1991);
- dommages matériels aux entreprises non agricoles et pertes d'exploitation: utilisation des résultats de l'étude SAGERI (1988) pour les zones industrielles et zones artisanales et commerciales, et transposition sur les activités disséminées dans le tissu urbain proportionnellement au nombre d'emplois.

VIII.6. LES DONNEES D'ENTREE ET LEUR TRAITEMENT

Tout au long du chapitre, on a mentionné les données d'entrée utilisées par le modèle et ses sous-modèles (voir aussi les figures VIII.2 à VIII.6). Cette partie a pour but de présenter ces données d'entrée de façon systématique, avec les traitements effectués en préalable à la mise en oeuvre du modèle lui-même (homogénéisation, remplacement de certaines données manquantes par des valeurs par défaut...). Cette présentation ne porte que sur les données utilisées directement par le modèle. La formalisation et la mise en oeuvre du recueil de données sont présentées dans le chapitre IX qui suit.

VIII.6.1. Remarques générales

Toutes les données présentées plus loin sont, sauf mention contraire explicite, des variables indispensables. Pour certaines informations, on a choisi des valeurs par défaut pouvant être prises en compte lorsque les valeurs réelles ne peuvent pas être obtenues. Le choix de ces informations a notamment reposé sur le fait que leur obtention sur le terrain posait régulièrement problème, et qu'il n'était pas dénué de sens de les remplacer par des valeurs moyennes.

Par ailleurs, les valeurs initiales d'intensités de crue peuvent être indifféremment exprimées en cote maximale H , en débit de pointe Q , ou en période de retour T (estimée sur la valeur de la pointe de crue). Le modèle se base sur celle(s) qui est(sont) disponible(s), sachant que le sous-modèle hydrologique ramène toutes les intensités de crue aux cotes, pour tout ce qui concerne la description du secteur inondable: seuils, surfaces, occupations des sols... Ce choix nous a semblé être cohérent avec les hypothèses générales du modèle, et surtout avec le fait que la description physique et morphologique du lit majeur nous apparaissait plus stablement et durablement liée à la cote "absolue" d'une ligne d'eau qu'à une fréquence (modifiée par des changements du bassin versant ou du cours amont) ou à un débit (par exemple le débit seuil de débordement dépend de l'état du lit mineur au droit du secteur et à l'aval).

Par ailleurs, la notion de crue seuil demande une précision: rappelons qu'il s'agit de l'intensité de crue au-delà de laquelle un phénomène se produit. Ainsi, on ne prend pas encore en compte de déversement au niveau de la crue seuil de déversement, par contre ce déversement intervient dès la première crue de base directement supérieure.

VIII.6.2. Les données relatives à un bief

Comme on l'a présenté plus haut, le bief constitue -en première approche- une unité hydrologique. Certaines données sont donc communes à tout ou partie des secteurs de ce bief.

- identification du bief;
- identification d'une station hydrométrique de rattachement;

- couples de points H-Q, H-T et/ou Q-T pour cette station en nombre variable, permettant au minimum d'estimer par interpolation et/ou extrapolation une relation H-T pour des périodes de retour de 1 à 500 ans (voir VIII.1.3);
- identification d'une éventuelle seconde station hydrométrique de rattachement (même si l'hypothèse d'uniformité des débits de crue peut être respectée en première approche, il a pu s'avérer nécessaire de considérer une seconde station soit pour améliorer la représentativité des lignes d'eau, soit pour disposer de références connues par rapport à certains secteurs du bief);
- couples de points H-Q, H-T et/ou Q-T pour cette seconde station en nombre variable, permettant au minimum d'estimer par interpolation et/ou extrapolation une relation H-T pour des périodes de retour de 1 à 500 ans (voir VIII.1.3);
- répartition saisonnière des crues selon les quatre trimestres civils (janvier à mars, avril à juin...);
- seuil de crue H-Q-T à partir duquel apparaissent les dommages (par rapport à une ou deux stations);
- durée de submersion, sur le bief, pour une forte crue définie en intensité (H,Q, ou T); ces données sont utilisées lorsque les informations correspondantes propres à un secteur sont manquantes.

VIII.6.3. Les données relatives à un secteur

- identification du secteur, du bief d'appartenance et de la station hydrométrique de rattachement;
- rive(s) concernée(s);

SEUILS

- seuil d'apparition des dommages (facultatif);
- seuil de débordement ou de remous (s'il y a lieu);
- seuil de déversement (s'il y a lieu);
- seuil d'apparition du risque de rupture de digue et seuil de rupture certaine (s'il y a lieu); lorsque l'un de ces seuils n'est pas connu, on a choisi de l'estimer par défaut en considérant que les deux seuils sont écartés d'un mètre (ordre de grandeur apparaissant "raisonnable" au vu des informations recueillies);
- seuil de submersion complète du secteur (facultatif, et s'il y a lieu).

HYDRAULIQUE

- surfaces submergées hors rupture, pour des crues d'intensité (H,Q,T) connue; au moins une valeur de surface non nulle ("absence de ces données gérable" si on connaît des surfaces submergées par rupture);
- surfaces submergées s'il y a rupture, pour des crues d'intensité (H,Q,T) connue; au moins une valeur de surface non nulle; pour une même intensité de crue, ces surfaces ne sauraient être inférieures à celles qui concernent le scénario sans rupture;
- représentation simplifiée du profil en travers du lit majeur pour un secteur inondé par débordement direct (facultatif, voir VIII.3); pour chacune des rives concernées, le profil de la rivière est représenté par une ou deux pentes; lorsqu'il y a deux pentes, le point de changement de pente est localisé en "altitude" en référence à une ligne d'eau (ce qui permet de définir ce point en cote);

- pour les secteurs endigués, couples de points "intensité de crue - hauteur maximale de submersion" (facultatif);
- durée maximale de submersion pour une forte crue d'intensité connue, supposée correspondre à la durée pendant laquelle l'eau dépasse le seuil de début d'inondation; lorsque ces informations ne peuvent être définies à l'échelle du secteur, on considère les valeurs connues à l'échelle du bief, que l'on transpose en durée de submersion sur le secteur pour la même crue (à partir de l'hypothèse d'un hydrogramme de forme triangulaire, en supposant que la durée de submersion connue correspond au seuil d'apparition des dommages sur le bief; voir VIII.1.4 et VIII.3);

OCCUPATIONS DES SOLS

- plus forte surface inondée connue, avec l'intensité de crue correspondante;
- répartition en pourcentages des types de surface, par grandes catégories (habitat aggloméré, habitat dispersé, zone artisanale et commerciale, zone industrielle, cultures agricoles, forêts et bois exploités, autres surfaces vulnérables, autres surfaces non vulnérables);
- densité de logements par rapport à la surface de type "habitat dispersé" (s'il y a lieu); lorsque cette donnée fait défaut, on propose de lui attribuer la valeur moyenne 3,7 obtenue sur 36 valeurs (écart-type 1,45);
- répartition de l'habitat aggloméré en 6 types d'urbanisme (s'il y a lieu, cf. tableau VIII.1);
- répartition des cultures agricoles en 16 catégories de production, correspondant en partie aux rubriques du Recensement Général Agricole (s'il y a lieu, cf. tableau VIII.1);
- serres non intégrées dans les surfaces agricoles, mais quantifiées comme établissement particulier (définies en surface, et par rapport à un seuil de crue, s'il y a lieu);
- hauteurs moyennes des premiers planchers habités par rapport au terrain naturel (pour l'habitat dispersé, on considère la même valeur que pour l'habitat pavillonnaire) pour les six types d'urbanisme; ces données étant difficiles à recueillir, et présentant un impact certain sur les dommages, nous avons choisi de leur attribuer des valeurs par défaut quand cela est nécessaire, en s'appuyant sur des nombreuses enquêtes faites en 1988 auprès de particuliers (voir chapitre IV), et sur les premiers recueils de données fructueux sur des secteurs avant le mois de juin 1991 (voir annexe VIII.F).

IX. LE RECUEIL DE DONNEES SUR LES ZONES INONDABLES DU BASSIN DE LA LOIRE ET LA MISE EN OEUVRE DU MODELE LOCAL

Finally, it is the method of measurement rather than the object of measurement that the savant describes. The object measured is not really more than a particular degree of approximation of the method of measurement. The savant believes in the realism of the measurement more than in the reality of the object. The object can then change of nature when one changes the degree of approximation.
Bachelard, 1977, p. 213

Ce chapitre présente l'opération de recueil de données sur les zones inondables du bassin de la Loire, réalisée avec le soutien du Ministère de l'Environnement (Torterotot et Marguet, 1989; Torterotot, 1991). Les objectifs poursuivis étaient tout d'abord de créer une base de données sur les vallées inondables qui soit cohérente avec le modèle local et qui puisse l'alimenter. Mais ce recueil a également servi à préciser la structure détaillée du modèle, tout comme des repérages antérieurs effectués sur les données et informations potentiellement disponibles avaient contribué à définir la structure générale de ce modèle.

On a souligné plus haut (chapitre II) l'hétérogénéité des données existantes: dans le temps, dans l'espace, en termes de précision... Par ailleurs, elles présentent des lacunes ou des défauts de réactualisation. Pour le modèle, et pour la synthèse d'informations en tant que telle, on a donc cherché à exploiter la plus grande part possible des informations disponibles, et à les confronter entre elles, à les critiquer.

Pour cette critique, comme pour la production d'informations initiales, on a cherché à s'appuyer sur l'expertise et la connaissance de terrain irremplaçables des Services Extérieurs de l'Etat. Leur aide et leur soutien ont rendu possible ce recueil, et la base de données constituée leur doit ses qualités principales: l'importance de la couverture géographique et l'intégration critique de toutes les informations et connaissances disponibles comme gage de réalisme. En particulier, le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne (Direction Régionale de l'Environnement, Orléans) et ses agents ont apporté une contribution matérielle, intellectuelle et morale inestimable.

La première partie de ce chapitre décrit la nature et les modalités du recueil: aire d'étude, organisation, collecte et critique des données. Dans la suite, on présente la base de données constituée et son environnement, ainsi qu'une exploitation des données par le modèle local. Enfin, en dernière partie est réalisée une critique des données recueillies, critique qui constitue l'une des bases de l'analyse des incertitudes dans le modèle local (chapitre X).

IX.1. L'AIRE D'ETUDE ET LA PROCEDURE DE RECUEIL

IX.1.1. L'aire d'étude

Avec l'accord de la Délégation aux Risques Majeurs (Ministère de l'Environnement), nous avons choisi de réaliser cette étude sur le bassin hydrographique de la Loire. Ce choix est motivé par différentes considérations, à commencer par l'importance du risque d'inondation, et des zones inondables. Celles-ci regroupent notamment des modes d'occupations des sols très divers, assurant une relative représentativité de situations par rapport à la France métropolitaine. De la même façon, les situations hydrologiques et hydrauliques rencontrées sur ce bassin présentent une diversité importante, qui permet d'extrapoler à d'autres bassins la méthode de recueil et le modèle local élaboré.

Par ailleurs, la structuration des données est destinée à respecter une double logique administrative (départements) et hydrographique (cours d'eau et sous-bassins). Il était donc intéressant

de travailler sur une zone d'étude "compacte", sur laquelle aborder les problèmes de découpage géographique et de structuration des données.

Le choix des cours d'eau a été fait en concertation avec le Service Hydrologique Centralisateur (SHC) du Bassin Loire-Bretagne, en se basant sur l'expérience des membres du SHC ainsi que sur d'autres sources d'informations, dont notamment l'Atlas des zones inondables (BCEOM, 1969).

Les cours d'eau retenus initialement dans l'aire d'étude sont indiqués ci-dessous et représentés sur la carte de la figure IX.1:

- l'Allier depuis la ville de Langogne (Lozère) jusqu'au confluent avec la Loire
- l'Arnon sur tout son cours
- l'Arroux à partir de son entrée dans le département de Saône-et-Loire
- la Bourbince sur tout son cours
- le Cher à l'aval du barrage de Rochebut (Creuse)
- le Clain sur tout son cours
- la Creuse depuis la ville d'Aubusson (Creuse) jusqu'au confluent avec la Vienne
- l'Huisne sur tout son cours
- l'Indre sur tout son cours
- le Lignon du Velay sur tout son cours
- le Loir sur tout son cours
- la Loire de l'aval du confluent de la Gazeille (Haute-Loire) jusqu'à l'estuaire
- la Maine sur tout son cours
- la Mayenne à l'aval du confluent avec l'Ernée (Mayenne)
- l'Oudrache sur tout son cours
- la Sarthe sur tout son cours
- la Sèvre Nantaise sur tout son cours
- la Vienne depuis la ville de Saint-Léonard-de-Noblat (Haute-Vienne) jusqu'au confluent avec la Loire
- l'Yèvre sur tout son cours.

A ces cours d'eau il faut ajouter des parties aval de certains de leurs affluents qui contribuent, lors des crues, à inonder des agglomérations situées aux confluent par le phénomène de remous aval.

L'aire d'étude correspondant à ces cours d'eau s'étend sur les 24 départements suivants:

Allier (03)
Charente (16)
Cher (18)
Creuse (23)
Eure-et-Loir (28)
Indre (36)
Indre-et-Loire (37)
Loir-et-Cher (41)
Loire (42)
Haute-Loire (43)
Loire-Atlantique (44)
Loiret (45)
Lozère (48)
Maine-et-Loire (49)
Mayenne (53)
Nièvre (58)
Orne (61)
Puy-de-Dôme (63)
Saône-et-Loire (71)
Sarthe (72)
Deux-Sèvres (79)
Vendée (85)
Vienne (86)
Haute-Vienne (87)

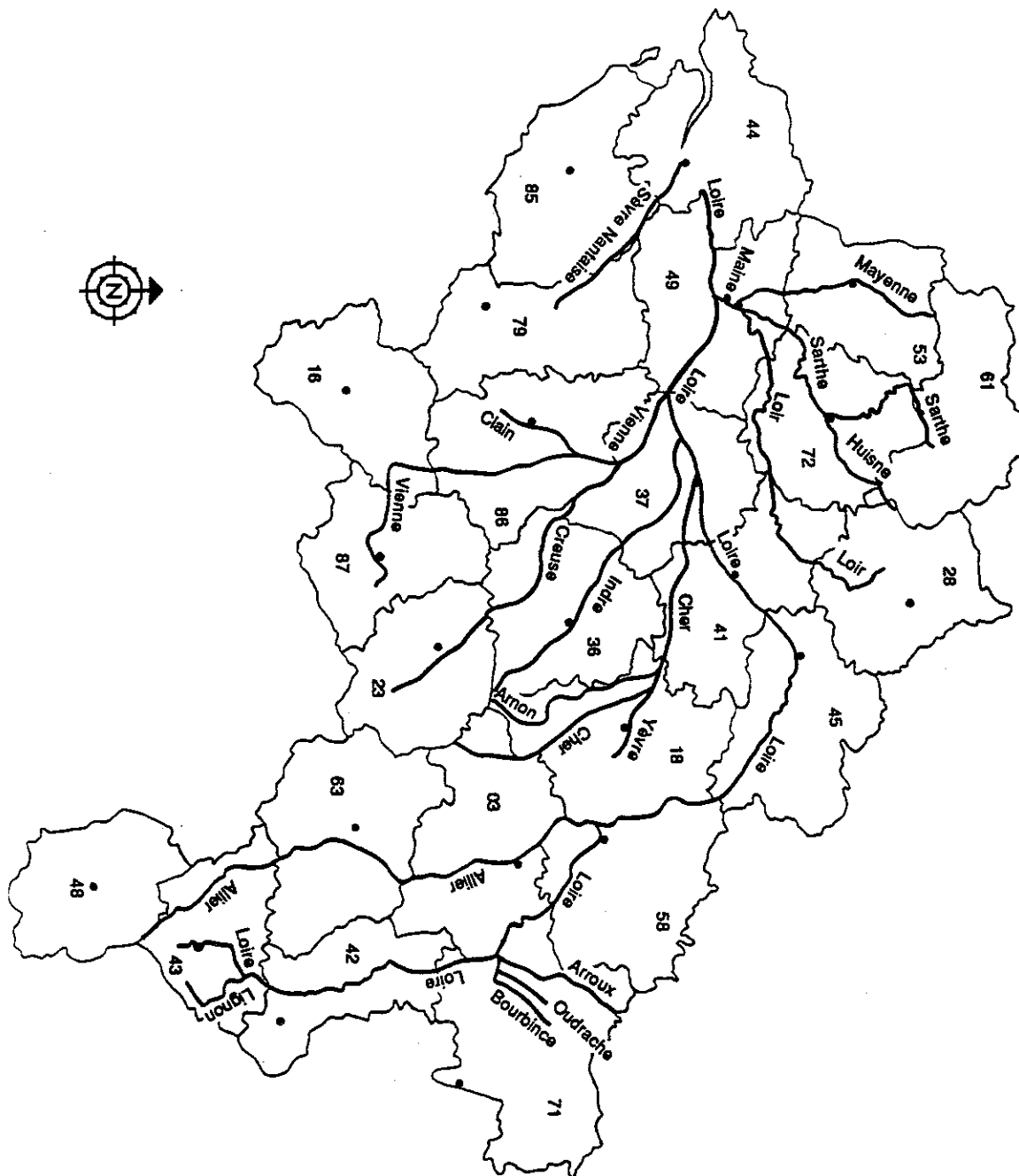


Figure IX.1. : aire d'étude retenue pour le recueil

les tracés épais représentent les parties de cours d'eau considérées, les tracés fins les limites des départements concernés

IX.1.2. L'organisation et le phasage du travail

Le recueil a bénéficié pendant neuf mois (en 1989 et 1990) de la collaboration dynamique et efficace d'Isabelle Marguet pour le lancement et la définition de l'opération, et également pour la plus grande partie des contacts de terrain.

Le recueil s'est organisé selon les modalités pratiques suivantes, dont dépend bien évidemment la qualité des données:

- exploitation des documents et études centralisés au Ministère délégué à l'Environnement et à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (DRM et SE), au Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne et à l'Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne;
- information des Préfets de Département par le Préfet Coordonnateur de Bassin, à la demande du Délégué-Adjoint aux Risques Majeurs;
- organisation avec le Service Hydrologique Centralisateur d'une réunion d'information pour les représentants des Directions Départementales de l'Équipement (DDE) afin de présenter le recueil et son contexte, de recueillir les avis des participants, et de demander leur collaboration (relais pour les contacts avec les autres Services extérieurs, fourniture de données...); sur 24 DDE invitées, 19 étaient représentées et une s'était excusée;
- organisation de réunions dans les départements avec les Services concernés pour faire le point sur les informations et études existantes, réaliser le découpage de la zone d'étude (selon la méthode pré-définie), organiser le rassemblement des informations (fourniture de données, transmission au CERGRENE d'éléments à exploiter...); le degré de participation à ces réunions a été très variable.

La suite du recueil de données s'est alors organisée de façon spécifique dans chaque département, en fonction des données déjà existantes, des besoins ressentis localement pour ces mêmes données, de la disponibilité des Services et de leur préférence quant au "mode de fonctionnement". L'action du CERGRENE a donc été variable selon les départements, allant du seul contrôle final des données à l'exploitation complète des informations brutes de départ.

L'annexe IX.A contient les questionnaires utilisés pour présenter les données recherchées et synthétiser les réponses. Les sources utilisées pour les informations sont très variables. Les principales d'entre elles sont mentionnées dans l'analyse critique globale des données recueillies (voir IX.3). La critique des données, telle qu'elle est présentée ci-dessous, est une partie intégrante du recueil.

IX.1.3. Le mode de critique des données

Tout au long du processus de recueil des données, il y a eu critique de ces données à des degrés divers, en ce qui concerne à la fois leur précision, leur actualité, et le fait qu'elles soient qualitativement suffisantes pour mener une évaluation approchée des dommages.

En effet, lors de la prise de contact générale ainsi que lors des réunions locales avec les représentants des Services de l'État, ont été présentés:

- les objectifs du recueil et les principes qui le régissent (recours maximal aux informations existantes et à l'expertise...);
- les hypothèses et la méthode proposée pour l'évaluation du coût des dommages, à partir des données recueillies.

De même, des évaluations provisoires menées sur des cas concrets, avec l'explicitation des calculs, ont été adressés aux Services (Torterotot, 1990-b). De la sorte, nos interlocuteurs disposaient des éléments permettant d'apprécier la valeur des informations fournies, les besoins minimaux en matière de précision, mais aussi le degré d'investissement à ne pas dépasser dans la recherche des données (il ne s'agissait pas d'aller arpenter les parcelles plantées en colza, par exemple). Cela

permettait notamment d'illustrer le fait qu'une donnée issue d'une expertise approximative pouvait améliorer sensiblement les résultats d'un modèle reposant sur peu d'informations.

Par ailleurs, la critique s'est exercée au cours du processus de transformation des informations brutes et des expertises en données, en fonction du mode de collaboration avec les représentants des Services.

La critique menée postérieurement à la phase de recueil a concerné les points suivants:

- cohérence entre des informations de sources différentes (données fournies directement, études consultées...), mais aussi et surtout cohérence interne;
- examen détaillé de situations particulières (par exemple lorsque l'habitat est déclaré touché dès les crues fréquentes...);
- complément, dans la mesure du possible, des données manquantes;
- vérification que l'on dispose d'un ensemble de données permettant de mener toute la procédure d'évaluation (en remplaçant éventuellement -à partir d'hypothèses "raisonnables"- des données manquantes dont l'estimation se révélerait être impossible ou du moins trop coûteuse en temps et en moyens).

Sur ce dernier point, on s'est assuré de disposer d'éléments minimaux concernant les informations suivantes:

- la "relation" entre fréquence et cote maximale de crue, sur une gamme de valeurs représentatives (permettant d'interpoler et d'extrapoler dans le domaine des phénomènes auxquels on s'intéresse);
- la répartition saisonnière grossière des crues dommageables;
- les seuils de début de débordement et d'apparition des dommages; la durée de submersion pour une forte crue;
- les seuils de phénomènes hydrauliques particuliers à l'origine des submersions (déversement sur une digue, risque de rupture de digue...);
- les surfaces inondées (au moins pour une crue importante);
- la répartition en surface des modes d'occupation des sols.

Enfin, après saisie informatique et contrôle "manuel" systématique de cette saisie, les données ont été imprimées et renvoyées à nos interlocuteurs locaux pour avis et attribution (pour le mode de présentation de ces données, voir Torterotot, 1991). Par ailleurs, le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, qui a fourni la majeure part des informations hydrologiques de départ, a bien voulu nous aider à refaire une critique sur les points suivants (à partir des informations existantes et de la connaissance hydrologique des cours d'eau):

- relations cote-débit-fréquence aux stations hydrométriques auxquelles on se réfère;
- cohérences entre stations;
- identification des stations pour lesquelles les niveaux de l'eau sont peu représentatifs par rapport aux niveaux des lignes d'eau sur les biefs correspondants;
- données hydrauliques (seuils de débordement...) sur un certain nombre de secteurs où interviennent des mécanismes particuliers de submersion (mise en fonctionnement de déversoirs, risques de ruptures de digues, remous aval...);
- ensemble des données sur la Loire moyenne et aval (notamment les seuils, la localisation de l'habitat...).

Les synthèses des critiques sur les différentes données sont présentées en IX.3. Par ailleurs, une critique hydrologique d'ensemble, faite a posteriori, est présentée en IX.1.4. Pour conclure les commentaires globaux sur la critique, mentionnons la tentative qui a été faite de recueillir des informations permettant de caractériser les données en termes de qualité.

Au niveau de la conception du recueil et des formulaires correspondants, on avait renoncé a priori à intégrer la quantification des degrés de précision des données. Cela aurait alourdi des formulaires déjà denses et "effrayants". L'idée était plutôt d'estimer ces degrés de précision au fur et à mesure de l'estimation des données, dans un processus mené conjointement par nos interlocuteurs et nous-mêmes. Or, il s'est rapidement avéré que ces précisions étaient elles-mêmes très difficiles à estimer (voire impossibles, à moins de considérer des "marges de sécurité" excessives). Par ailleurs, une partie des données ayant été directement fournie au CERGRENE sous une forme "achevée", un tel retour sur les précisions semblait peu réaliste.

Parallèlement à cette tentative sur les degrés de précision, et pour chercher à les identifier de façon indirecte, on a essayé de relever l'origine des données, par combinaison de 6 sources d'informations "élémentaires" (Torterotot, 1991). On a rencontré les mêmes difficultés liées à la variabilité des modes d'organisation du recueil. De surcroît, si la typologie proposée permet de rendre compte de façon générale de la nature de ces sources, elle est plus ou moins bien adaptée à chaque domaine (hydrologie, occupation des sols...).

On a ainsi été conduit à ne caractériser que les origines de données dont on était suffisamment sûr. Par ailleurs, dans les cas où nous n'exploitions pas seuls des documents et des informations "brutes", il faut penser a priori qu'une critique a été automatiquement menée, quelles qu'aient été les sources d'informations.

IX.1.4. La critique des données hydrologiques

Une critique spécifique d'ensemble a été menée sur les données relatives aux stations hydrométriques, à savoir les couples de valeurs cote - débit (H-Q), cote - période de retour (H-T) et débit - période de retour (Q-T). Ces données, recueillies pour les stations de rattachement de chaque bief inondable (rubriques B1 et B2 du formulaire), constituent l'information à utiliser pour représenter les relations T-H-Q dans le modèle d'évaluation du coût des dommages sur un secteur inondable.

Dans le modèle local, on est amené à considérer un certain nombre de crues, dont:

- les crues de période de retour 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ans;
- les crues seuils correspondant à certains mécanismes hydrauliques (débordement, déversement, apparition du risque de rupture de digue, rupture certaine...).

Pour ce qui concerne la critique, et étant donné la distance moyenne entre deux stations, cela n'avait pas de sens de confronter les altitudes absolues des lignes d'eau entre stations voisines. Par contre, on a confronté entre ces stations les débits locaux correspondant à une même période de retour de crue. Le paramètre "période de retour" n'est certes pas uniforme pour une crue réelle, mais on peut qualitativement porter une critique sur de tels débits analysés d'amont vers l'aval, à l'échelle de grands "tronçons" présentant de fait une cohérence hydrologique approchée:

- en vérifiant qu'à une forte augmentation de débit correspond un affluent important (et inversement);
- en vérifiant qu'à une forte diminution correspond une zone d'écêtement de crues naturelle ou artificielle (et inversement);
- en vérifiant qu'aux confluent (sauf apports intermédiaires sensibles) la crue de période de retour T à l'aval a un débit inférieur à la somme des débits amont de même fréquence (il n'y a pas a priori conjonction étroite des crues sur deux branches amont d'un confluent; on a vérifié cependant l'existence de telles conjonctions approchées sur des confluent où cela était connu "qualitativement" : Vienne-Creuse...).

Les critiques qualitatives ont été suivies d'une recherche complémentaire d'informations, d'un retour vers les hydrologues possédant la connaissance du terrain et des études antérieures, ou d'une critique directe quand cela était évident. En particulier, on s'est appuyé sur une visualisation des courbes reliant les couples de valeurs connus.

Au préalable, nous avons estimé ces valeurs de débits selon le mode de calcul présenté en VIII.2, qui consiste à interpoler et extrapoler des valeurs (H, Q, T) à partir de couples de valeurs connus. On a ainsi pu identifier les stations pour lesquelles on serait conduit à effectuer des extrapolations importantes pour caractériser les crues considérées par le modèle d'évaluation des dommages (du moins celles d'une période de retour inférieure à 100 ans). Pour ces stations-là également, a été systématiquement menée une recherche d'informations supplémentaires, ou du moins une vérification qualitative, par expertise du Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, que ces extrapolations étaient acceptables en première approche.

La figure IX.2 présente des exemples de résultats de ces calculs, pour cinq stations sur 66. Les cartes simplifiées des débits de période de retour donnée, par tronçon de cours d'eau, sont présentés en annexe IX.B. Il faut considérer les valeurs indiquées comme des ordres de grandeur (incertitudes des données et du mode de calcul, "moyenne" sur une partie de cours d'eau...). Pour les valeurs complètes par station hydrométrique (couples de valeurs H-Q, H-T, Q-T données, tableaux T-Q-H calculés), on se reportera à l'annexe 4 de (Torterotot, 1991).

Figure IX.2. : exemples de résultats des interpolations et extrapolations de paramètres hydrologiques (voir les pages suivantes)

Les résultats portent sur les stations hydrométriques suivantes :

61ALLI	Moulins, sur l'Allier;
195ALLI	Vic-le-Conte, sur l'Allier;
258ALLI	Vieille-Brioude, sur l'Allier;
118CHER	Saint-Julien, sur le Cher;
12CREU	Descartes, sur la Creuse.

Les graphiques présentés concernent, dans l'ordre, la relation "débit (m³/s) - cote (m)", la relation "fréquence de dépassement - débit (m³/s)" et la relation "fréquence de dépassement - cote (m)". Les lignes joignent les points estimés par le sous-modèle hydrologique, à partir des valeurs connues représentées par des points.

IX.2. LA BASE DE DONNEES CONSTITUEE ET LA MISE EN OEUVRE DU MODELE LOCAL

IX.2.1. La zone géographique couverte

Au cours de la phase de recueil, l'aire d'étude définie initialement (portant sur 24 départements) a fait l'objet d'une investigation plus poussée en termes d'enjeux. Compte-tenu de ces éléments et des contacts établis avec les Services extérieurs, on avait choisi de retenir 21 départements sur lesquels concentrer notre travail:

Allier (03)	Loir-et-Cher (41)	Orne (61)
Charente (16)	Loire (42)	Puy-de-Dôme (63)
Cher (18)	Haute-Loire (43)	Saône-et-Loire (71)
Creuse (23)	Loire-Atlantique (44)	Sarthe (72)
Eure-et-Loir (28)	Loiret (45)	Vendée (85)
Indre (36)	Maine-et-Loire (49)	Vienne (86)
Indre-et-Loire (37)	Nièvre (58)	Haute-Vienne (87).

Figure IX.2. (suite): 61ALLI Moulins, sur l'Allier

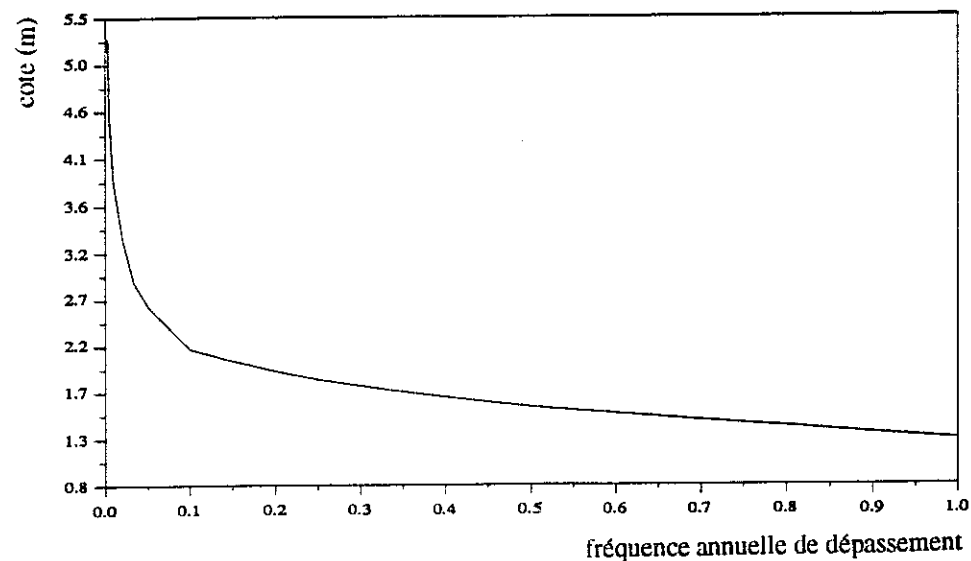
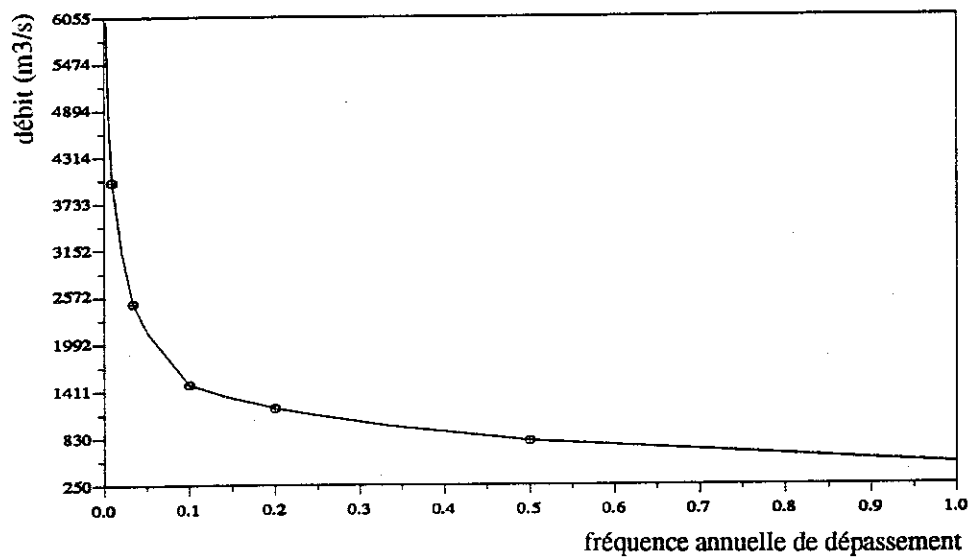
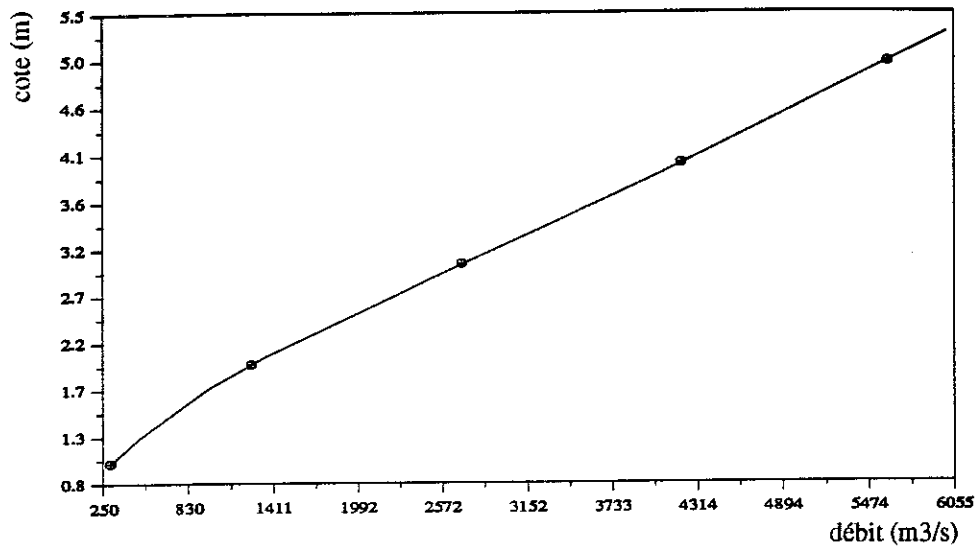


Figure IX.2. (suite): 195ALLI Vic-le-Conte, sur l'Allier

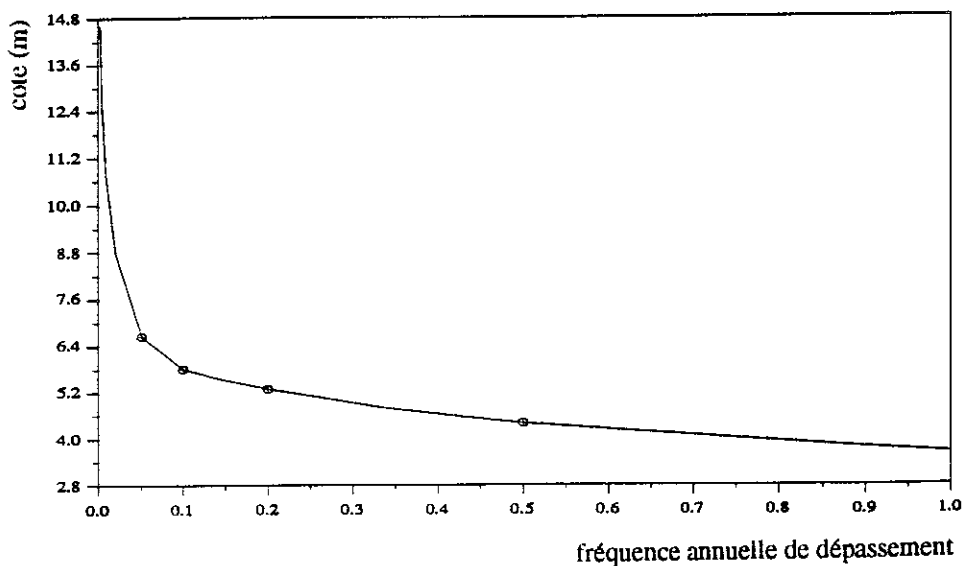
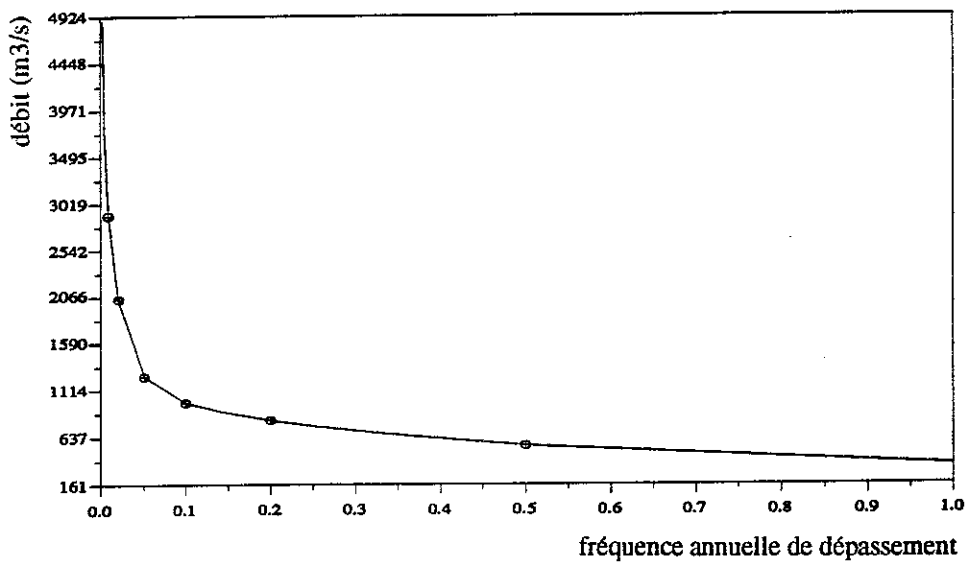
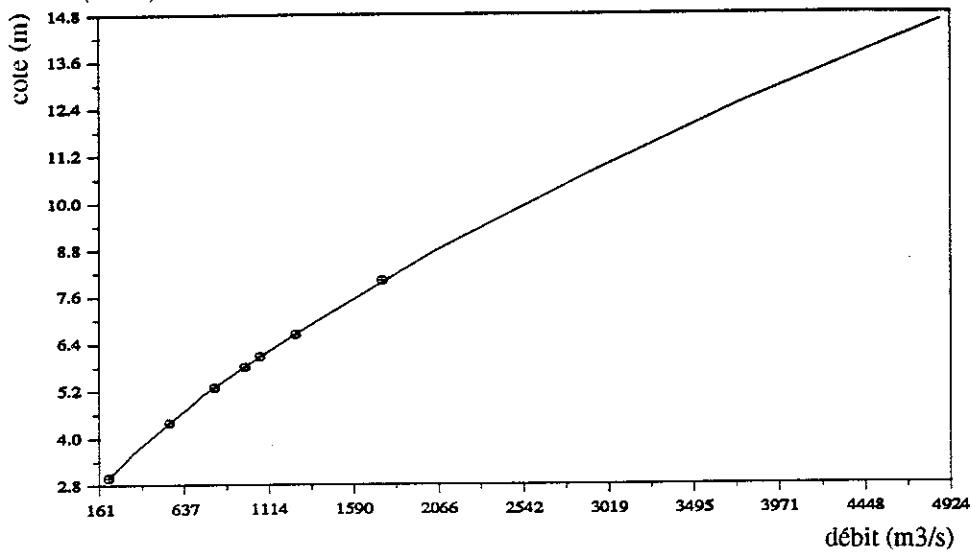


Figure IX.2. (suite): 258ALLI Vieille-Brioude, sur l'Allier

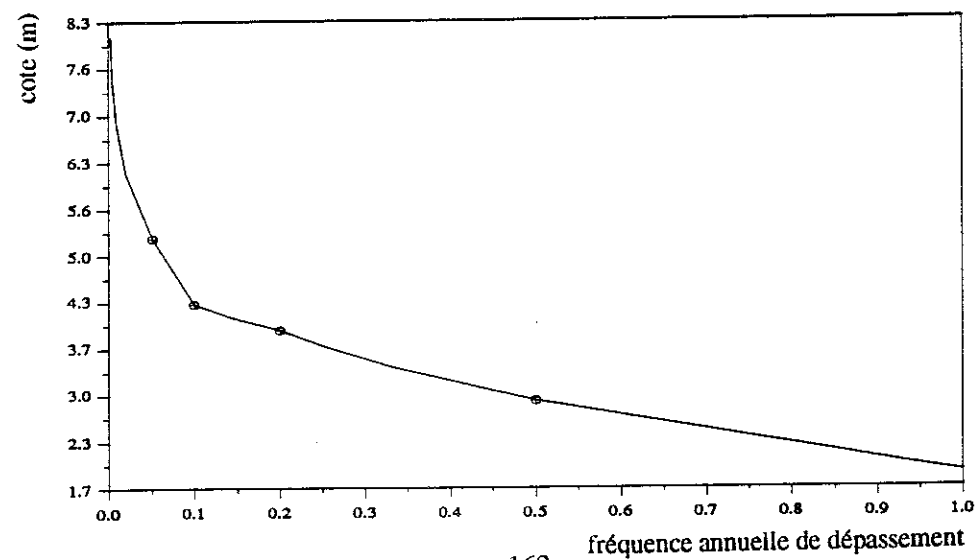
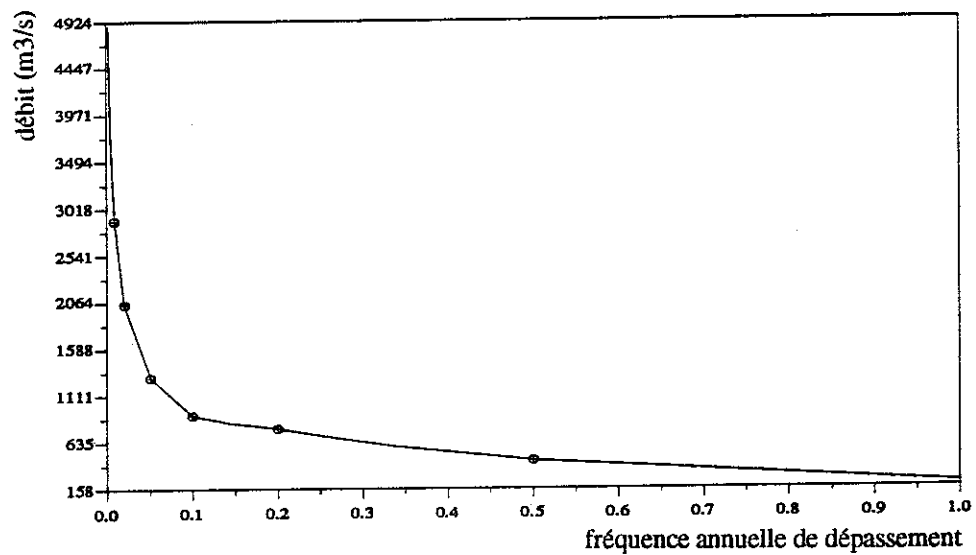
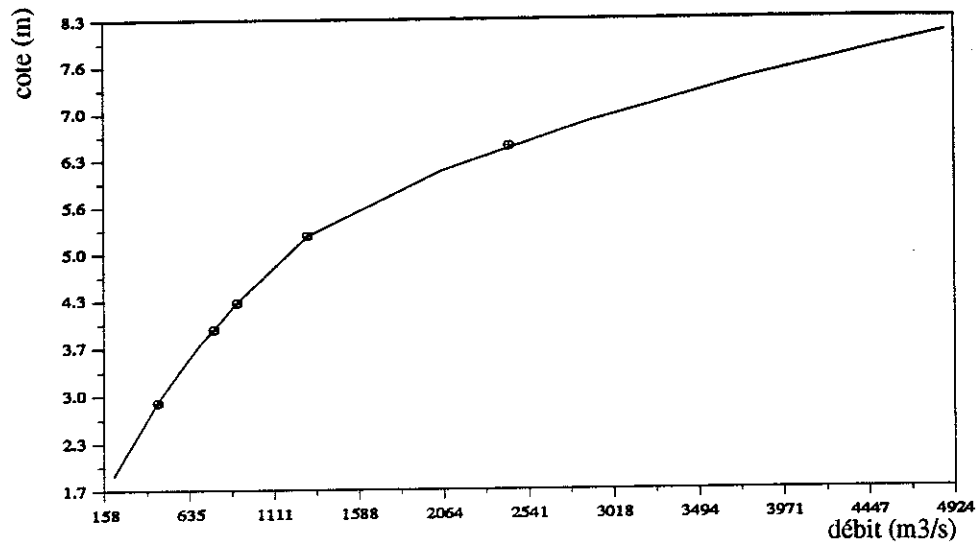


Figure IX.2. (suite): 118CHER Saint-Julien, sur le Cher

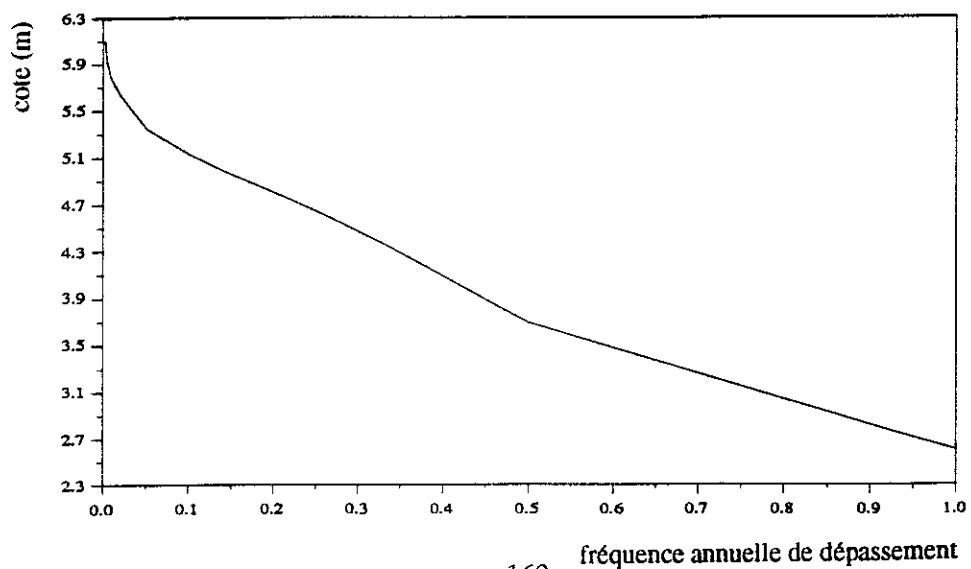
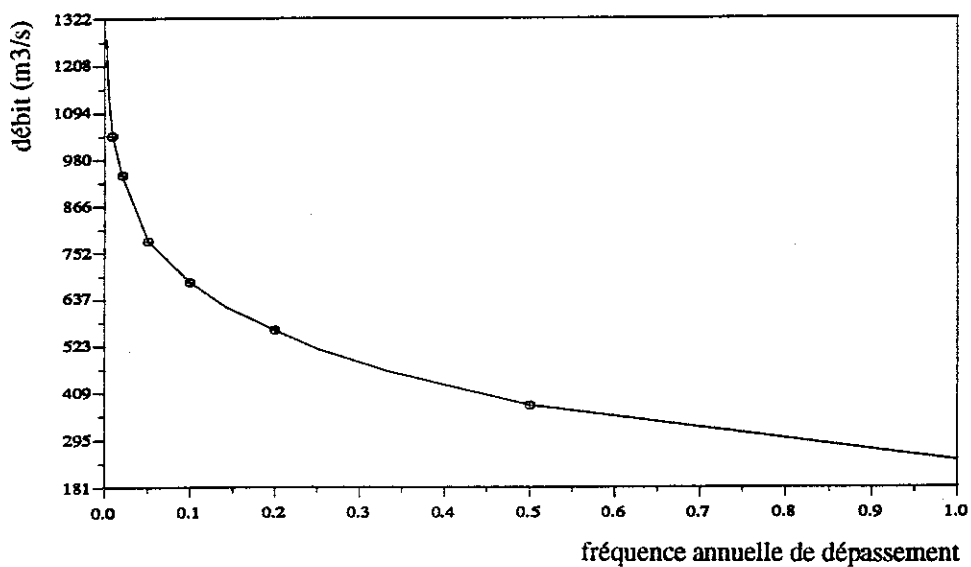
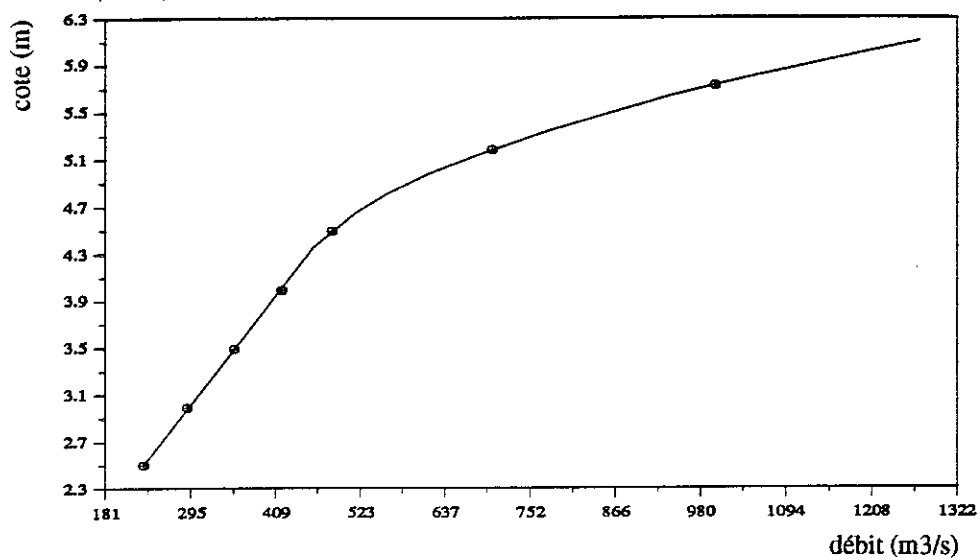
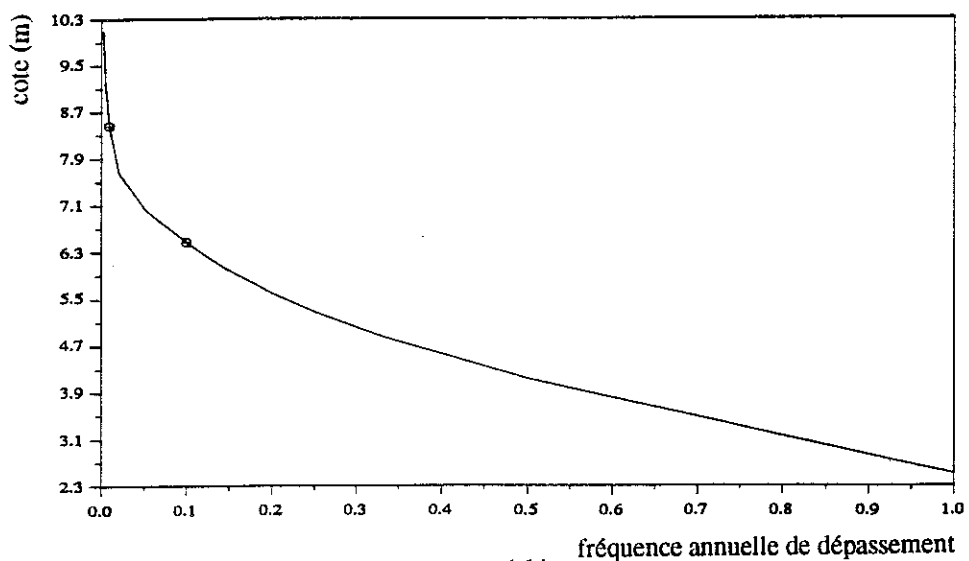
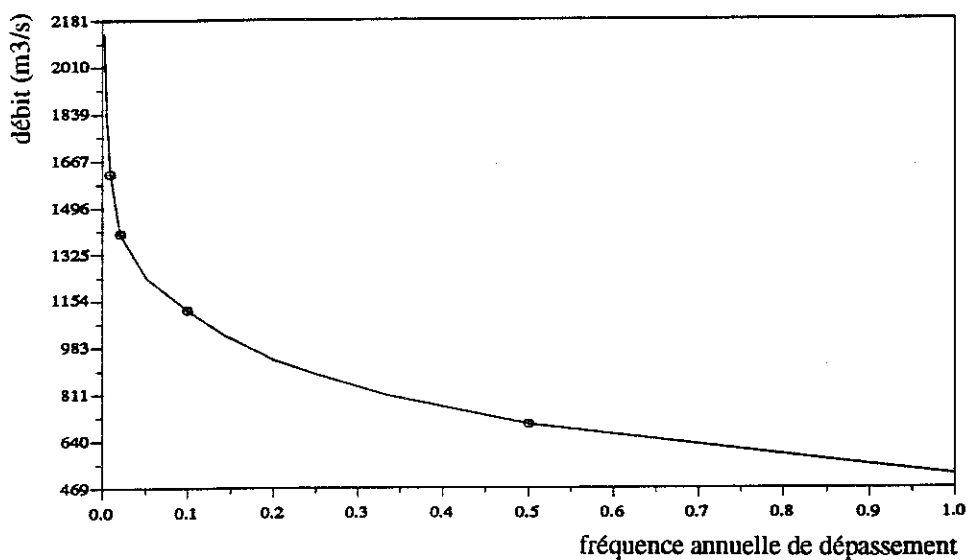
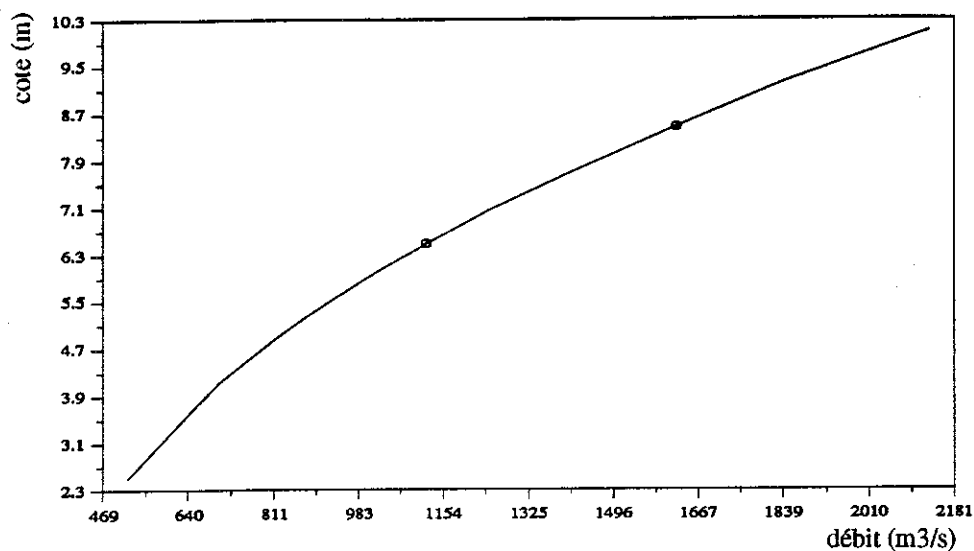


Figure IX.2. (suite): 12CREU Descartes, sur la Creuse



Par ailleurs, parmi les cours d'eau retenus, l'Arnon (département 18), l'Arroux (71), la Bourbince (71), l'Oudrache (71) et la Sèvre Nantaise (44, 49, 79, 85) ont présenté un problème important de manque de données, problème ne semblant pouvoir être résolu que par la réalisation d'études techniques hors de propos. Ces cours d'eau, ainsi que les parties de cours d'eau situées dans les 3 départements n'ayant pas été retenus (Allier dans la Lozère, Mayenne dans la Mayenne), ont donc été écartés de l'aire d'étude (ainsi que, en conséquence, le département de la Vendée concerné seulement au titre de la Sèvre Nantaise tout comme le département des Deux-Sèvres).

S'agissant là de zones situées à des "extrémités" amont de l'aire d'étude, le fait de nous concentrer sur les autres zones ne nuisait pas à la continuité géographique, et permettait d'assurer une meilleure efficacité qualitative du recueil effectué. Par contre, il est certain que, dans l'aire d'étude, les cours d'eau les plus petits n'ont pas une représentativité correspondant à leur linéaire dans les réseaux hydrographiques, ceci d'autant plus qu'ils sont moins étudiés, moins "mesurés" et donc moins connus (les conséquences de leurs débordements sont également moins importantes).

Globalement, les données utilisables (par le modèle local) et critiquées concernent 245 secteurs dans 52 biefs. L'aire ainsi couverte correspond à plus de 2100 kilomètres de cours d'eau (équivalent aux deux rives). La carte présentée en figure IX.3 montre l'emprise géographique des données compatibles avec la mise en oeuvre du modèle local.

La liste des biefs et secteurs correspondants est donnée en annexe IX.C, ainsi que des exemples de cartes présentant une vision schématisée des secteurs pour la Loire moyenne et aval, ainsi que pour le Cher amont. La figure IX.4 présente une localisation des biefs concernés. Pour un état d'avancement complet du recueil et de la critique, on peut se référer à l'annexe IX.D.

IX.2.2. La base de données ZONINOND et son environnement

Pour l'archivage, la gestion et l'exploitation des données recueillies sur les zones inondables, a été développée la base de données ZONINOND et un premier environnement logiciel de gestion. Cette base a été réalisée à partir du logiciel dBase III Plus, sous système d'exploitation MS-DOS (micro-ordinateur compatible IBM-PC). Une description détaillée est donnée par Torterotot (1991).

Le système de base de données comprend un fichier pour les biefs inondables, quatre pour les secteurs, ainsi que des fichiers annexes fonctionnels (codages des établissements particuliers, des voies de communication, de l'origine des informations).

Les données archivées correspondent, à de légères modifications de forme près, aux questionnaires utilisés pour le recueil. Deux informations ont toutefois été ajoutées pour les différentes rubriques : la date de création ou de mise à jour des données, et l'origine des informations. Cette origine codée correspond aux combinaisons possibles de 6 sources d'informations :

- bilan d'une inondation ancienne;
- bilan d'une inondation récente;
- étude technique ancienne;
- étude technique récente;
- recensement;
- expertise.

L'origine n'a été mentionnée que lorsqu'elle nous était connue sans doute majeur. On reviendra plus loin sur les difficultés posées par l'identification et la caractérisation de l'origine des informations.

L'environnement de gestion de la base ZONINOND est constitué de logiciels interactifs (programmation dBase III Plus):

- ENTBIEF / ENTSECT : ajout, changement d'identification, destruction d'enregistrements (un enregistrement est un bief ou un secteur inondable);
- PRIBIEF / PRISECT : impression de formulaires "condensés" (bief ou secteur) à partir des données saisies.

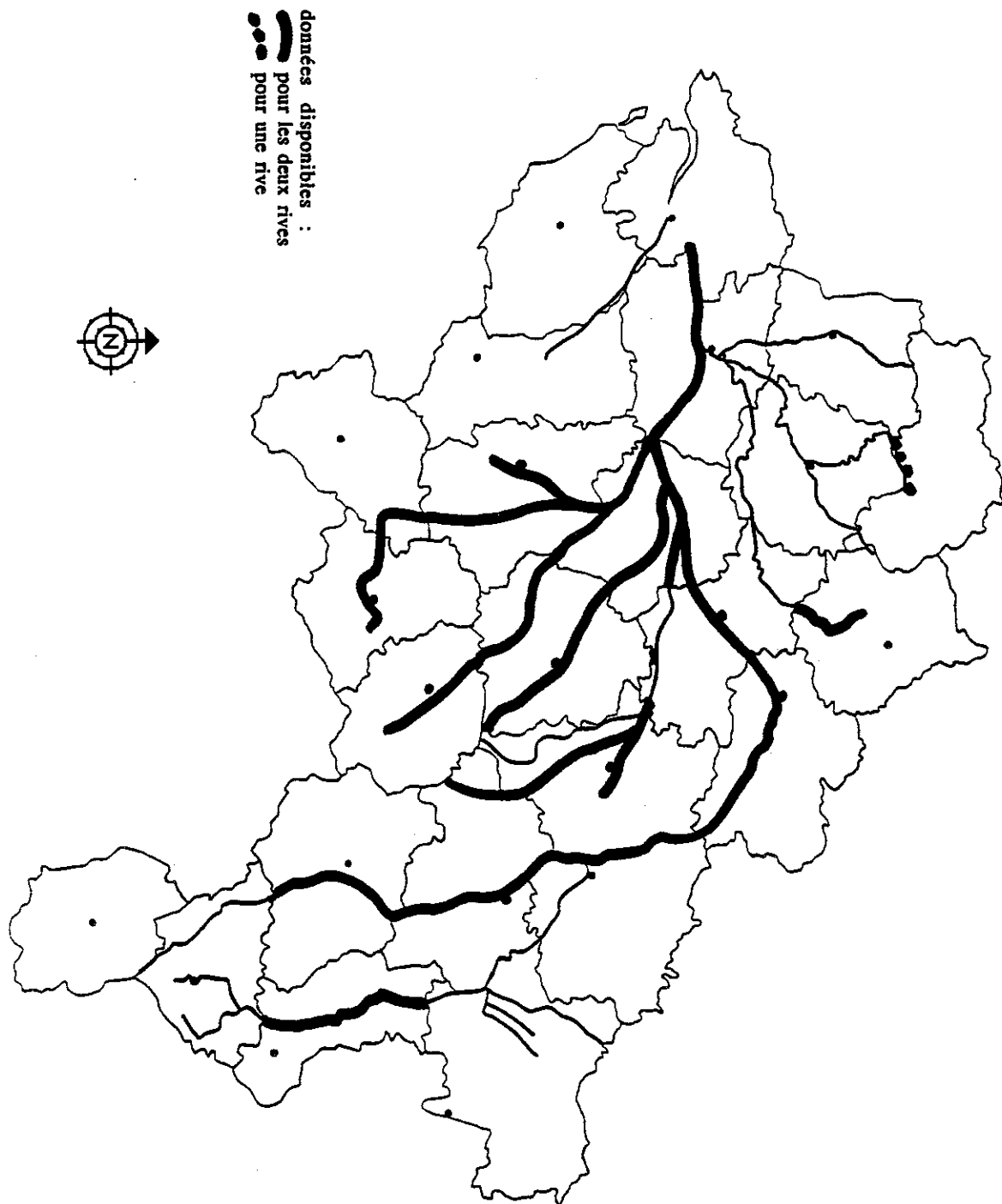


Figure IX.3. : la zone géographique couverte par les données recueillies

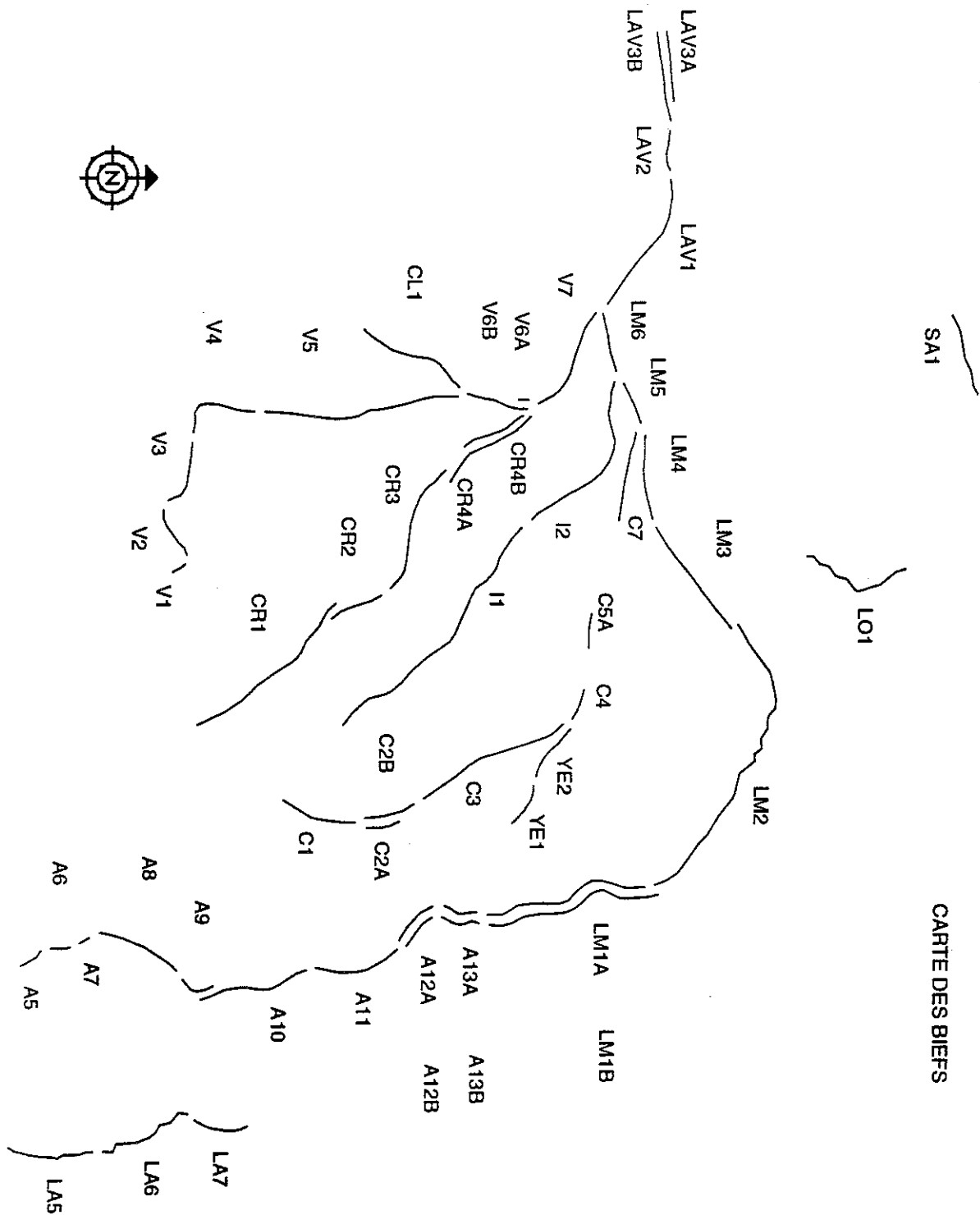


Figure IX.4. : les biefs inondables pour lesquels les données recueillies sont exploitables par le modèle local (à l'échelle de chaque secteur)

Les logiciels ENTBIEF et ENTSECT incluent des procédures de contrôle à différents niveaux:

- cohérence des différents fichiers contenant les paramètres des secteurs;
- cohérence des secteurs avec leurs biefs d'appartenance (station hydrométrique de rattachement, coordonnées géographiques...);
- affichage à l'écran de la signification des codes utilisés (origine des informations, établissements particuliers, voies de communication);
- contrôle interne des données saisies (nature des variables, vérification des sommes de pourcentages, respect de valeurs limites absolues...) et mise en forme des tableaux (rangement par valeurs croissantes -en niveau de crue, surface...- et regroupement des lignes inutilisées en bas de tableau);
- possibilité de revenir en arrière sur une variable avant de changer d'écran de saisie.

Les logiciels PRIBIEF et PRISECT permettent de lancer des impressions à l'unité ou en série, pour tous les biefs d'un département ou d'un cours d'eau, ou pour tous les secteurs d'un bief.

Par ailleurs, on a développé des structures de bases de données et des outils de calcul permettant de réaliser les différentes étapes de traitement pour la mise en oeuvre du modèle:

- la base de données STATION regroupe les données relatives aux stations hydrométriques, extraites des données "bief" de ZONINOND par une procédure interactive d'enregistrement et de réactualisation; le programme TRTM (annexe VIII.A) établit ou modifie les tableaux T-Q-H et constitue la partie essentielle du sous-modèle hydrologique;
- les bases de données SECTMHYD, SECTMOCS et SECTMCRU sont créées à partir de ZONINOND, et regroupent toutes les données nécessaires aux sous-modèles hydraulique (qui utilise SECTMHYD et SECTMCRU), d'occupation des sols (qui utilise SECTMOCS et les résultats du sous-modèle hydraulique), de dommages (qui utilise SECTMCRU et les résultats des autres sous-modèles); ces bases de données sont établies et réactualisées par extraction des données de ZONINOND et STATION, selon une procédure qui a notamment pour rôle d'identifier le type hydraulique du secteur (en fonction de sa nature et des données permettant de caractériser les mécanismes de submersion), d'attribuer d'éventuelles valeurs par défaut (voir VIII.6), de définir systématiquement toute intensité de crue par une cote en utilisant le sous-modèle hydrologique.

Les bases de données SECTMHYD, SECTMOCS et SECTMCRU intègrent les résultats du sous-modèle hydrologique (voir l'annexe VIII.E) et le traitement initial des données. Ce phasage des traitements est dû au fait que le sous-modèle hydrologique est relatif à des stations hydrométriques, communes à un grand nombre de secteurs, et que le traitement initial se situe à l'amont du cadre strict de la modélisation: même s'il est conditionné par la modélisation, il ne supplée qu'à des lacunes de données nécessaires. La figure IX.5 présente un organigramme de l'ensemble de la structure informatique.

IX.2.3. La mise en oeuvre du modèle local

Le modèle local a été mis en oeuvre sur l'ensemble des 245 secteurs intégrés dans la base de données ZONINOND. L'annexe IX.E présente des résultats du modèle par bief sur une schématisation cartographique (voir figure IX.4): d'une part les coûts globaux pour des crues de période de retour 2, 10, 100 et 500 ans, et le CMA, d'autre part la décomposition des coûts en pourcentage selon les rubriques "dommages directs à l'habitat", "dommages directs aux activités", "pertes de cultures", "pertes d'exploitation aux activités".

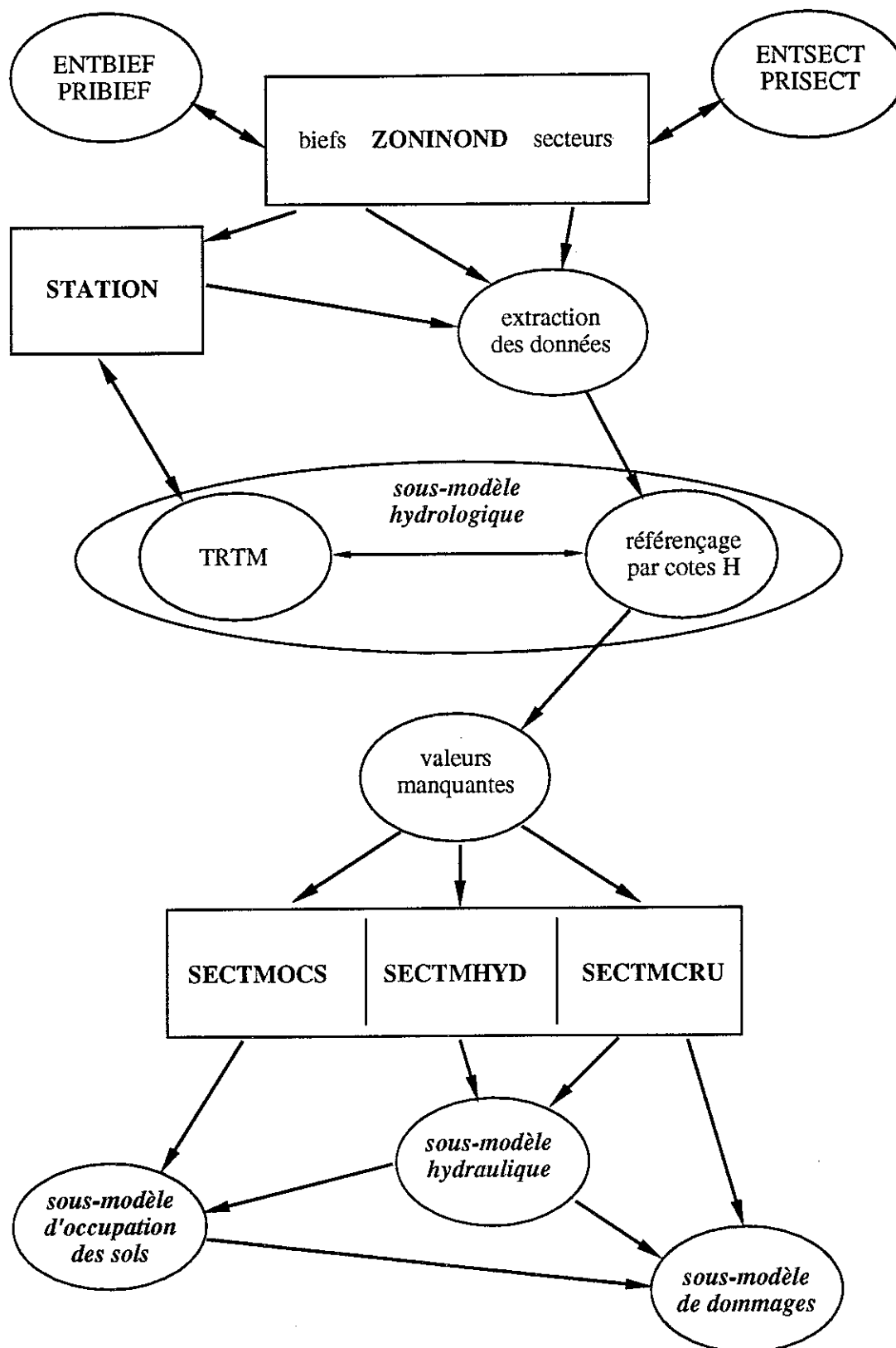


Figure IX.5. : organigramme de la structure informatique mise en place

Ces résultats appellent divers commentaires:

- on ne saurait considérer ces valeurs de coûts sans prendre en compte les faits que 1°) seule une partie des dommages est estimée (voir VIII.5) 2°) que l'incertitude est très forte (voir chapitre X) et constitue un facteur primordial pour toute utilisation de tels résultats;
- les bases sur lesquelles on estime les coûts élémentaires aux activités n'ont pas été validées dans l'état actuel de nos travaux (voir annexe VIII.D); les coûts aux activités doivent par exemple être considérés avec d'autant plus de prudence qu'ils apparaissent constituer une part importante des coûts estimés;
- le calcul d'un coût pour des crues rares, par exemple de période de retour de 200 ans, repose sur une extrapolation mathématique des différents paramètres au-delà des valeurs que l'on a pu estimer dans la réalité; les estimations en sont d'autant plus fragiles.

Dans ces conditions, on ne saurait envisager qu'une analyse qualitative de ces résultats. Ceux-ci illustrent en effet un aspect important par rapport à la prise de décision intégrant des événements aléatoires (voir notre discussion en III.3): en fonction du cadre de décision, de la question posée... on sera amené à considérer soit des valeurs de coûts correspondant à des événements de fréquence déterminée, soit le CMA. Or ce choix n'est pas neutre, ni a priori sur le plan théorique, ni a posteriori en ce qui concerne les résultats.

Ainsi, si l'on considère les cinq coûts les plus élevés parmi les 52 biefs inondables étudiés, on sélectionne les biefs suivants:

- pour le coût d'une crue biennale (période de retour 2 ans): YE1, LAV3A, V5, LAV2, I2;
- pour le coût d'une crue décennale: CL1, V5, V6B, LAV3A, CR2;
- pour le coût d'une crue centennale: LM2, A10, LA7, LM3, LM4;
- pour le CMA: LM2, YE1, A10, LA7, CL1.

Malgré les précautions à prendre pour considérer ces coûts, il n'en demeure pas moins que la prise en compte de l'aléa doit se faire d'une façon qui soit cohérente avec le cadre de décision, car le choix d'un critère de type "coût centennal" ou "CMA" influe beaucoup sur les enjeux que l'on va identifier. Si une politique ou un projet agit sur toute la gamme des crues, il serait incohérent de concentrer son attention sur les biefs présentant un fort coût "centennal". Si l'on comparait des unités plus petites, comme c'est le cas des secteurs, cette variabilité des relations "fréquence - coûts" ne pourrait qu'être plus forte.

Comparons par exemple les biefs LAV1 et LAV3A d'une part, LM2 et YE1 d'autre part (figure IX.6):

- LAV1 Loire entre les confluent de la Vienne et de la Maine (département du Maine-et-Loire);
- LAV3A Loire non influencée par l'Océan Atlantique dans le département de Loire-Atlantique (rive droite à l'amont de Oudon);
- LM2 Loire dans le département du Loiret
- YE1 Yèvre à l'amont du confluent de l'Auron (incluant Bourges, département du Cher).

Malgré des courbes "fréquence - coûts" différentes, les biefs LAV1 et LAV3A présentent des CMA respectifs de 49 et 48 (en millions de Francs), les biefs LM2 et YE1 de 151 et 136.

Figure IX.6. : relations entre fréquence de dépassement de la crue et coût des dommages sur des biefs inondables

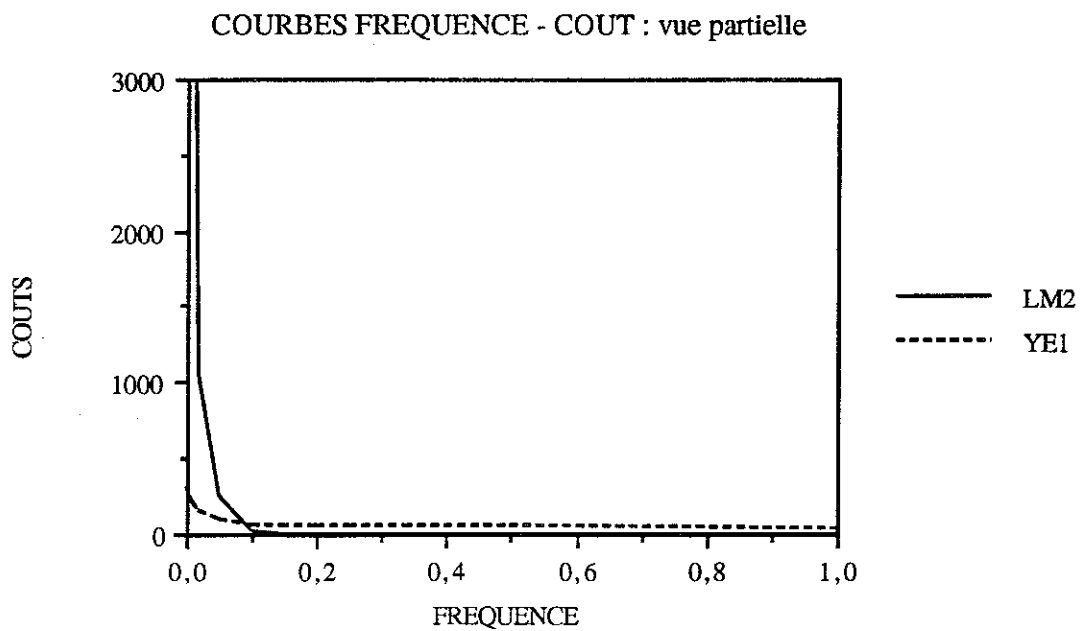
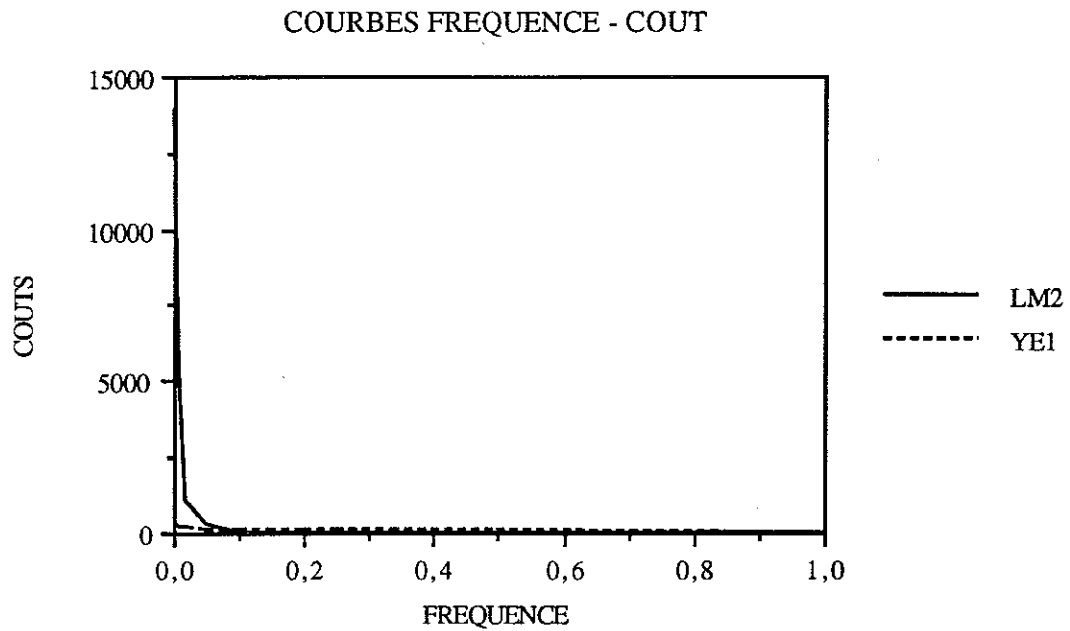
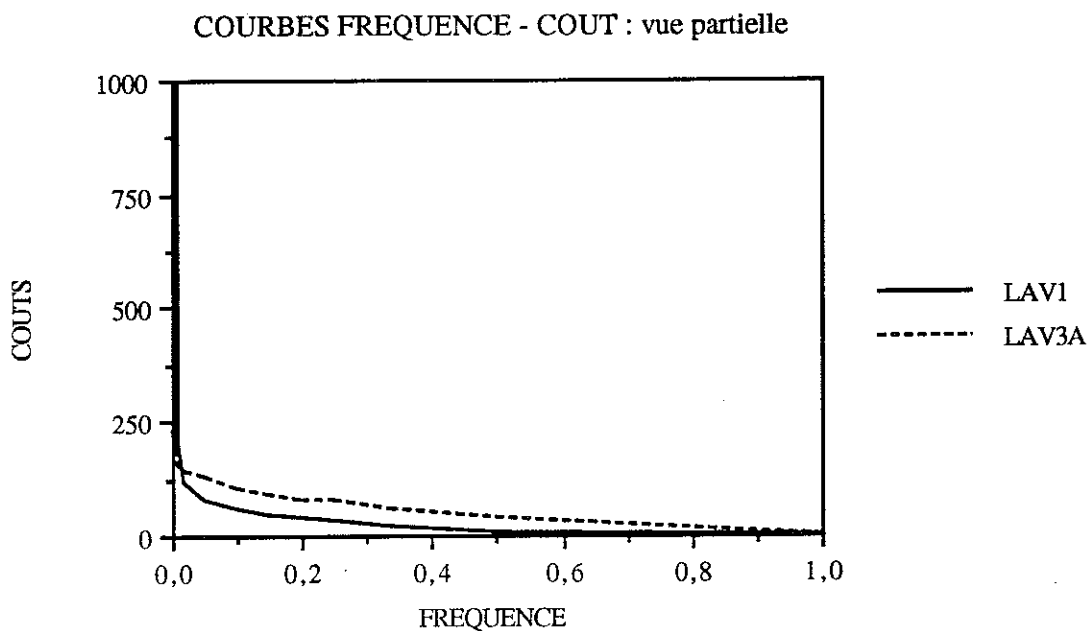
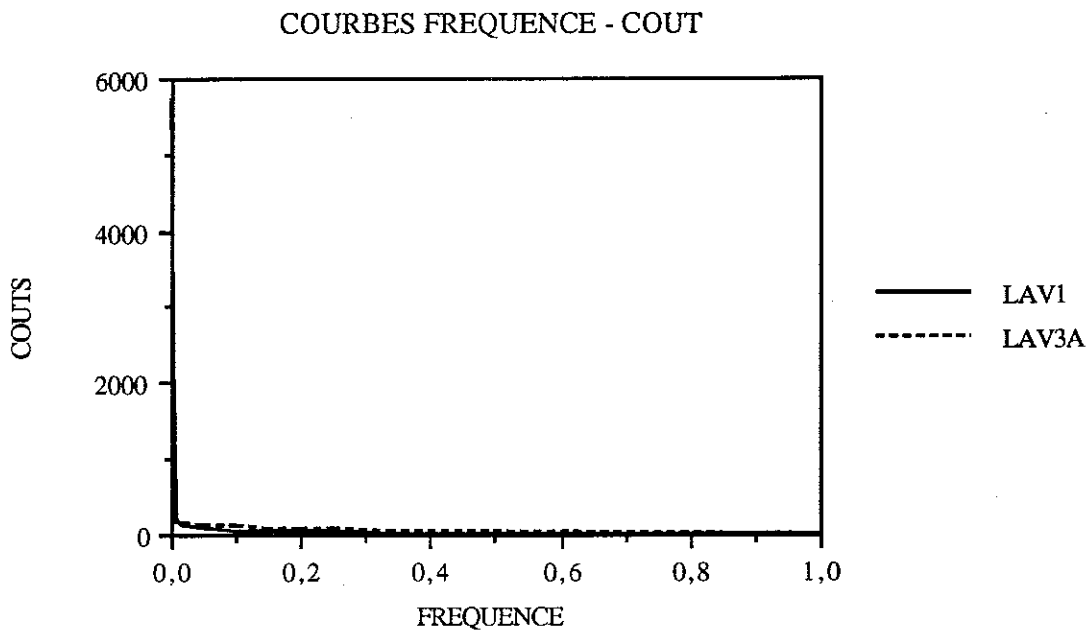


Figure IX.6. (suite)



IX.3. LES SOURCES D'ERREURS ET D'INCERTITUDES: CRITIQUE GENERALE DES DONNEES

On présente ici, pour les différents types de données recueillies, les origines des informations, les modes de détermination, les incertitudes qui en obèrent la validité. Les quantifications avancées pour les incertitudes doivent être considérées -au stade actuel- comme des propositions à valider.

En effet, on ne dispose pas d'éléments permettant réellement de quantifier les incertitudes, pour les raisons suivantes:

- les informations existantes ne permettraient pas (sauf très rarement) de réaliser deux estimations réalistes indépendantes d'un même paramètre (pour ensuite analyser les écarts);
- les différentes situations, vis-à-vis des données et de leur validité, sont extrêmement variées.

Avant d'aborder les commentaires sur les paramètres proprement dit, il faut faire quelques remarques sur le découpage de l'espace (biefs et surtout secteurs). En ce qui concerne les biefs, on peut considérer que le critère d'homogénéité (relative) hydrologique a été respecté de façon correcte, pour peu que l'on dispose d'une station hydrométrique représentative pour le bief et "documentée" (connaissance des débits -si possible- et des fréquences).

En ce qui concerne les secteurs, rappelons que les critères de découpage (à l'intérieur d'un bief) sont les suivants:

- homogénéité des mécanismes de submersion;
- homogénéité (bien sûr approchée) de la répartition des modes d'occupation des sols face à l'aléa d'inondation.

Il est bien évident que le second critère a été respecté de façon plus précise sur les zones à fort potentiel de dommages (centre ville, zone industrielle...) qu'ailleurs (zones de prairies et de grandes cultures par exemple). De surcroît, l'échelle géographique à laquelle on juge de cette homogénéité dépend des données existantes (connaissance des seuils de débordement, précision du zonage de l'inondation et des occupations des sols). En particulier, la méconnaissance de la micro-topographie rendrait inutile une tentative pour isoler chaque unité de parcelle dont le mode d'occupation serait unique.

Mais le compromis entre la précision et la faisabilité du recueil d'informations peut induire des biais systématiques, pour lesquels on pourrait ne pas compter sur une "compensation" relative des erreurs à l'échelle d'un ensemble de secteurs. En effet, sur un secteur "homogène" faisant l'objet de plusieurs modes d'occupation, dans quelle mesure peut-on justifier l'hypothèse que pour chaque crue (quinquennale ou centennale), les proportions en surface inondée de prairies, de cultures de céréales et d'habitat diffus sont les mêmes ? Suivant la topographie de la vallée et la prise en compte du risque, l'occupation des sols "moyenne" est susceptible de varier en fonction de la proximité de la rivière, sans qu'on dispose des informations permettant de prendre cela en compte. En l'état actuel des données recueillies, il n'est pas possible d'apprécier ce risque "d'hétérogénéité" de l'occupation des sols par rapport au risque d'inondation.

Concernant la question du découpage géographique et celle des incertitudes sur les données, rappelons ici un postulat de départ du recueil, qui consiste à supposer (voire à espérer !) que plus une zone est sensible aux inondations (en termes de risques économiques et sociaux), plus elle est susceptible d'être bien étudiée et connue, et plus elle sera examinée en détail au cours du recueil. Cela demanderait un travail spécifique de vérifier rigoureusement cette "relation inverse" entre les enjeux et les incertitudes relatives, même si on a pu en moyenne observer cette "rationalité" dans nos recherches d'informations et nos contacts de terrain.

Les paragraphes qui suivent regroupent les commentaires que l'on peut avancer sur les différentes données. Rappelons que les questionnaires utilisés sont présentés en annexe IX.A.

IX.3.1. Les données d'identification

Les biefs sont identifiés (outre leur numéro de code) par le cours d'eau, le département, les communes situées aux extrémités, les codes hydrologiques, les points kilométriques des extrémités (valeurs croissantes de l'aval vers l'amont, à partir du point 0,0 situé au point de confluence). Pour les secteurs, on a utilisé le code du bief (et un numéro d'ordre de secteur), les points kilométriques, la(les) rive(s) concernée(s), une description en "clair".

On peut considérer que ces données sont "justes" et suffisamment explicites, à l'exception des valeurs de points kilométriques issues de la consultation de profils en long I.G.N ou de mesures au curvimètre sur cartes (au 1/25.000° ou au 1/100.000°). On peut raisonnablement considérer que les erreurs de mesure d'excèdent a priori pas 100 à 200 mètres (du fait notamment de l'arrondi à l'hectomètre). Par contre, on ne peut pas totalement exclure une erreur de localisation d'un point particulier sur un profil en long I.G.N ou sur une carte (phénomène marginal).

IX.3.2. Les données hydrologiques et hydrauliques

* *valeurs de cote (H), débit (Q), période de retour (T, ou fréquence $F = 1/T$)*

Il s'agit ici tout d'abord des couples de points H-Q, H-T, Q-T relatifs à une station hydrométrique à laquelle se réfère un bief ou un secteur.

Les couples H-Q sont issus essentiellement de barèmes de tarage, correspondant à des relations analytiques calées sur des jaugeages. Ces barèmes extrapolent peu au-delà des valeurs mesurées, et dans certains cas les plus fortes valeurs connues ne dépassent pas un niveau de crue décennal de crue. Les données peuvent également provenir de calculs menés lors d'études techniques, de modèles hydrauliques, ou encore du rapprochement entre une cote réelle mesurée et un débit mesuré en un autre point (proche) du cours d'eau (ce débit ayant pu être "ajusté" à la station que l'on considère).

Si les erreurs de lecture de H peuvent être considérées comme faibles (de l'ordre de 1 centimètre), les erreurs relatives quadratiques moyennes sur Q dues au jaugeage, au calage d'une fonction de tarage et à une extrapolation "soigneuse" de cette relation vont de 10 à 25% en crue (suivant la méthode de jaugeage, la qualité de l'ajustement...). Des extrapolations de relations H-Q menées dans de mauvaises conditions peuvent déboucher sur des incertitudes plus fortes encore.

Sauf cas particulier, les périodes de retour T sont analysées en se basant sur des valeurs de débit de pointe de crue. Lorsque des valeurs de couples H-T (non issues du rapprochement entre les relations H-Q et Q-T) nous ont été proposées, il est fort probable qu'elles résultaient de la confrontation entre cotes H mesurées localement et périodes de retour T estimées ailleurs sur le même cours d'eau et pour la même crue. De telles données résultaient d'études techniques auxquelles nous n'avons pas toujours eu accès.

La relation Q-T, établie à partir d'une série de crues de taille variable, peut notamment provenir:

- d'une analyse fréquentielle sur Q (utilisant diverses formes de lois statistiques);
- d'une analyse fréquentielle sur les pluies ou sur les volumes de crues...

Devant l'impossibilité de quantifier les incertitudes de façon sûre et au cas par cas, on peut proposer une valeur estimative de 20% pour l'erreur relative quadratique moyenne sur la détermination de Q à T donnée pour des crues rares (périodes de retour supérieures à 20 ans), et une valeur de 10% pour des crues plus fréquentes.

Il faut ajouter ici un commentaire particulier sur la notion de "crue centennale". "Plus forte crue du siècle", ou "crue de deux mémoires d'homme"... il est fort vraisemblable que lorsqu'on se base

sur des fréquences empiriques, la valeur symbolique précise de $T = 100$ ans soit attribuée à une crue forte historique. Cela étant, on dispose d'un certain nombre d'études hydrologiques qui, par le biais des analyses de cohérence, ont dû permettre de faire la chasse aux "fréquences mythiques" présentant les erreurs les plus flagrantes.

On pourra en première approche considérer que les intensités de crues, exprimées en Q ou T présentent les mêmes degrés d'incertitudes. Pour ce qui concerne des cotes H d'événements réels relevées en-dehors de campagnes de mesure, il faut vraisemblablement retenir une erreur quadratique moyenne plus forte, de l'ordre de 5 centimètres.

* *répartition saisonnière des crues "dommageables"*

Sauf exception, cette information a été trouvée dans des études techniques, ou réestimée à partir de séries de crues. On n'a volontairement pas cherché à distinguer plusieurs gammes d'intensité de crue, ce qui -en fractionnant les séries de données- aurait conduit à des valeurs encore moins significatives (et par conséquent pas nécessairement plus "justes").

L'incertitude sur ces données dépend au premier chef de la longueur de la série de crues, longueur qui ne nous est pas connue. Pour prendre un exemple, considérons une série de n crues, que nous assimilons à autant de tirages aléatoires dans la population des crues (suivant une loi binomiale). Si p est la probabilité qu'une crue se produise au cours d'une saison donnée, on observera en moyenne $n \times p$ crues appartenant à cette saison (d'où la détermination a contrario de p), l'écart-type sur la fréquence d'apparition valant :

$$s = (p \times (1-p) / n)^{0,5}$$

Soit pour une série de $n = 40$ crues, on observe un écart-type de 3,4% pour $p = 95\%$, 7,9% pour $p = 50\%$, 3,4% pour $p = 5\%$. On voit que l'imprécision est loin d'être négligeable, notamment en valeur relative, pour les saisons peu concernées par les crues.

* *seuils de submersion/débordement*

Il s'agit ici autant de seuils de débordement (exprimés en H , Q , T) définis à l'échelle d'un secteur, que de seuils de submersion pour un nombre donné de logements, un établissement particulier, une voie de communication... Les références, pour exprimer ces valeurs, peuvent provenir d'études techniques, de crues observées... et cela conduit à des précisions variables.

La notion de "seuil de débordement hors du lit mineur" ne correspond pas à une limite univoque et indiscutable. De même, considère-t-on sur un quartier que le seuil de débordement correspond au moment où les rues sont "mouillées", au moment où les caves sont inondées, au moment où les niveaux habités (éventuellement surélevés) sont atteints ? Par conséquent, il semble pour le moins raisonnable de considérer, pour les seuils exprimés uniquement en débit Q , des erreurs relatives (quadratiques moyennes) de l'ordre de 20%, et des erreurs de 20 centimètres sur des seuils en cote H . Pour les seuils exprimés uniquement en période de retour (très rares), on propose de revenir à des valeurs de cotes ou de débits plus "parlantes".

* *seuils d'apparition des dommages*

La notion d'apparition des dommages se révèle être plus subjective encore que celle de seuil de débordement. Cela correspond-il au premier dommage même non indemnisé, au niveau à partir duquel les sinistrés se plaignent, au seuil d'alerte pour l'annonce des crues ? Il faut donc considérer ces valeurs comme des indicateurs d'une perception locale de la vulnérabilité, plutôt que comme des seuils définis de façon homogène.

* *seuils de déversement ou de rupture de digue*

Par seuil de déversement, on entend ici le niveau de crue pour lequel se produit un déversement par-dessus une digue, ou au niveau d'un ouvrage de déversement spécifique contrôlé (déversoir). Les estimations d'un tel seuil ne peuvent a priori être fondées que sur des études techniques : profils en long des ouvrages, calculs de lignes d'eau... On peut attendre alors une certaine

précision des valeurs. Cela étant, les digues comme les déversoirs peuvent être surmontés de "banquettes" en terre qui résistent à l'eau sur une certaine hauteur, puis "s'effacent" de façon quasi instantanée, offrant au déversement qui s'initie une capacité d'écoulement importante. Mais le niveau auquel débute le déversement n'est pas connu de façon précise, et il faut ajouter à cela les incertitudes dues aux études techniques mentionnées plus haut. Il semble raisonnable de tabler a priori sur une erreur quadratique moyenne (en cote) de l'ordre de 20 centimètres.

En ce qui concerne les seuils respectifs d'apparition du risque de rupture de digue et de rupture certaine, ils résultent d'estimations très subjectives, en l'absence d'études techniques spécifiques. La plupart des secteurs présentant un risque de rupture sont situés dans la vallée de la Loire à l'aval du confluent de l'Allier. Après un premier recueil local d'informations incomplètes concernant les seuils du risque de rupture, l'ensemble des secteurs concernés a été réexaminé par le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, et les seuils estimés ou critiqués en fonction des informations historiques (voir annexe VIII.B) et de l'état des digues (renforcées ou non, protégées contre l'érosion ou non...).

Par ailleurs, on a cherché à obtenir des informations sur les hauteurs moyennes de submersion, lors d'un déversement ou d'une rupture de digue. Quand on dispose de réponses, elles renvoient souvent à un événement historique unique et au champ d'inondation observé (éventuellement antérieurement à la construction des digues). Mais pour un événement de crue futur (potentiel), l'hydrogramme déversé peut être sensiblement différent, la rupture peut se produire en un autre endroit... Tout cela va se traduire par des écarts en termes de surfaces inondées et de hauteurs de submersion

* *durée de submersion pour une forte crue*

Cette information se base -sauf exception rare- sur des événements de crue historiques:

- exploitation de limnigrammes observés;
- estimation par nos interlocuteurs connaissant l'hydrologie du cours d'eau...

En dehors de l'incertitude inévitable due à ces sources, deux facteurs d'incertitudes majeurs doivent être considérés:

- cette durée peut dépendre beaucoup du seuil (en cote, en débit...) que l'on considère pour définir la submersion (seuil de "débordement" hors du lit mineur, seuil d'apparition des dommages...);
- cette durée peut être nettement différente pour deux événements de crue présentant la même cote (ou le même débit) maximum, suivant la forme du limnigramme.

Cela étant, le paramètre durée sert de base à une estimation grossière de durées de submersion pour le calcul des dommages aux cultures ou des dommages indirects (ruptures de voies de communication...). Les facteurs déterminants de ces dommages sont si nombreux et mal cernés (texture des sols, stade exact de maturation des plantes, durée de remise en état d'une chaussée...), et les durées de submersion à la parcelle si variables (par rapport à un limnigramme sur le lit mineur), que les incertitudes sur la durée de submersion définie ici sont bien en-deçà des incertitudes liées à l'exploitation de l'information.

* *surfaces inondées*

La connaissance des surfaces inondées -pour différentes intensités de crue- résulte de plusieurs sources (ou plutôt "résultent sur chaque site d'une ou deux sources parmi les suivantes"):

- contour d'une crue observée, parfois ancienne, éventuellement utilisée comme délimitation de zones réglementées (P.S.S..., avec les modifications du contour d'origine que l'on risque);
- photographies aériennes en crue;

- cartographie à partir de modélisations hydrauliques.

Le nombre de surfaces connues (non nulles) fluctue de 1 à 6, selon les secteurs. Lors de la mesure des surfaces par planimétrie, on peut estimer l'erreur relative quadratique moyenne à environ 2 ou 3%. Mais il faut ajouter à cela les incertitudes dues au report cartographique, à l'évolution des conditions d'écoulement et de la zone inondable (depuis la crue de référence)... Les surfaces connues correspondant le plus souvent à des crues rares, ces évolutions ne devraient pas avoir eu des effets trop importants (en valeur relative) sans que nos interlocuteurs locaux en aient eu connaissance. On propose de retenir une erreur relative quadratique moyenne de l'ordre de 15%.

IX.3.3. Les données d'occupation des sols

- * *répartition surfacique globale des occupations des sols (rubrique C1 du formulaire)*

Cette répartition a été estimée par identification (sur fond de carte comportant le contour de la plus forte inondation cartographiée) puis mesure des surfaces de différentes natures. L'identification s'est basée, selon les cas, sur tout ou partie des sources d'informations suivantes:

- carte géographique (plus ou moins à jour);
- plan cadastral;
- photographies aériennes;
- documents d'urbanisme;
- expertise et connaissance du terrain.

Dans quelques cas, on disposait également d'éléments tirés d'études techniques récentes (études d'aménagement, P.E.R...). Les données les plus fiables a priori émanent des connaissances de terrain, permettant "d'actualiser et d'affiner" les renseignements cartographiques. Par contre, le relevé des surfaces classées urbanisables surestime systématiquement les surfaces urbanisées, si une critique n'est pas menée pour exploiter les documents d'urbanisme. Et que dire d'une estimation par "lecture" directe d'une carte géographique, ce à quoi on a pu être réduit en l'absence d'autres sources.

Par ailleurs, l'occupation des zones inondables est susceptible d'évoluer rapidement par endroits, des cultures vers l'urbanisation ou les zones d'activités, des zones boisées ou naturelles vers les cultures ou les zones d'activités... Et le caractère dynamique (parfois important ...) de l'occupation des zones inondables obère la qualité de toutes les sources d'informations, à l'exception de la connaissance de terrain. C'est pourquoi on a tenté de donner la plus grande part possible à l'expertise et à la critique apportées par nos interlocuteurs locaux.

Dans un premier temps, on peut proposer de retenir une erreur relative quadratique moyenne sur les proportions surfaciques de l'ordre de 10 à 15% pour les zones agglomérées ainsi que les zones industrielles, artisanales et commerciales (zones a priori examinées de façon plus détaillée), de l'ordre de 15 à 20% pour les autres occupations.

En ce qui concerne l'habitat dispersé, on cherchait également une estimation de la densité de logements par rapport aux surfaces spécifiques concernées (en nombre de logements à l'hectare). Sur 107 secteurs comprenant de l'habitat dispersé, on a obtenu 36 valeurs de densité (de 0,4 à 7,1 logements/ha, avec une moyenne de 3,7 et un écart-type de 1,45). On peut considérer que, dans la majorité des cas, ces densités résultent d'une estimation directe du nombre de logements, estimation pour laquelle on avance une erreur relative quadratique moyenne de l'ordre de 10%.

* *répartition surfacique entre types de quartiers urbains et hauteur des niveaux de bâtiments occupés par rapport au terrain naturel*

Pour ce qui concerne la répartition surfacique, on peut pratiquement faire les mêmes remarques que ci-dessus, avec peut-être un recours plus grand et plus immédiat à la connaissance de terrain (mais également des cas de "lecture" directe sur une carte sans critique possible). On propose une estimation des erreurs de l'ordre de 10 à 15%.

Avec cette répartition on cherchait également à estimer la distance moyenne entre les premiers niveaux occupés des bâtiments (niveaux habités en ce qui concerne l'habitat) et le terrain naturel. Sur 125 secteurs concernés par l'habitat aggloméré, on a pu recueillir des estimations de hauteurs moyennes pour 32 cas. L'incertitude sur ces valeurs est a priori forte, ce d'autant plus si l'on y intègre la "micro-topographie" du sol naturel, micro-topographie qui a une influence importante sur l'altitude des bâtiments.

* *nombre de logements exposés/présents*

On dispose ici de valeurs pour 68 cas sur 170 concernés, ces valeurs pouvant se réduire à la connaissance du niveau de crue en-dessous duquel "zéro" logements sont touchés (en soi, c'est une information fort utile). Issues de la connaissance de terrain ou d'approximations grossières (ou d'études techniques, dans des cas marginaux), ces valeurs peuvent être considérées comme présentant une erreur relative quadratique moyenne de 15% pour les grandes valeurs, de quelques unités pour les petites valeurs provenant de "comptages".

* *nombre d'exploitations agricoles*

Cette information est très difficile à établir (hormis peut-être le seuil correspondant au nombre "zéro"), et n'a pu être estimée qu'à partir de rares études techniques et surtout de la connaissance du terrain. On peut estimer l'erreur potentielle à quelques unités.

* *répartition surfacique des cultures*

En matière d'occupation des sols, il s'agit vraisemblablement ici de la donnée la moins fiable en moyenne. Dans quelques cas seulement, on a pu utiliser des données issues de recensements spécifiques détaillés ou d'études techniques. Sinon, les sources d'informations relevaient de l'expertise et de la connaissance de terrain (a priori moins précises que pour l'habitat, à notre échelle de travail), ou correspondaient aux résultats -éventuellement critiqués- du Recensement Général de l'Agriculture (R.G.A; Ministère de l'Agriculture et de la Pêche) de 1988.

Or, le R.G.A est établi sur les limites communales et cantonales (en se référant à la localisation du siège de l'exploitation agricole auxquelles sont rattachées les parcelles), ainsi que pour des régions agricoles. Lorsque les données R.G.A ont été exploitées par nos interlocuteurs locaux, une critique réelle a pu plus ou moins s'exercer. Mais dans plusieurs cas, l'estimation a dû être faite par nous "à l'aveugle", en considérant soit des communes centrées (et si possible contenues en bonne part) dans la zone inondable, soit de préférence une région agricole correspondant à la vallée.

Par ailleurs, la répartition des cultures -hors cultures permanentes (vergers) et à haut revenu (cultures maraîchères, florales...)- fluctue dans le temps en fonction des tendances générales à l'intensification, des conditions climatiques dans les mois précédents, des cours des produits sur le marché. Cette évolution peut, localement, jouer de façon importante à l'échelle d'un petit nombre d'années.

Pour des cultures majoritaires (représentant plus de 30% des surfaces agricoles), il semble falloir compter avec une erreur absolue de l'ordre de 10%, pour les autres cultures avec une erreur relative de l'ordre de 30%.

* *établissements particuliers et voies de communication*

Les sources de données sont très variées, pour ce qui concerne les établissements particuliers et les voies de communication:

- analyse des cartes géographiques des zones inondables;
- études techniques;
- plans départementaux d'annonce des crues;
- fichier SIRENE (I.N.S.E.E) des entreprises;
- comptages de trafic;
- connaissance du terrain.

Les sources d'incertitudes sont a priori de 3 ordres, et leur quantification est pour le moins problématique:

- oublis d'établissements ou de voies de communication;
- erreurs sur la détermination de la "taille" (surface, desserte, trafic...), ou très souvent absence de cette donnée;
- erreur (et encore plus souvent absence) sur le seuil de submersion (cf. plus haut le paragraphe IX.3.2 sur les données hydrologiques et hydrauliques).

Par ailleurs, en ce qui concerne les établissements particuliers, il est apparu nécessaire d'utiliser un codage. Et l'affectation d'un code à un établissement donné peut engendrer une "simplification" de la réalité, voire une "modification" lorsque le code correspondant à la nature d'établissement la plus proche est mal adapté.

Si la quantification des différents trafics est une donnée existante pour un grand nombre de voies de communication, par contre la part du trafic qui peut être arrêtée ou détournée est rarement déterminable. Il en va de même pour la longueur moyenne du détour provoqué suite à la fermeture de la voie de communication.

X. L'ANALYSE DES INCERTITUDES DANS LE MODELE LOCAL

Ainsi d'après nous, l'homme qui aurait l'impression de ne se tromper jamais se tromperait toujours.

Bachelard, 1977, p. 240

Nous avons souligné, au chapitre III, l'importance majeure de la prise en compte des incertitudes dans le cadre d'une décision: ces incertitudes peuvent conduire soit à modifier une décision par rapport à une situation "déterministe" où tout serait connu, soit à repousser une décision dans l'attente d'éléments d'informations permettant de réduire l'indécidabilité. Cette question se pose d'autant plus que le modèle local d'évaluation des dommages, présenté au chapitre VIII, constitue a priori une description grossière de la réalité, et utilise des données d'entrée ayant un niveau de précision peu assuré.

L'incertitude à laquelle on s'intéresse ici est celle qui résulte des erreurs dues à la mise en oeuvre du modèle local pour l'estimation du coût lié à une inondation donnée, et non celle qui relève du caractère aléatoire des événements d'inondations (Lund, 1991). Ces erreurs sont de plusieurs natures (Tung et Mays, 1981; Kauark-Leite, 1990; Lund, 1991):

- erreurs sur les valeurs des données d'entrée, dues à la mesure elle-même, ou à la représentativité par rapport aux échelles spatiale et temporelle considérées;
- erreurs sur les paramètres du modèle;
- erreurs dues à la résolution numérique;
- erreurs dues à l'inadéquation du modèle.

Les deux premières catégories d'erreurs sont celles qui font l'objet de la majorité des analyses, à partir notamment de méthodes que l'on évoquera plus loin. Les erreurs que l'on est susceptible de rencontrer dans notre modèle relèvent des première et quatrième catégories, éventuellement de la deuxième (choix et utilisation de valeurs par défaut), la résolution numérique n'intervenant pas ici.

En préliminaire à une analyse plus formalisée des incertitudes, ce chapitre débute par la présentation des principales conclusions de la comparaison d'un prototype du modèle avec les résultats de simulations hydrauliques numériques, sur des secteurs de vallée réels. Cette comparaison, réalisée au CERGRENE dans le cadre du stage de fin d'études de J.O Ziegler à la Technische Universität München (République Fédérale d'Allemagne; Ziegler, 1991), a permis d'affiner certaines composantes du modèle et d'estimer des ordres de grandeur sur certaines erreurs partielles.

Par la suite, on présente le choix méthodologique retenu pour l'étude des incertitudes, et un examen des sources d'incertitudes en vue de cette analyse. Pour finir, on caractérise les incertitudes à partir d'une simulation spécifique des erreurs par la méthode de Monte-Carlo.

X.1. LA CONFRONTATION D'UN PROTOTYPE DU MODELE LOCAL AVEC LES RESULTATS DE CALCULS DE SIMULATION HYDRAULIQUE

X.1.1. Les objectifs

Pour les différentes composantes du modèle décrit au chapitre VIII, on se base soit sur des descriptions directes correspondant aux variables d'entrée (occupations des sols, par exemple), soit sur des formes de lois empiriques communément admises (hydrologie), soit sur des hypothèses de modélisation qui bien qu'apparaissant "raisonnables" sont surtout conditionnées par les données et

indicateurs disponibles. Ce dernier cas correspond typiquement à la plus grande partie du sous-modèle hydraulique (la problématique du risque de rupture a déjà été commentée par ailleurs).

En particulier, l'estimation des surfaces inondées et des hauteurs de submersion reposent sur deux postulats dont on ne peut juger la validité a priori:

- A - les lignes d'eau en crue (pour le lit mineur) sont parallèles sur les secteurs dépendant d'une même station hydrométrique; en corollaire, le niveau de l'eau est horizontal perpendiculairement à l'axe du cours d'eau;
- B - on peut estimer les surfaces inondées sur un secteur par interpolation et/ou extrapolation, en calant des fonctions analytiques données sur les couples de valeurs "cote-surface" connus.

Les objectifs de la démarche entreprise étaient d'estimer des ordres de grandeur des erreurs induites par ces hypothèses, en particulier les erreurs sur les estimations de coûts (pour une crue d'intensité donnée, ou le coût moyen annuel CMA), et de choisir une forme analytique de la relation "cote-surface" (voir VIII.3). Pour pouvoir considérer un nombre de crues compatible avec la discrétisation que le modèle local réalise sur les secteurs inondables, on ne pouvait se baser sur des crues réelles en un même site (ce d'autant plus que l'on n'aurait -sauf exception- pas pu disposer de données détaillées). Nous avons donc choisi de confronter ces hypothèses du modèle local aux résultats d'un modèle de calcul hydraulique, dont on peut attendre a priori un niveau de précision supérieur à celui du modèle local.

Pour des raisons pratiques, il aurait été très lourd de mettre en oeuvre nous-mêmes un modèle hydraulique sur des sites réels. La démarche pouvait alors s'appuyer sur deux approches différentes:

- mettre en oeuvre un modèle hydraulique sur des cours d'eau (lits mineur et majeur) "théoriques", dont on pouvait faire varier les caractéristiques de façon "abstraite";
- établir les comparaisons sur des sites réels, en considérant des résultats de modélisation existants.

Si la première approche permettait de maîtriser la mise en oeuvre du modèle hydraulique, en revanche elle offrait moins de garantie quant à la représentativité des résultats par rapport à des vallées inondables réelles (représentativité qui ne peut, de toutes les façons, être que très relative). Les erreurs d'un modèle hydraulique étant a priori d'un niveau inférieur à celles de notre approche, la maîtrise de la mise en oeuvre nous est apparue comme un critère secondaire. De surcroît, en considérant des vallées "théoriques", on peut imaginer toutes les morphologies sans aucun critère de réalisme.

A la lumière de ces différents éléments, on a donc choisi de comparer les hypothèses A et B aux résultats réels d'un modèle hydraulique, ces deux hypothèses étant intégrées dans un "prototype" de notre modèle local.

X.1.2. L'aire d'étude et les données de référence

On s'est basé sur une étude hydraulique de propagation des crues sur la Loire, entre le barrage de Villerest et le confluent de l'Allier (du bief LA7 inclus au bief LM1A exclus; voir les cartes des figures IX.1, IX.3 et IX.4), réalisée par la société Hydratec (1988-a; 1988-b). Les données nécessaires nous ont été transmises par le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, dont l'assistance et les conseils ont été très précieux.

Les secteurs de référence

Sur cette aire d'étude, nous avons considéré quatre secteurs, délimités sur les seuls critères de morphologie du champ d'inondation, en recherchant le plus grand linéaire "homogène" possible (par souci de représentativité):

- "gorges": lit mineur pentu à faible sinuosité, sur une longueur de 8,8 kilomètres, avec un

lit majeur d'une largeur moyenne de 750 mètres (le terme de gorges doit être pris dans un sens relatif, par rapport aux autres secteurs, pas dans l'absolu);

- "méandres basculants": lit mineur méandreux, situé en pied de côteau alternativement en rives droite et gauche, sur une longueur de 23,8 kilomètres, avec un lit majeur d'une largeur de 1000 à 3000 mètres;
- "festons": lit mineur méandreux sur une longueur de 33,8 kilomètres, avec un lit majeur d'une largeur de 2000 à 5000 mètres en deux terrasses, la première terrasse étant modelée par des bras morts entrecroisés (d'où une apparence de "festons");
- "méandres tendus": lit mineur avec des méandres étirés, sur une longueur de 29,3 kilomètres, avec un lit majeur d'un largeur de 1500 à 2800 mètres.

Ces quatre secteurs sont rattachés respectivement à l'une des trois stations hydrométriques suivantes: Villerest, Gilly, Imphy.

Le modèle hydraulique de référence

Ce modèle simule un écoulement filaire en régime transitoire, en considérant trois "lits" et leurs échanges: lit mineur, lit majeur actif (avec un écoulement longitudinal), lit d'expansion. Il considère un noeud de calcul tous les 350 mètres, en interpolant la géométrie des lits à partir de profils établis tous les 1500 mètres (pour le lit mineur, densité plus faible pour le lit majeur). Huit crues ont été simulées, dont les débits de pointe sont tels que le premier est un peu supérieur au seuil de débordement hors du lit mineur, et que le huitième correspond environ à une période de retour de l'ordre de 130 ans.

Les sorties du modèle que nous avons utilisées sont les suivantes:

- cotes de l'eau en chaque point de calcul, pour les huit crues;
- largeurs de miroir pour chacun des trois "lits" et pour chaque crue; ces valeurs ont été converties en surfaces, avec l'aide du Service Hydrologique Centralisateur (Monsieur Cléricy), en assimilant à un trapèze chaque zone inondable située entre deux points de calcul.

Par ailleurs, l'écartement entre deux lignes d'eau varie le long d'un secteur. On a ainsi décomposé ces secteurs en sous-secteurs plus homogènes en regard des variations des lignes d'eau, et on a reconstitué des lignes d'eau type pour tout le secteur. Ceci a été établi de telle sorte que pour des coûts de dommages qui seraient estimés à l'hectare par une fonction linéaire de la hauteur de submersion, on obtiendrait les mêmes valeurs d'une part en considérant les lignes d'eau type sur tout le secteur, d'autre part en considérant les lignes d'eau "réelles" sur chaque sous-secteur.

Le prototype du modèle local

L'objectif étant d'analyser les hypothèses A et B, avec leur influence sur les coûts, on a considéré les simplifications suivantes par rapport à une mise en oeuvre complète du modèle local:

- on se base sur la connaissance du seuil de débordement (en cote), et du couple "cote - surface inondée" pour la plus forte crue simulée (période de retour de l'ordre de 130 ans);
- la discrétisation du secteur se fait selon les crues de base de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 130 ans;
- on considère une occupation des sols uniforme, pour laquelle les dommages ne dépendent que de la hauteur d'eau; cette hypothèse est simplificatrice et un peu "théorique", dans la mesure où le seuil de submersion correspond à des crues assez fréquentes, et où on considère une gamme de fréquences étendue (ainsi qu'une gamme de cotes étendue);

- on considère que les coûts sont proportionnels à la surface touchée (sur chaque tranche de secteur), et sont estimés par trois différentes fonctions croissantes de la hauteur de submersion h ; ces trois fonctions correspondent à des formes utilisées dans la littérature pour les dommages à l'habitat, soit la fonction linéaire, la fonction sinusoïdale (Bhavnagri et Bugliarello, 1965), la fonction de Gompertz (El-Jabi, 1980); ces trois fonctions ont été calées de telle sorte que le coût soit nul pour une hauteur h nulle, et soit le même pour une valeur h de 1,5 mètre appliquée aux trois fonctions.

On a ainsi considéré les surfaces et lignes d'eau type issues soit du modèle hydraulique, soit de l'application des hypothèses A et B (par exemple les lignes d'eau estimées au droit des stations hydrométriques par leurs courbes de tarage "débit-cote").

Il faut souligner deux points qui peuvent limiter la représentativité de la mise en oeuvre de ce prototype de modèle local:

- la station de Gilly, à laquelle sont rattachés deux secteurs type, est mal simulée par le modèle hydraulique, que cela soit dû à une inadaptation du modèle sur une zone donnée ou à une forte singularité de la station;
- les fonctions de dommages considérées ne présentent pas de maximum par rapport à h , alors que l'on y applique des hauteurs de submersion importantes (pour des crues rares, sur les premières tranches des secteurs); on ne peut ainsi prétendre être représentatif pour tous les types d'occupations des sols, et a fortiori pas non plus pour toutes les occupations de secteurs; notons que les résultats sont sensibles aux différentes fonctions de coût retenues.

X.1.3. L'analyse des hypothèses

Les comparaisons effectuées entre le prototype de modèle local et les résultats du modèle hydraulique ont porté essentiellement sur les coûts des crues de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 130 ans, et sur le coût moyen annuel (CMA1, cf. VIII.5). Les erreurs ont été analysées en valeur relative, par rapport aux valeurs issues de la prise en compte du modèle hydraulique. On a également été amené à analyser directement les erreurs sur les surfaces totales inondées pour ces mêmes crues.

Par ailleurs, on ne pouvait distinguer dans l'analyse les erreurs sur chaque fréquence de crue et sur chaque type de secteur. Cela n'aurait pas eu grande représentativité. S'intéressant à des ordres de grandeur grossiers, on a été amené à considérer des moyennes sur les différentes fréquences de crues, ou sur les différents secteurs, ou les deux simultanément.

Hypothèse A: parallélisme des lignes d'eau

Pour analyser cette hypothèse, on a mis en oeuvre le prototype du modèle local en considérant respectivement les cotes hydrométriques à la station de rattachement et les cotes représentatives du lit mineur au droit du secteur (lignes d'eau type), avec dans les deux cas les surfaces estimées par le modèle hydraulique.

Selon les crues de base et les fonctions de coût considérées, l'erreur relative (issue des écarts en valeur absolue par rapport au modèle hydraulique) varie en moyenne de 22 à 52%. L'erreur relative sur le CMA varie de 33 à 54% selon les fonctions de coût. On observe ici la grande sensibilité des résultats aux formes de fonctions de coût, sensibilité exacerbée par les simplifications du modèle présentées en X.1.2.

Le prototype induit ici une surestimation des coûts, liée à une plus grande sensibilité de la relation "débit - cote" au droit des stations. Ceci intervient notamment pour deux secteurs rattachés à la station de Gilly.

Hypothèse B: relation "cote - surface inondée"

Cette analyse s'est basée sur plusieurs secteurs analysés séparément:

- les quatre secteurs type, pour lesquels on s'est basé sur les cotes représentatives (issues du modèle hydraulique);
- trois secteurs autres (CL1/1, LM1A/7, V4/2) pour lesquels on disposait de données de surfaces suffisantes, dans le but d'élargir la représentativité de l'analyse; dans ce cas, on était obligé de considérer les cotes correspondant aux stations hydrométriques de référence.

Une première phase d'analyse a consisté à faire une sélection parmi diverses formes analytiques "possibles" pour la relation "cote - surface" (H-S): fonctions linéaire, arcsinus, racine carrée, logarithme. On a ainsi retenu, au vu des relations H-S réelles, les formes linéaire et logarithmique:

$$S = a H + b \quad (26)$$

$$S = a \text{Ln} (1 + H / c) + b \quad (27)$$

avec Ln: logarithme népérien et H: cote mesurée au-dessus du seuil de débordement.

Parmi diverses formes logarithmiques possibles en fonction du paramètre c, on a retenu celle qui correspond à c = 1, car elle s'est révélée présenter les plus faibles erreurs relatives sur les surfaces (23% en moyenne, en considérant les valeurs absolues).

Pour l'analyse de l'hypothèse B, les résultats se sont révélés être clairement moins sensibles au choix de la fonction de coût (pour les quatre secteurs type). L'erreur relative moyenne (estimée sur les écarts en valeur absolue) est de 27% pour la forme linéaire S(H), 23% pour la forme logarithmique, l'erreur sur le CMA étant respectivement de 26% et 12%.

Pour les trois autres secteurs considérés, cet écart est un peu plus marqué, ce qui conduit à des erreurs relatives de l'ordre de 30% pour une forme linéaire de S(H), 20% pour une forme logarithmique.

Hypothèses A et B

On a comparé ici la mise en oeuvre simultanée des deux hypothèses au calcul de référence, qui utilise les cotes représentatives des lignes d'eau type et les surfaces issues du modèle hydraulique. On observe que les erreurs relatives moyennes (estimées sur les écarts en valeur absolue) correspondent aux ordres de grandeur suivants, selon les fonctions de coût considérées:

- 27% à 40% sur les coûts d'une crue pour une relation S(H) linéaire, 21% à 23% sur le CMA;
- 49% à 81% sur les coûts d'une crue pour une relation S(H) logarithmique, 36% à 42% sur le CMA.

En fait, la prise en compte d'une relation "cote - surface" linéaire conduit à compenser partiellement les erreurs provenant respectivement des deux hypothèses A et B. Au contraire, ces erreurs s'ajoutent pour une forme logarithmique. Si l'on pouvait considérer notre échantillon de quatre secteurs type comme représentatif, la recherche de l'efficacité devrait alors conduire à privilégier la forme linéaire. Cependant, rappelons que deux secteurs sont référencés par rapport à une station hydrométrique dont la concordance avec le modèle hydraulique est problématique.

Par ailleurs, les principes que nous avons adoptés pour le choix de modélisation sont peu compatibles avec le fait de "spéculer" sur des compensations d'erreurs. En effet, le caractère explicite du modèle devant favoriser la critique plus ou moins formalisée de la procédure et des résultats, tout comme la possibilité d'améliorer progressivement la précision du modèle, sont autant de motivations à privilégier une approche "robuste": retenir la moins mauvaise estimation des surfaces, même si cela ne masque pas une part des erreurs dues à l'hypothèse sur les lignes d'eau. Dans le cas contraire, une

amélioration de l'une des deux composantes du modèle pourrait non seulement ne pas améliorer la précision globale de l'estimation des coûts, mais éventuellement la dégrader.

Pour ces différentes raisons, nous avons retenu une forme analytique logarithmique pour la relation "cote - surface" S(H):

$$S = S^* \frac{\text{Ln}(H+1)}{\text{Ln}(H^*+1)} \quad (28)$$

avec H: cote au-dessus du seuil de début de submersion.

Par ailleurs, cette forme rend compte du fait qu'en l'absence d'endiguements, les surfaces évoluent moins par rapport à la cote lorsque le lit majeur est inondé par des crues rares atteignant le pied de coteau (ceci correspond à la situation observée pour un certain nombre de vallées).

Analyse d'autres scénarios de base pour le prototype

Le prototype de modèle local considéré correspond au niveau de connaissance "minimal" en matière de surfaces inondées: seuil de début de submersion (ici, correspondant à des crues fréquentes) et une surface inondée par une crue rare. Par ailleurs, on n'a jusqu'ici pas considéré d'extrapolation de surfaces inondées.

Lorsque l'on ajoute aux données initiales une surface intermédiaire connue, on ajuste deux relations S(H) linéaires par rapport à Ln(H+1), et les gains sur les erreurs relatives sont approximativement les suivants.

gain sur l'erreur relative	niveau de crue pour lequel on connaît une surface supplémentaire	
	crue décennale	crue cinquantiennale
pour le CMA	90%	40%
pour le coût d'une crue	35%	20%
pour une surface inondée	35%	20%

Par ailleurs, si l'on substitue à la surface unique connue pour une crue rare une surface correspondant à une crue vingtennale, les résultats sont issus d'interpolations et d'extrapolations sur les surfaces. Pour une forme logarithmique de la relation S(H), on gagne de 0 à 50% en précision, de 0 à 20% pour une forme linéaire. Ceci confirme le choix d'une relation S(H) de forme logarithmique, par rapport à des objectifs de "réalisme" et de "robustesse".

Analyse des erreurs sur les données d'entrée

Pour mettre en perspective les erreurs dues aux hypothèses A et B, nous avons établi une simulation simple des erreurs dues, cette fois-ci, aux données d'entrée: relations "période de retour - débit de pointe" et "débit - cote maximale", et valeur de la surface inondée connue. A partir de formes analytiques "théoriques" des relations Q-T, H-Q et H-S qui ont été présentées en VIII.4.2, on a introduit des erreurs sous la forme suivante:

$$Q = Q_1 \times \frac{\text{Ln}(12T)}{\text{Ln}(12T_1)} \times (1 + \sigma_q(T))^{u_1} \quad (29)$$

où Q1 = 1500 m3/s, u1 est une variable normale, et

$$\sigma_q(T) = \sigma_q \frac{\text{Ln}(12T_1)}{\text{Ln}(12T)} \times \frac{\sqrt{1 - 2\text{Ln}(T) + 2(\text{Ln}(T))^2}}{\sqrt{1 - 2\text{Ln}(T_1) + 2(\text{Ln}(T_1))^2}} \quad (30)$$

(d'après Kite, 1977; voir X.2)

$$H = H_2 \times \left(\frac{Q - Q_0}{Q_2 - Q_0} \right)^{0,5 + 0,05 u_2} \times (1 + \sigma_h)^{u_3} \quad (31)$$

où H2 = 4,1 mètres, Q2 = 2500 m3/s, u2 et u3 sont des variables normales, Q0 est le débit de la crue de période de retour de 1 an.

$$S = S3 \times \frac{\text{Ln}(H+1)}{\text{Ln}(H3+1)} \times (1 + \sigma_s)^{u4} \quad (32)$$

où $H3 = 6,4$ mètres, et $u4$ est une variable normale.

Pour différentes valeurs de σ_q , σ_h et σ_s , on a simulé des erreurs par 5000 tirages des variables $u1$, $u2$ et $u3$ (l'erreur sur S agit indépendamment des autres erreurs, et ses conséquences ont été ajoutées de façon analytique).

Lorsque les trois valeurs de dispersion sont à 20%, l'erreur relative quadratique moyenne sur le coût dû à une crue donnée vaut en moyenne 56% (de 51% à 61%), celle sur le CMA 51%. En faisant varier successivement σ_q , σ_h et σ_s , on observe que la dispersion sur le coût est sensible avant tout à la relation "cote - débit", puis à la relation "débit - période de retour", et moins à la valeur de la surface connue. Comme on l'avait observé sur les erreurs de modélisation, les erreurs des données d'entrée sur les lignes d'eau ont un poids supérieur à celui des erreurs sur les surfaces. La seule erreur due à la forme de la relation de tarage (liée au paramètre $u2$, quand σ_q , σ_h et σ_s sont nuls) induit une erreur relative quadratique moyenne de l'ordre de 12%.

X.1.4. Les conclusions en matière d'incertitudes

Les résultats de l'analyse menée doivent être considérés à la lumière de différentes remarques:

- les comparaisons et simulations effectuées ne sauraient être considérées comme représentatives de l'ensemble des situations que l'on est susceptible de rencontrer; elles conduisent à des ordres de grandeur indicatifs;
- seule une partie des sources d'incertitudes a été prise en considération; sur cette partie, les erreurs de modélisation d'une part, et les erreurs d'entrées d'autre part, ont été analysées successivement alors qu'elles devraient l'être conjointement.

Parmi les conclusions de cette analyse, reprenons les points majeurs (Ziegler, 1991). Les hypothèses A et B amènent à une évaluation des coûts et du CMA avec une erreur relative quadratique moyenne d'environ 60% (40% sur le CMA), à laquelle l'hypothèse A contribue majoritairement (elle amène des erreurs relatives moyennes de près de 50% à elle seule, contre 20% pour l'hypothèse B avec une fonction logarithmique pour la surface inondée).

En ce qui concerne le calcul d'incertitudes sur les données d'entrée, une quantification globale des erreurs d'origine de 20% conduit à une erreur relative moyenne d'environ 50% sur les coûts. Une amélioration de l'estimation des surfaces inondées fait gagner, en comparaison, le moins en précision sur les résultats. L'erreur sur l'hydrologie (période de retour - débit) porte surtout sur les coûts des crues rares. L'erreur sur la relation de tarage (débit - cote), par contre, est prépondérante sur toute la gamme des fréquences, de telle sorte que le CMA lui aussi est fortement influencé.

Les deux analyses, avec toutes les limites que nous avons soulignées, indiquent les mêmes points sensibles pour le calcul des coûts:

- l'erreur majeure provient d'une mauvaise représentativité de la station hydrométrique pour le secteur (lignes d'eau) ou de l'erreur sur la relation de tarage;
- la modélisation ou la connaissance des surfaces jouent un rôle relativement moindre pour le calcul des coûts.

X.2. LE MODE D'ANALYSE DES SOURCES D'INCERTITUDES

X.2.1. L'état de l'art

Avant de proposer une analyse d'ensemble des incertitudes dans l'évaluation des dommages dus aux inondations sur une partie de vallée, il nous a semblé utile d'évoquer quelques résultats trouvés dans la littérature scientifique, pour illustrer aussi bien l'importance de cette question que le caractère partiel de sa prise en compte (et le présent travail n'échappe pas non plus à ce caractère partiel).

Si on a fait mention des résultats de nature scientifique, c'est que dans les études d'évaluation opérationnelles les incertitudes sont très peu analysées, le plus souvent elles ne le sont pas du tout. Pourtant, il s'agit là aussi d'une préoccupation importante, même si cette préoccupation reste parfois implicite. Ainsi, des économistes du U.S Army Corps of Engineers ont organisé un séminaire consacré spécifiquement aux incertitudes dans l'évaluation des réductions de dommages liées aux projets de protection ou aux politiques de prévention contre les inondations (Davis et al, 1989).

En particulier, l'un des objectifs du séminaire était de recueillir des retours d'expérience et de dresser un état des besoins méthodologiques. Les principales conclusions que nous en avons tirées sont les suivantes:

- les sources majeures d'incertitudes, selon les phases d'études et les différentes catégories de difficultés rencontrées, concernent les données et méthodes pour prévoir les évolutions dans les zones inondables, les données décrivant les valeurs des biens exposés et les hauteurs de planchers, les connaissances en matière de courbes de dommages, la réduction des dommages non matériels;
- parmi les différentes sources d'incertitudes, il semble difficile de maîtriser (même avec des moyens financiers) celles qui portent sur les dommages intangibles ou sur les prévisions d'évolutions des zones inondables;
- l'analyse des incertitudes se fait essentiellement au travers de l'expertise, de descriptions qualitatives ou d'analyses de sensibilité; par contre, des méthodes plus élaborées et formalisées (statistiques, analyse Bayésienne...) sont rarement mises en oeuvre et il existe une demande importante d'informations sur les techniques d'estimation des incertitudes;
- au-delà de la forte conscience de l'importance des incertitudes, les avis sont partagés sur des points d'orientation plus précis (priorités..); par contre, on observe une forte préoccupation par rapport au problème de la mise en forme et de la transmission de l'information "incertitudes" vis-à-vis des décideurs.

Par rapport à ces conclusions, il nous semble important d'insister sur deux éléments de contexte qui peuvent avoir eu une influence sur ces conclusions: d'une part le séminaire ne regroupait que des économistes a priori plus conscients des faiblesses de leurs propres travaux, d'autre part le U.S. Army Corps dispose d'outils logiciels permettant de mener des évaluations distribuées à échelle fine (Penning-Rowsell et al, 1987). Dans les paragraphes qui suivent, on présente un résumé de résultats scientifiques issus de la littérature, structurés en fonction des composantes de modèles où interviennent les différentes sources d'incertitudes.

Hydrologie: relations "période de retour - débit de pointe - cote maximale" T-Q-H

L'importance de ces incertitudes sur les bilans économiques est mise en avant par de nombreux auteurs, à commencer par White (1964) et Kates (1965). Rappelons pour commencer que les "lois de fréquence" pour les crues rares résultent d'extrapolations dont la validité théorique ne peut aucunement être vérifiée, extrapolations basées notamment sur des hypothèses de stationnarité et d'ergodicité des lois statistiques (Klemes, 1989; Bouleau, 1991).

Les effets des erreurs sur les relations hydrologiques sont plus que sensibles pour le calcul des coûts:

- Macgilchrist (1985) a observé, pour des pertes moyennes annuelles sur une parcelle de maïs, des variations de +60 à +130% (suivant l'altitude de la parcelle) lorsqu'on identifie une nouvelle fonction de distribution à partir des mêmes données de débits;
- sur une analyse ex-post de projet de protection contre les crues, pour laquelle on avait ajouté depuis l'étude initiale 28 années de données hydrologiques, le ratio coût-avantage est passé de 1,16 à 0,87 (Ramirez et al 1988).

Suivant les propositions de James et Hall (1986), Bao et al (1987) puis Arnell (1989) ont analysé une méthode "améliorée" d'estimation du coût moyen annuel (CMA) des dommages: au lieu d'intégrer une relation entre la fréquence annuelle d'apparition F et le coût C des dommages provoqués par la crue de débit $E[Q(F)]$ (espérance sur l'estimation de Q), ils proposent de lier F à $E[C(Q(F))]$ (où $C = 0$ pour $Q < Q_0$). Cette approche majore les valeurs du CMA. Et par ailleurs, cela conduit à ce que les dommages, en espérance statistique, apparaissent avant le seuil déterministe de début de submersion.

Bao et al (1987) ont confronté au calcul "classique" du CMA cette approche à partir d'échantillons de crues de tailles n variables. Les valeurs CMA(n) obtenues se rapprochent du CMA "classique" lorsque n augmente (dans la mesure où le CMA classique n'intègre pas l'incertitude et correspond à une connaissance parfaite). Pour différentes lois de probabilités et différents seuils d'apparition des dommages, le CMA est majoré en moyenne de 5 à 33% pour $n = 100$, de 11 à 87% pour $n = 40$, de 44 à 490% pour $n = 10$.

Par ailleurs, l'analyse d'erreurs menée dans le cadre du stage de Ziegler (1991) a montré la sensibilité relative du calcul de coût à l'erreur sur l'hydrologie ($Q-T$, la relation $H-Q$ recouvrant à la fois le tarage de la station et la représentativité de la station pour les cotes au droit des secteurs inondables): quand l'erreur relative sur $Q(T)$ est divisée ou multipliée par 2 (de 20% à 10% et 40%, avec les autres erreurs inchangées), l'erreur relative sur le CMA est respectivement divisée par 1,1 ou multipliée par 1,4. L'erreur relative sur les crues rares est respectivement divisée par 1,2 et multipliée par 1,6.

En ce qui concerne le CMA, Arnell (1989) insiste sur la nécessité d'estimer la dispersion par un calcul d'incertitudes complet, et non en se basant sur les dispersions des coûts liés à différentes intensités de crue: un quantile donné du CMA ne correspond pas à ce même quantile uniforme sur les coûts des différentes crues. De même, l'auteur met en garde sur la très vraisemblable asymétrie de la distribution statistique du CMA, point qui nécessite des vérifications expérimentales.

Hydraulique: seuils des phénomènes, conditions de submersion par rapport au terrain naturel et par rapport aux planchers

Plusieurs auteurs ont souligné la sensibilité des coûts estimés par rapport à ces seuils, sans nécessairement illustrer quantitativement leurs propos. Macgilchrist (1985), par contre, a estimé ces effets sur les dommages moyens annuels à l'échelle d'une parcelle de maïs dans la vallée du Gers. Pour des cotes de débordement (et de début de submersion de la parcelle) augmentés de 5, 10 et 15 centimètres, on observe des réductions respectives du CMA de 16, 26 et 36%.

En ce qui concerne les surfaces, on a présenté des éléments plus haut. De façon générale, la sensibilité des coûts aux incertitudes sur les conditions de submersion (auxquels certains auteurs intègrent la connaissance hydrologique des lignes d'eau) est reconnue comme un facteur important (Soyke, 1988; Penning-Rowse et Green, 1990; Braschi et al, 1991). La micro-topographie influe sur l'exposition des biens et sur les écoulements en site urbanisé. Plazak (1986) avance l'hypothèse d'une surestimation systématique des coûts dans les approches traditionnelles, liée à l'existence de seuils pour les dommages et donc de "non compensations" d'erreurs opposées sur les hauteurs de submersion.

Si les hauteurs de submersion ne relèvent pas de l'hydraulique, elles conditionnent la hauteur "dommageable" de submersion pour une partie des dommages aux bâtiments, et sont donc associées à l'incertitude que nous analysons ici. Debizet et Caude (1986) ont simulé, sur un quartier de

Montauban, l'effet d'un déplacement vertical des planchers de -30 et +30 centimètres. Pour les maisons avec sous-sol, les dommages varient de $\pm 40\%$ pour la crue centennale, et de $\pm 16\%$ pour la crue décennale. Pour les maisons sans sous-sol, ces variations correspondent respectivement à -70% / $+130\%$ et $\pm 16\%$.

Dans l'analyse menée par Ziegler (1991) sur le mode de détermination des hauteurs de submersion, on a observé une surestimation des hauteurs h et des dommages de 30 à 50% en moyenne sur les coûts d'une crue (valeurs maximales de 80 à 300%), de 30 à 40% sur le CMA.

L'importance de ces effets dépend des formes de fonctions de dommages considérées, et l'effet des erreurs est d'autant plus critique qu'on a fait l'hypothèse pour ce dernier cas d'une implantation uniforme de l'habitat sur l'ensemble de la zone inondable. En particulier, il serait peu probable d'observer cela sur une telle amplitude en altitude. En effet, les parties basses de la zone inondable sont exposées -pour ce qui concerne les sites analysés- à de fortes hauteurs de submersion d'une part, et à de fortes erreurs sur ces mêmes hauteurs d'autre part.

Occupation des sols

On a longuement évoqué, au paragraphe VIII.4.2, la forte incertitude portée notamment par l'hypothèse d'uniformité de la répartition des types d'occupations des sols. Rappelons également les enjeux portés par les incertitudes sur les hauteurs de planchers.

Fonctions élémentaires de coûts

L'élaboration de ces fonctions, et les incertitudes qui découlent de leur mise en oeuvre, sont l'un des objets majeurs de la littérature scientifique en la matière. Nous ne saurions ici nous consacrer à une revue représentative de cette question, que nous avons illustrée sur certains aspects particuliers dans la seconde partie de ce mémoire.

En ce qui concerne les conséquences de ces incertitudes sur des coûts estimés à l'échelle d'un quartier, citons simplement des résultats de Debizet et Caude (1986) sur la ville de Montauban: en faisant varier le point de changement de pente d'une relation "hauteur - coût" constituée de deux segments de droite, ils observent jusqu'à une variation de 30% du coût d'une crue centennale.

En conclusion, force est de reconnaître non seulement la multiplicité des sources d'incertitudes (multiplicité que nous illustrerons plus encore par la suite), mais aussi l'importance de leur impact sur les coûts des dommages.

X.2.2. Le choix d'une méthode d'analyse

Les méthodes disponibles

Nous avons évoqué plus haut les diverses natures des sources d'incertitudes qui nous intéressent ici: erreurs sur les données d'entrée, sur le modèle local... Les méthodes analytiques développées par les modélisateurs s'adressent essentiellement aux erreurs sur les données et à celles sur les paramètres des modèles (non sur la structure même des modèles; voir Gardner et O'Neill, 1983; Beck, 1987; Kauark-Leite, 1990; Binley et al, 1991). Ces méthodes sont les suivantes:

- l'analyse de sensibilité consiste à faire varier un nombre limité de données et/ou de paramètres autour des valeurs moyennes; le nombre discret de valeurs que l'on obtient donne une indication de la dispersion des résultats, pour peu que les sources d'incertitudes conservent une amplitude limitée (Macgilchrist, 1985; Wind et Peerbolte, 1992);
- l'analyse du premier ordre consiste à faire un développement en séries de Taylor d'un modèle exprimable sous forme analytique; cette analyse permet mieux de prendre en compte des sources d'incertitudes multiples, mais suppose également leur amplitude limitée;

- la méthode de Rosenblueth (Binley et al, 1991) permet d'estimer les moments statistiques des résultats du modèle à partir d'un nombre limité de calculs; mais il s'agit d'une estimation approchée qui ne donne en outre pas d'indication quant à la forme de la distribution statistique des résultats;
- la méthode de Monte-Carlo, nécessitant des calculs lourds, consiste à simuler les erreurs à l'entrée et au sein d'un modèle, en procédant par tirages aléatoires; ces différentes erreurs sont ainsi propagées à travers le modèle, ce qui permet de simuler toute une série de résultats possibles, et donc d'en analyser la distribution lorsque l'on dispose d'un nombre de tirages représentatif (en particulier, l'espérance du résultat peut être tout-à-fait différente du résultat "déterministe" estimé sans incertitudes); cette méthode est la moins restrictive sur ses conditions d'emploi, ne supposant ni la linéarité du modèle, ni une faible amplitude des sources d'incertitudes.

Cette dernière méthode suppose néanmoins que l'on fasse des hypothèses sur les lois de distribution des sources d'erreurs, en prenant garde notamment aux corrélations entre erreurs, à leurs échelles spatiale et temporelle (Gardner et O'Neill, 1983). Mais cela aurait peu de sens de rechercher une simulation très précise des distributions d'erreurs, qui serait plus précise que le modèle analysé lui-même (Beck, 1987).

Les spécificités du problème posé

Le modèle local, dont on veut analyser les incertitudes, se caractérise par les aspects suivants:

- il est fortement non-linéaire;
- sa transcription analytique est très complexe, dans la mesure où le modèle s'adapte à des situations réelles variables en termes de données d'entrée (variabilité en nombre et en nature);
- les sources d'incertitudes de modélisation sont très nombreuses, et dépendent notamment, pour chaque secteur, du nombre de valeurs disponibles (par exemple, nombre de surfaces inondées connues...); en particulier les données d'entrée, qui constituent autant de sources d'incertitudes, sont nombreuses (le modèle peut utiliser plus de 200 variables);
- les sources d'incertitudes présentent des amplitudes fortes, notamment les incertitudes de modélisation qu'on ne peut pas transcrire sous forme analytique de façon stricte.

Ces différentes caractéristiques amènent à retenir une analyse d'incertitudes par la méthode de Monte-Carlo, seule parmi les méthodes mentionnées à pouvoir prétendre à quelque réalisme (dans notre cas). Par ailleurs, le nombre et la nature variables des sources d'erreurs imposent de recourir à une description simplifiée (donc à un modèle!) et uniforme des erreurs. A ce stade de l'analyse, il serait très compliqué de chercher à s'adapter à chaque secteur. Dans la partie X.2.3 qui suit, on va présenter une description synthétique des sources d'incertitudes, en vue de leur simulation (X.3).

X.2.3. La caractérisation et la représentation des sources d'incertitudes

X.2.3.1. Les principes de base

On a présenté plus haut les spécificités du problème posé par l'analyse des incertitudes pour le modèle local. La complexité et la variabilité du modèle interdisent a priori une simulation analytique exhaustive des sources d'incertitudes. Nous avons donc cherché à établir une représentation simplifiée de ces sources, qui soit compatible avec une simulation, qui soit réaliste (à la lumière des informations dont on dispose), et qui puisse servir de base à un diagnostic sur les incertitudes.

On a évoqué le fait qu'il était parfois difficile de dissocier les incertitudes dues aux données de celles dues au modèle, par exemple parce que la qualité du modèle lui-même dépend du nombre

des variables d'entrée disponibles. Par contre, il apparaît important, pour la simulation, de discerner par exemple les erreurs sur les surfaces inondées de celles sur la répartition saisonnière des crues ou sur la proportion de surface occupée par des zones industrielles. L'objectif est ici de pouvoir analyser les contributions des différentes sources à l'incertitude globale.

Par ailleurs, un des problèmes sensibles des analyses d'incertitudes concerne les corrélations entre erreurs. L'omission de ces corrélations peut conduire à des biais importants dans les résultats. C'est pourquoi ont été développées des approches permettant d'identifier les covariances "plausibles" des erreurs, en sélectionnant les tirages d'erreurs conduisant à des résultats vraisemblables ("generalized sensitivity analysis", Hornberger et Spear, 1980 et 1981; "bayesian Monte Carlo", Dilks et al, 1992). Par rapport à notre problème, ces méthodes présentent l'inconvénient de nécessiter un jugement de "vraisemblance" sur les résultats. Or, nous ne disposons pas de critères pour cela. Il nous faut donc tenir compte d'éventuelles corrélations à l'amont de la simulation.

Etant donné la structure du recueil des données et les sources d'informations utilisées, on a adopté le principe de décomposer globalement le problème en sources d'erreurs indépendantes (Matheson et Howard, 1983), même si cela peut alourdir le nombre de ces erreurs à prendre en compte: hauteurs de submersion par rapport au terrain naturel d'une part, hauteurs de plancher d'autre part. Par contre, devant le grand nombre de types d'occupations des sols, nous avons opéré des regroupements par grandes "catégories", en fonction de leurs poids économiques a priori et de leur mode de vulnérabilité aux inondations. Ceci nous a semblé d'autant plus acceptable qu'un secteur donné contient rarement la majeure partie des occupations des sols en proportion sensible.

X.2.3.2. La structure générale de la représentation des sources d'incertitudes

Par rapport aux différents éléments évoqués plus haut, nous avons choisi de simuler les sources d'incertitudes au niveau du sous-modèle de dommages: à l'entrée, au sein du sous-modèle, ou sur les résultats. On va passer en revue ces différentes sources dans les paragraphes qui suivent. Sur la base des représentations schématiques du modèle local et du sous-modèle de dommages (figures VIII.2 et VIII.6), les figures X.1 et X.2 donnent une illustration des différentes sources d'incertitudes prises en compte (les variables et paramètres modifiés sont identifiés par un astérisque). L'annexe X.A présente des organigrammes des programmes qui en découlent. Rappelons que nous avons choisi de considérer des sources d'erreurs "moyennes" qui soient uniformes sur l'ensemble des secteurs inondables considérés.

Parmi les grandeurs que l'on considère, et qui portent des sources d'incertitudes, beaucoup sont liées à l'intensité de crue (ou aux tranches de secteur) et peuvent varier en fonction de cette intensité: période de retour, débit, cote, hauteur et durée de submersion, surface totale inondée, proportion en surface de différents types d'occupations des sols... A la fois du fait des données d'entrée et du fait du modèle, les erreurs que l'on fait respectivement au niveau des crues fréquentes (ou des tranches basses de secteur) et au niveau des crues rares (ou des tranches hautes) sont très peu dépendantes. Peut-être ne sont-elles pas dépendantes du tout. Ainsi, deux valeurs de surface bien distinctes proviennent de mesures différentes sur des événements différents, ou d'un même modèle hydraulique dont les erreurs peuvent être de natures très différentes en crue biennale et en crue centennale. De même, l'analyse fréquentielle des débits de crue conduit à des erreurs très différentes sur les crues fréquentes ou rares. A contrario, les erreurs faites au niveau de crues proches sont très corrélées, ne serait-ce que du fait du recours fréquent à l'interpolation de grandeurs.

Appliquer des erreurs uniformes ou "colinéaires" (en ne faisant varier que l'amplitude) sur toute la gamme des crues ou sur tout le "dénivelé" d'un secteur inondable constituerait une simplification importante, notamment en regard du calcul du coût moyen annuel (CMA). Comme l'a indiqué Arnell (1989) pour le cas de la loi de fréquence des crues, l'incertitude sur le CMA est nettement surestimée si l'on applique des erreurs uniformes (en valeur relative) sur les coûts à différentes intensités de crue. Considérer des sources d'incertitudes uniformes ou colinéaires reviendrait à se placer dans cette situation. C'est pourquoi, comme on le montrera, on a considéré pour plusieurs sources d'incertitudes que le facteur aléatoire était de la forme

$$u = \alpha(H) \cdot u' + \beta(H) \cdot u'' \quad (33)$$

- où
- $\alpha(H)$ vaut 1 et $\beta(H)$ vaut 0 sous la crue biennale ($H \leq H_2$);
 - $\alpha(H)$ vaut 0 et $\beta(H)$ vaut 1 au-dessus de la crue centennale ($H \geq H_{100}$);

- $\alpha(H)$ décroît et $\beta(H)$ croît entre ces deux limites, de telle sorte que $\alpha(H)^2 + \beta(H)^2 = 1$;
- u' et u'' sont des nombres aléatoires indépendants, suivant une loi normale.

Ainsi, la variable u suit une loi de moyenne nulle et de variance 1. Cette "propagation" d'erreurs ne prétend pas à une représentation analytique exacte du phénomène, mais a pour ambition de prendre en compte une tendance générale qui apparaisse réaliste. Comme pour le modèle local lui-même, il s'agit d'intégrer autant que faire se peut les facteurs majeurs de cohérence d'une part, d'hétérogénéité ou de discontinuité d'autre part. Les variables u' et u'' correspondent respectivement aux variables d'incertitude pour le niveau de crue biennal et pour le niveau de crue centennial.

Certaines des grandeurs peuvent évoluer lentement par rapport à l'intensité de crue, voire être constantes pour une certaine gamme de crues (par exemple la surface inondée devant une digue). Lorsque l'on simule de fortes amplitudes d'incertitudes de façon uniforme et donc "aveugle", il faut veiller à la monotonie des relations entre paramètres hydrologiques, entre cote et surface inondée, entre cote et hauteur ou durée de submersion. Il faut donc assurer un contrôle sur les grandeurs simulées "avec erreurs", et le cas échéant agir sur les erreurs simulées.

Pour finir, et avant de décrire une à une les sources d'incertitudes considérées, mentionnons-en deux qui n'ont pas été intégrées. La première est la "discrétisation" considérée pour décrire la zone inondable, les crues... et l'assimilation de diverses relations entre paramètres à des segments de droites (ou de courbes) reliant des points discrets. Par rapport à un certain nombre de secteurs considérés, les amplitudes des écarts en altitude entre lignes d'eau, ou les "épaisseurs de tranches", restent inférieurs à 70 centimètres et peuvent descendre jusqu'à quelques unités. Nous avons donc considéré que la discrétisation induisait des incertitudes d'un ordre inférieur par rapport aux autres incertitudes considérées.

L'autre source d'incertitudes non intégrée concerne le seuil d'apparition des dommages, que nous ne considérerons pas explicitement en tant que source. En soi, ce paramètre est synthétique, et non descriptif comme la très grande majorité des autres paramètres. Une erreur est donc difficile à analyser en soi, au titre du "seuil d'apparition des dommages", ce d'autant plus que la façon dont on prend en compte une valeur de ce seuil supérieure au seuil de débordement ne peut pas être validée par rapport à la réalité (répartition non uniforme en "altitude" des occupations du sol). Par contre, l'incertitude sur ce seuil est traduite indirectement dans d'autres sources: relations hydrologiques, conditions de submersion, seuils de submersion, hauteurs de plancher, types d'occupations des sols.

X.2.3.3. Sources d'incertitudes sur l'hydrologie: relations "période de retour T - débit de pointe Q - cote maximale H "

L'analyse des erreurs et incertitudes sur les courbes et relations de tarage H - Q ainsi que sur l'évaluation probabiliste des crues fait l'objet de nombreux travaux théoriques et études de cas.

Ces erreurs sont très dépendantes des caractéristiques de chaque site, à commencer par les données existantes: erreurs de mesure, longueurs des chroniques de données... Les méthodes employées pour caler des expressions analytiques, ainsi que le choix de ces expressions, constituent une autre source d'erreurs.

Pour ce qui concerne la relation de tarage entre cote et débit, la première source d'erreurs est apportée par la mesure. Si l'erreur sur H ne dépasse pas un petit nombre de centimètres (Masson et al 1987), les jaugeages (qui peuvent avoir été réalisés à quelque distance de la station limnimétrique et "transportés") présentent des erreurs relatives quadratiques moyennes de 5 à 10% en moyennes eaux (Potter et Walker, 1985; Masson et al, 1987; Roche, 1988). Si l'on intègre le fait que la relation H - Q n'est pas univoque, et qu'on est amené soit à caler et extrapoler une relation analytique (CEMAGREF 1981), soit à extrapoler directement des mesures de vitesses, les erreurs relatives sur Q dépassent 10%, et peuvent même dépasser 25% (Kite, 1977; Masson et al, 1987; Roche, 1988; Zarate-Saab, 1981).

En ce qui concerne les analyses probabilistes, il est plus difficile d'avancer des valeurs synthétiques pour les erreurs commises sur les fréquences empiriques (ou sur les périodes de retour), ou pour les erreurs dues au choix d'une fonction de distribution et à son calage. Il semble que pour des crues de fréquence d'occurrence moyenne (crue décennale par exemple), il faille généralement considérer une erreur relative quadratique moyenne de l'ordre de 15% sur le débit. En ce qui concerne les estimations probabilistes menées directement à partir des cotes H (approches que l'on essaie

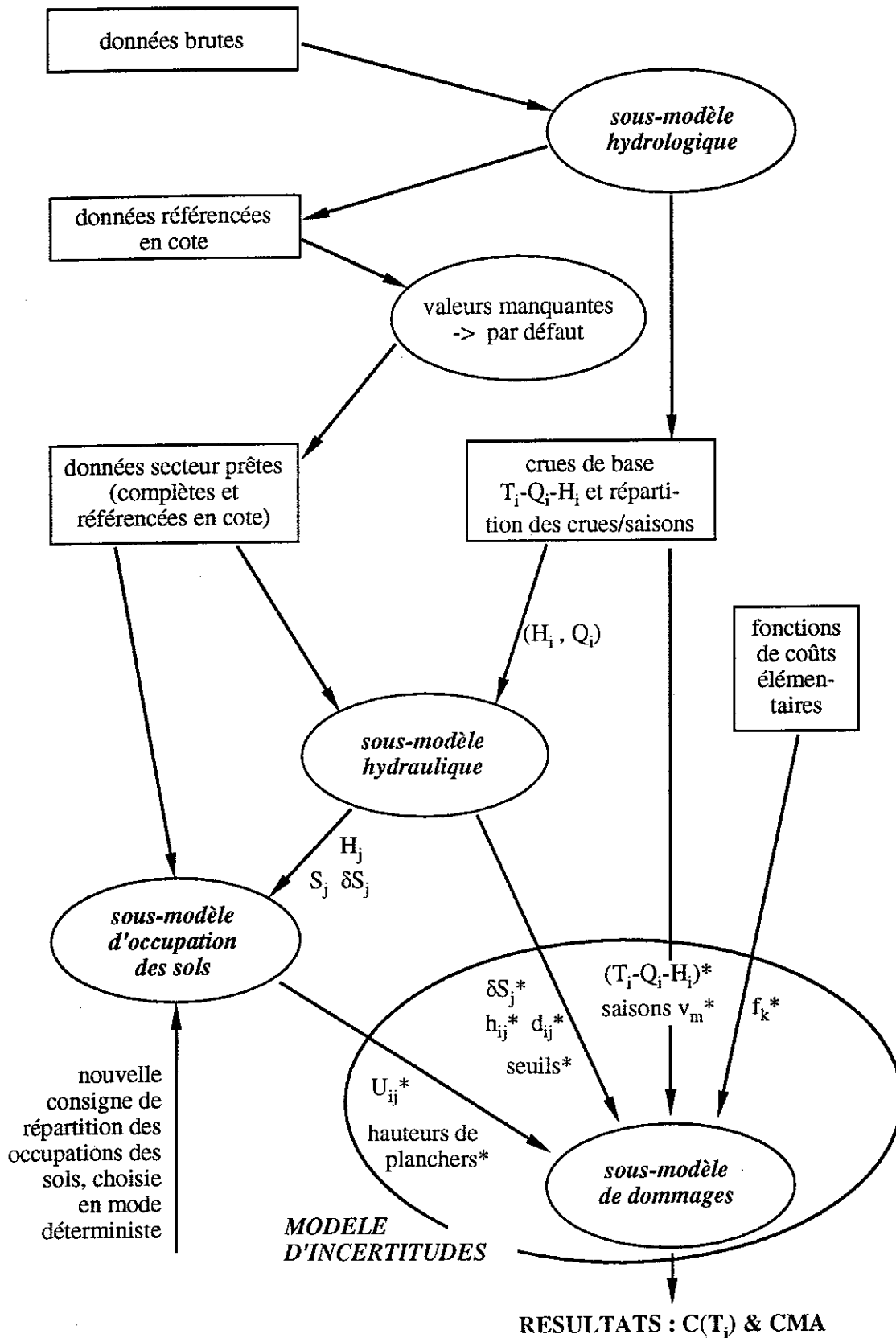


Figure X.1. : simulation des incertitudes sur le modèle local - structure générale

légende: voir figure VIII.2; les astérisques indiquent les variables pour lesquelles sont simulées des erreurs

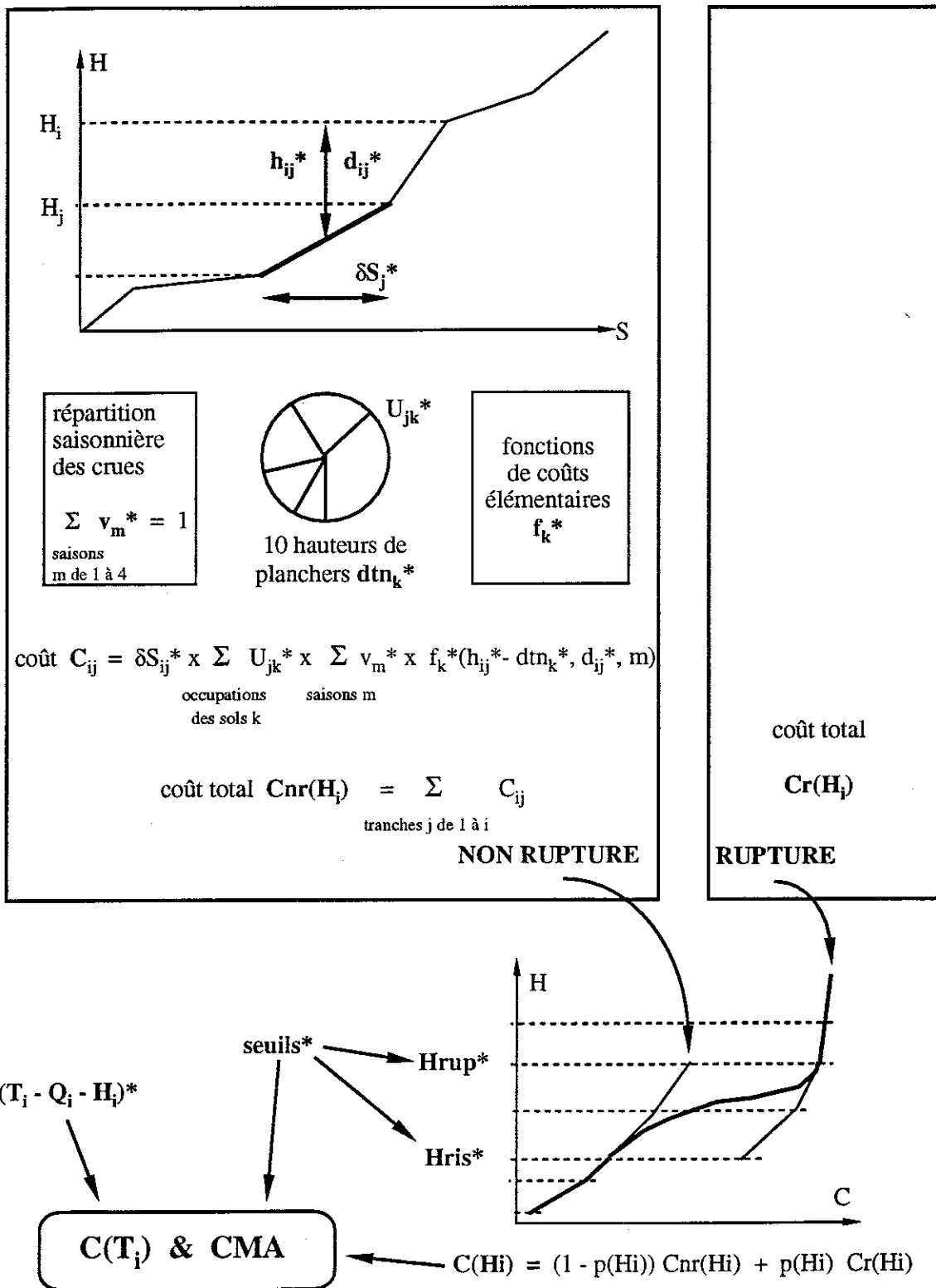


Figure X.2. : simulation des incertitudes sur le modèle local - sous-modèle de dommages

légende: voir figures VIII.2 et VIII.6; les astérisques indiquent les variables pour lesquelles sont simulées des erreurs

d'éviter autant que faire se peut en analysant les débits), il semble bien qu'il faille considérer des erreurs plus importantes encore, dans la mesure où les séries de données que l'on utilise sont susceptibles -plus que pour les débits- de présenter des non-stationnarités conséquentes.

Relation T-Q

Les erreurs sur Q(T) dépendent à la fois de l'adéquation de la loi utilisée et de la qualité de l'ajustement (liée a priori à la taille de l'échantillon). On ne connaît ici ni la loi utilisée, ni l'échantillon ayant conduit aux couples Q-T connus. On va alors considérer une forme unique du calcul d'erreurs, qui sera appliquée de façon uniforme. Cela étant, la dispersion absolue des valeurs de débit à T donné ne peut être considérée indépendante de la variabilité des débits en fréquence. Supposons que l'on dispose de la même information historique sur les débits de deux cours d'eau différents, la probabilité que le "vrai" débit centennal soit égal au débit vingtennal estimé doit être la même.

On a choisi de représenter la distribution de Q par une loi exponentielle:

$$\frac{Q}{Q1} = \frac{\text{Ln}(c \cdot T)}{\text{Ln}(c \cdot T1)} \tag{34}$$

où Q1 - T1 est un couple de valeurs de référence. On adopte usuellement une valeur de c égale à 12, qui permet d'obtenir les égalités approximatives suivantes (C. Michel, communication personnelle):

$$\frac{QT=10}{QT=2} = \frac{\text{Ln}(120)}{\text{Ln}(24)} \approx \frac{QT=100}{QT=10} = \frac{\text{Ln}(1200)}{\text{Ln}(120)} \approx 1,5 \tag{35}$$

L'erreur relative sur la relation Q - T n'est pas, a priori, uniforme sur toute la gamme des valeurs. Il s'agit donc, à partir de la connaissance de l'erreur relative sq sur Q1(T1), d'estimer l'erreur relative sqT sur la détermination d'un débit Q de période de retour T (entre autres sur celle du débit Q0 correspondant à la période de retour T=1). Pour ce faire, on se réfère aux travaux de Kite (1977) pour les procédures d'évaluation de l'écart-type des erreurs de toute loi de distribution. On a considéré ici une loi exponentielle. Pour employer la terminologie de Kite, notre situation de départ est la connaissance de "l'erreur standard" ST suivante:

$$ST(T1 = 100 \text{ ans}) = sq \cdot Q1 \tag{36}$$

L'analyse de notre loi de distribution se base sur l'équation de Chow (Kite, 1977, page 33):

$$Q(T) = \mu1 + K \cdot s \tag{37}$$

où K est le facteur fréquentiel, μ1 est le moment de premier ordre, et s est l'écart-type de la distribution. Revenons à notre loi de distribution:

$$Q = \frac{Q1}{\text{Ln}(12 \cdot T1)} \cdot \text{Ln}(12 \cdot T) \tag{38}$$

On définit le facteur multiplicatif constant a:

$$a = \frac{Q1}{\text{Ln}(12 \cdot T1)} = \frac{Q0}{\text{Ln}(12)} \quad (Q = Q0 \text{ pour } T = 1) \tag{39}$$

il s'ensuit:

$$T = \exp\left(\frac{Q-Q0}{a}\right) \tag{40}$$

d'où la fréquence annuelle de non-dépassement:

$$F = 1 - \frac{1}{T} = 1 - \exp\left(-\frac{Q-Q0}{a}\right) \tag{41}$$

la fonction de densité:

$$f(Q) = \frac{dF}{dQ} = \frac{1}{a} \cdot \exp\left(-\frac{Q-Q0}{a}\right) \tag{42}$$

et le moment de premier ordre:

$$\mu1 = \int_{Q0}^{\infty} f(Q) \cdot Q \cdot dQ = Q0 + a \tag{43}$$

on obtient par ailleurs les moments centrés d'ordre supérieur suivants:

$$\begin{aligned} \mu2 &= a^2 & \text{d'où: } s &= \sqrt{\mu2} = a \\ \mu3 &= 2 \cdot a^3 \\ \mu4 &= 9 \cdot a^4 \end{aligned}$$

On peut à présent représenter la distribution de Q sous forme de l'équation de Chow, mentionnée plus haut:

$$Q = a \cdot \text{Ln}(12 \cdot T) = Q_0 + a \cdot \text{Ln}(T) = (Q_0 + a) + a \cdot (\text{Ln}(T) - 1) = \mu_1 + s \cdot K \quad (44)$$

d'où le facteur fréquentiel $K = \text{Ln}(T) - 1$.

Comme K est indépendant du coefficient d'asymétrie, l'erreur standard de notre distribution devient (Kite, 1977, page 36):

$$S_T = \partial \cdot \sqrt{\frac{\mu_2}{n}} \quad (45)$$

où n est la taille de l'échantillon utilisé pour le calage de la loi, et avec:

$$\partial = \sqrt{1 + K \cdot g_1 + \frac{K^2}{4} (g_2 - 1)}. \quad (46)$$

Les coefficients g1 et g2 prenant les valeurs suivantes:

$$g_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} = 2 \quad (47)$$

$$g_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = 9 \quad (48)$$

En remplaçant:

$$\partial = \sqrt{1 - 2 \cdot \text{Ln}(T) + 2 \cdot (\text{Ln}(T))^2} \quad (49)$$

l'erreur standard pour le couple Q1 - T1 devient par conséquent:

$$S_{T1} = \sqrt{1 - 2 \cdot \text{Ln}(T1) + 2 \cdot (\text{Ln}(T1))^2} \cdot \sqrt{\frac{a^2}{n}} = \text{sq} \cdot Q1 \quad (50)$$

d'où la substitution du terme \sqrt{n} par:

$$\sqrt{n} = \frac{a}{\text{sq}} \cdot \partial(T1) \cdot \frac{1}{Q1} \quad (51)$$

On obtient finalement l'écart-type S_T de l'erreur pour une crue de période de retour T:

$$S_T = \text{sq} \cdot \frac{\text{Ln}(12 \cdot T1)}{\text{Ln}(12 \cdot T)} \cdot \frac{\sqrt{1 - 2 \cdot \text{Ln}(T) + 2 \cdot (\text{Ln}(T))^2}}{\sqrt{1 - 2 \cdot \text{Ln}(T1) + 2 \cdot (\text{Ln}(T1))^2}} \quad (52)$$

On simule ensuite les erreurs sur Q(T) par: $Q(T) = Q^*(T) \cdot (1 + S_T)^{u(T)}$, où u(T) suit une loi normale, et Q* correspond à la valeur obtenue par l'approche standard "déterministe".

En se référant à la discussion menée plus haut, on propose de "propager" les erreurs u(2) et u(100) sur la gamme des périodes de retour par:

$$u(T) = a(T) \cdot u' + b(T) \cdot u'' \quad (53)$$

$$\text{où } a(T) = \frac{Q(100) - Q(T)}{\sqrt{[Q(100) - Q(T)]^2 + [Q(T) - Q(2)]^2}} \quad \text{pour } 2 \leq T \leq 100 \quad (54)$$

$$\text{et } b(T) = \frac{Q(T) - Q(2)}{\sqrt{[Q(100) - Q(T)]^2 + [Q(T) - Q(2)]^2}} \quad \text{pour } 2 \leq T \leq 100 \quad (55)$$

$$\begin{aligned} a(T) \text{ vaut } 1 \text{ pour } T < 2 \text{ et } 0 \text{ pour } T > 100 \\ b(T) \text{ vaut } 0 \text{ pour } T < 2 \text{ et } 1 \text{ pour } T > 100 \end{aligned}$$

Si u' et u'' sont deux variables normales indépendantes, u(T) suit également une loi normale. Les erreurs sur la relation Q-T sont ainsi générées à partir de deux tirages aléatoires sur u' et u'', correspondant respectivement aux variables d'erreurs pour la crue biennale et pour la crue centennale.

Pour la détermination de sq , on se réfère à l'événement de période de retour $T = 100$ ans, en définissant une "règle" intégrant la variabilité fréquentielle des débits:

$$Q^*(100) \times (1 + sq)^{-2} = \sqrt{Q^*(10) \times Q^*(100)} \quad \text{soit} \quad (1 + sq)^{-2} = \sqrt{\frac{Q^*(10)}{Q^*(100)}} \quad (56)$$

$$\text{ou encore } sq = \left(\frac{Q^*(100)}{Q^*(10)} \right)^{0,25} - 1$$

(rappelons que Q^* représente l'estimation initiale du débit correspondant à une période de retour donnée).

La valeur sq est recalculée pour chaque secteur (ou du moins chaque station hydrométrique de référence). Rappelons que l'on a présenté en annexe IX.B une cartographie, par groupes de biefs, des rapports des débits de fréquence donnée au débit décennal, en analysant les cohérences que l'on observe sur ces grandeurs. La variabilité "naturelle" du rapport $Q^*(100) / Q^*(10)$ est importante, et cela ne peut que renforcer la nécessité de rapporter l'amplitude des incertitudes d'estimation à cette variabilité. Consuegra Zammit (1992) présente des estimations de débits sur des stations hydrométriques du bassin du Rhône, pour lesquelles les débits estimés décennal et millennial présentent moins de 30% d'écart avec le débit estimé centennal. Nous pensons que pour de telles stations, il faut considérer ces écarts de 30% comme des erreurs de probabilité très faible.

Relation Q-H

On considère généralement les relations de tarage sous la forme $Q = a \cdot (H + H_0)^b$, où b varie sensiblement autour d'une valeur de l'ordre de 2.

En approximation grossière, on peut considérer les égalités suivantes:

$$\frac{dQ}{Q} = b \cdot \frac{dH}{H} \quad \text{soit} \quad \frac{dH}{H} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{dQ}{Q} \quad (57)$$

Au vu des erreurs relatives qu'on a affichées sur Q à partir des relations de tarage, on retient une valeur d'erreur relative quadratique moyenne sur $H(Q)$ de l'ordre de 7%.

On propose de simuler des erreurs par la relation suivante:

$$H(Q) = H^*(Q) \cdot 1,07^{u(Q)} \quad (58)$$

(H^* est la valeur estimée par la procédure standard). En définissant comme précédemment:

$$u(Q) = a(Q) \cdot u' + b(Q) \cdot u'' \quad (59)$$

$$\text{où } a(Q) = \frac{H(Q100) - H(Q)}{\sqrt{[H(Q100) - H(Q)]^2 + [H(Q) - H(Q2)]^2}} \quad \text{pour } Q2 \leq Q \leq Q100 \quad (60)$$

$$\text{et } b(Q) = \frac{H(Q) - H(Q2)}{\sqrt{[H(Q100) - H(Q)]^2 + [H(Q) - H(Q2)]^2}} \quad \text{pour } Q2 \leq Q \leq Q100 \quad (61)$$

$a(Q)$ vaut 1 pour $Q < Q2$ et 0 pour $Q > Q100$
 $b(Q)$ vaut 0 pour $Q < Q2$ et 1 pour $Q > Q100$

$Q2$ étant le débit biennal et $Q100$ le débit décennal.

Relation T-H

Lorsqu'on ne dispose que de la relation entre H et T, sans connaître les débits Q, on revient à l'égalité définie plus haut:

$$\frac{dH}{H} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{dQ}{Q} \quad (62)$$

en considérant les deux sources d'erreurs identifiées, qui agissent respectivement sur les relations T-Q et Q-H. Si on considère que ces erreurs sont indépendantes, leurs variances s'ajoutent:

$$s = \exp[\sqrt{sqT^2 + 1,07^2}] - 1 \quad (63)$$

A partir de là, on retrouve une simulation telle que celles qu'on a définies plus haut:

$$H(T) = H^*(T) \cdot (1 + s)^{u(T)} \quad (64)$$

(H* est la valeur estimée par la procédure standard). En définissant comme précédemment:

$$u(T) = a(T) \cdot u' + b(T) \cdot u'' \quad (65)$$

Répartition saisonnière des crues

Sauf exception, l'information sur cette répartition a été tirée d'études techniques ou réestimée à partir de séries de crues. On n'a volontairement pas cherché à distinguer plusieurs gammes d'intensités de crue, ce qui -en fractionnant les séries de données- aurait conduit à des valeurs de probabilités saisonnières encore moins significatives (et donc pas nécessairement plus "justes"). Cela étant, il est très vraisemblable que deux crues d'intensités très différentes n'ont pas la même probabilité saisonnalisée d'apparition.

Si sur le coût d'une crue rare cette hypothèse peut conduire à des erreurs appréciables pour ce qui concerne les dommages aux cultures, il faut penser que le coût moyen annuel est influencé par les crues dommageables fréquentes et moyennes qui sont le mieux représentées dans la série analysée. De surcroît, lors de crues rares les dommages à l'habitat et aux activités prennent en moyenne une part largement prépondérante, et ils ne dépendent pas des saisons d'occurrence.

L'incertitude sur ces données dépend au premier chef de la longueur de la série de crues, longueur qui ne nous est pas connue (dans les données recueillies). Pour prendre un exemple, considérons une série de n crues, dont les saisons d'occurrence sont assimilées à une variable aléatoire définie sur la population des crues. On fait l'hypothèse que la variable "saison" suit une loi binomiale. Si p est la probabilité qu'une crue se produise au cours d'une saison donnée, on observera en moyenne n.p crues appartenant à cette saison (d'où la détermination a posteriori de p), l'écart-type sur la fréquence d'apparition valant:

$$s = \sqrt{\frac{p \cdot (1 - p)}{n}} \quad (66)$$

Soit, pour une série de n = 40 crues, on observe un écart-type de

- 3,4% pour p = 95%
- 7,9% pour p = 50%
- 3,4% pour p = 5%

On voit que l'imprécision est loin d'être négligeable, notamment pour ce qui concerne les saisons peu concernées par les crues. C'est, sur le bassin de la Loire, souvent le cas en ce qui concerne l'été (en moyenne 8% des crues) et à moindre titre le printemps (en moyenne 22% des crues, contre 32% en automne et 38% en hiver). Or, si l'on considère les dommages aux cultures, ce sont là précisément les saisons où les vulnérabilités économiques sont les plus fortes.

Lorsque la taille n de l'échantillon de crues considérées augmente, la fonction de répartition de la fréquence saisonnière se rapproche d'une loi normale. On va considérer cette propriété pour simplifier la génération d'erreurs sur la répartition saisonnière des crues (en partant néanmoins d'une taille d'échantillon n = 40). De même, on propose de s'en tenir à l'hypothèse d'équi-probabilité

saisonnaire des crues de différentes intensités, pour générer une répartition uniforme sur l'ensemble des crues. Pour éviter de multiplier le nombre de variables aléatoires, on choisit d'appliquer une erreur uniforme sur l'automne et l'hiver d'une part, sur le printemps et l'été d'autre part.

Si vp^* , ve^* , va^* , vh^* sont respectivement les probabilités initiales qu'une crue dommageable survienne au printemps, en été, en automne ou en hiver, on applique le calcul suivant:

$$\text{soit } v^* = vp^* + ve^* \quad (67)$$

$$\text{on estime } v = v^* + \sqrt{\frac{ve^* \cdot (1 - ve^*)}{40}} \cdot u \quad (68)$$

où u est une variable normale, et en limitant v à l'intervalle $[0,1]$

$$\text{on définit alors } vp = vp^* \frac{v}{v^*} \quad ve = ve^* \frac{v}{v^*} \quad (69)$$

$$va = va^* \frac{1 - v}{1 - v^*} \quad vh = vh^* \frac{1 - v}{1 - v^*} \quad (70)$$

X.2.3.4. Sources d'incertitudes sur l'hydraulique

Relation "cote - surface inondée" (H - S)

On s'intéresse ici aux données de surfaces non nulles. Les erreurs sur ces surfaces émanent de deux sources:

- les erreurs sur les surfaces "connues", c'est-à-dire sur les données d'entrée recueillies (erreurs de mesure ou de report cartographique, modifications des conditions hydrauliques depuis l'événement considéré...); l'erreur relative quadratique moyenne a été estimée à environ 15%;
- les erreurs dues à la représentation des surfaces par une relation les liant à la cote (cote à la station hydrométrique); ces erreurs sont faibles à proximité des valeurs connues (interpolation ou extrapolation), plus importantes lorsqu'on s'en éloigne; on inclut également ici les hypothèses servant à la détermination des surfaces pour les secteurs submergés par plusieurs mécanismes hydrauliques.

Comme on l'a déjà indiqué, la variabilité des surfaces inondées pour des crues rares apparaît -en moyenne- moins importante dans la mesure où la plus grande partie du lit majeur est submergé, et où les surfaces évoluent moins avec la cote. On propose par conséquent de simuler les erreurs sous la forme suivante:

$$S = S^* \times 1,2^{u(H)} \quad (71)$$

où $u(H) = a(H) \cdot u' + b(H) \cdot u''/3$, u' et u'' étant des variables normales.

Hauteur de submersion h_{ij} (due à la crue H_i , sur la tranche de secteur délimitée par les emprises des crues H_{j-1} et H_j)

Ces erreurs proviennent des différents phénomènes que recouvrent les hypothèses de la modélisation (les hauteurs de submersion évoluent en fonction des cotes hydrométriques):

- a - non-représentativité des cotes à la station pour les lignes d'eau "moyennes" sur la partie de cours d'eau en regard du secteur inondable;
- b - variabilité "longitudinale" de l'écart entre deux lignes d'eau (on a fait l'hypothèse de parallélisme des lignes d'eau en crue débordante);
- c - non-représentativité des cotes en lit mineur pour les plans d'eau dans le lit majeur;

- d - non-concordance entre la hauteur moyenne arithmétique définie et la véritable hauteur moyenne sur une tranche de secteur (cf. la non-linéarité de la "relation" surface-cote);
- e - micro-topographie sur la zone inondable.

On a essayé de cerner quelles pouvaient être les "homogénéités", sur la gamme des crues d'une part, sur les "tranches" de secteur inondable d'autre part, des différents phénomènes:

- pour les différentes crues, seuls les phénomènes d et e sont homogènes sur une tranche de secteur donnée;
- sur les différentes tranches d'un secteur, seuls les phénomènes a, b et c sont homogènes pour une crue donnée.

Rappelons que dans un travail présenté en X.1, on a déterminé sur 4 secteurs-types (rattachés à 3 stations hydrométriques) des cotes de lignes d'eau "réelles" (à partir du seuil de débordement) pour les crues de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 130 ans. Ces cotes "réelles" émanent des lignes d'eau calculées par un modèle hydraulique, et prennent en compte les phénomènes a et b, c'est-à-dire le problème de représentativité des lignes d'eau par une cote "station". En considérant toutes les hauteurs de submersion h pour les différentes crues et les différentes tranches des 4 secteurs-types, on observe un biais moyen de +64,9% avec une dispersion de +25,4%.

Si l'on différencie les 4 secteurs type, le biais prend les valeurs +29% (dispersion 11%) pour les "méandres tendus", +44% (14%) pour les "gorges", +91% (17%) pour les "méandres basculants", +109% (19%) pour les "festons". Rappelons que les deux derniers secteurs dépendent de la station de Gilly qui pose de réels problèmes de représentativité.

Lorsqu'on analyse les erreurs sur h en regroupant les valeurs pour différents niveaux de crue ou différentes tranches de secteur, on observe (en moyenne sur les 4 secteurs):

- que le biais augmente continûment de +29% à +75% entre les crues de périodes de retour 2 et 100 ans (dispersion de 35% pour T2, entre 26 et 30% pour les autres crues);
- que le biais augmente continûment avec "l'altitude" des tranches de +48% à +86% (la dispersion croît de 26% à 36%).

Si l'on considère plus globalement les altitudes des diverses lignes d'eau par rapport à la ligne d'eau biennale, les rapports ' $\Delta H_{station} / \Delta H_{réel}$ ' croissent avec l'intensité de la crue:

- de 1,18 à 1,41 pour le secteur "gorges";
- de 1,75 à 1,99 pour le secteur "méandres basculants";
- de 1,93 à 2,16 pour le secteur "festons";
- de 1,26 à 1,32 pour le secteur "méandres tendus".

La dispersion des erreurs est réduite par la seule distinction entre différentes stations, ce qui atteste du caractère local des erreurs, pour autant que les erreurs observées dans la zone d'influence de la station de Gilly ne relèvent que des choix de modélisation. Il est difficile de transposer de tels résultats à une aire d'étude importante, notamment au vu des doutes que certains de ces résultats nous inspirent.

On propose, par conséquent, en se basant sur des ordres de grandeur observés en termes de dispersion, de simuler deux termes d'erreurs liés respectivement à la ligne d'eau (H_j) et à la localisation en "altitude" au sein du secteur (H_i):

$$h_{ij} = h_{ij}^* \times 1,2^{u(H_i)} \times 1,2^{w(H_j)} \quad (72)$$

où $u(H_i) = a(H_i) \cdot u' + b(H_i) \cdot u''$ et $w(H_j) = a(H_j) \cdot w' + b(H_j) \cdot w''$
 u', u'', w' et w'' étant des variables aléatoires indépendantes, suivant une loi normale.

Durée de submersion d_{ij}

La durée de submersion sur une tranche de secteur, pour une crue donnée, dépend de plusieurs facteurs qui sont mal ou non connus (notamment à notre échelle de travail):

- forme de l'hydrogramme de crue, qui varie le long d'un cours d'eau, et qui varie d'un événement à l'autre indépendamment du débit maximum;
- représentativité de cet hydrogramme pour "l'hydrogramme de submersion" dans le lit majeur (c'est d'ailleurs à ce dernier que renvoie dans certains cas l'information de durée);
- seuil de crue correspondant à la "vidange de surface" d'un secteur; ce seuil peut être différent du seuil de début de submersion (ne serait-ce que dans les cas de déversement et de ruptures de digues);
- texture du sol et topographie fine, qui conditionnent le ressuyage des parcelles agricoles (cf. dommages aux cultures), la possibilité de déplacement de véhicules (pas seulement agricoles)...

La méthode proposée dans le modèle local, qui consiste à donner une représentation simple de l'hydrogramme de crue et à y lier directement les durées, se base sur la connaissance d'une durée de débordement observée. Elle intègre donc plus ou moins les trois premiers points, à l'exception de la variabilité des durées pour un même débit de pointe qui jette un doute global sur les valeurs estimées (et si la crue à laquelle on s'est référé était "atypique"?). Et on ne maîtrise pas réellement l'évolution des durées en fonction des débits maximaux de crue ou en fonction de l'altitude dans la zone inondable.

Aucun raisonnement a priori ne permet de prévoir un biais moyen sur notre estimation des durées. De même, la variabilité des formes d'hydrogrammes ne permet pas de faire une hypothèse quant à un lien entre les erreurs commises ni pour différentes crues, ni sur différentes tranches. Cependant, les durées doivent rester a priori décroissantes en fonction de l'altitude (sur un même secteur seulement, selon qu'il y a ou non des endiguements).

On propose de simuler deux termes d'erreurs, comme pour le cas de la hauteur de submersion:

$$d_{ij} = d_{ij}^* \times 1,3^{u(H_i)} \times 1,2^{w(H_j)} \quad (73)$$

On donne ici un poids plus fort au facteur lié à la crue, dans la mesure où la forme de l'hydrogramme de crue nous apparaît être un facteur d'incertitude plus fort.

X.2.3.5. Sources d'incertitudes sur l'occupation des sols

Les sources d'erreurs tiennent aux valeurs recueillies, ainsi qu'au principe d'uniformité de la répartition qui a présidé au recueil de données et qui est pris en compte (avec quelques "correctifs") dans le modèle local:

- erreurs de quantification des nombres de logements et des pourcentages surfaciques (établis à partir des surfaces absolues présentes sur l'emprise de crue maximale connue ayant a priori servi de référence);
- erreurs sur les seuils "zéro logement";
- erreurs sur les hauteurs des planchers occupés par rapport au terrain naturel et erreur due à la prise en compte d'une valeur moyenne;
- non-uniformité de la répartition et de la densité des occupations.

Parmi les sources d'erreurs que l'on peut quantifier, revenons aux erreurs relatives quadratiques moyennes avancées pour les données issues du recueil:

- 10 à 15% pour le pourcentage de surfaces agglomérées, industrielles ou artisanales et commerciales; 15 à 20% pour les autres surfaces;
- 10 à 15% pour les répartitions entre types urbains;
- 10% pour les pourcentages des cultures majoritaires et 30% pour les autres;
- 10% pour les nombres de logements ou d'exploitations agricoles.

En ce qui concerne la densité de l'habitat diffus, on peut considérer une erreur quadratique moyenne de 1,5 logement par hectare, qui correspond à la dispersion sur les valeurs recueillies. Rappelons que cette valeur de densité doit souvent être attribuée par défaut dans la procédure de calcul (36 valeurs connues pour 107 secteurs concernés).

Enfin, les hauteurs de plancher portent deux sources d'erreurs principales:

- la valeur moyenne est estimée par expertise et connaissance globale du terrain; dans un grand nombre de cas, une valeur est attribuée par défaut; si l'on considère la variabilité des moyennes entre secteurs, la dispersion est de l'ordre de grandeur de la moyenne (ou supérieure) à l'exception des habitats "grand collectif" et "pavillonnaire" où elle a une valeur de moitié par rapport à la moyenne;
- par ailleurs, la seule moyenne est censée représenter toute la variabilité possible; par rapport au calcul des dommages, cela revient à faire l'hypothèse que la fonction de coût est linéaire par rapport à la hauteur de submersion sur toute l'étendue des valeurs rencontrées; Plazak (1986) a diagnostiqué là une erreur systématique de sur-estimation des dommages.

Il est beaucoup plus délicat d'estimer l'importance des erreurs sur les seuils de crue correspondant à un nombre donné de logements présents ou exposés. En particulier, il est probable qu'on ignore tout de seuils réels "0 logement" qu'il n'a pas été possible de connaître.

La variabilité de la nature des données disponibles et des traitements qui les utilisent est telle que la représentation des erreurs ne peut être que très synthétique. De même, comme on l'a évoqué plus haut, cela représenterait peu d'intérêt de distinguer les erreurs sur chacun des types d'occupations des sols. On propose par conséquent de simuler les erreurs à deux niveaux:

- sur les pourcentages de surface occupés, sur chaque tranche, par quatre catégories d'occupations des sols;
- sur la valeur moyenne des hauteurs de planchers, en reproduisant en outre la dispersion des valeurs, pour deux catégories d'urbanisations.

Pourcentages de surface U_{jk} (type d'occupation des sols k , sur la tranche de secteur délimitée par les emprises des crues H_{j-1} et H_j)

On propose de considérer la forme suivante:

$$U_{jk} = U_{jk}^* \times 1,15^{u(H_j)} \quad (74)$$

$$\text{où } u(H_j) = a(H_j) \cdot u' + b(H_j) \cdot u''$$

en considérant indépendamment les catégories d'occupations des sols suivantes (quatre tirages indépendants de u' et u''):

- habitat dispersé et pavillonnaire;
- autres zones urbanisées;

- zones industrielles, artisanales et commerciales;
- cultures agricoles.

On ne prend pas en compte les autres occupations des sols, dans la mesure où l'on n'estime pas les dommages correspondants. On isole les habitats dispersé et pavillonnaire, car ils correspondent en moyenne à des hauteurs de plancher plus importantes et plus variables, et à des types d'urbanisations plus fréquents en zone inondable. L'approche retenue ici permet de prendre en compte une certaine hétérogénéité de la répartition des occupations des sols, en faisant dépendre les erreurs de la localisation en altitude (par l'intermédiaire des tranches de secteurs).

Hauteurs de plancher

On distingue ici deux catégories d'urbanisation, comme précédemment: d'une part les habitats dispersé et pavillonnaire, d'autre part les autres zones urbanisées. L'annexe VIII.F présente les données dont on dispose sur les hauteurs de plancher. A défaut d'autres informations, supposons que la distribution des valeurs individuelles sur un même site soit proche de la distribution des valeurs moyennes entre sites. Il ressort des valeurs observées que la distribution est asymétrique, avec une concentration de valeurs sous la moyenne m , lorsque m est faible.

On propose alors de représenter la fonction de répartition des valeurs par une fonction exponentielle, définie entre 0 et un maximum M :

$$F(x) = \left(\frac{x}{M}\right)^z \quad (75)$$

en ajustant z pour obtenir la moyenne m :

$$m = \frac{z M}{z + 1} \quad \text{soit} \quad z = \frac{m}{M - m} \quad (76)$$

Dans ces conditions, l'écart-type vaut $\sigma = m / \sqrt{z(z + 2)}$, soit $\sigma = m$ pour $m = 0,29 M$, et $\sigma = 0,5 m$ pour $m = 0,55 M$.

En choisissant une valeur de 1,5 mètre pour le maximum M , on obtient des ordres de grandeur compatibles avec les données recueillies (annexe VIII.F).

On propose de simuler les erreurs sur la hauteur de plancher dt_n^* selon la procédure suivante:

- on tire un nombre aléatoire u compris entre 0 et 1;
- on fixe $M = 1,5$ mètre ou $M = dt_n^* + 0,5$ si dt_n^* est supérieur à 1 mètre (pour des raisons de vraisemblance et de stabilité numérique);
- on estime $z = \frac{dt_n^*}{M - dt_n^*}$, puis $dt_n = M \cdot \exp\left(\frac{u}{z}\right)$ (ou 0 si le nombre est trop petit);
- si M est supérieur à 30 dt_n , on le ramène à cette valeur pour des raisons de stabilité numérique;
- on tire 10 valeurs de dt_n également réparties en probabilité, et on établit une moyenne des coûts calculés avec chacune des 10 valeurs; les 10 valeurs sont définies par

$$dt_{ni} = M \cdot \frac{z'}{z' + 1} \cdot \left((0,1 \cdot i)^y - (0,1 \cdot i - 0,1)^y \right) \quad (77)$$

$$\text{où } y = \frac{z' + 1}{z'} \quad \text{et } z' = \frac{dt_n}{M - dt_n}$$

X.2.3.6. Sources d'incertitudes sur les fonctions de coûts élémentaires

Les erreurs que l'on considère ici sur les relations "submersion (h/d) - coût unitaire (à l'hectare, à l'unité)" proviennent de deux sources:

- erreurs de détermination des fonctions à partir d'un échantillon de données spécifiques, à partir d'exploitations de données d'indemnisation, à partir de simulations et d'expertises...;
- non-représentativité des fonctions établies pour la situation à laquelle on les applique, notamment lorsque les conditions initiales (échantillon, support de la simulation...) sont par trop différentes de celles auxquelles on s'intéresse.

Cette deuxième source est d'autant plus importante que les fonctions de coût élémentaires sont fortement sous-déterminées:

- elles ne renvoient qu'à un seul paramètre de submersion (éventuellement deux, pour l'habitat), qui quoique majeur n'est pas seul à déterminer les dommages (cf. la vitesse, les solides transportés...); pour ce qui concerne les cultures, la prise en compte de la date au travers de quatre trimestres doit être considérée comme assez grossière;
- la vulnérabilité intrinsèque d'un même type de bien est très variable, selon l'aménagement intérieur d'un logement, la variété d'une plante cultivée et la date de semis, la dépendance d'une entreprise vis-à-vis des circuits économiques pouvant être coupés...; et on ne connaît pas l'importance de l'effet de moyenne sur une partie de vallée;
- face à la survenue de l'inondation, les réactions de protection peuvent faire varier le coût des dommages, en fonction du mode et du délai d'alerte, en fonction de la perception individuelle du risque et de la crédibilité accordée à l'annonce, en fonction des capacités à choisir et à prendre des mesures de protection plus ou moins efficaces.

Il s'agit donc ici des sources d'incertitudes pour lesquelles une estimation quantitative est la plus délicate à mener. Selon les fonctions, on est confronté à diverses difficultés (voir l'annexe VIII.D):

- hétérogénéité des sources d'informations (cas des cultures, par exemple);
- lacunes en matière de références extérieures (cas de l'habitat, pour l'influence de la durée);
- absence de références internes analysables (activités non agricoles).

Le mode de simulation des erreurs que l'on peut proposer ici est encore plus arbitraire que dans les autres cas, ou disons du moins qu'il résulte de spéculations sans références extérieures. Par ailleurs, les incertitudes portent non seulement sur la valeur absolue des coûts, mais également sur la forme de la fonction liant coût unitaire et conditions de submersion. Pour éviter une trop grande lourdeur, on propose de prendre en compte ce second phénomène en modifiant le (ou les) paramètre de submersion (hauteur nette h, durée d), mais ici au titre de la fonction de coût (cette modification est la même pour toute valeur de h ou de d). Les amplitudes des différentes sources d'erreurs ont été choisies selon la fiabilité qu'il apparaissait possible d'attribuer à diverses fonctions, et selon la dépendance vis-à-vis de divers paramètres de submersion.

Habitat

$$c(h^*, d^*) = c^*(h^* \cdot 1,2^u, d^* \cdot 1,2^{u'}) \cdot 1,2^w \quad \text{où } u, u' \text{ et } w \text{ sont des variables indépendantes et de loi normale} \quad (78)$$

Activités non agricoles

$$\text{coût direct} \quad c(h^*) = c^*(h^* \cdot 1,2^u) \cdot 1,2^w \quad (79)$$

$$\text{coût indirect} \quad c(h^*) = c^*(h^* \cdot 1,2^u) \cdot 1,3^w \quad (80)$$

Cultures agricoles

$$c(d^*, \text{saison}^*) = c^*(d^* \cdot 1,2^u, \text{saison}^*) \cdot 1,3^w \quad (81)$$

X.2.3.7. Sources d'incertitudes sur les seuils des phénomènes hydrauliques

Rappelons qu'il s'agit ici des seuils de débordement, de déversement, d'apparition du risque de rupture et de rupture certaine.

Pour les deux premiers seuils, on pourrait considérer au premier abord qu'il s'agit de limites de phénomènes déterministes, et que donc les erreurs proviennent simplement d'une mauvaise connaissance de ce phénomène sur le terrain. Mais les choses ne sont en fait pas aussi simples. En ce qui concerne le seuil de débordement, sa définition est strictement liée à celle du "lit mineur", seule partie de la vallée où s'écoule l'eau "en conditions normales". Ce concept de seuil de débordement porte en soi une part de subjectivité, quelle que soit la définition que l'on retiendra.

Sur un autre plan, l'erreur sur le seuil de déversement intègre plus qu'une simple erreur de connaissance d'une valeur fixe. Si l'on prend l'exemple caractéristique des déversoirs installés en certains vals endigués de la Loire, ils sont constitués d'un déversoir maçonné (avec une protection en pied de digue aval) surmonté d'une banquette en terre pouvant dépasser un mètre de haut. Il est difficile de prévoir avec précision pour quelle cote de l'eau cette banquette sera emportée, mais cette cote sera dans tous les cas inférieure à celle du sommet de la banquette.

En ce qui concerne les limites propres au risque de rupture de digue, on a souligné par ailleurs la complexité et le caractère multiple des phénomènes en jeu, ainsi que les lacunes flagrantes dans nos connaissances.

On propose de retenir une erreur quadratique moyenne, sur les valeurs des seuils, de l'ordre de 20 centimètres, d'où une simulation des erreurs par la formule

$$H_{\text{seuil}} = H^* + s \cdot u \quad (82)$$

où $s = 0,2$ mètre et u est une variable normale. On simulera indépendamment les erreurs sur les différents seuils, mais on rejettera les tirages d'erreurs qui modifieraient l'ordre de différents seuils sur un même secteur (voir plus loin).

Comme pour les autres sources d'incertitudes, il serait très lourd, et vraisemblablement de peu d'intérêt, de recourir à une mise en oeuvre complète du modèle local pour chaque tirage d'erreurs. On propose par conséquent de simuler ces erreurs sous une forme simplifiée, directement sur les couples de valeurs "cote H - coût C".

Seuil de débordement / remous

Si la nouvelle valeur H est supérieure à H^* , on la maintient à la limite supérieure constituée par un éventuel seuil de déversement ou de rupture, minoré de 20 centimètres. On considère alors que pour toutes les crues de base comprises entre H^* et H incluses, le coût est nul, et qu'il demeure inchangé au-delà.

Si la valeur H est inférieure à H^* , on ajoute le couple de valeurs "H - S=0" à la relation "cote - coût" (H constitue alors une crue de base supplémentaire), le nouveau coût C^* correspondant à H^* étant estimé linéairement par rapport à H et à la crue de base directement supérieure.

Seuil de déversement

S'il existe un seuil de rupture certaine au-delà de H^* , on limite H à la valeur maximale constituée par ce seuil de rupture, minoré de 20 centimètres. Lorsque le seuil de déversement H^*

correspond au début de la submersion, on procède comme pour le seuil de débordement (alors le coût C^* est nul). Dans le cas contraire, modifier le seuil revient à déplacer la limite entre la submersion par remous et celle par déversement. Par principe, on limite H à la valeur minimale constituée par le seuil de remous, majoré de 20 centimètres.

Si le nouveau seuil H est supérieur à H^* , on considère que cela ne change pas les dommages pour les crues supérieures à H (en faisant notamment abstraction implicite de la modification de la durée de submersion). L'évolution des coûts entre H et H^* étant plus difficile à estimer sur des hypothèses justifiables, on a retenu une attitude "prudente" consistant à attribuer le coût initial C^* (pour H^*) à ces crues entre H^* et H inclus.

Si le nouveau seuil est inférieur à H^* , se pose le même problème. Bien évidemment, les crues inférieures à H ne sont pas modifiées. Aucune des options simples n'étant plus fondée qu'une autre (à savoir attribuer entre H et H^* le coût C^* -minoration- ou le coût correspondant à la crue supérieure -majoration), on choisit d'attribuer le coût C^* à ces crues.

Seuil d'apparition du risque de rupture de digue

La variation du seuil H^* est limitée par le seuil de rupture certaine, qui apparaît comme une limite (supérieure) absolue, en termes physiques comme en termes de variabilité de l'estimation par expertise. On simule les nouveaux coûts (pour le scénario "rupture") comme pour le seuil de déversement, à ceci près qu'ici les probabilités de rupture se trouvent automatiquement modifiées. La seule différence que nous avons introduite par rapport au cas du seuil de déversement concerne la situation pour laquelle H est inférieur à H^* et la rupture est précédée par une submersion (remous ou déversement). Il nous a semblé que ce phénomène devait être plus intense ou "brutal" que dans le cas d'un déversement, sans pouvoir s'appuyer sur des considérations plus précises ou plus fondées. On affecte alors aux crues comprises entre H exclus et H^* inclus le coût initial de la crue de base supérieure à H^* , c'est-à-dire la première crue dont les coûts correspondent à une rupture effective de digue.

Seuil de rupture certaine

En cohérence avec ce qui est présenté plus haut, la limite inférieure pour ce seuil est la valeur (éventuellement modifiée) correspondant au seuil d'apparition du risque de rupture. L'estimation des nouvelles valeurs de coûts procède de la même logique que pour le seuil précédent (à la fois pour les coûts "rupture" et "non rupture").

X.3. LA SIMULATION DES SOURCES D'INCERTITUDES ET LEUR ANALYSE

X.3.1. La procédure de simulation et son mode d'exploitation

Les calculs effectués

Comme cela a été présenté plus haut, la simulation des sources d'erreurs est initiée par le tirage de différentes variables aléatoires indépendantes, au nombre total de 37. Ce nombre découle des choix que nous avons faits pour les différentes sources d'incertitudes. Il faut noter d'emblée que pour la mise en oeuvre de la méthode de Monte-Carlo ce nombre de variables est très important. Il en découle que nous n'avons pas cherché à réaliser un nombre de tirages conduisant à des distributions statistiques stables des résultats, mais plutôt à fournir des ordres de grandeur réalistes. Sur une version préliminaire du programme de simulation, nous avons pu vérifier que les ordres de grandeur obtenus pour la dispersion des résultats, respectivement à partir de 500 ou de 5000 tirages, étaient comparables. Pour pouvoir privilégier une analyse embrassant la diversité des secteurs inondables, nous nous sommes limités à 500 tirages pour l'analyse locale. Nous verrons plus loin que ce problème du nombre de tirages peut être considéré comme étant du second ordre, par rapport à la variabilité des situations sur chaque secteur.

Deux restrictions ont été faites au caractère aléatoire et indépendant des tirages des 37 variables représentant les sources d'incertitudes. La première de ces restrictions a pour objet de borner les valeurs pour assurer la stabilité numérique des calculs et le réalisme des erreurs simulées (il est difficile d'imaginer que des erreurs de mesure ou d'interpolation puissent ne pas être bornées). Pour les variables normales (moyenne 0 et écart-type 1), les valeurs inférieures à -3 ou supérieures à +3 ont été fixées à la valeur seuil correspondante, et de même pour les deux variables suivant une loi de distribution uniforme sur [0,1] avec les valeurs seuil 0,001 et 0,999. Ces deux intervalles auxquels on s'est restreint contiennent plus de 99,7% de la distribution théorique correspondante.

La seconde restriction concerne les erreurs que l'on fait dépendre de la cote de crue ou de la tranche de secteur (voir plus haut), sous la forme:

$$X(H) = X^*(H) \cdot (1 + \sigma)^{u(H)} \quad (83)$$

où $u(H) = a(H) \cdot u' + b(H) \cdot u''$.

Rappelons que les fonctions a et b prennent les valeurs respectives 1 et 0 sous la cote de crue biennale, 0 et 1 au-delà de la cote de crue centennale, et varient régulièrement entre ces deux limites (de 1 à 0 pour a, et de 0 à 1 pour b). Une simulation "aveugle" risque de ne pas respecter la monotonie éventuelle (stricte ou non) de la relation X(H), par exemple dans le cas de la surface inondée, pour des valeurs positives de u' ou des valeurs négatives de u''. Dans ce cas, on active une procédure itérative jusqu'au respect de la monotonie: à chaque étape, on réduit u' de 10% si cette valeur est positive, et on augmente u'' de 10% si cette valeur est négative.

Il aurait été trop lourd de réaliser des simulations et analyses sur l'ensemble des 245 secteurs des 52 biefs de l'aire d'étude. On s'est par conséquent concentré sur 112 secteurs correspondant aux 16 biefs du Cher amont, de la Loire moyenne et de la Loire aval: C1, C2A, C2B, C3, C4, LM1A, LM1B, LM2, LM3, LM4, LM5, LM6, LAV1, LAV2, LAV3A, LAV3B. La localisation de ces secteurs est présentée sur les cartes de l'annexe IX.C. Le choix de ces trois régions correspond d'une part à la recherche de régimes fluviaux contrastés, d'autre part à la volonté de sur-représenter des secteurs de types minoritaires (différents mécanismes hydrauliques, seuls ou combinés, sur des secteurs endigués; lits moyens entre digue et lit mineur...). Par ailleurs, cela permet de considérer des régions présentant des tailles et des niveaux de découpage différents: découpage de l'espace plus fin sur la Loire du fait des mécanismes hydrauliques, concentration des enjeux sur le Cher amont (agglomération de Vierzon)... Signalons que la Loire moyenne concentre un grand nombre de secteurs très différents, en termes de morphologie ou d'occupation des sols.

Il faut rappeler ici qu'un secteur n'est pas nécessairement concerné par l'ensemble des 37 sources d'incertitudes, qui couvrent tous les mécanismes de submersion, toutes les catégories d'occupations des sols. A cet égard, soulignons le cas des sources d'incertitudes sur l'hydrologie, à savoir les relations "période de retour T - débit Q - cote H". Lorsque l'on dispose de données sur les trois grandeurs, on simule séparément des sources d'incertitudes sur les relations T-Q et Q-H: ceci correspond aux relations à la fois fondées sur le plan physique et -autant que possible- prises en compte sur le plan opérationnel. Mais le modèle peut s'accommoder de l'absence d'informations sur les débits, et dans ce cas l'analyse fréquentielle dont nous utilisons les résultats a vraisemblablement été menée sur les cotes hydrométriques. On considère alors la relation T-H comme seule source d'incertitudes. Ce cas concerne un nombre tout-à-fait minoritaire de secteurs.

Le mode d'analyse des résultats

Dans l'absolu, les incertitudes sur les coûts devraient être analysées de façon spécifique sur les secteurs, en fonction des seuils des phénomènes de submersion, en fonction des types d'occupations des sols concernés, en fonction des sources d'incertitudes qui interviennent effectivement. Les secteurs présentent une très forte diversité, au point que l'analyse des incertitudes devrait être propre à chaque cas. Par rapport à cette option très maximaliste, nous avons choisi d'analyser les résultats quantitatifs de façon globale et systématique. Ceci doit conduire à des conclusions qualitatives. Nous n'avons certes pas connaissance d'une autre démarche analytique et systématique menée à une échelle comparable à celle-ci, mais notre échantillon de secteurs ne peut pas être considéré comme représentatif dans l'absolu.

Pour analyser les incertitudes sur les estimations de coûts, nous avons retenu quatre indicateurs représentant en première approche la relation "période de retour - coût":

- le coût C2 correspondant à une crue biennale (période de retour de 2 ans);

- le coût C10 correspondant à une crue décennale (période de retour de 10 ans);
- le coût C100 correspondant à une crue centennale (période de retour de 100 ans);
- le coût moyen annuel CMA.

Rappelons que le CMA est estimé directement pour chaque tirage d'erreurs. Il faut souligner que des secteurs dont le seuil d'inondation est supérieur à la crue centennale ne sont analysés ainsi qu'au travers du CMA. Par ailleurs, l'écart d'intensité entre deux crues indicatrices ne doit pas être négligé: l'analyse d'un secteur sur ces quatre indicateurs ne pourra pas donner une image complète des phénomènes qui se produisent (zones de fort gradient sur le coût...).

Les différents coûts retenus n'ont pas la même signification pour des secteurs présentant différents seuils de début de submersion. Certaines analyses ne seront pas effectuées sur des indicateurs (C2, C10...) ayant une valeur déterministe nulle, alors que le tirage d'erreurs peut faire apparaître des coûts simulés non nuls, et donc une espérance de coût non nulle.

L'annexe X.B montre des histogrammes d'estimations de coût, pour différents secteurs et différents indicateurs. On observe une asymétrie marquée, mais surtout une grande variabilité des formes de distributions, entre secteurs différents et entre indicateurs différents sur un même secteur. Il en ressort qu'on ne peut pas, de façon réaliste, faire une hypothèse a priori sur cette forme. Ceci confirme l'intérêt d'une approche par la méthode de Monte-Carlo, qui seule permet de faire cette constatation. Ces résultats étayent également l'hypothèse de Arnell (1989), selon laquelle la distribution sur les estimations de CMA est asymétrique. Il s'ensuit que l'analyse d'indicateurs statistiques (moyenne, écart-type, coefficient d'asymétrie) ne permet pas d'estimer de façon directe des quantiles de distributions de coût. Ces indicateurs statistiques "classiques" ne donnent qu'une représentation partielle de l'incertitude analysée.

Pour élargir la base sur laquelle on analyse l'incertitude et essayer de palier au problème évoqué, nous avons considéré deux groupes d'indicateurs statistiques, le premier que nous qualifierons "d'arithmétique", le second de "géométrique":

- l'espérance arithmétique de coût C_a et son écart relatif par rapport au coût "déterministe" C_o , soit $E_a = (C_a - C_o)/C_o$ qui n'est défini que lorsque C_o n'est pas nul; l'écart-type S_a et le coefficient de variation $V_a = S_a/C_a$; le coefficient d'asymétrie sur la distribution des coûts estimés;
- l'espérance géométrique C_g et le biais par rapport au coût déterministe, $E_g = (C_g/C_o) - 1$ (pour C_o non nul); l'écart relatif quadratique moyen S_g , où on considère que le coût estimé C se met sous la forme

$$C = C_g (1 + S_g)^u = C_o (1 + E_g) (1 + S_g)^u \quad (84)$$

où u est une variable de moyenne nulle et de variance 1.

Lorsque C_o n'est pas nul, un tirage donné de variables d'erreurs peut conduire à un coût C nul ou très faible (notamment par effet de seuil). Pour ne pas exclure ces cas de l'analyse géométrique, on a assimilé les coûts nuls ou minimes à une valeur minimale $C_o/100$, qui nous est apparue équivalente à la valeur C , en termes de résultat absolu.

L'annexe X.C donne une présentation cartographique des grandeurs suivantes, par secteur et par indicateur de coût: coût déterministe C_o , espérance arithmétique C_a , écart relatif E_a , coefficient de variation V_a , biais E_g , écart relatif quadratique moyen S_g .

X.3.2. L'analyse des résultats d'ensemble

X.3.2.1. Les résultats globaux

Les tableaux X.1 et X.2 présentent les statistiques arithmétiques et géométriques (moyenne, écart-type, valeurs extrêmes) des indicateurs statistiques introduits en X.3.1, sur les 112 secteurs analysés. Rappelons que ces données portent uniquement sur les secteurs pour lesquels les coûts

déterministes (respectivement C2, C10, C100 et CMA) ne sont pas nuls. Avec l'observation du fait que les dispersions sont fortes, le facteur prédominant qui se dégage est la très grande variabilité des comportements des secteurs en matière d'incertitude. Cette variabilité est très forte pour l'écart relatif E_a ou le biais E_g , un peu moins pour la dispersion (V_a et S_g).

Pour la dispersion arithmétique, représentée en valeur relative par V_a , on observe des valeurs moyennes de l'ordre de 2 (écart-type 3) pour C2 et C10, de l'ordre de 0,75 (écart-types de 0,67 et 0,59) pour C100 et CMA. S_g présente des valeurs moyennes de 3 (écart-type 5) pour C2, 8 (15) pour C10, 2 (3) pour C100 et 2,3 (écart-type 8) pour CMA. Dans les deux cas, on observe que la dispersion décroît au fur et à mesure que les coûts sont plus "intégrateurs": C100 intègre la plus grande partie de la plupart des secteurs, CMA pondère de plus les différentes fréquences. On aurait pu penser a contrario que les crues rares sont les plus mal connues.

L'asymétrie présente des valeurs positives moins variables que la dispersion (sauf exception), avec des valeurs moyennes de 3,3 pour C2, 2,9 pour C10, 1,4 pour C100, 1,6 pour CMA. Ces valeurs fortes confirment l'asymétrie observée sur les distributions présentées en annexe X.B. A nouveau, tout se passe comme si les phénomènes d'intégration et de moyenne (crues rares, CMA) tendaient à rendre les distributions plus symétriques.

Tableau X.1. : statistiques arithmétiques sur les indicateurs de coût (500 simulations sur 112 secteurs inondables)

légende:

C2 coût pour une crue biennale
 C10 coût pour une crue décennale
 C100 coût pour une crue centennale
 CMA coût moyen annuel

Co coût déterministe sans incertitudes
 Ca espérance du coût
 Sa écart-type du coût

	C2	C10	C100	CMA
écart relatif de l'espérance E_a : (Ca-Co) / Co	0,70	24,92	0,20	0,57
	1,33	173,55	0,70	2,97
	0,07	0,004	-0,24	-0,45
	4,92	1311,07	5,66	29,49
coefficient d'asymétrie	3,30	2,92	1,41	1,61
	3,29	4,36	1,06	1,05
	1,13	0,58	0,004	-0,17
	13,0	22,4	5,85	6,83
coefficient de variation: $V_a = S_a / Ca$	2,17	1,85	0,75	0,75
	3,10	3,42	0,67	0,59
	0,48	0,30	0,26	0,39
	12,25	22,36	3,93	3,91
(Ca-Co) / Sa	0,35	0,35	0,15	0,25
	0,19	0,21	0,18	0,13
	0,08	0,01	-0,46	-0,31
	0,89	0,78	0,48	0,52

chaque case du tableau présente successivement les informations statistiques suivantes: valeur moyenne, écart-type, valeurs extrêmes sur l'échantillon

Tableau X.2. : statistiques géométriques sur les indicateurs de coût (500 simulations sur 112 secteurs inondables)

légende:

C2 coût pour une crue biennale
 C10 coût pour une crue décennale
 C100 coût pour une crue centennale
 CMA coût moyen annuel

Co coût déterministe sans incertitudes
 Cg espérance géométrique du coût
 Eg $(Cg/Co) - 1$ biais
 Sg écart relatif quadratique moyen

	C2	C10	C100	CMA
biais sur l'espérance géométrique:	-0,07	0,25	-0,14	-0,03
Eg = $(Cg/Co) - 1$	0,29	3,31	0,26	0,15
écart relatif quadratique moyen:	-0,64	-0,81	-0,93	-0,96
Sg	0,71	24,68	0,29	0,27
écart relatif quadratique moyen:	3,10	7,74	2,00	2,34
Sg	5,16	14,91	2,88	8,79
Eg / Sg	0,66	0,35	0,28	0,49
	22,37	88,35	15,10	84,14
	-0,001	-0,028	-0,039	-0,002
	0,078	0,082	0,097	0,085
	-0,121	-0,141	-0,282	-0,200
	0,241	0,338	0,201	0,320

chaque case du tableau présente successivement les informations statistiques suivantes: valeur moyenne, écart-type, valeurs extrêmes sur l'échantillon

En ce qui concerne les écarts entre espérance de coût et coût déterministe (Ea et Eg), il nous a semblé préférable de les ramener à la dispersion totale, au travers des grandeurs $(Ca - Co)/Sa$ et Eg/Sg . Ces grandeurs présentent des valeurs beaucoup plus homogènes que les écarts relatifs eux-mêmes. Il apparaît que l'espérance géométrique est peu biaisée par rapport au coût déterministe, Eg/Sg de dépassant pas 0,34 et ayant des valeurs moyennes très faibles. L'espérance arithmétique est plus biaisée et est en moyenne supérieure au coût déterministe: $(Ca - Co)/Sa$ vaut en moyenne 0,35 pour C2 et C10, 0,15 pour C100 et 0,25 pour CMA (on ne dépasse pas la valeur de 0,89). Même en ramenant le biais à la dispersion, on observe que les crues rares font apparaître des phénomènes de "régularisation" dans les comportements d'incertitudes.

Il est évident que beaucoup de sources d'incertitudes ont été simulées sous une forme asymétrique de type $(1 + \sigma)^u$, où u est une variable normale. Ni le modèle, ni l'accumulation de sources d'incertitudes n'ont amené à une symétrie approximative des résultats. Peut-être le modèle renforce-t-il l'asymétrie que le nombre de sources aurait tendance à estomper.

On observe par ailleurs que les différents indicateurs statistiques ne sont pas liés strictement et mesurent de ce fait des réalités différentes sur les incertitudes.

X.3.2.2. Une analyse typologique

L'annexe X.D présente les résultats d'une tentative d'analyse typologique des comportements des secteurs en termes d'incertitudes. Les indicateurs statistiques ont été estimés pour l'ensemble des

secteurs, par types de mécanismes de submersion (cf. VIII.3.2) et par gammes de seuils de début de submersion exprimés en période de retour:

- seuil 1: moins de 2 ans;
- seuil 2: de 2 ans inclus à moins de 5 ans;
- seuil 3: de 5 ans inclus à moins de 10 ans;
- seuil 4: de 10 ans inclus à moins de 50 ans;
- seuil 5: de 50 ans inclus à moins de 100 ans;
- seuil 6: 100 ans et plus.

Ces distinctions amènent dans certains cas à considérer des échantillons de secteurs trop petits pour être analysés, notamment en regard de la variabilité des résultats. C'est pourquoi il convient d'être prudent dans les conclusions qualitatives:

- les dispersions des estimations (V_a , S_g) sont très fortes pour les crues proches des seuils de début de submersion;
- sur un secteur donné, la dispersion relative sur le coût a tendance à décroître lorsque l'intensité de crue augmente (phénomène observé en moyenne);
- globalement, la dispersion relative sur le CMA augmente avec le seuil de début de submersion.

X.3.2.3. Une analyse qualitative

Face à la très grande variabilité des comportements (entre secteurs pour une même crue, entre crues sur un même secteur...), nous avons essayé de progresser dans la compréhension des phénomènes d'incertitudes en isolant et en examinant les secteurs présentant notamment de fortes valeurs de dispersion: V_a supérieur à 1, S_g supérieur à 2.

Sur les fortes valeurs de dispersion, il y a concordance qualitative entre les deux indicateurs statistiques. Les fortes valeurs de dispersion relative sont liées à des phénomènes de "seuils" et/ou de "gradients" dans la relation liant le coût à la période de retour:

- proximité d'un seuil de début de submersion, de déversement, de rupture (la condition inverse n'est pas toujours vérifiée, un seuil ne conduit pas nécessairement à des fortes dispersions);
- proximité d'un seuil d'apparition des dommages;
- proximité d'un seuil des premiers planchers inondés;
- fort gradient de la surface totale inondée par rapport à l'intensité de crue...

L'indicateur S_g reste plus sensible aux seuils que V_a , ainsi qu'à l'effet des incertitudes provenant de la relation T-Q (voir plus loin).

Cette conclusion qualitative est cohérente logiquement, sinon prévisible. L'aspect intéressant ici est que cet effet de seuil est prédominant pour expliquer les fortes dispersions des estimations de coûts.

X.3.3. Les contributions des différentes sources d'incertitudes

X.3.3.1. Le mode d'analyse

Dans une optique d'aide à la décision (voir notamment le formalisme de "l'analyse de la décision" que l'on a présenté), l'estimation des incertitudes sur un résultat apporte un élément très important, indispensable même, mais pas suffisant. Si le niveau d'incertitude observé permet de prendre une décision, on peut s'en tenir là. Mais dans un certain nombre de cas, la nature de la décision dépendra du niveau d'incertitude, si jamais une décision peut être prise. Il importe alors de pouvoir identifier:

- les causes et sources majeures d'incertitude;
- les approches dont on dispose pour les réduire et l'effet à attendre sur l'incertitude globale;
- l'intérêt de recourir à ces approches en comparant l'investissement qu'elles nécessitent (en moyens matériels et humains, en délai) à l'avantage tiré d'une réduction de l'incertitude (possibilité de prendre une décision, meilleure efficacité potentielle de la décision...); cet "intérêt" constitue la valeur de l'information.

Cette démarche complète est évidemment spécifique à chaque situation analysée et à chaque problème de décision. Sans entreprendre cette démarche, nous avons voulu nous placer dans ce cadre général de réflexion pour avancer dans l'analyse des sources d'incertitudes. Nous cherchons à répondre à la première question: quelle est la contribution de différentes catégories de sources d'incertitudes à la dispersion des estimations de coûts? Nous avons choisi de n'analyser que la dispersion, et non les écarts entre coût déterministe et espérances de coût, dans la mesure où ces grandeurs sont liées entre elles. Il faut préciser que les sources d'erreurs ont été analysées en considérant toute leur amplitude, et non seulement la part d'amplitude pouvant être réduite dans l'absolu.

Pour ne pas analyser les 37 sources d'incertitudes simulées une à une, nous les avons regroupées en catégories décrites par les abréviations suivantes:

- debo = seuil de débordement ou de remous;
- dens = (pour "densité") pourcentages surfaciques des différentes types d'occupations des sols;
- deve = seuil de déversement;
- fonc = fonctions élémentaires de coûts et répartition saisonnière des crues; on a opéré ce rapprochement car la répartition saisonnière ne nous semblait pas nécessiter une analyse spécifique (étant donné le poids des cultures agricoles), et qu'elle représente un élément de variabilité de la vulnérabilité des cultures aux inondations;
- hadu = hauteur et durée de submersion (par rapport au terrain naturel);
- hydr = relations "période de retour T - débit de pointe Q - cote maximale H";
- hyqh = relation Q-H;
- hytq = relation T-Q, ou T-H quand les débits ne sont pas connus;
- plan = hauteurs de plancher par rapport au terrain naturel (incertitudes provenant de la valeur moyenne et de la dispersion des hauteurs pour chaque bâtiment);
- rupt = seuils d'apparition du risque de rupture de digue et de rupture certaine;
- surf = surface inondée.

Ceci constitue une étape supplémentaire de synthèse, ou "d'agglomération" des sources d'incertitudes réelles multiples. Toutes les sources d'incertitudes ne s'appliquant pas nécessairement à tous les secteurs, il nous est apparu plus représentatif d'opérer des regroupements de sources d'erreurs indépendantes mais de même nature (il aurait été moins représentatif d'opérer ces regroupements pour la simulation elle-même). Dans cette configuration d'analyse, seuls les seuils (debo, deve, rupt) peuvent n'avoir aucune influence sur un secteur donné.

Etant donné l'importance de l'incertitude globale, nous avons considéré que cela n'aurait pas été représentatif de simuler uniquement une catégorie de sources d'incertitudes à la fois, sans les autres. En effet, chaque catégorie intervient dans le contexte global d'incertitudes. Nous avons donc effectué, par la méthode de Monte-Carlo, une analyse de sensibilité des sources d'incertitudes en réalisant des séries de 500 simulations d'erreurs, chaque série ignorant les sources de l'une des catégories mentionnées. Cette approche est également cohérente avec les objectifs d'analyse de la décision.

Pour quantifier la contribution d'une catégorie de sources d'erreurs, on compare la dispersion σ estimée sans cette catégorie à la dispersion σ^* totale de référence (obtenue avec toutes les sources d'erreurs actives). On propose alors de définir la contribution d'une catégorie donnée par l'écart relatif que son absence induit sur la dispersion totale:

$$\delta\sigma = \frac{\sigma^* - \sigma}{\sigma^*} \quad (85)$$

(où σ représente soit le coefficient de variation arithmétique Va, soit l'écart relatif quadratique moyen Sg).

L'annexe X.D présente ces résultats, de façon globale ainsi que selon la typologie des secteurs par mécanismes hydrauliques ou par seuils de début de submersion. Comme on l'a souligné précédemment, la taille très réduite de certains échantillons doit inciter à la plus grande prudence quant aux conclusions.

X.3.3.2. L'analyse quantitative générale

Avant toute autre considération, soulignons ici aussi la forte variabilité des comportements des différents secteurs en termes d'incertitudes, forte variabilité qui motive l'analyse qualitative présentée plus loin. De même, on reviendra dans cette analyse qualitative sur le fait que, pour quelques secteurs, la "suppression" d'une catégorie de sources d'incertitudes puisse conduire à une augmentation de la dispersion (paramètre de contribution $\delta\sigma$ négatif). Les paragraphes qui suivent passent en revue les différentes catégories. Il est à noter qu'on n'analyse pas ici les cas pour lesquels le coût déterministe est nul.

debo: seuil de débordement

La contribution moyenne est faible en valeur absolue, qu'elle soit positive ou négative (réduction de la dispersion totale). Les valeurs individuelles peuvent atteindre de -0,16 à +0,23 sur les statistiques géométriques, où l'effet apparaît sensiblement plus que sur les statistiques arithmétiques.

deve: seuil de déversement

Les phénomènes sont comparables, mais plutôt moins accentués (notamment sur les valeurs extrêmes). L'effet est sensible surtout sur les statistiques géométriques, et pour le type 2 de secteur, c'est-à-dire inondé uniquement par déversement.

rupt: seuils de rupture

L'effet est excessivement hétérogène, notamment en fonction de la proximité entre la crue indicatrice et les crues seuil. Sur les statistiques géométriques, la contribution de ces seuils à la dispersion totale varie de -0,81 à +0,80 !

hydr: relations T-Q-H

Il s'agit ici à la fois de l'effet de la plus fort, et le moins variable (la contribution peut dépasser 0,99!):

- pour Va une moyenne de 0,59 sur C2 (écart-type 0,23), 0,58 sur C10 (0,27), 0,35 sur C100 (0,21), 0,49 sur CMA (0,15);
- pour Sg une moyenne de 0,55 sur C2 (écart-type 0,20), 0,64 sur C10 (0,27), 0,47 sur C100 (0,27), 0,58 sur CMA (0,17).

Cet effet est assez homogène sur la typologie des secteurs, il diminue par rapport à l'intensité de crue sur un même secteur, et sur CMA il augmente avec le seuil de submersion (pour les statistiques arithmétiques, l'effet décroît à nouveau pour les plus fortes intensités). On verra plus loin que la contribution relative des incertitudes sur l'hydrologie est d'autant plus forte que la dispersion totale est forte, c'est-à-dire quand on observe des effets de seuils ou de gradients. Cette catégorie de sources se décompose selon les deux catégories présentées ci-dessous.

hyqh: relation Q-H

La contribution est forte et peu variable, allant jusqu'à 0,99: moyennes de 0,14 (C100) à 0,51 (C2) pour Va (0,22 sur CMA), et de 0,23 (C100) à 0,49 (C2) pour Sg (0,29 sur CMA). L'effet sur un secteur a tendance à diminuer par rapport à l'intensité de crue, les autres tendances ne sont pas significatives par rapport à la variabilité.

hytq: relation T-Q (ou relation directe T-H)

L'effet est comparable à celui de hyqh, sinon qu'il est nettement moins important sur l'indicateur de coût C2: de 0,14 (C2) à 0,31 (C10) pour Va (0,21 sur CMA), et de 0,08 (C2) à 0,34 (C10) pour Sg (0,28 sur CMA). De fait, la dépendance par rapport à l'intensité de crue est plus complexe, pour autant que l'on puisse en identifier une. Ici aussi, la contribution peut atteindre 0,99.

surf: relation entre cote et surface inondée

La contribution moyenne est inférieure à 0,035, et les valeurs ne dépassent pas 0,27. Elle augmente en fonction de l'intensité de crue, et sur le CMA elle décroît quand le seuil de submersion augmente. Il semble que l'effet est plus sensible dans le cas d'inondations plus progressives, car après déversement ou rupture de digues on observe en général des surfaces plus stables (dans notre modèle local), sans oublier qu'on fait moins varier les surfaces correspondant aux crues rares.

hadu: hauteur et durée de submersion

La contribution moyenne varie de 0,06 à 0,09 pour Va, de 0,03 à 0,04 pour Sg, avec une variabilité très forte (valeurs maximales respectives de 0,93 et 0,52 sur CMA). Les valeurs négatives observées restent supérieures à -0,2. La contribution est plus importante pour les inondations par débordement ou remous, et elle décroît par rapport au seuil de submersion. Par contre, cette contribution croît, à seuil donné, avec l'intensité de crue.

dens: pourcentages surfaciques d'occupations des sols

Cette contribution faible en moyenne (0,02 à 0,03) ne dépasse pas 0,12. Son effet augmente avec l'intensité de crue considérée, et diminue avec le seuil de submersion. Mais ces tendances ne sont pas très affirmées.

plan: hauteurs de plancher (habitat seulement) par rapport au terrain naturel

Contrairement aux catégories surf, hadu ou dens, les contributions sont ici un peu plus sensibles sur les statistiques géométriques (Sg). Les valeurs moyennes restent inférieures à 0,045 pour Va, à 0,072 pour Sg (respectivement 0,022 et 0,025 sur CMA). Les valeurs maximales restent inférieures à 0,3. L'effet décroît avec l'intensité de crue, ainsi qu'avec le seuil. Il est plus sensible pour les inondations "précoces".

fonc: fonctions de coûts élémentaires et répartition saisonnière des crues

Globalement, la contribution moyenne fluctue (hors une valeur très particulière due à un seul secteur) de 0,04 à 0,12. On n'observe pas de typologie de comportements marquée par rapport à la variabilité intrinsèque, si ce n'est que l'effet augmente avec l'intensité de crue.

Analysé de cette façon, l'impact des catégories de sources d'incertitudes apparaît faible, sauf dans des cas ponctuels et en ce qui concerne les relations T-Q-H. Il est bien évident que chaque source agissant isolément est à même d'induire une distribution sensible. Mais dans la "réalité", ou du moins par rapport à la connaissance que l'on a de la réalité, chacune des sources agit sur une distribution d'états, qu'elle ne modifie souvent qu'à la marge.

X.3.3.3. L'analyse qualitative

Comme cela a été entrepris pour chercher à comprendre les déterminants de la dispersion globale, nous avons observé les "comportements" de secteurs sur lesquels différentes catégories de sources d'incertitudes présentent une contribution fortement positive (constituant important de la dispersion) ou fortement négative (réduction sensible de la dispersion totale).

En examinant les fortes contributions des relations Q-H et T-Q aux incertitudes, il apparaît:

- que les plus fortes contributions (au-delà de 0,5 pour Va et 0,6 pour Sg) correspondent à de fortes dispersions totales (éventuellement à des dispersions moyennes avec des biais relatifs importants);
- parmi ces fortes contributions on observe rarement une conjonction de fortes contributions "hytq" et "hyqh" (moins d'un quart des secteurs concernés);
- les sources hyqh sont prépondérantes sur C2, les sources hytq sur C10;
- pour C100 et CMA, les contributions sont plus nettement sensibles sur la dispersion géométrique que sur la dispersion arithmétique.

Pour les autres catégories de sources d'incertitudes, la contribution à la dispersion arithmétique est en général plus forte que la contribution à la dispersion géométrique. Les seuls cas où une contribution dépasse 0,35 en valeur absolue sont:

- l'incertitude due aux seuils de rupture (pas pour tous les secteurs concernés);
- les contributions à la dispersion arithmétique pour les cas où le coût déterministe est nul, lorsque des catégories de sources d'incertitudes induisent des seuils d'apparition de dommages.

On a plus particulièrement pris en considération les contributions (autres que celles correspondant aux relations T-Q-H) dépassant 0,1 et 0,2. Soulignons que les contributions des seuils (debo, deve, rupt) présentent des valeurs très variables.

Pour les autres catégories de sources d'incertitudes, les fortes contributions sont le plus répandues pour "fonc" (fonctions de coût et répartition saisonnière des crues, 100 valeurs de contributions fortes sur Va), puis "hadu" (hauteur et durée de submersion, 64 valeurs), "plan" (hauteur de plancher, 27 valeurs), "surf" (surface inondée, 7 valeurs). Les fortes contributions de "dens" (pourcentages surfaciques d'occupations des sols) sont plus rares, et toujours associées à des sources d'incertitudes présentant des logiques communes (fonc ou surf).

Pour les contributions supérieures à 0,2 il y a cohérence entre les dispersions arithmétique et géométrique. Les contributions "fonc" et "hadu" sont plus sensibles sur Va, "plan" plus sur Sg. Les fortes contributions de "surf" sont le plus souvent associées à celles de "fonc" (dans 54% des cas). On observe la même chose pour les fortes contributions de "hadu" associées à celles de "fonc" (77% des cas). De même, les fortes contributions de "plan" sont souvent associées à celles de "fonc" et "hadu".

Contrairement aux sources d'incertitudes de nature hydrologique, toutes ces catégories présentent leurs contributions majeures sur des dispersions totales moyennes ou faibles en valeur absolue.

Pour finir, nous avons examiné les contributions inférieures à -0,05, c'est-à-dire les sources d'incertitudes qui "réduisent" la dispersion due aux autres sources. On observe, en-dehors d'un cas particulier, que ces situations correspondent à l'une des situations suivantes:

- seuils de début de submersion (on est confronté ici à des coûts faibles en valeur absolue);
- crues correspondant à un coût déterministe nul (certaines sources d'incertitudes augmentent la proportion de valeurs de coût nulles);
- effet des incertitudes sur les seuils de rupture.

Dans ce dernier type de cas, cela concerne des crues proches des seuils de rupture, pour lesquelles les distributions de coût sont fortement influencées quand on fait varier les seuils.

X.3.3.4. La dispersion sur la relation "cote - coût"

Jusqu'ici, on a considéré que l'évaluation des coûts portait sur des crues de période de retour déterminée, ce qui fait intervenir les incertitudes sur les relations hydrologiques (T-Q-H). On a vu que ce choix, motivé par le cadre d'aide à la décision et par la prise en compte du critère du CMA, conduit à de très fortes incertitudes. Si l'on menait une évaluation du coût pour une crue de cote déterminée, on observerait les dispersions correspondant à la situation sans les sources d'incertitudes de la catégorie "hydr". Le tableau X.3 présente les valeurs de dispersion correspondantes. Notons qu'ici le CMA représente bien une intégration des coûts par rapport à la fréquence, en supposant la loi de fréquence parfaitement connue.

Tableau X.3. : dispersions sur les coûts estimés pour une crue de cote donnée (500 simulations sur 112 secteurs inondables)

légende:

<i>C2</i>	<i>coût pour une crue biennale</i>	<i>Ca</i>	<i>espérance du coût (arithmétique)</i>
<i>C10</i>	<i>coût pour une crue décennale</i>	<i>Sa</i>	<i>écart-type du coût</i>
<i>C100</i>	<i>coût pour une crue centennale</i>	<i>Va</i>	<i>Sa/Ca coefficient de variation</i>
<i>CMA</i>	<i>coût moyen annuel</i>	<i>Sg</i>	<i>écart relatif quadratique moyen</i>

	C2	C10	C100	CMA
coefficient de variation:	0,33	0,33	0,48	0,38
$Va = Sa/Ca$	0,16	0,34	0,60	0,42
	0,00	0,00	0,04	0,03
	0,77	2,78	3,82	2,97
écart relatif quadratique moyen:	0,86	1,29	0,81	1,26
	1,23	2,05	1,90	7,42
	0,30	0,25	0,26	0,24
Sg	5,77	8,03	15,83	75,90

chaque case du tableau présente successivement les informations statistiques suivantes: valeur moyenne, écart-type, valeurs extrêmes sur l'échantillon

On observe que les valeurs de dispersions restent très variables, notamment en ce qui concerne la dispersion géométrique. Par rapport à l'analyse complète sur la loi de fréquence des coûts, les dispersions moyennes se trouvent réduites d'un facteur 4 à 6 pour les coûts des crues assez fréquentes (C2, C10), d'un facteur 2 pour les coûts des crues rares (C100) et le CMA. Les valeurs maximales se trouvent bien réduites pour les crues fréquentes, ainsi que l'ensemble des valeurs minimales en ce qui concerne la dispersion arithmétique.

Dans ces conditions, on peut être amené à choisir dans un processus de décision entre un critère conceptuellement plus complet (coût-fréquence, CMA) mais moins précis, et un critère plus partiel (coût pour une cote de crue) mais plus précis en valeur.

X.3.4. Les conclusions pour les incertitudes sur le modèle local

Les éléments majeurs à rappeler en conclusion sont d'une part l'importance en moyenne de la dispersion sur les estimations de coût (pour une crue définie en période de retour), d'autre part la très grande variabilité de cette dispersion et de la forme de distribution statistique, entre différents secteurs ou entre différentes crues sur un même secteur. Une partie des valeurs de dispersion est tellement forte que les estimations de coûts correspondantes ont peu de chances -en l'état- de constituer un apport d'information déterminant dans un processus de décision. Soulignons toutefois que cette appréciation concerne soit certains secteurs (et non l'échelle d'une vallée ou d'une région), soit une gamme déterminée de crues sur un secteur donné.

En effet, il apparaît que les incertitudes les plus fortes correspondent soit à la proximité de seuils d'apparition de dommages, soit à des gammes de crues pour lesquelles on observe une forte variabilité des coûts par rapport à l'intensité de crue. Et dans ce cas, une part importante de la dispersion est liée aux incertitudes sur la relation "période de retour - débit" ou sur la relation "débit - cote". Ces deux sources ont rarement une influence importante conjointe (même si leur influence moyenne est forte dans l'absolu). Pour quelques secteurs particuliers, c'est l'incertitude sur les seuils de rupture de digue qui contribue principalement à l'incertitude sur les coûts. Notons que parmi ces sources majeures d'incertitudes, seules celles sur la relation "débit - cote" apparaissent pouvoir être réduites de façon sensible (par le calcul de lignes d'eau de crues, et la définition de relations Q-H locales se substituant à celle caractéristique de la station hydrométrique). Ce n'est que sur des dispersions moins fortes que les autres sources d'incertitudes présentent une influence sensible.

Si l'on considère le coût moyen annuel (CMA), ou par ailleurs le coût pour une crue définie en cote, les incertitudes sont sensiblement moins fortes (dispersions moyennes de 30% à 130%).

Sur le plan méthodologique, ces résultats confortent le choix qui a été fait de recourir à une analyse des incertitudes par une méthode de Monte-Carlo simulant des sources d'erreurs agrégées, car ces incertitudes sont importantes et non linéaires. De même, analyser séparément certaines sources d'incertitudes ne peut conduire à des conclusions représentatives que si l'on simule conjointement toutes les autres sources, et que l'on examine l'effet des premières sur la dispersion globale.

Par ailleurs, nous sommes obligés de renoncer à certaines valorisations de cette analyse d'incertitudes, telles que l'on pouvait les envisager initialement:

- afficher des dispersions "standard" sur les estimations de coût, à partir de quelques critères;
- ou même au-delà, envisager une modélisation simplifiée permettant d'estimer a priori les incertitudes sans devoir recourir à une procédure aussi lourde que celle que nous avons mise en oeuvre.

Les résultats obtenus nous semblent devoir conduire à cette conclusion, pour deux raisons. La première est la variabilité des indicateurs statistiques sur les estimations de coût, avec la variabilité des formes de distributions statistiques. La seconde raison s'appuie sur le fait que les fortes dispersions correspondent à des situations de seuils ou de gradients, qu'on ne peut éventuellement identifier a priori qu'au prix d'un diagnostic complexe: "localiser" les crues "à risque" sur des résultats intermédiaires du modèle local, et tester la sensibilité à certains paramètres, au cas par cas.

Enfin, même si l'on se base sur les paramètres statistiques issus de nos simulations, et décrivant les incertitudes sur différentes crues et pour chaque secteur, il n'est pas possible de simuler directement ces incertitudes sur les résultats, car on ne peut pas identifier a priori la forme de leur distribution statistique. Nous verrons les conséquences de ce point dans le chapitre suivant, consacré à l'évaluation régionale des coûts des dommages dus aux inondations.

XI. DU MODELE LOCAL AU BILAN REGIONAL

LE DELUGE

*La pluie qui tombe ensemence la rivière
qui s'enfle accouchant d'une crue
la pluie qui tombe ensemence la crue
qui se gonfle et couvre l'horizon
la pluie qui tombe ensemence l'horizon
il pousse au-dessus des montagnes
une végétation de vagues sévères
l'horizon fond il ne reste que l'eau*

Queneau, 1943

C'est une confusion similaire que commet l'esprit préscientifique dans sa méconnaissance des réalités d'échelles. Il porte les mêmes jugements expérimentaux du petit au grand et du grand au petit. Il résiste à ce pluralisme des grandeurs qui s'impose pourtant à un empirisme réfléchi, en dépit de la séduction des idées simples de proportionnalité.

Bachelard, 1977, p. 223

En introduction à la troisième partie de ce mémoire, nous avons présenté les types d'applications envisagés pour le cadre de modélisation développé. Parmi ces applications figure l'évaluation du coût des dommages dus aux inondations à l'échelle régionale: unité administrative, vallée, sous-bassin... Dans une première étape, au vu de la nature des données disponibles et des hétérogénéités des phénomènes ou des connaissances, nous avons défini des règles de découpage géographique des aires d'étude et constitué un modèle d'évaluation local qui estime les coûts à l'échelle de chaque secteur inondable.

On peut donc définir une région comme un ensemble de biefs constitués chacun de secteurs rattachés à une station hydrométrique. Par conséquent, les dommages régionaux résultent de la composition des dommages estimés sur chaque secteur par le modèle local. De même, l'incertitude sur l'évaluation régionale résulte de la composition des incertitudes locales.

Nous justifierons l'usage fait ici du terme de "composition", en montrant sur le plan conceptuel comment des cohérences partielles de différents ordres (aléa hydrologique, économie, sources d'incertitudes) conditionnent la relation entre résultats régionaux et résultats locaux. Sur des régions de notre aire d'étude, nous illustrerons séparément les enjeux de la prise en compte de la dimension spatiale de deux facteurs: l'aléa hydrologique et les sources d'incertitudes. L'importance intrinsèque de ces deux facteurs par rapport à la prise de décision a déjà été évoquée plus haut.

Pour finir, on replacera l'évaluation régionale des dommages dans le cadre d'analyse de la décision. Pour cela, on tentera de définir une démarche d'évaluation régionale permettant de se focaliser sur les enjeux majeurs en terme de coûts et d'incertitudes sur ces coûts.

XI.1. LES COHERENCES PARTIELLES A RESPECTER DANS L'AGREGATION REGIONALE DES COUTS DES DOMMAGES

On considèrera qu'estimer un coût régional peut se ramener à l'une des démarches suivantes:

- A - estimer le coût pour un événement hydrologique qui est défini en intensité en chaque unité hydrologique de la région analysée;
- B - estimer une loi de fréquence pour le coût régional;
- C - estimer le coût moyen annuel régional (pouvant résulter de la loi de fréquence sur le coût régional).

Jusqu'à présent, on a raisonné à l'échelle de tronçons de cours d'eau homogènes, sur lesquels un événement hydrologique peut être défini -en première approximation- par une grandeur unique, par exemple une cote maximale ou un débit de pointe. Si l'on néglige alors la variabilité de la forme de l'hydrogramme, ou du moins l'effet de cette variabilité (ce qui est plus raisonnable), on peut lier le coût dû à une crue à la fréquence de dépassement de cette crue. A l'échelle régionale par contre, un événement ne peut être défini complètement par une grandeur unique, dans la mesure où les relations hydrologiques amont - aval d'une part, entre affluents d'autre part, sont variables. A contrario, on ne peut définir complètement un événement par une fréquence ou une période de retour. Ce premier aspect, que l'on développe un peu plus loin, va concerner en priorité une démarche de type B.

De surcroît, quel que soit le type d'évaluation envisagé, se posent deux autres problèmes d'échelle spatiale pour la composition des coûts:

- l'échelle économique de la zone touchée: si l'on peut considérer que les dommages matériels s'additionnent le long d'une vallée inondée, d'autres types de dommages sont susceptibles de présenter des effets cumulatifs (coupures de voies de communication...);
- les degrés de cohérence entre sources d'incertitudes: si certaines sources d'erreurs agissent de la même façon sur les coûts pour un ensemble de secteurs, d'autres purement locales sont indépendantes et peuvent -en moyenne- faire l'objet de compensations partielles.

Ainsi, en additionnant sur des secteurs protégés par des digues différentes les coûts respectifs correspondant partout à une hypothèse pessimiste de "rupture précoce", on obtient un coût global vraisemblablement irréaliste. Ce coût correspond à une situation physique de probabilité très faible, mais si l'hypothèse de "rupture précoce", prise séparément sur chaque secteur, est réaliste. Il en serait de même si l'on appliquait uniformément l'hypothèse optimiste de "rupture tardive".

XI.1.1. La composition des coûts en regard de l'aléa hydrologique

On a évoqué en introduction les grandes lignes du problème de la cohérence de l'aléa hydrologique à l'échelle régionale. En effet, un même événement climatique, même s'il génère des crues (dommageables ou non) sur tous les cours d'eau considérés sur la région, ne se traduit pas par des événements hydrologiques locaux de même fréquence. Parmi les nombreux exemples que l'on pourrait mentionner, citons les résultats présentés par Consuegra Zammit (1992) sur différents affluents de la Broye, en Suisse, ou l'étude des concomitances de crues au confluent entre la Loire et la Vienne (Guilbot et al, 1982 et 1984). De même, selon leur localisation et leur déplacement, des épisodes de pluie génèrent des crues de fréquences différentes à l'amont et à l'aval d'un même cours d'eau.

En fait, la question de la cohérence des crues se pose à deux niveaux différents:

- le problème usuel (ce qui ne signifie pas "simple") porte sur la formation des crues des parties amont vers les parties aval d'un bassin, avec notamment l'analyse des décalages des hydrogrammes au niveau des confluent et l'hydrogramme résultant;
- par rapport à l'évaluation économique, le problème porte avant tout sur la cohérence entre les intensités locales maximales des crues au cours d'un même événement climatique; l'objectif visé est alors la conjonction (relative) des apparitions de dommages; même si un affluent présente un poids "hydrologique" faible en raison d'un retard relatif de sa crue par rapport à celle du cours d'eau principal, son poids économique peut être significatif.

Si l'étude du confluent Loire-Vienne, déjà citée (Guilbot et al, 1982; 1984), analyse la concomitance de débits, la question pour nous est plutôt de connaître la corrélation entre les débits maximaux respectifs à l'amont (Loire et Vienne) et à l'aval (Loire). On aborde plus loin les questions de composition économique des coûts sur deux sites différents, et d'éventuels effets cumulatifs. Ces effets sont liés à la proximité dans le temps de deux (ou plusieurs) submersions, sans que l'on puisse définir un écart de temps au-delà duquel les dommages de deux événements (sur un même bief ou sur des biefs différents) n'interfèrent plus. Cela illustre d'autant plus le fait que la notion de "concomitance des dommages" doit être comprise dans un sens plus large que celles de débits.

A l'échelle d'une région, considérons qu'un événement pluvieux donne lieu à une crue, dommageable ou non, sur chaque secteur. Si l'on s'affranchit du problème de composition

économique, la variable aléatoire "coût d'un événement" C est alors la somme des variables aléatoires C_i "coût de cet événement sur le secteur i ":

$$C = \sum C_i. \quad (86)$$

Le coût moyen annuel régional CMA est en fait l'espérance statistique de C , soit la somme des espérances sur les C_i , soit les coûts moyens annuels locaux CMA_i :

$$CMA = \sum CMA_i. \quad (87)$$

Par contre, la distribution statistique de C , pour des variables de coûts C_i données, dépend de la covariance sur ces coûts, et ne peut donc être estimée qu'à partir de la connaissance de la structure spatiale des crues.

Cette connaissance peut se traduire sous différentes formes plus ou moins élaborées:

- modélisation hydrologique de la région (relations pluie-débit, propagations des crues...) et connaissance des corrélations spatiales temporelles entre les variables d'entrée (précipitations par sous-bassin, débit amont...);
- détermination des corrélations entre les intensités locales de crue...

Mais dans tous les cas on ne déterminera la distribution statistique de C qu'en simulant un nombre important d'événements, à moins que l'on dispose de chroniques de données suffisamment longues. En XI.2 on présente, au travers de deux "régions" de l'aire d'étude, l'influence de la dimension spatiale de l'aléa hydrologique sur le coût régional. Citons le travail présenté par Schaake et Fiering (1967), qui a consisté à simuler un fond d'assurance portant sur plus d'un millier de zones urbaines inondables. Sur chaque région indépendante, ont été simulées des séries d'événements de crues respectant les covariances observées entre débits de pointe. En négligeant ces covariances, les coûts et indemnités simulés à l'échelle globale auraient été trop peu variables et auraient conduit à sous-estimer le risque assurantiel.

XI.1.2. La composition économique des coûts

On a évoqué plus haut le problème de la composition économique des coûts locaux en coût régional, que l'on peut résumer par une question posée à chacune des échelles considérées:

- les coûts locaux dépendent-ils des dommages subis sur le reste d'une vallée ou d'une région ?
- comment agréger les coûts locaux, selon leur définition, pour estimer un coût régional ?

La nature des effets régionaux

Ces questions n'interviennent pas a priori en ce qui concerne les dommages directs, dommages matériels (ou humains) dus à l'action directe de l'eau: ces dommages sont conditionnés par les paramètres locaux de la submersion et par les réactions à court terme de la population. Eventuellement, pourrait-on imaginer que pour des crues fortes et brusques, l'ampleur spatiale perturbe les communications au-delà de l'échelon local, et limite d'autant la latitude de réaction de la population (ainsi que l'aide en temps réel qui peut être apportée de l'extérieur).

Par contre, l'ampleur régionale d'un événement peut limiter, et même obérer, la capacité des services de secours (pour autant que les concentrations de moyens correspondent aux zones touchées) et nécessiter de recourir à une assistance plus éloignée. De même, cela est susceptible de retarder les travaux de remise en état (les professionnels concernés dans un rayon d'action raisonnable étant "submergés" de commandes). Cet accroissement de la durée de réparation des dommages directs va ainsi se traduire a priori par des pertes d'exploitation accrues, par des dommages indirects intangibles plus importants (moindre disponibilité des services sociaux, plus longue durée de rupture du mode de vie...). Dans l'état des connaissances actuelles, il semble cependant illusoire de pouvoir quantifier ces phénomènes, même de façon très approchée. En particulier, le problème des réparations intervient dans le moyen terme, et il est difficile d'imaginer quels peuvent être à cette échéance le fonctionnement et les adaptations d'un circuit économique (ou des services publics).

En ce qui concerne les dommages indirects eux-mêmes, ils sont par nature conditionnés par l'ampleur spatiale de la perturbation due à l'inondation. Ces dommages indirects résultent de gênes et

entraves aux activités humaines: arrêt de la production ou des échanges commerciaux, arrêts des services, ruptures de voies de communication... Ils sont limités, "régulés", par des transferts dans le temps et/ou dans l'espace: déviations des voies de communication, modification des circuits d'échanges commerciaux, substitution de services ... Ce degré de "régulation" est différent selon que l'on se place au niveau de l'acteur économique élémentaire ou à différents niveaux collectifs (collectivité locale, région, nation; Parker et al, 1987; Howe et al, 1991). Par conséquent, le bilan économique est différent à ces diverses échelles. Mais on raisonne ici sur les retombées à différentes échelles d'un événement local, tout comme Yezer et Rubin (1987) analysent les effets de l'inondation d'une ville sur la ville voisine.

L'ampleur spatiale d'une inondation grave, qui suit par définition les axes de communication et d'échange privilégiés que sont les vallées, va affecter la capacité de régulation qui existe à différents niveaux:

- allongement des déviations, voire impossibilité des déplacements dans certaines directions (par exemple tous les ponts d'un fleuve sont emportés ou leurs accès sont coupés au niveau du grand lit majeur);
- au-delà d'une certaine proportion de commerces touchés, impossibilité d'un approvisionnement local;
- effets en chaîne plus importants des arrêts de production (notamment s'agissant d'un type de production qui serait concentré pour une part non négligeable dans la vallée touchée);
- arrêts de services non suppléables (par exemple coupure simultanée d'une usine de traitement d'eau potable et d'une interconnection qui aurait permis "d'importer" de l'eau depuis des collectivités voisines...).

On pense immédiatement à des effets cumulatifs, supérieurs à la somme des effets d'inondations locales. Selon Anderson (1990), la proportion de dommages indirects augmente avec l'ampleur géographique d'une catastrophe naturelle. Mais par ailleurs, on peut également imaginer pour certains impacts qu'au-delà d'un niveau global de perturbation, l'augmentation de la zone inondée ne pourra plus ajouter de perturbations supplémentaires à des activités totalement paralysées. Illustrons ceci par un parallèle avec les effets des fermetures de voies sur berges, à Paris, lors des crues de la Seine (Bamberger, 1987): les difficultés de circulation (traduites en kilométrage et en temps supplémentaires) ne sont pas très importantes ni au milieu de la nuit (les autres itinéraires sont libres), ni aux heures de pointe où le trafic est très congestionné même en l'absence de fermeture des voies sur berges. On peut ainsi supposer que certains effets auront une importance marginale décroissante par rapport à l'ampleur de la région affectée par les inondations.

L'évaluation des effets régionaux

L'évaluation de tels effets pour une région donnée, et une crue donnée, est confrontée à diverses difficultés:

- le caractère cumulatif du phénomène global "rupture/arrêt + entrave à la régulation" présente pour les voies de communication et les services collectifs un caractère local marqué, qui nécessiterait une analyse de type "prévision de crise" (existence de ponts dont les accès sont hors d'eau, existence de routes sur les côtes, localisation des réservoirs d'eau potable...); on peut éventuellement rechercher de telles analyses dans le domaine routier, pour ce qui concerne les plus grands axes (avec la particularité que les micro-déviations locales sont a priori moins opérantes ici que pour d'autres causes de coupure);
- ce caractère local du phénomène se retrouve également pour ce qui concerne des activités économiques hors commerce de proximité et grande distribution;
- dans les données dont on dispose sur les dommages indirects aux activités, une majorité est issue d'enquêtes sur des événements d'inondation réels (pour des crues d'intensités diverses); par conséquent, ces données intègrent déjà l'interdépendance spatiale des impacts, chacune dans la mesure où ce phénomène a joué (c'est-à-dire selon la

vulnérabilité propre de l'activité à cela, selon l'ampleur spatiale de la crue à laquelle on s'est référé), mais uniquement pour les activités situées dans la zone inondée.

En ce qui concerne les dommages secondaires subis par les activités productives et commerciales situées en-dehors de la zone inondée, l'une des méthodes d'évaluation proposée repose sur l'usage de matrices d'échanges inter-industriels, ou plus généralement de matrices économiques régionales "input-output". A la condition que ces matrices englobent toute la région touchée directement ou indirectement, on peut imaginer qu'elles permettent une estimation réaliste de ces seuls dommages secondaires dus aux perturbations des circuits économiques.

Cependant, de telles méthodes ont des validités d'application limitées (Howe et al, 1991):

- elles reposent sur des hypothèses d'un réalisme limité, et nécessitent d'être mises en oeuvre par des analystes qualifiés;
- l'élaboration et la réactualisation de matrices "input-output" sont lourdes et coûteuses;
- elles n'intègrent qu'une partie des souplesses et capacités d'adaptation des circuits économiques, et sont peu utilisables face à des "chocs" d'approvisionnement.

Comme nous avons essayé de le montrer, les approches procédant par agrégation géographique soulèvent de grandes difficultés pour la composition des coûts à l'échelle régionale. A l'opposé, des approches macro-économiques sont à même de répondre à cette question, alors même qu'elles ne répondent à aucun des critères que nous nous sommes fixés pour choisir un mode d'évaluation. Ainsi, sur le cas des grandes crues du Bangladesh, une modélisation a été établie sur la base des événements récents, en liant la fréquence du phénomène hydrologique global à la surface inondée, et cette surface à deux composantes du coût macro-économique (Gagey, 1989; Maurice et Schubert, 1989-a): la destruction des stocks (dommages matériels) et la variation de produit intérieur brut (pertes nettes de production).

Dans les exemples et analyses présentés plus loin, nous omettrons totalement cette question de la composition des coûts régionaux, dans la mesure où il ne nous a pas été possible d'approfondir cette voie de travail. Il n'en demeure pas moins que cette question est importante sur les plans conceptuel et opérationnel, notamment dans le cadre de la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (résolution 44/236 de l'Assemblée Générale des Nations Unies).

XI.1.3. La composition des incertitudes

Cette question présente quelque similitude avec le problème de la prise en compte spatiale de l'aléa hydrologique. Reprenons le formalisme utilisé, où C est le coût régional d'un événement donné et C_i le coût sur le secteur i :

$$C = f(C_i, i = 1 \text{ à } n). \quad (88)$$

Si l'on fait abstraction, pour simplifier la présentation, des cohérences hydrologiques et économiques, il reste:

$$C = \sum C_i. \quad (89)$$

Pour prendre en compte les erreurs E_i d'estimation de C_i , on écrit:

$$C = \sum (C_i^* + E_i) \quad (90)$$

Soit une erreur sur le coût régional égale à:

$$C - C^* = E = \sum E_i. \quad (91)$$

Si les erreurs E_i étaient des variables aléatoires indépendantes, l'erreur moyenne régionale serait égale à la somme des erreurs moyennes, et la variance de l'erreur régionale serait égale à la somme des variances. Mais il n'y a pas indépendance, et cette deuxième proposition est fautive. A contrario, les erreurs sur les coûts de différents secteurs ne sont pas parfaitement corrélées. L'estimation de l'incertitude sur le coût régional doit prendre en compte les cohérences partielles entre les incertitudes sur les coûts locaux.

De telles cohérences dépendent des cohérences spatiales entre diverses sources d'incertitudes, et du mode de contribution de chaque source à l'incertitude globale. Nous avons montré au chapitre précédent à quel point la contribution moyenne d'une source d'incertitudes variait d'un secteur à l'autre. Si l'on ajoute à cela la variabilité des distributions statistiques résultant sur les coûts locaux, on doit renoncer à une prise en compte globale, synthétique, voire simplifiée des cohérences

entre erreurs locales. Nous présenterons en XI.3 la démarche analytique que nous avons mise en œuvre à échelle régionale, pour intégrer les dimensions spatiales des sources d'incertitudes.

Pour conclure cette première analyse générale, on présente ci-dessous une caractérisation qualitative du degré de cohérence spatiale des diverses catégories de sources prises en compte dans la simulation des incertitudes locales (cf. X.2.3):

- relation " période de retour-débit" T-Q: le degré de cohérence spatiale est lié au degré de cohérence hydrologique, dans la mesure où les lois de fréquence des débits locaux auront été estimées sur les mêmes échantillons d'événements (plus ou moins corrélés spatialement), ou par corrélations entre stations hydrométriques cohérentes; on peut considérer que le degré d'adéquation de diverses lois statistiques est lié également à la cohérence physique des crues analysées en chaque site;
- répartition saisonnière de crues: ici encore, le degré de cohérence spatiale est lié au degré de cohérence hydrologique, les répartitions étant estimées à partir d'échantillons d'événements climatiques plus ou moins cohérents;
- relation "débit-cote" Q-H: cette relation, qu'on peut considérer indépendante entre secteurs relevant de stations hydrométriques différentes, présente a priori des erreurs d'autant plus corrélées que les secteurs sont proches; cela étant, on peut supposer que pour deux secteurs éloignés de plus de quelques kilomètres ou dizaine de kilomètres, les erreurs sont largement indépendantes (variabilité des lignes d'eau supérieure à l'erreur sur la courbe de tarage à la station);
- relation cote-surface: même si l'amplitude des erreurs dépend à priori du nombre de surfaces connues, on peut considérer que les erreurs dépendent exclusivement de la géomorphologie de chaque secteur (très grande dispersion des "comportements");
- hauteur de submersion: source d'erreurs locale (étant donné le mode de simulation adopté);
- durée de submersion: les incertitudes liées à la forme d'un hydrogramme sont cohérentes par tronçon de cours d'eau, mais la durée dépend également de la variable d'entrée locale "durée", ainsi que de conditions locales d'écoulement (digue, micro-topographie...); en première approche, la cohérence de cette source d'incertitudes est partielle à l'échelle du bief;
- occupations des sols (pourcentage de surface): source d'erreurs locale;
- hauteurs de plancher: on peut considérer qu'une source d'erreurs est la représentativité de la valeur moyenne adoptée par défaut, l'autre les caractéristiques de l'habitat sur le secteur; les valeurs recueillies se sont révélées être si variables, qu'on peut supposer cette source d'erreurs comme locale;
- fonctions de coûts élémentaires: les erreurs proviennent de la mauvaise représentativité moyenne de ces fonctions, ainsi que de la variabilité de chaque type d'occupation des sols entre différents secteurs; on ne dispose pas ici d'éléments permettant de trancher; le mode de constitution des fonctions étant peu assuré, on peut considérer que la faible représentativité moyenne constitue une source d'incertitudes cohérente à l'échelle régionale;
- seuils de phénomènes hydrauliques: sources d'erreurs locales.

XI.2. LA PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION SPATIALE DE L'ALEA HYDROLOGIQUE

Après avoir donné une présentation générale de cette question, nous illustrons ici sur deux cas réels des modes de prise en compte de la cohérence hydrologique régionale: le bassin de la Vienne (Clain, Creuse et Vienne), et la vallée centrale de la Loire de part et d'autre du confluent de la Vienne.

Il s'agit là de démarches simples, basées essentiellement sur les données recueillies pour la mise en œuvre du modèle local (chapitre IX), sans qu'on ait recherché des données spécifiques (en particulier des chroniques de débits de crue). Même si nos démarches constituent des approches minimalistes, à notre sens, on peut considérer que les résultats présentent des ordres de grandeur réalistes pour les régions analysées. Il va de soi que chaque contexte hydrologique est spécifique, et l'effet des cohérences hydrologiques sur les coûts régionaux dépend également de la répartition spatiale des enjeux économiques le long des vallées. La figure XI.1 présente les deux régions analysées.

Précisons que les valeurs de coût considérées ici correspondent aux estimations "déterministes", sans prise en compte des incertitudes (coûts exprimés en millions de francs, valeur au troisième trimestre 1991).

XI.2.1. Le cas du bassin de la Vienne

Définition de la région considérée

Cette région correspond aux zones inondables du bassin de la Vienne incluses dans l'aire d'étude, soit les cours d'eau suivants:

- le Clain sur un linéaire de 64 kilomètres: bief CL1;
- la Creuse sur un linéaire de 234 kilomètres: biefs CR1, CR2, CR3, CR4 (CR4A et CR4B);
- la Vienne sur un linéaire considéré de 282 kilomètres: biefs V1, V2, V3, V4, V5, V6 (V6A et V6B), V7.

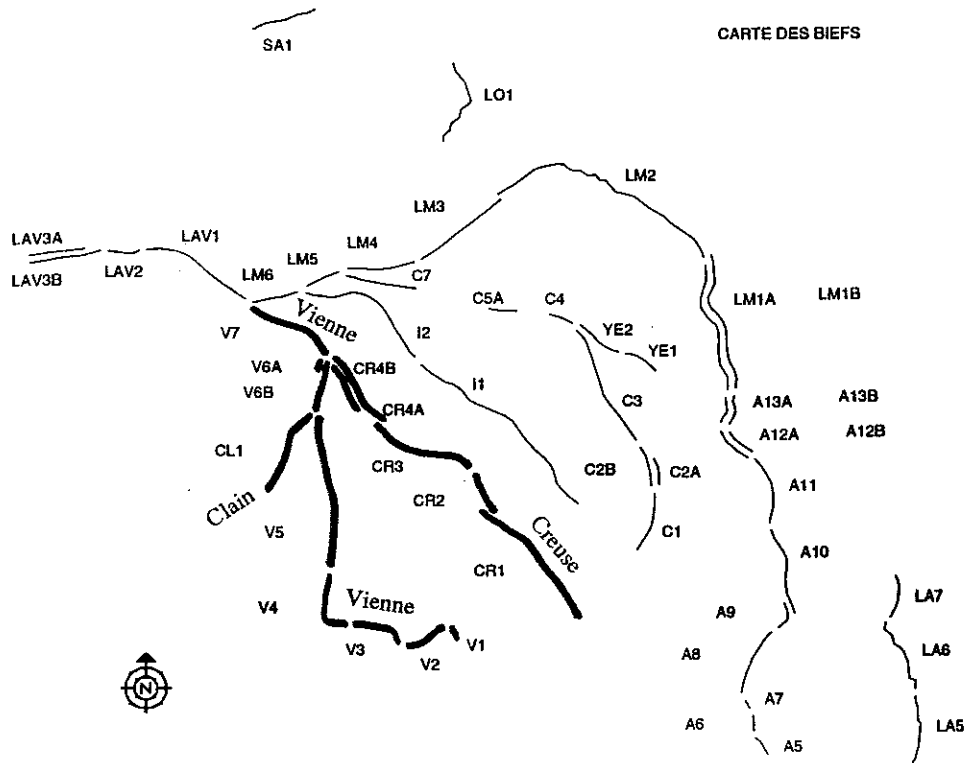
Par souci de cohérence et de simplification, on regroupe les biefs initiaux correspondant aux deux rives d'un même tronçon physique de cours d'eau (dans ce cas, le découpage répond uniquement à un critère administratif). L'annexe XI.A présente les coût par bief en fonction des fréquences de dépassement du maximum de crue. Dans un premier temps, nous avons considéré que l'information sur les cohérences hydrologiques était totalement absente, notamment dans un souci démonstratif au-delà du seul cas du bassin de la Vienne. Nous reviendrons sur ce point plus loin. Mais en se plaçant en situation d'ignorance complète, les seules hypothèses que l'on puisse avancer sont les suivantes:

- les événements ne sont certainement pas totalement homogènes en fréquence sur chaque cours d'eau; a contrario, les fréquences d'un même événement sur deux biefs voisins (d'un même cours d'eau) sont corrélées;
- les événements ne sont certainement pas totalement homogènes en fréquence entre les trois cours; a contrario, les fréquences d'un même événement sont au moins partiellement corrélées entre les tronçons amont d'un confluent et le tronçon aval.

Pour cerner la variabilité des coûts régionaux, nous avons choisi de considérer trois hypothèses contrastées, incluant les situations extrêmes envisageables en regard de la cohérence hydrologique:

- H1 - Les événements de crue se produisent sur tout le bassin, mais les fréquences locales de dépassement ($F = 1/T$) sont indépendantes sur chacun des 12 biefs (on a regroupé CR4A et CR4B, V6A et V6B);
- H2 - les événements de crue se produisent sur tout le bassin, mais les fréquences sont indépendantes entre cours d'eau, et homogènes entre biefs d'un même cours d'eau;
- H3 - les événements de crue sont homogènes en fréquence sur tout le bassin.

(a) bassin de la Vienne



(b) vallée de la Loire centrale

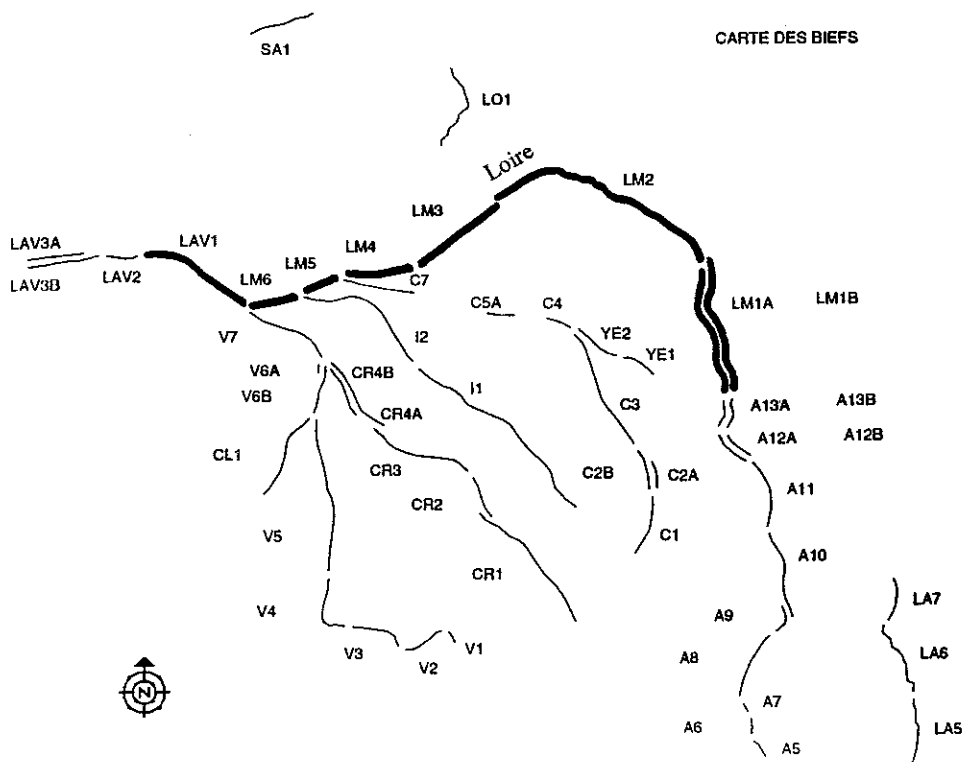


Figure XI.1. : les régions étudiées pour la prise en compte de l'aléa hydrologique

L'approche par simulation

Pour estimer les coûts régionaux, 2000 événements ont été simulés par tirage aléatoire de fréquences de dépassement pour chacune des trois hypothèses de cohérence, c'est-à-dire selon les cas: une fréquence de dépassement par bief (H1), une par cours d'eau (H2), une pour tout le bassin (H3). A partir d'un tirage d'une fréquence F (par une variable aléatoire suivant une loi uniforme sur l'intervalle]0,1[), le coût C correspondant (à une échelle géographique donnée) a été estimé par interpolation linéaire entre les couples de valeurs F-C correspondant aux périodes de retour (T= 1/F) 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200 et 500 ans. Pour les valeurs F inférieures à 1/500, on a prolongé linéairement le dernier segment (F entre 1/200 et 1/500; voir le calcul du CMA, VIII.2.5).

En additionnant, pour chaque événement, les coûts ainsi simulés sur chaque unité géographique, on a obtenu trois séries de 2000 coûts régionaux, dont les caractéristiques statistiques sont présentées dans le tableau XI.1. Le tableau XI.2 compare les quantiles empiriques de coûts (estimés sur les 2000 valeurs, et définis par la période de retour T et la fréquence F) aux sommes des coûts locaux pour ces mêmes fréquences.

Tableau XI.1. : caractéristiques des coûts régionaux dus aux inondations (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

hypothèses de cohérence	H1	H2	H3
valeur moyenne	262	265	261
écart-type	213	344	526
coefficient de variation Cv	0,81	1,30	2,02
coefficient d'asymétrie Cs	1,60	2,68	3,40
coefficient d'asymétrie Cs* sans biais (Kite, 1977)	1,61	2,69	3,41
coefficient d'aplatissement Ck	6,4	12,8	16,7
valeur minimale du coût	11,00	3,27	1,66

$$Cv = \frac{\text{écart-type}}{\text{espérance}} \quad Cs = \frac{\text{moment centré d'ordre 3}}{\text{écart-type à la puissance 3}} \quad Ck = \frac{\text{moment centré d'ordre 4}}{\text{écart-type à la puissance 4}}$$

$$Cs^* = Cs \times \left(1 + \frac{8,5}{N}\right) \text{ avec } N \text{ taille de la population}$$

Tableau XI.2. : quantiles de coût régional (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

période de retour	fréquence de dépassement	hypothèses de cohérence			estimation directe (H3)
		H1	H2	H3	
2	0,500	197	132	41	41
5	0,200	411	430	300	299
10	0,100	547	676	774	794
20	0,050	682	992	1406	1344
50	0,020	846	1320	2012	2050
100	0,010	986	1628	2488	2601
200	0,005	1157	1944	3051	3317
500	0,002	1291	2419	3714	4064
CMA		262	265	261	261

CMA: coût moyen annuel

Il apparaît bien sur ces tableaux que l'espérance de coût, en l'occurrence le coût moyen annuel (CMA), ne dépend pas du niveau de cohérence géographique des événements de crue. Par contre, l'écart-type sur le coût régional d'un événement, ainsi que tous les paramètres caractérisant la distribution, en dépendent beaucoup (facteur 2.5 sur l'écart-type, tableau XI.1). On observe également que lorsque l'on additionne des coûts indépendants, l'asymétrie de la distribution diminue: de 3,4 à 1,6 en passant de l'hypothèse H3 à H1 (indépendance des biefs).

Ceci se traduit directement sur les quantiles de coûts qui nous intéressent (tableau XI.2), c'est-à-dire correspondant à des événements rares. Le fait de considérer une cohérence tend à accroître le coût des crues rares (facteur supérieur à 2,5 entre les extrêmes H1 et H3) et décroître le coût des crues plus fréquentes. Même si l'on écarte l'hypothèse H1 la moins réaliste, il reste un facteur 1,6 entre les deux estimations (H2 et H3) d'un coût centennal. Soulignons par ailleurs qu'on observe une bonne concordance entre l'estimation directe et la simulation de l'hypothèse H3 (quantiles écartés de moins de 10 % en valeur).

Ces résultats illustrent bien les enjeux de la prise en compte de la cohérence spatiale de l'aléa hydrologique, et au vu de cet exemple "d'école" rien ne permet de négliger cette question en regard des incertitudes sur les coûts locaux.

L'approche analytique

Pour la suite, on a restreint l'analyse aux hypothèses H2 et H3, qui nous ont semblé mieux "encadrer" la réalité hydrologique du bassin de la Vienne (voir plus loin). Cela revient à considérer trois unités, les trois cours d'eau, entre lesquels les crues sont indépendantes (H2) ou homogènes en fréquence. Le tableau XI.3 présente les caractéristiques statistiques des coûts sur les cours d'eau (issus de la simulation H2), qui traduisent des similitudes de distributions.

Tableau XI.3. : caractéristiques statistiques des coûts sur les cours d'eau supposés homogènes (simulation de 2000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

légende: voir tableau XI.1

	Clain	Creuse	Vienne
espérance de coût CMA	67	48	150
écart-type	148	97	291
coefficient de variation Cv	2,20	2,02	1,94
coefficient d'asymétrie Cs	3,41	3,67	3,53
coefficient d'asymétrie Cs*	3,42	3,69	3,54
coefficient d'aplatissement Ck	17,2	19,7	18,3
valeur minimale de coût	0	1,600	0,075

L'objectif visé était d'identifier une forme analytique pour les distributions des coûts (par cours d'eau), afin de composer ces coûts de façon analytique, et non plus par simulation. Pour cela, on s'est basé sur les méthodes proposées par Cunnane (1989) pour l'analyse statistique des grandeurs hydrologiques, à partir des séries de 2000 valeurs:

- courbes liant le coût C au logarithme népérien de $(T - 0,5)$, où T est la période de retour empirique ($T = 2000/n$, où n est l'ordre du coût C parmi les 2000 valeurs classées par ordre décroissant; formes types dans Cunnane, 1989, page 17);
- confrontation de paramètres statistiques (coefficients Cv, Cs, Ck) aux abaques caractéristiques de différentes lois de distribution (Cunnane, 1989, page 20).

Les courbes observées sont présentées en annexe XI.A. Pour les coûts les plus élevés, aucune des distributions-types ne présente une bonne concordance. Pour les autres valeurs, et en

référence aux paramètres statistiques, il est apparu qu'une distribution Pearson type 3 pouvait correspondre le moins mal (au vu de la forme des courbes), avec une fonction de densité:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\Gamma(\lambda)} \cdot e^{-\alpha(x-m)} \cdot [\alpha(x-m)]^{\lambda-1} \quad (92)$$

m paramètre de position, α paramètre d'échelle, λ paramètre de forme, Γ fonction Gamma (f est une fonction de densité de la loi Gamma pour m = 0).

De même, les distributions de coûts régionaux simulés pour les hypothèses H2 et H3 présentent des caractéristiques proches de celles d'une loi Pearson 3.

Pour identifier les paramètres de ces lois, on disposait a priori de la méthode des moments et de celle du maximum de vraisemblable. Les approches itératives numériques développées pour cette dernière méthode étant inapplicables pour les séries de coûts observés, on a utilisé la méthode des moments (voir Brunet-Moret, 1969; Bobée, 1976; Kite, 1977):

- m + λ / α est la valeur de l'espérance;
- λ / α^2 celle de la variance;
- $2 / \sqrt{\lambda}$ celle du coefficient d'asymétrie.

Le tableau XI.4 présente la valeur des paramètres estimés, avec l'écart-type asymptotique d'estimation (Bobée, 1976).

Tableau XI.4. : estimation des paramètres de lois Pearson type 3 avec les écart-types asymptotiques d'estimation (Bobée, 1976)

$$f(x) = \frac{\alpha}{\Gamma(\lambda)} \cdot e^{-\alpha(x-m)} \cdot [\alpha(x-m)]^{\lambda-1}$$

série de valeurs de coûts	$\alpha \cdot 10^6$	λ	m
bassin H2	2,16 (0,286)	0,553 (0,120)	9,7 (23,1)
bassin H3	1,11 (0,172)	0,343 (0,086)	- 47,5 (32,0)
Clain	3,95 (0,613)	0,342 (0,086)	- 19,3 (9,0)
Creuse	5,62 (0,921)	0,294 (0,078)	- 4,5 (5,7)
Vienne	1,94 (0,309)	0,318 (0,082)	- 14,1 (17,5)

m paramètre de position, α paramètre d'échelle, λ paramètre de forme

Les paramètres α et λ sont déterminés de façon assez précise, contrairement au paramètre m. Le paramètre de forme λ est très proche pour H3 et les trois cours d'eau. Pour estimer l'adéquation de cette loi de distribution, on a simulé 2000 tirages de coûts (pour chaque cours d'eau), et comparé les quantiles empiriques aux estimations directes, et aux quantiles empiriques tirés de l'analyse précédente (résultats en annexe XI.A). A l'exception des crues fréquentes (quinquennale sur le Clain, biennale sinon), les écarts entre ces trois estimations sont le plus souvent inférieurs à 10 %, et toujours inférieurs à 20 %. Par rapport aux ordres de grandeurs des écarts que l'on veut analyser sur les coûts régionaux, ceci est tout-à-fait raisonnable.

La composition statistique analytique des coûts par cours d'eau se fait alors par addition de trois variables aléatoires de type σCo , où Co suit une loi Pearson type 3 avec $\lambda_0 = 0,3$ (valeurs proches sur les trois cours d'eau) et $\alpha_0 = \sqrt{\lambda_0}$. Considérant des crues rares, nous nous sommes ramenés à des distributions Gamma par souci de simplification (m = 0), dans la mesure où la différence influe peu sur les coûts rares.

Pour l'hypothèse H3 (cohérence des crues), on devrait observer une distribution suivant une loi Pearson type 3 ou Gamma: $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)Co$. De fait, on a observé un λ du même ordre, et l'écart-type observé (526) diffère de l'écart-type estimé ainsi ($535 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) de 1,8 %.

Pour l'hypothèse H2, par contre, il faut composer trois distributions Gamma. Or, cette composition n'est possible sous forme analytique que lorsque les paramètres d'échelle α sont identiques. Le seul point que l'on puisse analyser dans ce cas est l'écart-type de la distribution du coût régional (la variance doit être égale à la somme des variances): l'écart entre la valeur observée pour H2 (344) et la valeur estimée ($340 = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_3)^2}$) est de 0,9 %.

Par l'approche analytique, on peut ici donner une image réaliste complète pour l'hypothèse de cohérence complète (H3), mais seulement un paramètre (l'écart-type) pour l'hypothèse d'indépendance de cours d'eau (H2), ce qui est insuffisant pour caractériser les quantiles de coût régional.

Peut-on préciser l'estimation pour le cas particulier du bassin de la Vienne

Jusqu'ici, nous avons considéré des hypothèses "extrêmes" en termes de cohérence hydrologique. Pour le bassin de la Vienne, il est possible de faire un diagnostic plus précis, en se référant à la critique des données hydrologiques présentée dans l'annexe IX. B.

Le tableau XI.5 présente les quantiles de débits locaux, estimés au niveau des confluent Clain-Vienne et Creuse-Vienne. Au niveau du premier confluent, l'écart entre le débit de pointe aval et la somme des deux débits de pointe amont est compris entre -1,7% et +4% jusqu'à la crue centennale, +8,8% et +5,3% au-delà. Pour le deuxième confluent, cet écart varie de 0 à +7,4% entre les crues biennale et cinquantiennale, de +12% à +25% au-delà. On n'insistera plus sur la prudence avec laquelle il faut considérer des extrapolations de débits rares.

Tableau XI.5. : débits de pointe de crue à proximité des confluent sur la Vienne (en mètres cubes par seconde)

période de retour	confluent du Clain			confluent de la Creuse		
	Clain	Vienne amont	Vienne aval	Creuse	Vienne amont	Vienne aval
2	100	650	750	700	750	1350
5	150	900	1000	900	1000	1900
10	180	1000	1200	1100	1200	2300
20	200	1250	1400	1200	1400	2500
50	260	1300	1500	1400	1500	2800
100	290	1400	1650	1600	1650	2900
200	350	1500	1700	1800	1700	3000
500	400	1600	1900	2100	1900	3200

En dehors peut-être du Clain, on peut considérer qu'il y a peu d'apports intermédiaires entre les valeurs de débits de pointe estimées sur les branches amont et les valeurs qu'on observerait au confluent lui-même. A l'inverse, ces débits de pointe sont susceptibles:

- d'être réduits par laminage de crue dans le lit majeur inondé;
- d'être décalés légèrement entre les deux cours d'eau à l'amont, car les pointes de crues sont assez marquées sur ce bassin.

Malgré cela, les valeurs de débit se "composent" bien, et les écarts entre somme des débits amont et débit aval restent assez faibles en regard de la variabilité des débits sur chaque bief. C'est pourquoi, nous considérons que l'hypothèse de cohérence totale H3 est nettement plus proche de la réalité que l'hypothèse H2 d'indépendance des cours d'eau. Cependant, il serait prématuré d'estimer à

partir de là des quantiles de coûts régionaux, dans la mesure où l'on ne peut pas juger d'un facteur que nous avons négligé pour la fin de cette analyse: le degré d'indépendance des fréquences locales d'événements de crue entre l'amont et l'aval d'un même cours d'eau.

XI.2.2. Le cas de la vallée centrale de la Loire

La problématique et la région considérée

Nous appelons Loire centrale la partie du fleuve comprise entre le confluent de l'Allier et celui de la Maine, sur un linéaire de 404 kilomètres. Ceci correspond aux biefs LM1A, LM1B, LM2, LM3, LM4, LM5, LM6 à l'amont du confluent de la Vienne (totalisant 79 secteurs inondables), et LAV1 à l'aval de ce confluent (7 secteurs, dont le Val d'Authion qui correspond à plus de 34 000 hectares inondables par rupture de digue).

Entre les confluents de l'Allier et de la Vienne exclus, on peut considérer que les autres affluents de la Loire perturbent peu l'homogénéité des fréquences locales de crues. Cette hypothèse est largement reconnue par les hydrologues qui étudient le bassin de la Loire. Par contre, la Vienne influence de façon non négligeable les crues de la Loire à l'aval du confluent. Une étude a été effectuée, par le Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation de Montpellier, sur les concomitances des crues (Guilbot et al, 1982; 1984). Cette étude a porté sur 66 événements de crues, parmi les 140 plus fortes crues observées à l'aval du confluent entre 1856 et 1979. Les débits de pointe des deux échantillons diffèrent légèrement: moyenne de 3696 mètres cubes par seconde pour les 66 crues contre 3409, écart-type de 751 contre 771. Si l'on considère les crues au moins quinquennales à l'aval, la contribution moyenne de la Vienne au débit de pointe est de 32,6 % (écart-type 9 %), et n'est pas corrélée au débit maximum.

La question posée est la suivante: si l'on s'intéresse aux coûts sur la Loire centrale, en quoi la prise en compte de la cohérence partielle entre l'amont et l'aval du confluent de la Vienne va-t-elle modifier les estimations, par rapport à l'hypothèse d'événements homogènes en fréquence locale ?

L'analyse générale des cohérences

L'étude mentionnée se basait sur les débits de pointe à l'aval, et sur les débits contributifs à l'amont en fonction du délai de propagation. Nous intéressés à l'intensité maximale des crues, nous avons estimé les débits de pointe sur les 62 plus fortes crues à partir des hydrogrammes, à l'aval du confluent Q_{av} , sur la Loire à l'amont Q_{am} , sur la Vienne Q_v . Ces valeurs de débits sont présentées dans l'annexe XI.B.

Les corrélations calculées respectivement entre les débits et entre les logarithmes des débits valent:

- 0,72 et 0,72 entre Loire amont et aval;
- 0,54 et 0,48 entre Loire aval et Vienne;
- -0,06 et -0,13 entre Loire amont et Vienne.

Ces dernières valeurs de corrélations, entre la Loire amont et la Vienne, ne sont pas significatives sur 62 valeurs.

L'absence de corrélation entre les deux branches amont du confluent nous a conduits à représenter la relation entre Loire amont et Loire aval par une régression sur les logarithmes des débits:

$$\text{Log}(Q_{av}) = a. \text{Log}(Q_{am}) + b + \varepsilon \quad (93)$$

Les valeurs obtenues pour a et b, significativement non nulles, sont 0,657 et 3,04 (écart-types de 0,082 et 0,643). Les paramètres a et b présentent un coefficient de corrélation de -0,9996. Le résidu ε présente un écart-type sans biais de 0,143 (la distribution des valeurs de ε est présentée en annexe XI. B). La normalité a été testée par un test de khi2 sur 6 classes équiprobables, la valeur de

khi² obtenue correspondant à une probabilité de dépassement comprise entre 10 et 50 %. L'hétéroscédasticité a été vérifiée en analysant la variable de Fischer constituée par le rapport des deux variances des résidus obtenues par les régressions respectives sur les 23 plus fortes et les 23 plus faibles valeurs de Qam. Il s'ensuit que l'on peut considérer le résidu ε comme indépendant de Log(Qam), et suivant une loi Gaussienne.

La simulation des événements hydrologiques

Selon les mêmes principes que ceux utilisés sur le bassin de la Vienne, on a simulé 4000 événements de crue sur la Loire centrale, pour deux hypothèses:

- H1: les événements sont homogènes; le coût global est calculé par interpolation linéaire à partir des valeurs "fréquences-coût" obtenues par addition de coûts locaux (fréquences correspondant aux crues de base: périodes de retour 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ans);
- H2: pour chaque tirage de fréquence F on calcule le coût C1 à l'amont du confluent de la Vienne, et le débit Qam (par interpolation linéaire à partir des valeurs F-Qam connues sur le bief LM6); on estime le débit Qav par la formule de régression avec un tirage aléatoire du résidu ε ; on fait le calcul inverse de Qav en fréquence locale à l'aval (soit sur le bief LAV1), puis on estime le coût C2 à l'aval; le coût total régional est alors C1 + C2.

Comme contrôle de la procédure, on a confronté les caractéristiques statistiques des 4000 valeurs de débit Qav obtenues respectivement à partir des valeurs de fréquences utilisées pour H1 et à partir du calcul H2. Les valeurs moyennes sont respectivement 3180 (mètres cube par seconde) et 3410, les écart-types 919 et 917, les coefficients d'asymétrie 1,68 et 1,44. Nous avons considéré que la procédure de calcul n'induisait pas de non-représentativité appréciable sur les crues simulées à l'aval.

Les coûts ont été estimés pour les deux scénarios: A - ruptures des digues prises en compte en probabilité (évaluation "standard") et B - ruptures de digues intervenant dès la première crue supérieure au seuil d'apparition du risque (Hris, voir chapitre VIII). Ce deuxième scénario, s'il est réaliste sur chaque secteur pris séparément, ne l'est pas à l'échelle de l'ensemble de la Loire centrale (il constitue un cas "extrême", en regard du problème de rupture de digues). Le tableau XI.6 présente les caractéristiques statistiques des séries de 4000 coûts régionaux simulés. Le tableau XI.7 présente les quantiles empiriques correspondants.

La prise en compte de la cohérence partielle entre l'amont et l'aval du confluent de la Vienne modifie peu les paramètres statistiques (tableau XI.6), moins de 1 % sur l'écart-type, 4 % à 5 % sur l'espérance (sachant que les coefficients de variation sont très importants). De même, les quantiles sur le coût "standard" (scénario A) varient de -0,1 % à +0,1 %, sauf sur les crues plus fréquentes: +135 % sur le coût biennal, +4 % sur le coût décennal. Le fait que l'on s'intéresse rarement aux coûts des crues fréquentes ne doit pas faire oublier l'importance qualitative de cette observation.

Tableau XI.6. : caractéristiques statistiques des coûts régionaux simulés sur la Loire centrale (simulation de 4000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

	Scénario A		Scénario B	
	H1	H2	H1	H2
espérance (CMA)	299	314	375	389
écart-type	2080	2100	2310	2290
coefficient de variation Cv	6,96	6,69	6,15	5,89
coefficient d'asymétrie Cs	14,3	13,8	11,5	11,5
coefficient d'aplatissement Ck	236	221	159	159

Tableau XI.7. : quantiles empiriques de coût régional sur la Loire centrale (simulation de 4000 événements, coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

période de retour	Scénario A		Scénario B	
	H1	H2	H1	H2
2	8	19	8	19
10	217	228	217	228
20	684	720	684	739
50	2 200	2 250	3 680	4 790
100	6 930	7 280	10 700	8 960
500	32 700	32 000	32 800	32 600

C'est sur les quantiles de coût correspondant au scénario B (ruptures des digues "précoces") que la cohérence spatiale de l'aléa hydrologique présente une importance relative et absolue: +30 % sur le coût cinquantennal, -16 % sur le coût centennal (et bien sûr +135 % sur le coût biennal). L'inondation "probabilisée" du Val d'Authion pèse moins que son inondation par rupture précoce, par rapport aux ruptures précoces sur les secteurs situés à l'amont du confluent de la Vienne. Cela signifie que si l'on "probabilise" les ruptures de digues, mais que l'on considère une rupture précoce au Val d'Authion, la prise en compte du niveau de cohérence hydrologique peut modifier encore plus sensiblement l'évaluation du coût régional.

Même si le scénario B est irréaliste à l'échelle de la Loire centrale, et que sur le coût "standard" la dimension spatiale de l'aléa influe peu, il ne faut pas oublier que la représentation des ruptures de digues est fortement chargée d'incertitudes. Et la prise en compte de ces incertitudes peut amener à accroître sensiblement l'effet -sur les coûts régionaux- de la dimension spatiale de l'aléa hydrologique.

XI.3. LA PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION SPATIALE DES SOURCES D'INCERTITUDES

Nous avons présenté plus haut la problématique générale de la cohérence spatiale des incertitudes, et caractérisé qualitativement différentes sources d'incertitudes en termes d'échelle spatiale. Il en ressort que les dimensions spatiales des différentes sources sont multiples, parfois "mixtes" par rapport aux découpages géographiques considérés.

Cependant, une prise en compte détaillée de ces différentes dimensions ne serait cohérente ni avec le niveau général de précision du modèle et de l'évaluation des incertitudes, ni avec le fait que les sources d'incertitudes sont simulées de façon "synthétique" et simplifiée. Nous avons donc choisi ici d'effectuer une première analyse quantitative visant des ordres de grandeur de l'influence des cohérences spatiales sur les incertitudes.

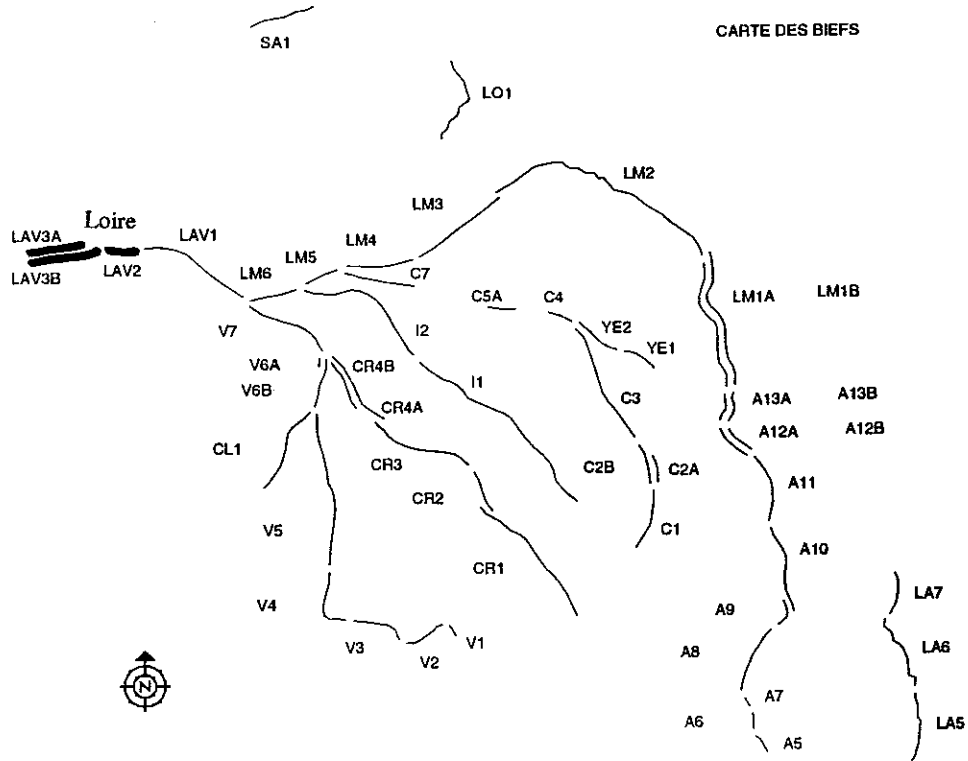
XI.3.1. Les régions analysées et les enjeux sur les incertitudes

Nous avons considéré trois régions, recouvrant l'aire d'étude restreinte sur laquelle ont été analysées les incertitudes locales (figure XI.2). Pour ne pas risquer de confusion avec des désignations "non standardisées" de parties du cours de la Loire, nous avons adopté une désignation spécifique:

- la Loire centrale (LC), entre les confluent de l'Allier et de la Maine; biefs LM1A, LM1B, LM2, LM3, LM4, LM5, LM6 et LAV1 (86 secteurs sur 404 kilomètres);
- la Loire inférieure (LI), entre le confluent de la Maine et la limite de l'influence océanique; biefs LAV2, LAV3A (sauf le secteur 1 non pris en compte) et LAV3B (14 secteurs sur 57 kilomètres);

(a) Loire centrale (voir la figure XI.1.b)

(b) Loire inférieure



(c) Cher amont

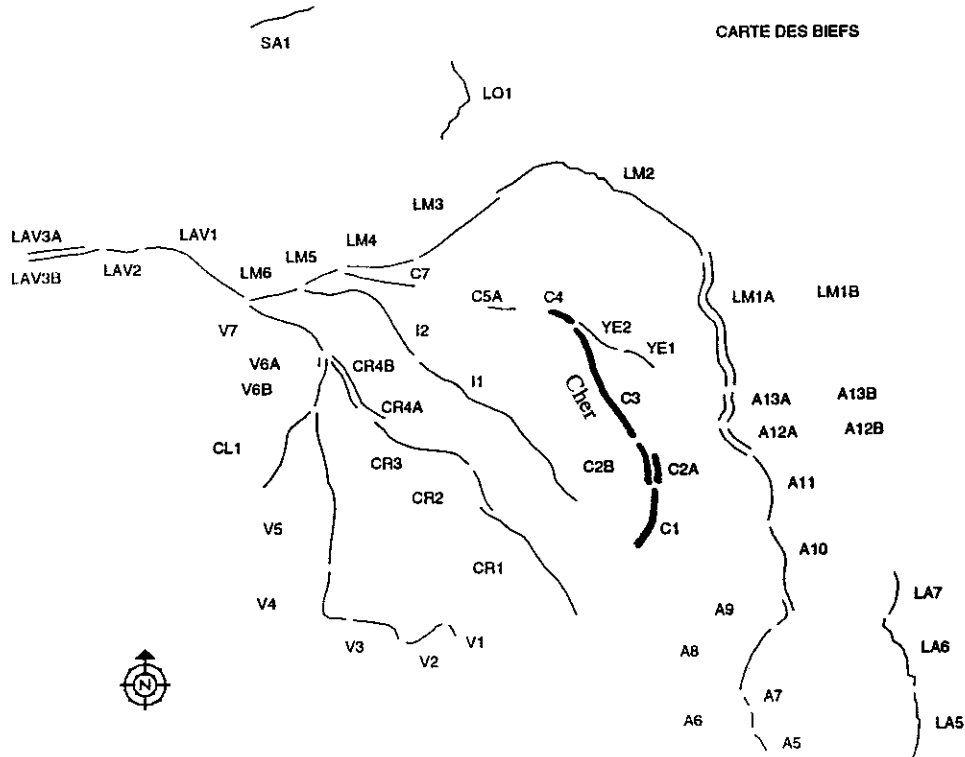


Figure XI.2. : les régions étudiées pour la prise en compte de la dimension spatiale des incertitudes

- le Cher amont (CA), dans les départements de l'Allier et du Cher; biefs C1, C2A, C2B, C3 et C4 (12 secteurs sur 183 kilomètres).

La Loire centrale présente une vallée très endiguée, avec des secteurs non protégés, ou inondés par remous, par déversement pour des crues moyennes, par rupture de digue ou de banquettes de déversoir. Les secteurs sont très variés en termes de typologie hydraulique, d'occupations des sols... Comme on le montrera plus loin (XI.4), pour différentes fréquences de crues c'est un petit nombre de secteurs qui regroupe plus de la moitié des coûts. Lors des crues rares notamment, quelques vals importants (en taille ou en densité d'occupation) présentent un poids très fort. Les dommages augmentent beaucoup avec l'intensité de crue.

La Loire inférieure présente une taille globale moindre, avec des secteurs endigués ou non, et inondés souvent à partir de crues fréquentes (débordement, remous, déversement). Les dommages sont plus stables par rapport à l'intensité de crue.

En ce qui concerne le Cher amont, les secteurs non endigués (sauf un, qui ne représente pas un poids majeur) sont inondés par débordement direct, à partir de crues fréquentes. La particularité de cette région est que dès la crue décennale, les coûts (en espérance) sont "dominés" par les dommages sur le seul secteur C3/6, correspondant à l'agglomération de Vierzon et Mereau. Et l'incertitude absolue y est très forte. Il faut noter que sur ce secteur on ne connaît pas les débits de pointe des crues, et qu'on a simulé une source d'erreur unique sur la relation T-H "période de retour - cote".

Le tableau XI.8 présente, pour chaque région et plusieurs indicateurs de coûts, la somme des coûts locaux déterministes, la somme des espérances arithmétiques de coûts locaux, et deux estimations "extrêmes" de l'écart-type sur le coût régional:

- la racine carrée de la somme des variances locales; ceci correspond à l'hypothèse d'une indépendance totale entre les incertitudes sur différents secteurs;
- la somme des écart-types locaux; ceci revient à supposer que la corrélation entre les erreurs locales est totale, c'est-à-dire que ces erreurs sont colinéaires.

Il faut noter que l'on n'a pris en compte ni le facteur de cohérence hydrologique (événements homogènes en fréquence locale), ni le problème de la composition économique des coûts.

On observe à échelle régionale, comme à échelle locale, la différence importante entre coût "déterministe" et espérance de coût, lorsque les dispersions sont fortes:

- importance des phénomènes de seuil, notamment pour les crues fréquentes sur la Loire centrale (coefficients de variation moyens supérieurs à 1,7);
- effet de l'incertitude forte sur le secteur de Vierzon (C3/6) sur le Cher amont.

Sur la Loire inférieure, ce phénomène joue très peu dans la mesure où on observe des inondations plutôt "précoces", et évoluant "peu" (en comparaison) avec l'intensité de crue. Le gradient de la relation "fréquence-coût" y est moins fort, ce qui laisse moins de prise aux incertitudes (coefficients de variation moyens inférieurs à 0,6).

Par ailleurs, on observe l'écart important entre les deux estimations "extrêmes" d'écart-type du coût régional, pour les deux premières régions (LC et LI). Ce phénomène ne joue que très peu sur le Cher amont, où les coûts et les dispersions absolues sont "dominés" par un seul secteur: les deux estimations sont donc très proches (Sa pour ce secteur représente 97% du total en crue décennale, 96,5% en crue centennale, 94% pour le CMA).

Sur les deux régions de la Loire, il faut noter que le niveau général d'incertitude est fort (LI) ou très fort (LC), et le rapport entre les limites extrêmes de la dispersion va de 2 à 4 (CMA sur LC). Ainsi, si l'on considère le coût centennal sur la Loire centrale, la question est de préciser la valeur du coefficient de variation à l'intérieur d'une fourchette de 0,23 à 0,65 (0,30 à 0,95 pour le coût décennal, ou 0,17 à 0,43 pour le coût centennal sur la Loire inférieure).

Tableau XI.8. : coûts des dommages et premières hypothèses d'incertitudes à l'échelle régionale
(coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

C_i : coût déterministe sur un secteur
 Ea_i : espérance arithmétique de C_i
 Sa_i : écart-type arithmétique sur C_i

(a) Loire centrale

	ΣC_i	ΣEa_i	$\sqrt{\Sigma Sa_i^2}$	ΣSa_i
coût biennal C2	8,2	11,7	4,5	10,8
coût décennal C10	225	407	121	385
coût centennal C100	8 160	8 530	1 970	5 510
coût moyen annuel CMA	342	386	53	215

(b) Loire inférieure

	ΣC_i	ΣEa_i	$\sqrt{\Sigma Sa_i^2}$	ΣSa_i
coût biennal C2	65	74	18	39
coût décennal C10	182	200	38	89
coût centennal C100	293	336	56	144
coût moyen annuel CMA	86	98	19	44

(c) Cher amont

	ΣC_i	ΣEa_i	$\sqrt{\Sigma Sa_i^2}$	ΣSa_i
coût biennal C2	0,29	1,42	1,48	1,87
coût décennal C10	82	710	1 620	1 660
coût centennal C100	1 100	2 810	4 530	5 180
coût moyen annuel CMA	40	231	436	464

XI.3.2. Une tentative d'approche analytique

Dans un premier temps, nous avons tenté de cerner les incertitudes sur le coût régional par voie analytique. Négligeant la disparité des formes de distributions statistiques sur les coûts locaux, mais prenant en compte leur asymétrie, on a supposé que les coûts locaux suivaient une loi du type:

$$C_i = Co_i (1 + Eg_i) (1 + Sg_i)^{u_i} \quad (94)$$

pour le secteur i , et une crue donnée, où Co_i est le coût déterministe, Eg_i le biais, Sg_i l'erreur relative quadratique moyenne (cf. X.3.1), u_i une variable de moyenne nulle et d'écart-type 1.

Pour simuler le phénomène de cohérence spatiale, on s'est appuyé sur une hypothèse systématique $u_i = u + \varepsilon_i$, où u est une variable gaussienne d'écart-type ρ ($0 < \rho < 1$) et ε_i une autre d'écart-type $\sqrt{1 - \rho^2}$, les ε_i étant indépendants entre eux et par rapport à u . Cela revient à considérer une composante de l'erreur régionale uniforme u , et une composante locale ε_i , le facteur ρ devant permettre de moduler, de façon uniforme, le degré de cohérence régionale des incertitudes.

On peut ainsi exprimer, pour une intensité de crue donnée, le coût régional sur la Loire centrale:

$$C(\rho) = \sum_{i=1}^{86} C_{0i} (1 + E_{gi}) (1 + S_{gi})^{u_i(\rho)} \quad (95)$$

où $u_i(\rho) = u(\rho) + \varepsilon_i(\rho)$, à partir de la connaissance des valeurs locales C_{0i} , E_{gi} , S_{gi} . Il en découle une expression analytique de diverses grandeurs qui nous intéressent: l'espérance et l'écart-type sur $C(\rho)$, la contribution de chaque secteur à l'incertitude régionale (sous la forme de la dérivée partielle de cet écart-type par rapport à S_{gi} ...).

La mise en œuvre de ces calculs a conduit à des valeurs de dispersions nettement plus fortes que la limite maximale estimée plus haut, cette dispersion étant notamment due à certains secteurs insignifiants à l'échelle de la région: une analyse plus détaillée a montré que le choix d'une forme de distribution statistique inappropriée et non bornée (il existe vraisemblablement des bornes absolues au coût décennal sur un secteur donné) conduisait à des ordres de grandeur irréalistes.

Il serait de peu d'intérêt de détailler plus avant ces résultats, que nous résumerons par une conclusion qualitative: les comportements d'incertitudes sur divers secteurs sont très variables, et une représentation analytique arbitraire peut conduire à des absurdités.

XI.3.3. La simulation numérique des incertitudes à l'échelle régionale

Les éléments de conclusion que l'on vient de présenter confirment les résultats du chapitre précédent, s'opposant à toute approche synthétique pour analyser les incertitudes à échelle régionale. La variété des comportements locaux d'incertitudes (amplitude, forme de distribution, contributions des différentes sources) est importante, et on vient de montrer que cette variété ne pouvait être réduite même pour une analyse régionale. Il s'ensuit que seule une simulation "complète" et coordonnée des incertitudes sur chaque secteur présente une garantie suffisante de robustesse. C'est la méthode et les résultats d'une telle simulation que nous présentons ici, sur la Loire centrale, la Loire inférieure et le Cher amont.

La méthode de simulation

Comme nous l'avons évoqué plus haut, les niveaux de cohérence spatiale varient en fonction des sources d'incertitudes: région, groupe de secteurs, secteur, ou combinaison de plusieurs échelles. Il semblait peu réaliste à ce niveau de simuler toute cette complexité, et nous avons considéré deux échelles géographique pour les incertitudes:

- la région entière pour la relation "période de retour-débit" T-Q (ou T-H pour les secteurs C3/5 et 6, constituant l'essentiel du poids de la région Cher amont), la répartition saisonnière des crues dommageables, les fonctions de coûts élémentaires;
- le secteur pour les autres sources, dont la relation "débit-cote" Q-H (sauf pour les secteurs C3/5 et 6).

Ainsi, chaque source d'incertitudes est rattachée à l'échelle géographique qui la définit le plus. L'utilisation du modèle local de simulation s'est faite selon la procédure suivante:

- A - tirage de 500 erreurs régionales;
- B - tirage de 5 000 erreurs locales;
- C - pour chaque tirage régional i et pour chaque secteur, choix de 10 (respectivement 100) tirages d'erreurs locales parmi 5 000 et calcul de 10 (resp. 100) valeurs de coûts (à chaque fois pour différentes crues, et le CMA); obtention de 10 (resp. 100) coûts régionaux par sommation sur les secteurs;
- D - obtention de 5 000 (resp. 50 000) estimations régionales (coûts pour différentes crues, et CMA).

Le choix de 10 (resp. 100) tirages d'erreurs locales, pour chaque secteur et chaque tirage i d'erreurs régionales, est fait de la manière suivante:

- on dispose pour chaque secteur de 10 (resp. 100) entiers n_j ($j = 1$ à 10 ou 100) aléatoires, compris entre 1 et 5 000;
- pour chaque tirage $i \times j$, on utilise le tirage d'erreurs locales portant le numéro " $(i \times 10 + n_j) \text{ modulo } 5\,000 + 1$ ".

Cette procédure assure le fait que pour un tirage régional, les tirages locaux soient indépendants d'un secteur à l'autre (les n_j sont indépendants). De même, les erreurs locales sur un secteur sont indépendantes entre deux tirages d'erreurs régionales, pour limiter les risques de biais (erreurs locales particulières pour un secteur). La figure XI.3 schématise cette démarche.

Les résultats

L'annexe XI.C présente les histogrammes obtenus, sur 50 000 tirages, pour des coûts de différentes crues sur les trois régions. Ces histogrammes reflètent des distributions statistiques clairement asymétriques (coût d'une crue ou CMA), y compris sur la Loire centrale regroupant 86 secteurs (la figure XI.4 présente cet histogramme sur l'estimation du coût centennal et sur celle du CMA). Cette annexe présente également une comparaison entre les statistiques (sur quelques coûts) correspondant respectivement à 5 000 et 50 000 simulations:

- les valeurs sont très proches pour la Loire inférieure et le Cher amont, à l'exception de la dispersion pour les crues fréquentes (plus forte pour 50 000 tirages);
- en examinant plus attentivement les différences sur la Loire centrale, pour l'espérance, l'écart-type et les bornes de l'intervalle de confiance à 70 %, les écarts relatifs vont de 23 à 43 % pour le coût biennal, mais restent ensuite inférieurs à 10 % pour le coût quinquennal (sauf 15 % pour la borne inférieure), et inférieurs à 5 % au-delà (sauf 9 % pour la borne inférieure du coût décennal).

Pour la suite des résultats, on se réfère aux 50 000 simulations, qui apparaissent apporter des résultats robustes, si l'on considère la proximité des résultats avec les 5 000 simulations ("robustes" par rapport à cette simulation de variables aléatoires).

Le tableau XI.9 présente les résultats avec les paramètres statistiques arithmétiques (version géométrique dans l'annexe XI.C). Les intervalles centrés de confiance à 70 % ont été estimés directement sur les populations de 50 000 valeurs simulées. La figure XI.5 présente les estimations avec ces intervalles de confiance sur des courbes "fréquence-coût". Les intervalles de confiance sont établis point par point, leurs courbes enveloppes ne correspondent à rien.

La première constatation qui s'impose est la réduction importante des dispersions relatives, par rapport aux estimations locales, à l'exception du Cher amont où tout est conditionné par un secteur excessivement sensible aux incertitudes. Peut-être faut-il également voir là l'effet de la mise en œuvre d'une version "dégradée" du modèle local et de la simulation des incertitudes, dans la mesure où l'on ne dispose pas d'information sur les débits. Sur cette région, la dispersion relative (coefficient de variation, amplitude de l'intervalle de confiance) décroît en fonction de l'intensité de crue.

Sur la Loire centrale, la dispersion relative (coefficient de variation) croît jusqu'au niveau décennal, puis diminue de 40% jusqu'à la plus forte crue considérée. Sur la Loire inférieure, la dispersion relative est plus faible en général, mais elle croît avec l'intensité de crue (après une petite décroissance entre les niveaux biennal et quinquennal). Contrairement au cas de la Loire centrale, le nombre de secteurs concernés n'augmente pas (ou peu) avec l'intensité de crue. On retrouve les mêmes phénomènes sur l'écart relatif quadratique moyen (statistiques géométriques en annexe XI.C). La variabilité des comportements d'incertitudes se retrouve jusqu'au niveau régional.

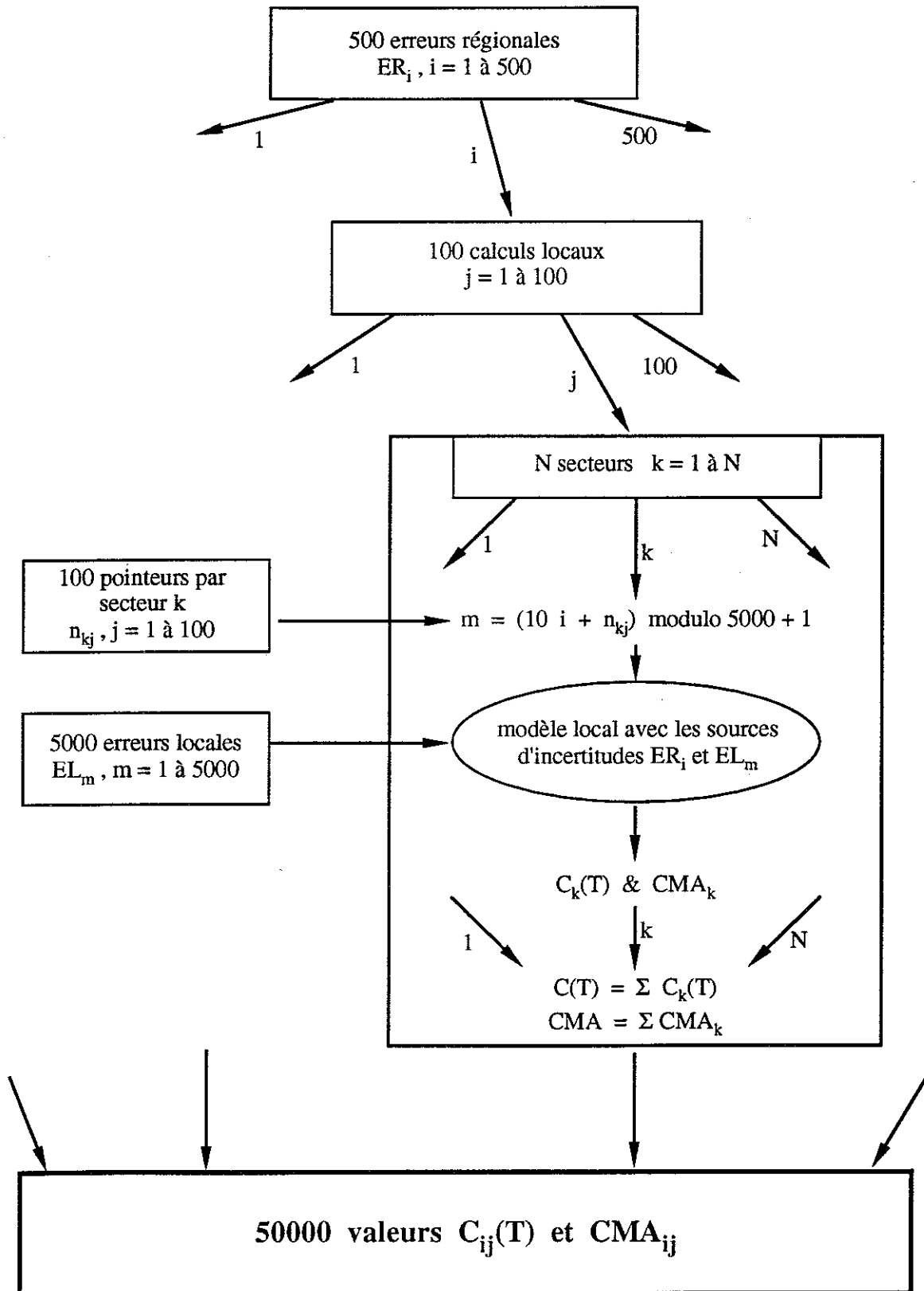


Figure XI.3. : la procédure de simulation des incertitudes régionales

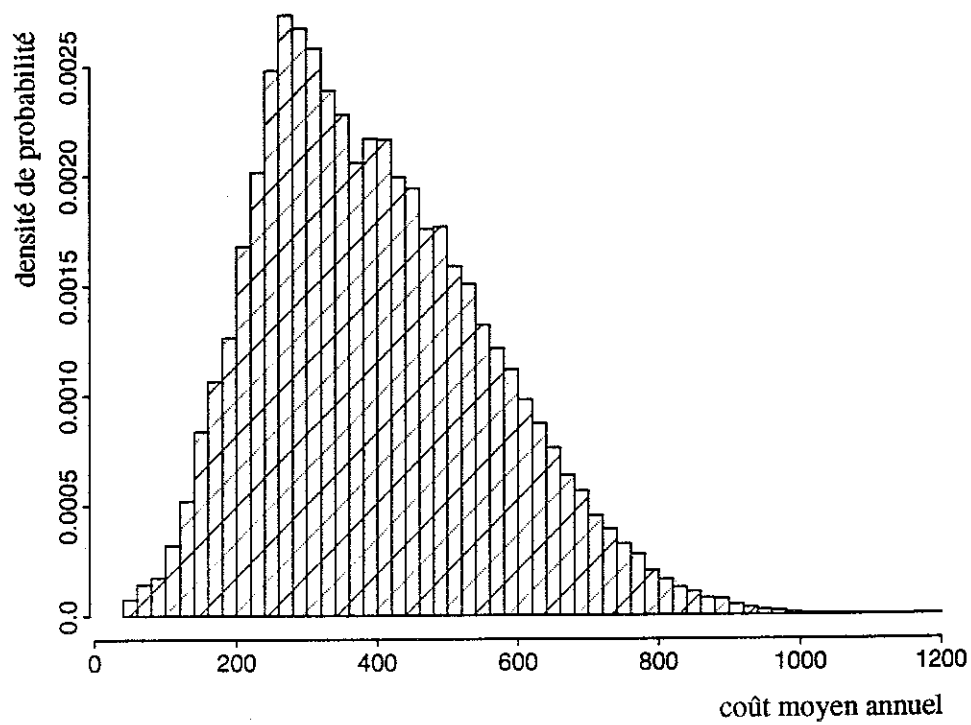
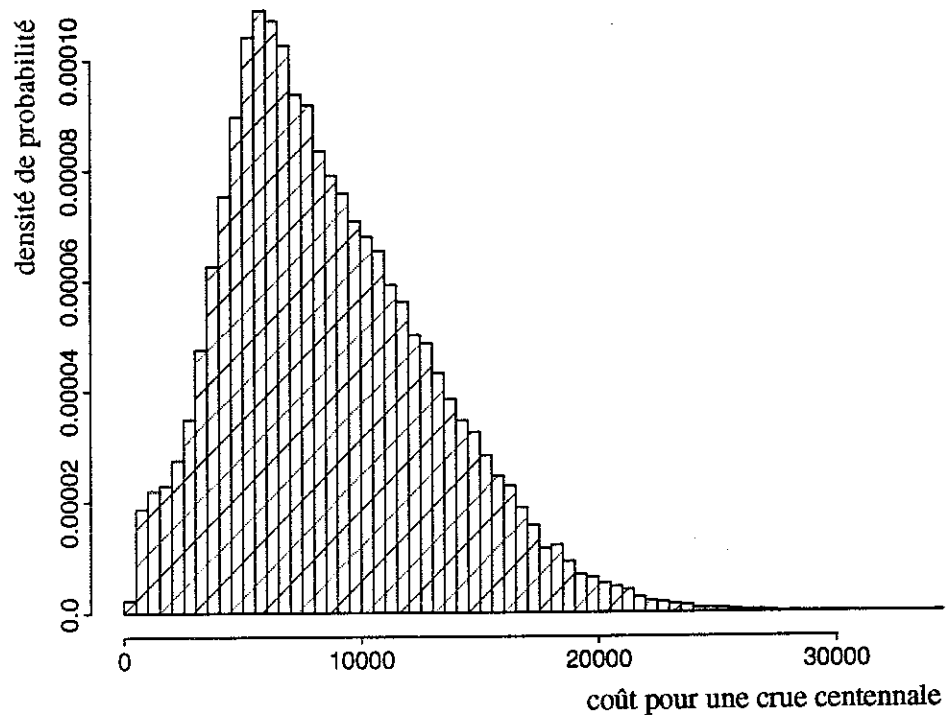


Figure XI.4. : histogrammes des estimations du coût centennal (C100) et du coût moyen annuel (CMA) sur la Loire centrale (50000 simulations, coûts exprimés en millions de Francs au troisième trimestre 1991)

Tableau XI.9. : résultats des 50 000 simulations d'incertitudes régionales (coûts exprimés en millions de francs au troisième trimestre 1991)

CMA: coût moyen annuel

(a) Loire centrale

période de retour	espérance de coût régional	écart-type	coefficient de variation	intervalle centré de confiance à 70 %	
2	19	10	0,55	9	28
5	131	91	0,69	53	213
10	459	348	0,76	131	834
20	872	549	0,63	298	1 423
50	2 515	1 455	0,58	1 008	4 017
100	8 668	4 361	0,50	4 415	13 369
200	18 194	8 448	0,46	9 562	27 169
500	33 732	15 345	0,45	18 173	49 801
CMA	398	163	0,41	234	576

(b) Loire inférieure

période de retour	espérance de coût régional	écart-type	coefficient de variation	intervalle centré de confiance à 70 %	
2	75	27	0,36	49	101
5	161	54	0,34	106	216
10	206	73	0,36	132	281
20	258	106	0,41	158	360
50	328	163	0,50	185	500
100	391	212	0,54	206	620
200	472	273	0,58	232	767
500	568	333	0,59	236	923
CMA	103	34	0,33	68	138

(c) Cher amont

période de retour	espérance de coût régional	écart-type	coefficient de variation	intervalle centré de confiance à 70 %	
2	1,5	2,2	1,47	0,2	3,2
5	286	585	2,05	1,3	601
10	650	1 347	2,07	5,5	1 448
20	1 067	2 166	2,03	26	2 396
50	1 765	3 321	1,88	73	3 854
100	2 515	3 965	1,58	189	5 126
200	3 063	4 349	1,42	380	5 878
500	3 757	4 752	1,26	997	6 818
CMA	208	368	1,77	13	460

Figure XI.5. : relations fréquence - coût sur trois régions (coût moyen par rapport aux incertitudes et intervalle de confiance centré à 70%, 50000 simulations, coûts exprimés en millions de Francs au troisième trimestre 1991)

(a) Loire centrale

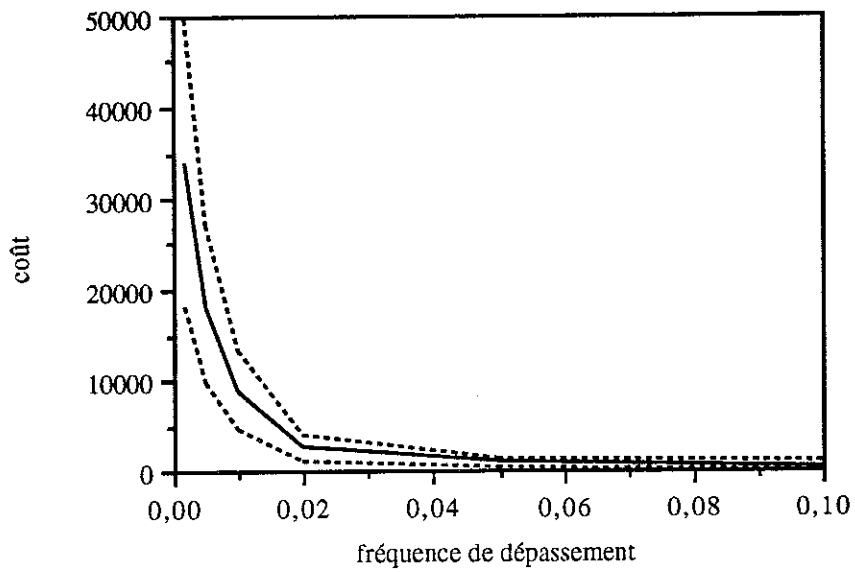
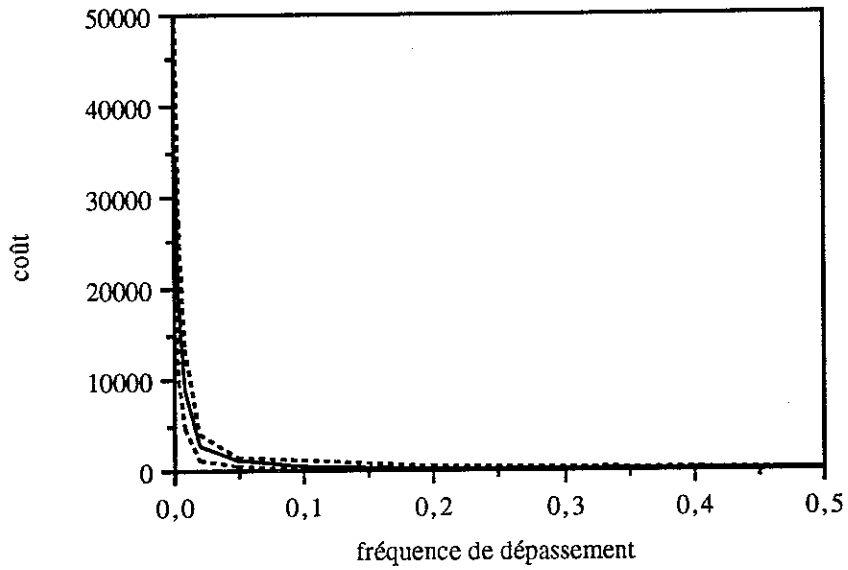


Figure XI.5. (suite)

(b) Loire inférieure

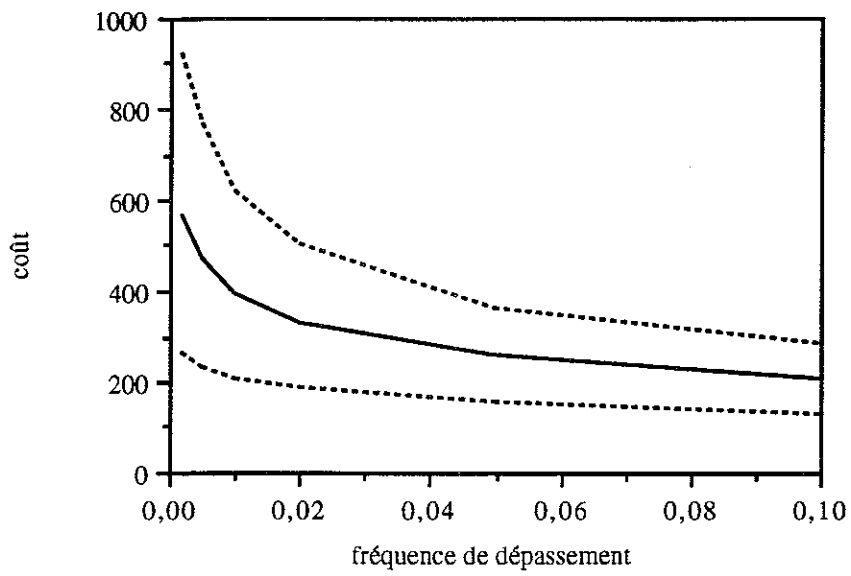
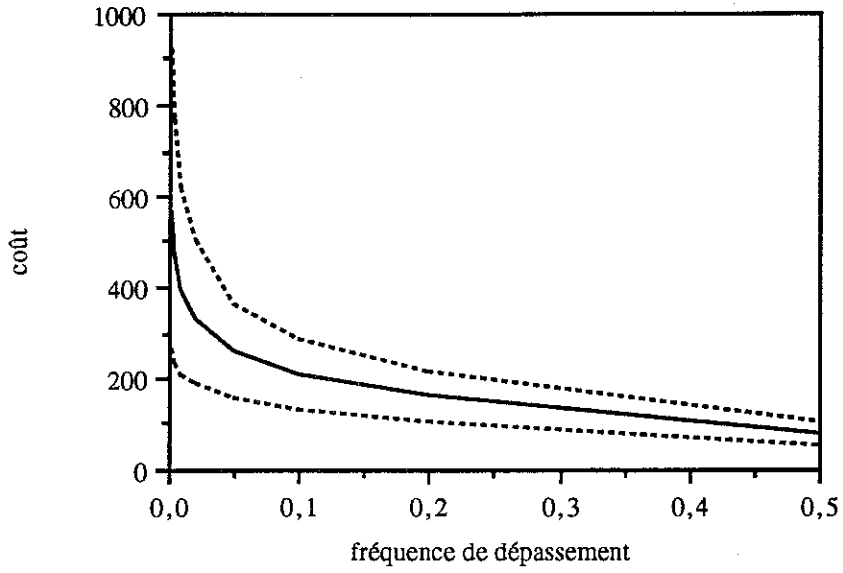
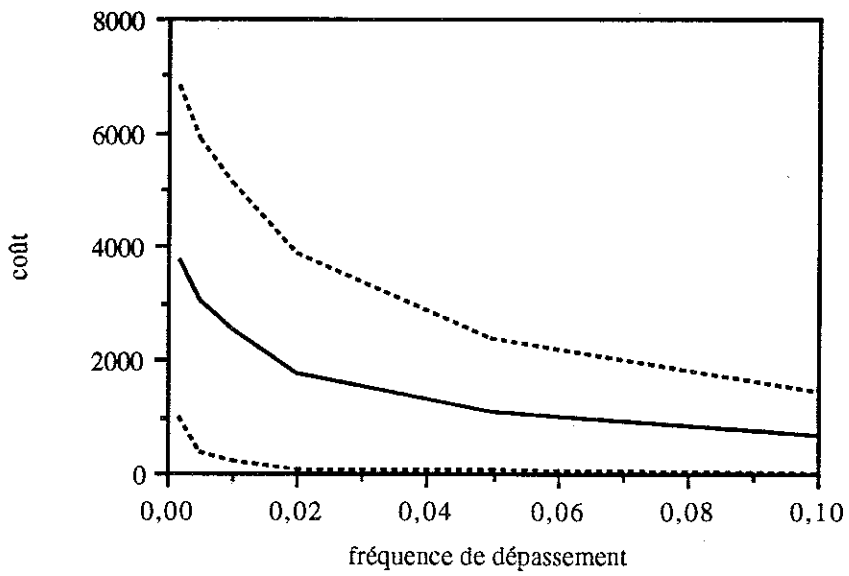
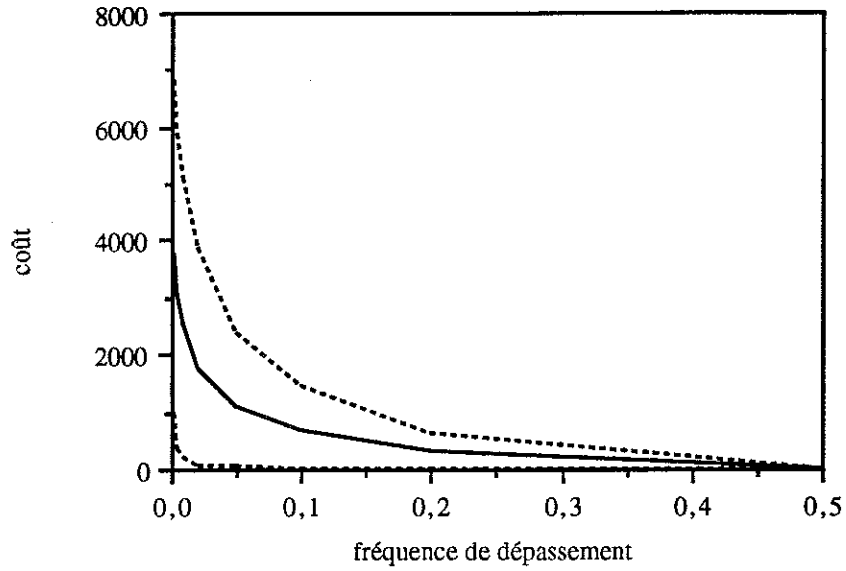


Figure XI.5. (suite)

(c) Cher amont



Si l'on compare les estimations aux résultats des hypothèses "extrêmes" sur les incertitudes régionales (XI.3.1, tableau XI.8), on observe des ordres de grandeur proches sur le Cher amont, à ceci près que les dernières estimations sont plus précises, puisqu'elle reposent sur plus de simulations (sur un secteur essentiellement). En ce qui concerne les deux régions "Loire", on trouve des écarts entre les espérances de coûts supérieures à quelques pourcents:

- pour les crues fréquentes en Loire centrale;
- pour la crue centennale en Loire inférieure.

Toutefois, toutes les valeurs restent dans l'intervalle de confiance à 70%. Il faut souligner que le dernier calcul repose sur un nombre de tirages cent fois supérieur à celui utilisé pour les estimations locales. Ainsi, pour la crue centennale sur la Loire inférieure, la valeur de l'écart-type (estimé par simulation) est à l'extérieur des estimations "extrêmes" présentées plus haut: nous considérons qu'il faut imputer cela à la relative faiblesse des estimations locales dont dérivent ces estimations régionales "extrêmes". De façon générale les écart-types estimés par simulation complète sont plus proches des "bornes" supérieures de la première approche, mais on ne saurait toutefois se contenter de ces bornes supérieures comme estimateur. Le cas de la Loire inférieure le montre.

En conclusion, il nous semble qu'il faut insister sur la grande variabilité des comportements en termes d'incertitudes:

- variabilité des amplitudes, distributions et causes des incertitudes locales, qui interdisent toute modélisation simplifiée et nécessitent de réaliser des simulations suffisantes en nombre, y compris en vue d'une analyse à l'échelle régionale;
- variabilité des estimations régionales résultant de scénarios a priori, qui s'appuient sur des hypothèses simples extrêmes (indépendance complète, cohérence complète...);
- variabilité des comportements "régionaux" en termes d'incertitudes (évolution de la dispersion relative avec l'intensité de crue), et des formes des distributions des estimations.

Le fait d'arriver à ces conclusions par des approches simples nous impose également la plus grande prudence sur les valeurs numériques des résultats du modèle local et des résultats régionaux. Nous avons essayé d'intégrer toute information disponible, ainsi que les facteurs majeurs d'hétérogénéité et de variabilité pour l'estimation des coûts des dommages. Mais il n'en demeure pas moins que nous ne disposons pas de contrôle extérieur, et que les estimations n'apparaissent pas très stables par rapport aux différentes hypothèses analysées.

XI.4. QUELLES CONCLUSIONS POUR L'ESTIMATION DES COÛTS A ECHELLE REGIONALE

XI.4.1. La portée des analyses effectuées

Avant de présenter diverses conclusions, il convient d'en définir la représentativité, la valeur d'exemple par rapport à la problématique générale de l'évaluation des dommages dus aux inondations. Il s'agit également d'essayer d'en préciser les limites.

Notre démarche repose sur le modèle local d'évaluation des dommages, que nous pensons être représentatif des modèles globaux développés en matière de recherche appliquée, ou utilisés pour des études opérationnelles (nature des informations exploitées, hypothèses de modélisation). Si les données et l'échelle géographique sont plus grossières que dans la majorité des travaux réalisés, en contre-partie nous avons essayé ici d'intégrer toutes les hétérogénéités et discontinuités identifiables: prise en compte des processus hydrauliques de submersion, découpage géographique de l'aire d'étude...

L'une des caractéristiques les plus originales du modèle local est le fait qu'on ait "automatisé" la prise en compte de toute information disponible, ce qui impose de pouvoir utiliser des données d'entrée en nombre et en nature variables (au-delà d'un jeu de données "minimal"). Le terme

"d'expertise" est vraisemblablement excessif pour caractériser cet aspect du modèle, aussi nous dirons que le modèle intègre tous les moyens de critique et d'adaptation disponibles. A ce titre, nous considérons qu'au niveau local, les estimations de dommages produites de façon systématique sont comparables à celles qu'on obtiendrait par une mise en œuvre critique, voire "manuelle", d'un modèle global "standard".

Par contre, il faut noter que la simulation des sources d'incertitudes passe par des erreurs déjà "agrégées", synthétiques, qui présentent en outre des amplitudes uniformes d'un secteur à l'autre. Le premier aspect ne nous semble pas remettre en cause la représentativité globale des résultats: on conserve un grand nombre de sources d'erreurs, et donc beaucoup de degrés de liberté par rapport aux incertitudes (le fait qu'à notre connaissance il n'y ait pas eu d'autre démarche aussi "complète" ne constitue pas en soi un argument). Par ailleurs, le fait de considérer des amplitudes uniformes, en valeur relative, nous apparaît avant tout comme une limite pour des résultats spécifiques aux régions étudiées elles-mêmes. La variabilité des valeurs absolues (moyenne, écart-type) et des comportements de chaque secteur (contributions des différentes sources d'incertitudes...) est telle que les résultats qualitatifs en matière d'incertitudes nous apparaissent généralisables à des contextes hydrologiques et économiques comparables.

A l'échelle régionale, nous avons considéré des régions différentes, en matière de configuration hydrologique, de répartition des vulnérabilités (forte concentration sur le Cher amont, par exemple), de taille et de niveau de décomposition. On ne saurait considérer cette représentativité comme absolue, mais certaines conclusions qualitatives nous semblent transposables. A cette échelle, le problème de modélisation peut être défini de la façon suivante (notons qu'à échelle régionale il ne s'agit pas d'un modèle global):

- multiplicité des sources d'informations;
- dispersion géographique des phénomènes; existence de fortes hétérogénéités quantitatives et qualitatives (seuils de submersion, par exemple), mais également de cohérences spatiales partielles;
- absence de moyen fiable permettant de se prononcer sur la pertinence du modèle;
- absence de moyen de calage, de vérification des résultats globaux (sinon par l'absurde sur la cohérence globale; voir XI.3.2);
- difficulté à quantifier les sources d'incertitudes et leur structure géographique.

Il nous semble que ces caractéristiques sont propres à divers types de modèles prédictifs, dont on considère généralement les résultats avec des doutes que les analyses de sensibilité par scénarios ne suffisent pas à lever:

- modèles de changement climatique global et régional;
- modèles économétriques;
- modèles hydrologiques répartis (ou distribués) qu'on ne peut pas toujours valider sur des événements réels (extrapolations quantitatives et qualitatives à partir des phénomènes observés...).

Rappelons que la question de la composition régionale économique des coûts n'a pas pu être analysée ici, et que donc ce problème est absent de toutes les conclusions que l'on peut avancer. Par ailleurs seule une partie des dommages a été prise en compte, mais nous ne pensons pas que la portée qualitative des résultats en soit affectée.

XI.4.2. Les conclusions majeures

A l'échelle locale du secteur inondable, les coûts moyens diffèrent parfois sensiblement des coûts déterministes, les écarts restant inférieurs à la dispersion. Les distributions statistiques des estimations de coûts présentent des formes diverses d'un secteur à l'autre, ou d'une crue à l'autre. Une paramétrisation simple uniforme de ces distributions peut conduire à des estimations aberrantes, aux niveaux local et régional. Les dispersions relatives les plus importantes sur les coûts correspondent

aux crues proches des seuils de début de dommages, ainsi qu'aux crues pour lesquelles on observe un fort gradient dans la relation liant l'intensité de crue au coût.

En moyenne, les dispersions dépendent fortement des incertitudes sur les relations "période de retour T - débit de pointe Q - cote maximale H", les autres sources d'incertitudes présentant un poids moyen moindre, qui n'est important que sur des secteurs particuliers et hors des situations de forte dispersion (hormis le cas de seuils de submersion). Les incertitudes sur la relation "cote-coût" sont sensiblement inférieures à celles sur la relation "période de retour - coût". Ces différentes considérations conduisent à renoncer à toute modélisation locale des incertitudes plus simplifiée que celle qui a été mise en œuvre ici.

La composition régionale des coûts est liée à la cohérence spatiale des événements hydrologiques. La loi de fréquence que l'on peut estimer sur le coût régional global est sensible au niveau de cohérence spatiale, et cette sensibilité ne peut être négligée a priori, même devant la dispersion des estimations due aux incertitudes sur les calculs locaux. De plus, cette sensibilité peut être sous-estimée si l'on ne se base que sur des coûts moyens ignorant l'incertitude: certaines sources d'incertitudes sont susceptibles de renforcer cette sensibilité (cas des ruptures de digues, par exemple; voir XI.2.2).

De même, la cohérence spatiale des sources d'incertitudes a une forte influence sur la dispersion des estimations de coûts régionaux (facteur 2 à 3 sur l'écart-type, entre des hypothèses extrêmes de cohérence). Selon le niveau de cohérence et le cadre décisionnel dans lequel interviennent les estimations de coût régional, les incertitudes seront ou non de nature à permettre une décision (en partant d'un même niveau d'incertitude locales). Différentes sources d'incertitudes présentent différentes échelles géographiques de cohérence: secteur, groupe de secteurs, bief, région... La contribution globale d'une catégorie de sources d'incertitudes est d'autant plus forte que ces sources sont plus cohérentes sur la région.

Ainsi, les sources concernant les lois de fréquence des crues (T-Q, ou T-H) présentent un niveau de cohérence spatiale correspondant à la cohérence des événements hydrologiques. Si l'on considère que ces incertitudes sont très peu réductibles (ou non réductibles, pour des crues rares), on mesure tout leur poids dans l'incertitude globale pesant sur le coût régional. A l'opposé, d'autres sources importantes comme la relation "débit-cote" (lignes d'eau), les seuils des phénomènes de submersion, ou les paramètres de submersion, sont définies à un niveau local, réductibles par des études hydrauliques ou par des changements de découpage géographique (échelle). Pour la relation Q-H, on peut ainsi penser prendre en considération des stations hydrométriques "fictives" proches des secteurs, à condition que l'on ait déterminé des lignes d'eau le long d'un bief inondable.

Il ressort de cela que ni la cohérence spatiale hydrologique, ni la cohérence spatiale des incertitudes ne peuvent être omises dans l'estimation des coûts régionaux et de leurs incertitudes. Par contre, on ne dispose pas d'éléments permettant de juger de l'influence des phénomènes de composition économique régionale des coûts. L'impossibilité de proposer des modélisations simplifiées des incertitudes locales conduit à proposer une procédure d'estimation régionale selon la logique suivante:

- simulation des sources d'erreurs prenant en compte les différentes échelles spatiales de ces sources (voir XI.3);
- pour chaque tirage d'erreurs, défini sur chaque secteur, estimation des relations locales "période de retour - coût" $C_s(T)$, agglomérées par bief $C_b(T)$ (cohérence hydrologique des biefs), génération d'événements hydrologiques régionaux respectant les cohérences spatiales (voir XI.2.2) pour déterminer une loi de fréquence du coût régional $C_r(T)$;
- analyse des incertitudes à l'échelle régionale en comparant les lois de fréquence $C_r(T)$ issues de chaque tirage d'erreurs (analyse des quantiles: coût décennal, centennal..., CMA).

De même, dans une optique d'analyse de la décision où l'on voudrait pouvoir estimer la contribution de diverses sources d'incertitudes à la dispersion du coût régional, il faudrait procéder à une telle analyse avec différents scénarios sur les amplitudes de chaque source. Aucune simplification sensible de la démarche d'ensemble n'apparaît possible au vu des résultats établis. Par contre, on propose ci-dessous des orientations pour focaliser les analyses sur certains secteurs et certaines sources d'incertitudes.

XI.4.3. Peut-on alléger la démarche d'analyse ?

Une analyse complète, tel qu'on en a déduit le principe plus haut, est une entreprise très lourde. Pourtant, nous avons montré les enjeux des questions de composition spatiale des coûts (aléa, incertitudes), et la nécessité de les traiter de façon conjointe. Et l'identification des sources d'incertitudes ayant une contribution forte est une démarche importante dans le cadre de l'analyse de la décision (du moins pour ce qui concerne les sources d'incertitudes pouvant être réduites).

Pour restreindre le champ d'analyse, on peut s'appuyer sur deux évidences:

- un secteur, pour lequel les espérances de coûts et les variances sont faibles, aura une faible influence sur le niveau régional;
- une source d'incertitudes locale, ayant une faible contribution sur la dispersion du coût local, aura une faible influence sur le niveau régional.

L'imprédictibilité des comportements d'incertitudes impose en préalable l'analyse des coûts locaux, par secteur: espérance du coût pour différentes fréquences et du CMA, dispersions. Rappelons que des secteurs présentant un coût déterministe nul peuvent être l'objet d'un coût moyen important: ainsi le secteur LM2/8 (Val de Gien) présente un coût déterministe décennal nul, mais contribue -en espérance de coût- pour 13 % au coût régional sur la Loire centrale (86 secteurs).

Il s'agit ensuite d'identifier les secteurs qui, pour l'une des crues d'un ensemble représentatif, contribuent notablement au coût moyen, ou présentent une forte dispersion absolue de coût. L'annexe XI.D présente, pour quelques crues, ceux des 86 secteurs de la Loire centrale qui contribuent pour au moins 5 % au coût régional (déterministe et/ou moyen), et ceux qui présentent un écart-type important (exprimé en valeur relative par rapport au plus fort écart-type absolu). On observe, pour ces différentes crues, qu'une forte proportion du coût régional est concentrée en quelques secteurs (54 % du CMA en 7 secteurs sur 86, 60 % du coût centennal en 5 secteurs sur plus de 70 concernés). De plus, il existe une très forte disparité entre les dispersions absolues.

Ainsi, on peut espérer obtenir une représentation assez fidèle de la région au travers d'un nombre limité de secteurs. Le processus de composition vis-à-vis de l'aléa hydrologique impose de retenir tous les secteurs "majeurs" respectivement sur les différentes gammes de crues. Sur ces secteurs, on peut alors analyser localement les contributions des sources d'incertitudes, comme on l'a présenté en X.3.

Une analyse respectant cette séquence permettra ainsi d'identifier les secteurs majeurs, ainsi que les sources d'incertitudes susceptibles d'influencer véritablement l'incertitude régionale. Il faut noter que les sources présentant un fort degré de cohérence régionale sont, bien évidemment, de "bonnes candidates" pour l'analyse.

Une fois restreint le champ d'investigation, il restera à mener la démarche complète proposée plus haut, consistant à simuler toutes les sources d'incertitudes sur les secteurs sélectionnés, avec la dimension spatiale de l'aléa, mais à n'analyser la sensibilité globale qu'aux sources "sélectionnées".

Selon le degré de fiabilité recherché, on pourra soit se contenter de cette analyse "partielle", soit s'en servir comme analyse de sensibilité pour restreindre le champ formel (et non plus géographique) d'une analyse complète. On basera alors le diagnostic sur les ordres de grandeur estimés pour:

- les enjeux de la cohérence des incertitudes;
- les enjeux de la cohérence hydrologique;
- les enjeux des sources d'incertitudes régionales.

partie D

CONCLUSION GENERALE

XII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR LES MODELES D'EVALUATION DES DOMMAGES

Le pessimisme de la pensée est le signe le plus certain de l'optimisme dans l'action.
Audouard, 1992

Dans ce dernier chapitre, nous allons résumer les conclusions détaillées des parties B (paragraphe V.3 et VI.4) et C (paragraphe X.3.4 et XI.4), pour tenter d'en dégager des perspectives de recherches ultérieures. Bien évidemment, le travail présenté ici ne porte que sur une partie restreinte de la problématique de l'estimation du coût des dommages dus aux inondations fluviales. Aussi, les pistes que nous proposons ne constituent-elles qu'une fraction des très nombreuses voies à explorer. Souhaitons que la Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles continue à porter ses fruits, par des résultats scientifiques et opérationnels nouveaux, ainsi que par la mise à jour d'un "état-de-l'art" et par l'identification d'orientations prioritaires de réflexion.

En cherchant à modéliser et estimer les dommages dus aux inondations, et à identifier les limites de telles démarches, nous nous sommes trouvés confrontés ici à deux obstacles importants, la variabilité et l'incertitude:

- la variabilité des comportements individuels, des vulnérabilités des logements, des caractéristiques des secteurs et des vallées inondables...;
- l'incertitude sur les nombreuses informations nécessaires, sur des modèles non validables par des données et références extérieures, sur des phénomènes très rares et très intenses.

Par rapport à la finalité de l'estimation des dommages, cela peut constituer une conclusion pessimiste, incitant à se satisfaire d'une méthode "qui ne sera pas plus mauvaise qu'une autre!". Pour chercher à dépasser ce constat, nous nous sommes attachés à approfondir et systématiser l'analyse des variabilités et incertitudes, avec l'espoir de mieux discerner les limites de l'estimation des dommages, et les voies permettant de les repousser.

XII.1. LA CONNAISSANCE DES DOMMAGES A ECHELLE ELEMENTAIRE

XII.1.1. Les résultats obtenus

Les conclusions que nous proposons ici ne concernent que les dommages à l'habitat (individuel), qui ont seuls été étudiés dans ce travail. Certaines conclusions qualitatives peuvent très vraisemblablement être transposées à d'autres types de dommages. Les travaux se sont appuyés sur une importante base de données constituée par enquêtes auprès de particuliers sinistrés dans différentes vallées françaises. Cette base présente l'intérêt de concerner huit sites et des phénomènes d'inondation fluviale (en plaine) variés, avec des données homogènes en termes de définition et de protocole de recueil.

Les principaux résultats qualitatifs obtenus par des analyses de données, à la lumière de synthèses bibliographiques, sont les suivants:

- les dommages à l'habitat dépendent d'un grand nombre de paramètres, relevant aussi bien de l'aléa (hauteur et durée de submersion, vitesse de montée...) que des enjeux (valeur exposée, type de bâtiment, hauteur de plancher) et des ressources disponibles (alerte, capacité physique de réponse); même en considérant simultanément plusieurs de ces paramètres au travers d'une typologie de situations, on ne peut pas expliquer toute la variabilité des dommages; cela étant, nous avons pu vérifier que la hauteur et la durée de

submersion influencent significativement les dommages, de même que la valeur des biens exposés (ceci conduit à analyser l'endommagement, défini ici préférentiellement par le coût des dommages ramené à la valeur immobilière d'un niveau de bâtiment);

- cette variabilité se traduit notamment sur l'effet de réduction des dommages par les réponses individuelles à l'annonce de crue et à la montée des eaux; les réponses et leur efficacité dépendent elles aussi de l'aléa, des enjeux et des ressources (dont les capacités physiques des occupants du logement), ainsi que de paramètres sociologiques et psychologiques; le délai disponible pour répondre à la montée de l'eau est constitué non seulement du délai d'alerte, mais également d'une partie du temps pendant lequel l'eau envahit le bâtiment; on a pu montrer que ce délai disponible et la durée de submersion conditionnent à la fois la nature des mesures adoptées en réponse à la montée de l'eau, mais également l'efficacité de différentes mesures; l'alerte constitue évidemment un facteur sensible pour les crues à montée rapide;
- de façon générale, le facteur humain possède une influence sensible sur les dommages, au travers de ses différentes dimensions; il faut constater l'insuffisance de données factuelles pour l'élaboration d'un modèle explicatif des comportements individuels et collectifs (culture du risque...), mais aussi le manque d'un modèle reconnu pour orienter le recueil de données; nous ne sommes pas en mesure de nous prononcer sur la possibilité d'établir un tel modèle.

L'analyse quantitative des dommages à l'habitat individuel a consisté à identifier des relations linéaires entre la hauteur de submersion H au-dessus du premier plancher aménagé (hors sous-sol) et l'endommagement E (coût du dommage matériel ramené à la valeur immobilière d'un niveau du bâtiment). Pour cela, nous avons opéré plusieurs distinctions: maison avec ou sans sous-sol, crue rapide et de courte durée ou lente et de longue durée, dommages immobiliers ou mobiliers, déplacement de mobilier (à titre partiel) ou non. Les ajustements de régressions linéaires $E(H)$ ne sont pas très significatifs, traduisant le nombre et la variété des paramètres qui conditionnent les dommages.

Malgré cela, différentes conclusions se déduisent de cette analyse:

- la durée de submersion accroît sensiblement les dommages immobiliers, notamment pour les fortes hauteurs de submersion;
- pour les dommages mobiliers par contre (maisons sans sous-sol), la durée longue est liée à une montée plus lente de l'eau, ce qui conduit à une plus grande efficacité des réponses; les droites ajustées indiqueraient que les dommages mobiliers seraient ainsi réduits par rapport aux crues rapides, pour des hauteurs de submersion n'excédant pas 1,5 mètre; au-delà, on peut penser que le facteur aggravateur de la durée l'emporte (sur le mobilier non déplacé ou insuffisamment surélevé); il faut rappeler par ailleurs que dans notre échantillon, les premiers niveaux des maisons sans sous-sol apparaissent un peu moins aménagés en moyenne sur les sites à crue rapide;
- lors des crues rapides, les mesures de déplacement (partiel) de biens mobiliers ne semblent montrer d'effet qu'au-delà de plusieurs dizaines de centimètres de hauteur de submersion.

Ces observations doivent cependant être tempérées par le caractère arbitraire des formes linéaires retenues pour les courbes (hauteur - endommagement), et par la qualité très moyenne des ajustements statistiques.

XII.1.2. Des questions à approfondir

Avant de s'intéresser aux dommages eux-mêmes, se pose la question de la spécificité de l'occupation des zones inondables, voire de différentes parties de ces zones: spécificités en termes de population, de perception et de comportement face au risque, de type d'habitat, d'occupation de cet habitat... On peut émettre l'hypothèse vraisemblable que ces spécificités sont "graduées" par le degré d'exposition à l'aléa (réel ou perçu, absolu ou relatif aux événements les moins anciens), avec l'influence généralement reconnue d'expériences antérieures. Nous avons rencontré de telles situations

au cours des diverses enquêtes. Ces spécificités conduisent à s'interroger, à plusieurs niveaux, sur l'estimation des dommages:

- la définition, par approche de simulation, ou la transposition géographique de courbes de dommages, lorsque l'on considère une typologie générale des enjeux (type d'habitat, valeurs exposées...), alors qu'ils sont susceptibles de présenter des spécificités par rapport aux zones non inondables (nous sommes conscients que sur certaines zones inondables notre hypothèse relève de l'utopie, ou du voeu pieux);
- l'utilisation des mêmes bases de référence pour estimer les impacts ou dommages dus respectivement aux crues assez fréquentes et aux crues rares; en effet, ces dernières touchent des populations et enjeux qui peuvent différer en moyenne des populations et enjeux touchés par les crues fréquentes; cette question est peut-être plus aiguë encore dans le cas des infrastructures et de leur fonctionnement.

Faisant suite à ces différents constats, certains travaux de recherche permettraient de mieux connaître les dommages à échelle élémentaire, pour le cas de l'habitat:

- observer et analyser les spécificités de l'occupation des zones inondables (population, enjeux...); ceci suppose notamment que l'on cherche à rendre les structures spatiales des outils statistiques et des systèmes d'informations géographiques compatibles avec l'étude des zones exposées aux risques;
- observer les comportements individuels en matière d'inondations sur des thèmes précis (à défaut de disposer d'un modèle général des comportements), notamment ceux qui sont proposés en V.3;
- proposer un modèle conceptuel pour le cas des réponses à l'annonce de crue et à la montée des eaux (qui est l'un des aspects les plus analysés jusqu'ici), qui permette d'approfondir la prise en compte des nombreux paramètres influents;
- tenter de réduire l'incertitude qui obère notre connaissance de la vulnérabilité et poursuivre l'analyse des paramètres majeurs (aléa, enjeux, ressources), d'une part en élargissant ce "jeu" de paramètres, d'autre part en augmentant la taille des échantillons de données analysées tout en veillant à l'hétérogénéité des situations et à l'homogénéité de la définition et du recueil des données.

XII.2. L'APPLICABILITE ET LA VALIDITE DES MODELISATIONS DEVELOPPEES

XII.2.1. Le modèle local

Il a pour objectif d'estimer, sur une partie de vallée inondable, les coûts des dommages pour des crues de différentes périodes de retour, ainsi que le coût moyen annuel (CMA). Le modèle local a été conçu pour utiliser au maximum une information hétérogène (qualitativement et quantitativement), issue de données préexistantes, d'expertises et d'estimations approchées. On a développé autant que possible cette caractéristique, pour limiter les inconvénients que présente une démarche systématisée et automatisée. Comme on le rappellera plus loin, l'automatisation du modèle permet de le mettre en oeuvre sur un grand nombre de sites et de façon systématique. Par ailleurs, nous avons cherché à prendre en compte les phénomènes d'hétérogénéités (découpage spatial, typologie des mécanismes hydrauliques) et de discontinuités (seuils des phénomènes de submersion, seuil de dommages, seuil de submersion des logements, discrétisation des zones inondables).

Le modèle donne une représentation aussi descriptive que possible de l'hydrologie des crues, des conditions de submersion, de l'occupation des sols et des processus d'endommagement. Parmi les raisons qui nous ont amenés à retenir un modèle semi-déterministe "descriptif", mentionnons le caractère explicite et expertisable (pour un site donné) des hypothèses de modélisation, ainsi que la possibilité d'identifier et de quantifier les diverses sources d'incertitudes. Seul ce choix de méthode, et la cohérence de la démarche, constituent des arguments de validité du modèle. Ainsi, sur certains secteurs a été effectuée une critique a posteriori, au vu des premières estimations de dommages

révélant que des seuils ou discontinuités avaient mal été pris en compte. Des experts connaissant le terrain ont pu revenir sur les données d'entrée, et le cas échéant compléter ces données pour rendre la description de la zone inondable plus réaliste. Ainsi nous sommes-nous assurés que la démarche mise en place permettait d'une part une valorisation des connaissances et expertises de terrain, a priori ou a posteriori, d'autre part une intégration aisée de toute information supplémentaire ou nouvelle. Si la structure du modèle apparaît représentative d'autres modèles globaux développés en matière de recherche ou à des fins opérationnelles, il nous semble que les intérêts majeurs de notre approche résident dans cette intégration "maximale" de l'information.

Parmi les limites de ce modèle, il faut signaler en particulier les caractéristiques suivantes:

- le caractère partiel des types de dommages estimés;
- le manque de validation de certaines fonctions de coûts élémentaires;
- les faiblesses dans la connaissance des mécanismes de rupture de digues (seuils de crues, loi de probabilité...);
- le fait que le modèle n'ait pas été validé sur des données réelles, ni par rapport à un autre modèle.

Ce modèle a été mis en oeuvre sur différentes zones inondables du bassin de la Loire, à partir d'une base de données constituée avec le soutien des Services Extérieurs de l'Etat, et regroupant 245 secteurs inondables qui représentent un linéaire de vallées de plus de 2.000 kilomètres.

Par ailleurs, nous avons développé une procédure de simulation de sources d'incertitudes, par la méthode de Monte-Carlo, pour reconstituer au sein du modèle les effets des nombreuses et diverses sources d'erreurs. Le choix de cette approche lourde (mais non biaisée) s'est trouvé justifié a posteriori par le fait que ces sources, et leurs effets sur les estimations de coûts, présentent de fortes amplitudes et des non-linéarités manifestes. Signalons que les sources d'incertitudes ont été considérées avec des amplitudes uniformes sur les différents secteurs. La méthode employée nous a permis, par ailleurs, d'analyser séparément l'effet d'une catégorie de sources d'incertitudes en simulant toutes les autres sources, et en comparant les résultats à la simulation globale. En effet, une source d'incertitude donnée intervient dans un contexte constitué par les autres sources, et non seule.

La procédure de simulation a été mise en oeuvre sur 112 secteurs, pour lesquels on a analysé les distributions des estimations du coût moyen annuel (CMA) et des coûts correspondant aux crues de périodes de retour 2, 10 et 100 ans.

Il ressort de l'analyse (voir V.3.4) que les niveaux d'incertitudes sont très forts en moyenne sur les coûts liés à une crue de période de retour déterminée, moins forts lorsqu'on caractérise la crue en cote, ou sur le CMA. Le facteur prédominant qui se dégage des simulations effectuées est la très grande variabilité des comportements des secteurs en matière d'incertitudes. Cette variabilité se traduit sous différents aspects:

- en termes de forme de distribution statistique, ce qui interdit de caler une loi de forme type, et impose d'analyser plusieurs indicateurs statistiques;
- en termes d'amplitude relative entre différentes crues, sur un même secteur;
- en termes d'amplitude relative entre différents secteurs.

De plus, on observe que la dispersion décroît au fur et à mesure que les coûts sont plus "intégrateurs": le coût des dommages en crue centennale intègre souvent la plus grande partie d'un secteur, et le CMA pondère de plus les différentes fréquences. Ces phénomènes d'intégration et de moyenne tendent à rendre les distributions plus symétriques. Finalement, on constate que les différents indicateurs statistiques utilisés ici ne sont pas liés strictement et mesurent des réalités différentes sur les incertitudes.

Les dispersions les plus fortes apparaissent dans les situations de discontinuité ou de fort gradient: seuil de submersion des logements, croissance rapide des surfaces inondées par rapport à l'intensité de crue, et surtout seuil d'apparition des dommages. Les sources d'incertitudes majeures (en moyenne) correspondent aux conditions hydrologiques (relations "période de retour - débit - cote") et

aux seuils de rupture de digues. Ces sources ont un effet d'autant plus fort, en valeur relative, que la dispersion sur les estimations de coûts est élevée. Ces résultats confortent notre choix de chercher à prendre en compte, dans le modèle, les situations d'hétérogénéités et de discontinuités. Les omettre aurait conduit à négliger une part sensible des incertitudes.

En ce qui concerne les sources d'incertitudes majeures, il faut souligner que les extrapolations de fréquences de débits, et la simulation des incertitudes qui s'y rattachent, reposent sur des hypothèses de forme de loi statistique. Nous avons évoqué à plusieurs reprises les interrogations fondamentales que suscitent la manipulation de quantiles aussi rares. Nous ne disposons pas d'éléments permettant de justifier dans l'absolu de la robustesse de nos simulations d'incertitudes. Par ailleurs, ces incertitudes sur les statistiques de crues sont difficiles à réduire, sinon par la patiente observation d'événements qu'il faut supposer suivre une loi stationnaire.

Parmi les autres sources majeures d'incertitudes, celles relatives aux ruptures de digue appellent des travaux d'analyse importants, avec des résultats vraisemblablement peu transposables directement d'un site à un autre. Quant aux incertitudes sur la relation entre cote et débit, elles peuvent être partiellement réduites par la mise en oeuvre de modèles hydrauliques d'écoulement, et d'une plus grande discrétisation spatiale des références hydrologiques (rattacher des secteurs à des points proches du lit mineur, plutôt qu'à des stations hydrométriques éloignées).

Malgré de telles améliorations, il faut rester excessivement prudent dans l'utilisation du modèle local à l'échelle d'un secteur. Les incertitudes peuvent être très fortes, et on ne dispose pas jusqu'ici d'une méthode heuristique permettant d'identifier a priori les situations "secteur - crue" les plus incertaines en termes d'estimation de dommages (sinon par simulation complète). De plus, la grande variabilité des "situations d'incertitudes" conduit à conclure que la quantification de ces incertitudes nécessite une approche analytique et une simulation des sources d'incertitudes ou de leurs effets directs.

XII.2.2. L'évaluation à échelle régionale

Les deux questions que nous avons plus particulièrement examinées sur des cas d'application portent sur la composition régionale des coûts et des incertitudes, par rapport aux cohérences spatiales respectives de l'aléa hydrologique et des sources d'incertitudes:

- le degré de cohérence spatiale hydrologique de l'aléa a une influence non négligeable sur la loi de fréquence des coûts régionaux, tel que nous l'avons illustré par simulation d'événements globaux de crues;
- de même, l'incertitude sur le coût régional dépend des degrés de cohérence spatiale des diverses sources d'incertitudes appliquées aux différents secteurs; l'effet d'une source d'incertitudes d'amplitude donnée est d'autant plus fort que son niveau de cohérence spatial est important (en d'autres termes qu'elle est plus uniforme sur les secteurs); dans le cadre d'une simulation, nous nous sommes limités à répartir ces sources entre le niveau local du secteur et le niveau régional; une telle simulation est lourde sur le plan de la mise en oeuvre, mais inévitable par rapport à la variabilité des secteurs et de leurs comportements en termes d'incertitudes (pas de modèle simplifié envisageable pour les incertitudes).

Les compositions régionales de l'aléa d'une part, des incertitudes d'autre part, nous apparaissent nécessiter des procédures analytiques, à cause de la variabilité évoquée, et à cause de l'amplitude importante des incertitudes: les diverses hypothèses simplificatrices que l'on pourrait proposer pour les deux opérations de composition conduisent à des résultats trop différents les uns des autres pour qu'il soit permis de conclure. Ainsi, des hypothèses extrêmes de cohérence hydrologique sur le bassin de la Vienne (en considérant trois cours d'eau) conduisent à des estimations de coût qui varient jusqu'à un facteur 3 ou 4. Pour la cohérence régionale des incertitudes, des hypothèses extrêmes conduisent, sur la Loire centrale, à des écarts-types sur le coût régional pouvant différer de plus d'un facteur 3.

En ce qui concerne la composition régionale de l'aléa, nous n'avons fait qu'illustrer rapidement la problématique et son importance. La cohérence spatiale des événements de crues relève de concepts et de méthodes hydrologiques maîtrisés, et l'analyse de cette cohérence ne peut être

limitée sérieusement que par des lacunes en termes de séries de données. On dispose par conséquent des bases permettant de développer l'estimation régionale des coûts en regard de la composition de l'aléa.

Sur la question des incertitudes, les simulations numériques ont conduit à des résultats contrastés selon les régions considérées. Sur la Loire centrale, la dispersion relative croît jusqu'au niveau décennal, puis diminue jusqu'à la plus forte crue considérée. Par contre, sur la Loire inférieure, cette dispersion relative -bien que plus faible en général- croît avec l'intensité de crue. Contrairement au cas de la Loire centrale, le nombre de secteurs concernés n'augmente pas (ou peu) avec l'intensité de crue. Pour le Cher amont, où tout est conditionné par un secteur "majoritaire" excessivement sensible aux incertitudes, la réduction des dispersions relatives par rapport aux estimations locales est bien moins importante que sur les deux autres régions.

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pris en compte simultanément les deux dimensions spatiales de l'hydrologie et des sources d'incertitudes. Une telle analyse, menée de façon complète, est lourde. Par contre, il faut noter que les fortes hétérogénéités entre secteurs conduisent à une concentration des dommages et des incertitudes au "profit" d'un nombre plus limité de secteurs. Cela devrait permettre de concentrer l'analyse et ainsi de l'alléger.

C'est par une telle simplification que la procédure et les outils développés pourront s'intégrer efficacement dans un processus d'aide à la décision, prenant en compte le caractère aléatoire des dommages dus aux inondations, ainsi que les importantes incertitudes. En particulier, la mise en oeuvre itérative d'une telle procédure d'évaluation, pour diminuer les incertitudes d'une façon qui soit "économique", nécessite de pouvoir aisément identifier les sources majeures et réductibles.

Revenons à notre ambition initiale: viser un compromis acceptable entre la mise en oeuvre d'une évaluation et sa précision. Un tel compromis dépend de chaque contexte décisionnel. S'il apparaît délicat d'utiliser le modèle développé à l'échelle local, il nous semble par contre utilisable à l'échelle régionale. Le niveau d'incertitude sur l'estimation d'un coût régional peut apparaître trop important par rapport à la prise de décision envisagée, mais les caractères explicite et quantitatif de l'approche permettent dans un deuxième temps d'identifier les sources majeures d'incertitudes puis d'orienter efficacement l'approfondissement de l'analyse.

En guise de conclusion, il nous semble qu'il faut insister encore sur la grande variabilité des amplitudes, dispersions et causes des incertitudes locales, ainsi que sur celle des comportements "régionaux" observés sur les incertitudes à échelle plus large.

XII.3. DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE SUR LES MODELES D'ESTIMATION DES DOMMAGES

Nous ne reviendrons pas ici sur le problème épistémologique de la validation d'un modèle tel que celui que nous avons développé et appliqué, notamment à échelle régionale (voir XI.4). Cette question appelle à se rapprocher de travaux de modélisation menés dans des domaines différents. Nous tenterons par contre ici de définir quelques unes des questions plus précises qui ont été ouvertes par ce travail, ou qui sont restées sans réponse jusqu'ici.

XII.3.1. Hétérogénéités, découpage spatial et précision

Nous avons insisté plusieurs fois sur les notions de variabilité, d'hétérogénéité, de discontinuité, aussi bien au niveau du modèle local qu'à l'échelle régionale. Après avoir découpé une région en secteurs inondables sur des critères de cohérence hydrologique, hydraulique, d'occupation des sols, on a logiquement observé une variabilité des "comportements" de ces secteurs: valeurs absolues de coûts de dommages, dispersion de la variable aléatoire "coût d'une crue", niveau relatif d'incertitudes, sources d'incertitudes majeures. Il faut toutefois rappeler que nous avons considéré des amplitudes uniformes pour ces sources, sur les différents secteurs (dispersions uniformes pour les simulations).

L'une des hypothèses implicites de notre démarche était que pour les zones où les enjeux sont forts, il existerait plus d'informations (études techniques, réglementations spécifiques...) et on recueillerait une expertise plus critique. C'est ce que nous avons qualitativement pu vérifier, du moins sur la quantité d'informations (à défaut de pouvoir toujours se prononcer sur la qualité), et parfois sur la finesse du découpage géographique.

Le niveau de découpage spatial (des zones inondables en secteurs) est dépendant de la finesse de l'information disponible, et constitue un facteur de précision pour le modèle d'évaluation (prise en compte des hétérogénéités). Par exemple, quelle confiance pourrait-on accorder au modèle s'il était appliqué sur des secteurs supposés uniformes, mais regroupant le lit moyen non endigué et une partie de lit majeur inondable par rupture de digue? L'une des voies de recherche, qui nous semblerait faire utilement suite à notre travail, serait l'analyse du niveau de découpage spatial par rapport au niveau de précision, en regroupant ou en divisant des secteurs pour comparer les évaluations de dommages résultantes.

Cette voie nous semble relever de questions typiques posées pour les systèmes d'informations géographiques (SIG), et notamment pour l'interface entre ces systèmes et différentes modélisations. Comme cela a été mentionné au chapitre VII, des premières expériences appliquent les SIG à l'évaluation des dommages dus aux inondations, basée ainsi sur une description systématique de l'espace (modèles distribués). Mais notre démarche est basée sur une approche globale par secteurs. Pour que le recours aux SIG ne se limite pas seulement à préciser mieux l'occupation globale des sols sur un secteur, il faudrait reprendre entièrement la réflexion pour l'élaboration d'un nouveau modèle qui respecte nos choix de principe. Cela ne donnerait que plus d'intérêt à cette démarche.

Par ailleurs, pour pouvoir intégrer efficacement des SIG et systèmes de données statistiques existants dans un modèle d'estimation des dommages (topographie, occupation des sols...), il faut qu'ils soient compatibles avec ce que l'on pourrait appeler la "logique du risque d'inondation":

- que leur définition spatiale soit cohérente avec la variabilité des facteurs déterminants des dommages (degré d'exposition à l'aléa résultant notamment de la topographie, nature des occupations des sols...);
- que les "objets" décrits, comme par exemple l'habitat, soient cohérents avec les facteurs de vulnérabilité; ainsi, pour estimer les dommages matériels il sera souhaitable de connaître (ou de pouvoir déterminer) la densité des logements situés au rez-de-chaussée, plutôt qu'une densité totale de logements (la question serait différente si l'on se préoccupait d'évacuation des personnes).

Une analyse approfondie du découpage spatial devrait être complétée par l'analyse de l'effet de la quantité d'informations sur la précision du modèle: plus on dispose par exemple de valeurs initiales de surfaces inondées, plus le modèle sera précis dans l'interpolation et l'extrapolation (cet aspect n'est pas pris en compte dans l'état de développement actuel). En fragmentant les secteurs, on peut également prendre en compte plus d'informations (pour peu qu'elles existent) et plus d'expertise sur chaque nouveau secteur. Ceci justifie à nos yeux le lien entre les deux questions.

De telles réflexions et travaux ultérieurs devraient permettre de mieux élucider la recherche d'un compromis entre la précision recherchée pour l'évaluation et les moyens d'analyse mis en oeuvre (précision et richesse des données, découpage spatial).

XII.3.2. Vers une évaluation régionale complète

L'évaluation des dommages à échelle régionale correspond à l'un des objectifs majeurs que nous nous sommes fixés pour notre démarche. Ce travail ne comporte en fait que les outils de base de cette évaluation régionale (modèle local, simulation des incertitudes, base de données), avec le cadre conceptuel et les premiers pas de sa mise en oeuvre sur un nombre limité de régions. De ce constat se dégagent des orientations logiques:

- tout d'abord, évaluer les dommages en prenant bien en compte le facteur important que représente la cohérence spatiale de l'aléa hydrologique;

- approfondir l'analyse de la cohérence spatiale des sources d'incertitudes, en ne se contentant pas des deux niveaux du secteur et de la région;
- tenir compte conjointement des cohérences spatiales de l'aléa hydrologique et des sources d'incertitudes; en particulier, notons que les incertitudes sur l'analyse fréquentielle des crues sont structurées par la cohérence hydrologique des événements de crues (périodes de retour estimées sur un même échantillon de crues historiques...); ceci va renforcer le poids régional des sources d'incertitudes hydrologiques;
- étendre l'analyse à d'autres régions, pour chercher à identifier et expliquer des comportements types en matière d'incertitudes (relation entre dispersion relative des coûts et période de retour, notamment), en fonction de la concentration spatiale des dommages, de l'hétérogénéité des secteurs...

Au-delà de ces trois points, reste ouverte la question de la cohérence économique des coûts et de leur composition régionale (XI.1). Rien ne permet de supposer que cette composition ne soit pas spécifique à chaque région. Ainsi, même si l'on recueillait des données de dommages élémentaires intégrant cet effet de composition régionale sur un événement réel, on ne pourrait pas transposer les résultats a priori à une autre région, sans avoir au préalable compris quels facteurs conditionnent ces dommages. C'est pourquoi il nous semble que la résolution de cette question passe par la définition d'un cadre conceptuel adapté.

L'une des voies d'exploration pourrait être de se référer à d'autres catastrophes naturelles que les inondations fluviales, du moins pour les événements présentant des mêmes échelles de temps (ce qui exclut notamment les sécheresses, ou les lentes subsidences de terrain). Si l'on tente de qualifier les structures spatiales de différentes catastrophes, on est ramené le plus souvent à deux structures types:

- des événements très ponctuels dans l'espace, dont les déclenchements sont peu corrélés d'un endroit à l'autre (hormis éventuellement par une situation climatique générale) et dont la localisation est imprécise: glissements de terrain et éboulements, effondrements, précipitations et ruissellements très intenses, avalanches, coulées de laves sans éruption volcanique;
- des événements plus étendus, "à logique surfacique", frappant toute une zone "convexe" à l'intérieur des limites de laquelle se manifeste l'aléa (à des degrés variables): séismes, éruptions volcaniques, submersions côtières de grands polders, raz-de-marées, tempêtes et ouragans.

Par contre, les inondations fluviales et certaines inondations côtières présentent des structures spatiales linéaires (éventuellement en arborescence), avec des submersions sur de longues distances mais sur une proportion surfacique restreinte de la région perturbée. Cette toute première analyse ne doit pas être considérée comme un résultat établi, mais plutôt comme un appel à contradiction et à réflexion.

Il nous semble que l'analyse de la composition économique des coûts à échelle régionale devrait s'appuyer sur la prise en compte de cette structure spatiale des événements, et pourrait ainsi faire l'objet d'une comparaison entre différents types de catastrophes naturelles.

XII.3.3. Apporter une aide à la décision

L'estimation des dommages s'inscrit par nature dans un cadre décisionnel, en contribuant à identifier des zones "prioritaires" pour une action publique, ou à évaluer une politique de gestion du risque d'inondation fluviale (occupation des sols, alerte, ouvrage de protection...). A ce titre, les dommages ou leur réduction ne constituent que l'un des éléments à prendre en compte, parmi toutes les retombées d'une décision. Et il nous faut rappeler que nous n'avons pu considérer dans ce travail qu'une partie des types de dommages. Malgré les autres travaux et résultats produits de longue date par les chercheurs et les chargés d'études, il reste beaucoup à faire pour mieux cerner les dommages.

En ce qui concerne la procédure de modélisation et d'estimation, nous avons déjà exprimé notre sentiment sur son intérêt potentiel à échelle régionale, en veillant à identifier et quantifier les sources d'incertitudes et leurs effets. Encore n'avons-nous raisonné ici que sur l'évaluation des

dommages potentiels dans la situation "actuelle" décrite par les données. Or, les problèmes de décision en matière d'inondations portent souvent sur la part de réduction des dommages apportée par une politique. En vertu des objectifs de modélisation fixés a priori, notre approche passe par une description simplifiée des zones inondables et des inondations, qui est cohérente avec les descriptions des retombées de divers modes de gestion du risque d'inondation:

- modification des relations entre paramètres hydrologiques;
- modification des fonctions de coûts élémentaires;
- modification ou construction de digues;
- modification de l'occupation des sols...

De la sorte, les effets des modes de gestion peuvent être simulés en intervenant soit sur les données d'entrée, soit sur le modèle lui-même. Et ainsi il est possible d'estimer les dommages après mise en oeuvre d'une décision. Soulignons que les effets d'un mode de gestion doivent être déterminés par ailleurs, et ne pas porter sur des facteurs non pris en compte comme la vitesse de courant, par exemple.

Mais il reste à vérifier que notre procédure permet d'apporter des éléments utiles d'aide à la décision en simulant et en analysant les réductions de dommages. En particulier, on ne peut pas prévoir ex abrupto le niveau d'incertitudes sur ces réductions, pour les raisons suivantes:

- l'action d'un mode de gestion est elle-même entachée d'incertitudes (taux et efficacité de mise en conformité de bâtiments, nouvelle résistance d'une digue...);
- la simulation des sources d'incertitudes doit être menée sur les variations de dommages, et non sur les dommages totaux (la dispersion absolue sur le dommage total est plus forte que sur la réduction du dommage).

Par ailleurs, le caractère aléatoire des occurrences et des intensités des inondations introduit un élément supplémentaire de variabilité sur le bilan a priori d'une politique (III.3).

L'intérêt et les limites d'application de la méthode développée ne pourront être estimés qu'après sa mise en oeuvre pour l'évaluation de différentes politiques. Il faudra ainsi analyser le niveau d'incertitude sur cette évaluation, pour juger de l'apport à un processus de décision.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

sigles fréquemment utilisés:

BCEOM	Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer
CEMAGREF	Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CERGRENE	Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement
D(E)PP(R)	Direction (de l'Eau et) de la Prévention des Pollutions (et des Risques)
DRM	Délégation aux Risques Majeurs
ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ENPC	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
SRETIE	Service de la Recherche, des Etudes et du Traitement de l'Information sur l'Environnement

ADDAD. 1989. *ADDAD: Logiciel d'analyse des données. Manuel de référence*. Version micro - 08/89. Paris: Lefonen.

AMBRUS, S.Z. 1989. On the modelling of dike breach during flood using a complex modular model system. Dans LOUCKS, D.P. et SHAMIR, U. (sous la direction de). *Systems analysis for water resources management: closing the gap between theory and practice*. IAHS Publication no. 180. Wallingford, Royaume-Uni: Association Internationale des Sciences Hydrologiques, 117-128.

ANDERSON, M.B. 1990. *Analyzing the costs and benefits of natural disaster responses in the context of development*. Environment working paper no. 29. Washington: The World Bank (Environment Department), 34 pages.

ANGELMAR, R. 1984. Les méthodes de l'évaluation. Dans NIOCHE, J.P. et POINSARD, R. (sous la direction de). *L'évaluation des politiques publiques*, Paris: éditions Economica, 75-87.

APPELBAUM, S.J. 1985. Determination of urban flood damages. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 111, no. 3, 269-283.

ARNELL, N.W. 1986. Average annual damage by flood frequency zone. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 112, no. 1, 104-113.

ARNELL, N.W. 1989. Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 115, no. 1, 94-107.

ASIA REGION TECHNICAL DEPARTMENT. 1990. *Flood control in Bangladesh: a plan for action*. Technical paper no. 119. Washington: The World Bank, 91 pages.

AUDOUARD, Y. 1992. *Le Canard Enchaîné*, 12 février.

AYED, M. 1985. *Sélection des secteurs prioritaires pour l'élaboration des plans d'exposition aux risques naturels prévisibles*. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en méthodes scientifiques de gestion. Paris: Université de Paris-Dauphine, 64 pages, annexes.

BACHELARD, G. 1977. *La formation de l'esprit scientifique - contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Dixième édition. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 257 pages.

BAGHERZADEH-BORNER, M. 1985. *Rapport d'enquête sur les inondations de Montauban du 9 novembre 1982*. Rapport pour la Délégation aux Risques Majeurs. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC), 25 pages, annexes.

- BAILLY, A.S. 1977. *La perception de l'espace urbain: les concepts - les méthodes d'étude - leur utilisation dans la recherche urbanistique*. Paris: Centre de Recherche d'Urbanisme, 250 pages, annexes.
- BAILLY, A.S. 1978. *L'environnementalisme: environnement et action*. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique / Centre de Documentation en Sciences Humaines, 123 pages, annexes.
- BALTEANU, D. 1993. The natural hazards research agenda in Romania. *Natural Hazards Observer*, vol. XVII, no. 5, p. 5.
- BAMBERGER, V. 1987. *Evaluation du coût des dommages indirects engendrés par la fermeture des voies sur berge en période de crue*. Mémoire du Diplôme d'Etudes Approfondies 103. Paris: Université Paris-Dauphine, 2 volumes, 101 pages, annexes.
- BAO, Y., TUNG, Y.K. et HASFURTHER, V.R. 1987. Evaluation of uncertainty in flood magnitude estimator on annual expected damage costs of hydraulic structures. *Water Resources Research*, vol. 23, no. 11, 2023-2029.
- BARRIER, P. 1990. *La mémoire des fleuves de France*. Paris: Christian de Bartillat, 318 pages.
- BCEOM. 1967. *Essai sur le coût économique des crues: I - recherches méthodologiques*. Paris: Ministère de l'Équipement et du Logement / Service Central Hydrologique, 90 pages, annexes.
- BCEOM. 1969. *Atlas des zones inondables*. Paris: Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire / Service Central de l'Hydrologie et de l'Environnement, 6 volumes.
- BCEOM. 1970. *Recherches méthodologiques sur l'évaluation des coûts unitaires des dommages causés par les crues*. Paris: Ministère de l'Équipement et du Logement / Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables / Service Central Hydrologique, 212 pages.
- BCEOM. 1971. *La rentabilité de l'annonce des crues: exemple du bassin de la Vézère et de la Corrèze*. Paris: Ministère de l'Équipement et du Logement / Service de la Navigation de la Seine, 90 pages, annexes.
- BCEOM. 1977. *Approche rationnelle des décisions concernant la lutte contre les nuisances dues aux inondations*. Paris: Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire, 2 tomes, 7 volumes d'annexes.
- BCEOM. 1980-a. *Estimation du coût des inondations catastrophiques - saison hydrologique 1977*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie / DPP / Service Central de l'Hydrologie et de l'Environnement, 28 pages, annexes.
- BCEOM. 1980-b. *Lutte contre les nuisances des inondations: méthode sommaire d'évaluation des critères économiques*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie / DPP / Service de l'Eau / Sous-Direction des Eaux Continentales, 75 pages, annexes.
- BCEOM. 1984. *Bilan économique des inondations - années hydrologiques 1979 à 1982*. Neuilly-sur-Seine, France: Secrétariat d'Etat à l'Environnement / DPP / Service de l'Eau / Sous-Direction des Eaux Continentales, 18 pages, annexes.
- BCEOM. 1990. *Dommages de crues: bassin de la Moselle*. Rapport pour le Ministère de l'Environnement (DEPPR, Service de la Navigation de Nancy), l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse, la Direction Départementale de l'Équipement de la Moselle. Villers-lès-Nancy, France: Service de la Navigation de Nancy, 4 volumes, 251 pages, annexes.
- BECK, M.B. 1987. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, vol. 23, no. 8, 1393-1442.
- BENZÉCRI, J.P. 1980. *Pratique de l'analyse des données - Tome 1: Analyse des correspondances - Exposé élémentaire*. Paris: Dunod, 424 pages.

- BERNIER, J. 1979. Sur la nature aléatoire du coût des dommages provoqués par les crues. *La Houille Blanche*, no. 1, 11-19.
- BERNIER, J. 1990. Les incertitudes hydrologiques dans les problèmes de dimensionnement d'ouvrages: valeur des informations locales et spatiales. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 3, no. 1, 37-53.
- BERNIER, J. et MIQUEL, J. 1979. Incertitudes de l'information et décisions en situation de risque: cas des problèmes de protection contre les crues. *La Houille Blanche*, no. 4/5, 251-257.
- BHAVNAGRI, V.S. et BUGLIARELLO, G. 1965. Mathematical representation of an urban flood plain. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 91, no. HY2, 149-173.
- BHAVNAGRI, V.S. et BUGLIARELLO, G. 1966. Flood proofing in a flood plain: a stochastic model. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 92, no. HY4, 63-76.
- BIALAS, W.F. et LOUCKS, D.P. 1978. Nonstructural floodplain planning. *Water Resources Research*, vol. 14, no. 1, 67-74.
- BIDAN, P. 1993. *Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles*. Paris: Caisse Centrale de Réassurance, 8 pages, annexes.
- BINLEY A.M., BEVEN K.J., CALVER A. et WATTS L.G. 1991. Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions. *Water Resources Research*, vol. 27, no. 6, 1253-1261.
- BOBEE, B. 1976. *Contribution à l'étude statistique des débits maximaux annuels de crue par les distributions Pearson type 3 et Log-Pearson type 3*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Toulouse, France: Université Paul-Sabatier, 157 pages.
- BOGARDI, I., DUCKSTEIN, L. et SZIDAROVSKY, F. 1975. On the reliability of flood levee systems. *Proceedings of the Second International Conference on Application of Statistics and Probability in Soil and Structure Engineering* (Aachen, République Fédérale d'Allemagne, 15-18/09). 47-66.
- BONNIN, J. 1984. *L'eau dans l'Antiquité: l'hydraulique avant notre ère*. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France no. 47. Paris: éditions Eyrolles, 383 pages.
- BONNIN, J. 1990. Le Déluge et les déluges. *La Houille Blanche*, no. 5, 341-348.
- BOUDIER, H. 1983. *L'environnement vu par les producteurs agricoles - rapport 1: cadre général et méthodologie*. Montréal, Canada: Gouvernement du Québec / Ministère de l'Environnement, 72 pages, annexes.
- BOULEAU, N. 1991. Splendeurs et misères des lois de valeurs extrêmes. *Risques*, no. 4, 85-92.
- BOURGUE, B. et BRUCHET, E. 1988. *Réalisation d'enquêtes sur les dommages dus aux inondations*. Rapport de stage du Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées "Aménagement du Territoire et Développement Local". Aix-en-Provence, France: Institut d'Aménagement Régional, 15 pages, annexes.
- BRASCHI, G., GALLATI, M. et NATALE, L. 1991. Modeling floods in urban areas. Dans "Inspiration: come to the headwaters" *Proceedings of the fifteenth Annual Conference of the Association of State Floodplain Managers* (Denver, 10-14/06/91). Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 117-122.
- BRILLY, M. et SMITH, M. 1992. Floods, damage, and protection on headwater streams. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 8 pages.

- BROWN, J.P. 1972. *The economic effects of floods*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems no. 70. New-York: Springer-Verlag, 87 pages.
- BROWN, J.P., CONTINI, B. et McGUIRE, C.B. 1972. An economic model of floodplain land use and land use policy. *Water Resources Research*, vol. 8, no. 1, 18-32.
- BRUNET-MORET, Y. 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. *Cahiers de l'ORSTOM*, vol. VI, no. 3, 100 pages.
- BUCK, W. et LEE, K.K. 1980. Effektiver Hochwasserschutz: Vorarbeiten und deren Anwendung. *Wasser und Boden*, no. 2, 59-67.
- BUCK, W. et PFLÜGNER, W. 1991. Nutzwertanalytische Bewertung Auenökologischer Wirkungen - Pilotstudie für eine Hochwasserschutzmassnahme. *Wasserwirtschaft*, vol. 81, no. 12, 578-587.
- BURBY, R.J., BOLLENS, S.A., HOLWAY, J.M., KAISER, E.J., MULLAN, D. et SHEAFFER, J.R. 1988. *Cities under water*. Institute of Behavioural Science monograph no. 47. Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: University of Colorado, 250 pages.
- BURTON, I., KATES, R.W. et WHITE, G.F. 1978. *The environment as hazard*. New-York: Oxford University Press, 240 pages.
- CARTER, T.R., PARRY, M.L., NISHIOKA, S. et HARASAWA, H. 1992. *Preliminary guidelines for assessing impacts of climate change*. Report of working group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (WMO-PNUE). Oxford (Royaume-Uni) et Tsukuba (Japon): University of Oxford / Environmental Change Unit et Center for Global Environmental Research, 28 pages.
- CASELTON, W.F. et LUO, W. 1992. Decision making with imprecise probabilities: Dempster-Shafer theory and application. *Water Resources Research*, vol. 28, no. 12, 3071-3083.
- CAUDE, G. 1987. *L'expérience française de zonation des risques d'inondation*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère délégué chargé de l'Environnement / Délégation aux Risques Majeurs, 31 pages.
- CAUDE, G. 1988-a. Vulnérabilité et plans d'exposition aux risques. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 361-371.
- CAUDE, G. 1988-b. L'inondation des villes: un phénomène maîtrisable ?. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, no. 40, 53-63.
- CAUDE, G. et DEBIZET, G. 1986. *Eléments d'appréciation économique applicables aux plans d'exposition aux risques liés aux inondations*. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC), 57 pages.
- CAZES, P. 1984. *Analyse des correspondances multiples: application à l'étude des questionnaires*. Pratique de l'analyse des données. Paris: ENGREF, 261 pages.
- CEMAGREF. 1981. *L'extrapolation des courbes de tarage en hydrométrie (fascicule 1)*. Antony, France: CEMAGREF, 71 pages.
- CEMAGREF. 1991. *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux*. Antony, France: CEMAGREF / Division Hydrologie, 413 pages.
- CEMAGREF. 1992. *Inondabilité: modélisation des connaissances hydrologiques et hydrauliques en vue d'une confrontation "Risques / Besoins de protection" directe - synthèse cartographique*. Rapport établi pour le X^{ème} Plan et la Région Rhône-Alpes (Contrat Etat - Région Rhône-Alpes; Risques Naturels en Montagne). Lyon, France: CEMAGREF / Division Hydrologie-Hydraulique, 195 pages.
- CEMAGREF (non daté). *Notice du logiciel RUPRO*. Lyon, France: CEMAGREF / Division Hydrologie-Hydraulique, 5 pages.

- CHARENTON, J.M. et BROSSIER, C. 1980. *Crues de la Loire: pertes économiques dues à une crue éventuelle - actualisation du rapport O.T.U (agriculture)*. Rapport de stage de l'Université d'Orléans. Orléans, France: Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne, 18 pages.
- CHATTERTON, J.B., PIRT, J. et WOOD, T.R. 1979. The benefits of flood forecasting. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, vol. 33, no. 3, 237-252.
- CHOJNACKI, J., FILIMOWSKI, J. et KONIECZNY, R. 1992. Flood: computer system and its implementation. Dans SAUL, A.J. (sous la direction de). *Floods and flood management* (Third International Conference, Florence, Italie, 24-26/11/92). Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers, 109-117.
- CLARK, C. et al. 1983. *Les inondations*. Amsterdam: Time-Life Books, 176 pages.
- COHEN, V. 1992. Evaluation d'un risque naturel dans un contexte décisionnel. *Actes du séminaire sur les aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels* (Paris, 1-3/10/91, coordination PENEL M. et MARCO O.). Etudes du CEMAGREF - Montagne no. 2. Antony, France: CEMAGREF, 97-102.
- CONSUEGRA ZAMMIT, D. 1992. *Concept de gestion des eaux de surface: aspects méthodologiques et application au bassin versant de la Broye en Suisse*. Thèse de Docteur es Sciences Techniques. Lausanne, Suisse: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne / Département de Génie Rural, 169 pages, annexes.
- CORDEIRO-NETTO, O. et BARRAQUE, B. 1991. *Evaluation des politiques publiques de l'environnement: aspects méthodologiques*. Etude pour le Groupe de Prospective du Ministère de l'Environnement. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF) et LATTIS (ENPC - CNRS), 19 pages, annexes.
- CUNNANE, C. 1989. *Statistical distributions for flood frequency analysis*. Operational Hydrology Report no. 33 (WMO - No. 718). Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 73 pages, annexes.
- DACHARRY, M. 1990. Parade aux effets des inondations. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, no. 1, 5-12.
- DANNINGER, H.G. et WALDNER, F. 1983. Analyse von Hochwasserschäden zur Erstellung von Schadensfunktionen. Dans BIFFL, W., RADLER, S. et SUPERSPERG H. *Oesterreichische Wasserwirtschaft*. Vienne: Springer-Verlag, 199-206.
- DANTZIG (Van), D. 1956. Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica*, vol. 24, no. 3, 276-287.
- DAS, S. et LEE, R. 1988. A nontraditional methodology for flood stage-damage calculations. *Water Resources Bulletin*, vol. 24, no. 6, 1263-1272.
- DAVIS, S.A. (sous la direction de). 1988. *National economic development procedures manual - Urban flood damage*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Water Resources Support Center / Institute for Water Resources, 288 pages.
- DAVIS, D.W. et BURNHAM, M.W. 1988. Analytical methods and tools for reconnaissance-phase studies. Dans *Proceedings of a seminar on flood damage reduction reconnaissance-phase studies* (09-11/08/88). Davis (Calif.), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Hydrologic Engineering Center, 79-93.
- DAVIS, D.R. et DVORANCHIK, W.M. 1971. Evaluation of the worth of additional data. *Water Resources Bulletin*, vol. 7, no. 4, 700-707.
- DAVIS, D.W. et WEBB, R.F. 1978. *Flood damage assessments using spatial data management techniques*. Technical Paper no. 57. Davis (Calif.), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Hydrologic Engineering Center, 25 pages.

- DAVIS, D.R., DUCKSTEIN, L. et KRZYSZTOFOWICZ, R. 1979. The worth of hydrologic data for nonoptimal decision making. *Water Resources Research*, vol. 15, no. 6, 1733-1742.
- DAVIS, S.A., RATICK, S.J. et BALLEW, M. 1989. *Uncertainty analysis for urban flood damage reduction benefits: attitudes and practices of Corps of Engineers Economists*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S Army Corps of Engineers / Water Resources Support Center / Institute for Water Resources, 57 pages.
- DAY, J.C. 1970. A recursive programming model for nonstructural damage control. *Water Resources Research*, vol. 6, no. 5, 1262-1271.
- DAY, H.J. et LEE, K.K. 1976. Flood damage reduction potential of river forecast. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, vol. 102, no. WR1, 77-87.
- DDE (DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT) DE LA GIRONDE, et ADERCAV. 1986. *Plan d'exposition aux risques naturels: étude de vulnérabilité secteur 2*. Bordeaux, France, n.p..
- DDE (DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT) DE LA SEINE-ET-MARNE. 1986. *Plans d'exposition aux risques sur les communes de Lagny-sur-Marne, Montévrain, Esbly, Condé-Ste-Libiaire: études de vulnérabilité*. Melun, France, 4 volumes.
- DEBIZET, G. et CAUDE, G. 1986. *Simulation de dommages en zone urbaine inondable: application au quartier de Sapiac à Montauban*. Rapport pour la Délégation aux Risques Majeurs. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC), 73 pages, annexes.
- DELEAU, M., NIOCHE, J.P., PENZ, P. et POINSARD, R. 1986. *Evaluer les politiques publiques: méthodes, déontologie, organisation*. Paris: Commissariat Général du Plan & La Documentation Française, 181 pages.
- DELEUZE, C., FOTRE, C., NUTI, I. et PIEROT, F. 1991. *Evaluation de fonctions de coûts économiques des dommages aux cultures dus aux inondations*. Rapport de Thème. Paris: ENGREF, 50 pages.
- DILKS, D.W., CANALE, R.P. et MEIER, P.G. 1992. Development of Bayesian Monte Carlo techniques for water quality model uncertainty. *Ecological Modelling*, vol. 62, no. 1-3, 149-162.
- DION, R. 1934. *Le Val de Loire: étude de géographie régionale*. Tours, France: Arrault et Cie Imprimeurs - Editeurs (réédition Laffite Reprints, Marseille, 1978), 751 pages.
- DOIZY, A. 1991. *Evaluation of the non-monetary impacts of flooding on households*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 47 pages, annexes.
- DOMBROWSKY, W.R. 1990. *The social dimension of warning and the transition from folk wisdom to professionalism*. Communication au Workshop "Prediction and Perception of Natural Hazards" (Perugia, Italie, 22-26/10/90). Genève: Organisation des Nations-Unies / IDNDR, 17 pages.
- DONNELLY, W.A. 1989. Hedonic price analysis of the effect of a floodplain on property values. *Water Resources Bulletin*, vol. 25, no. 3, 581-586.
- DOURLENS, C. 1989. Nîmes: la domestication d'une catastrophe. *Aménagement et Nature*, no. 95, 10-12.
- DOURLENS, C., GALLAND, J.P., VIDAL-NAQUET, P.A. et THEYS, J. (sous la direction de). 1991. *Conquête de la sécurité - gestion des risques*. Paris: éditions l'Harmattan, 300 pages.
- DRE (DIRECTION REGIONALE DE L'EQUIPEMENT) D'ILE-DE-FRANCE. 1986. *Plans d'exposition aux risques naturels sur les communes d'Ablon-sur-Seine, de Villeneuve-Saint-Georges et de Villeneuve-le-Roi - rapport no. 2: simulation économique et propositions*. Paris, 20 pages, annexes.

- DRI (DELEGATION A LA RECHERCHE ET A L'INNOVATION). 1991. *Regards de chercheurs sur une catastrophe: l'inondation de Nîmes du 3 octobre 1988*. Dossiers des Séminaires TTS no. 17. Paris: Ministère de l'Équipement du Logement des Transports et de l'Espace, 119 pages.
- DRM (DELEGATION AUX RISQUES MAJEURS). 1990. *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Paris: Ministère de l'Environnement et La Documentation Française, 142 pages.
- DRM (DELEGATION AUX RISQUES MAJEURS). 1992. *Prévention des risques naturels et technologiques majeurs: années 1988 à 1990*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère de l'Environnement / DEPPR, 52 pages.
- DRM (DELEGATION AUX RISQUES MAJEURS) et STU (SERVICE TECHNIQUE DE L'URBANISME). 1990. *Urbanisation - inondation*. Neuilly-sur-Seine, France: Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs / DEPPR, 199 pages.
- DUCLOS, D. 1988. La construction sociale des risques majeurs. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 37-54.
- DUNCAN, J.M. et HOUSTON, W.N. 1983. Estimating failure probabilities for California levees. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 109, no. 2, 260-268.
- DVWK (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU). 1985. *Oekonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen: Arbeitsmaterialien zum methodischen Vorgehen*. DVWK-Mitteilung 10. Bonn: DVWK, 70 pages, annexes.
- EDINGER, J.E. 1964. Economic effect of local flood protection measures. Dans WHITE, G.F., *Choice of adjustment to floods*. Department of Geography Research Paper no. 93. Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 127-149.
- EENSCHOOTEN, M. et LEROY, G. 1988. *Les conditions de logement des ménages en 1984*. Les Collections de l'INSEE no. 133M. Paris: Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 273 pages.
- EL-JABI, N. 1980. *Approche systématique pour l'aménagement des plaines inondables*. Thèse de Doctorat (PhD). Montréal, Canada: Ecole Polytechnique de Montréal, 220 pages, annexes.
- EL-JABI, N. et ROUSSELLE, J. 1987. A flood damage model for flood plain studies. *Water Resources Bulletin*, vol. 23, no. 2, 179-187.
- EL-JABI, N., ROUSSELLE, J., BRIERE, F. et LEBLANC, D. 1982. *Aménagement des plaines inondables: analyse hydro-économique*. Etude no. 127 de la série scientifique. Ottawa: Environnement Canada / Direction de la Planification et de la Gestion des Eaux, 120 pages.
- ERICKSEN, N.J. 1986. Forecasting for what and whom ?. Dans SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. (sous la direction de). *Flood warning in Australia*. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 223-234.
- EUROFLOOD. 1990. *Flood hazard assessment and management in the European Community: an EPOCH research proposal*. Bruxelles: Commission des Communautés Européennes / D.G. XII / programme EPOCH, n.p.
- EUROFLOOD. 1992. *Inception report*. Bruxelles: Commission des Communautés Européennes / D.G. XII / programme EPOCH, 361 pages.
- EUROFLOOD. 1993. *First annual report*. Bruxelles: Commission des Communautés Européennes / D.G. XII / programme EPOCH, 503 pages.
- FENELON, J.P. 1981. *Qu'est-ce que l'analyse des données ?*. Paris: Lefonen, 311 pages.

- FERREL, W.R. et KRZYSZTOFOWICZ, R. 1983. A model of human response to flood warnings for system evaluation. *Water Resources Research*, vol. 19, no. 6, 1467-1475.
- FHRC (FLOOD HAZARD RESEARCH CENTRE). 1987. *Thames overview: pre feasibility study*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 37 pages, annexes.
- FISCHHOFF, B. 1988. Gérer la perception du risque. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 493-510.
- FISCHHOFF, B., LICHTENSTEIN, S., SLOVIC, P., DERBY, S.L. et KEENEY, R.L. 1981. *Acceptable risk*. New-York: Cambridge University Press, 185 pages.
- FLACK, J.E. 1978. Economic analysis of structural flood proofing. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, vol. 104, no. WR1, 211-221.
- FORDHAM, M., TUNSTALL, S.M. et PENNING-ROWSELL, E.C. 1989. *Choice and preference in the Thames floodplain: the beginnings of a participatory approach*. Papier présenté à la International Conference on Wetlands "The People's Role in Wetland Management" (Leiden, Pays-Bas, 5-8/06/89). Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 6 pages.
- FORTIN, M. et Mc BEAN, E. 1984. Forecasting relative price movements for project evaluation. *Water Resources Research*, vol. 20, no. 10, 1327-1330.
- FOWLER, B. 1988. Level of detail in reconnaissance reports. Dans *Proceedings of a seminar on flood damage reduction reconnaissance-phase studies* (09-11/08/88). Davis (Calif.), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Hydrologic Engineering Center, 69-78.
- FREAD, D.L. 1989. National weather service models to forecast dam-breach floods. Dans STAROSOLSZKY, O. et MELDER, O.M. (sous la direction de). *Hydrology of disasters*. Londres: James and James & Organisation Météorologique Mondiale, 192-211.
- FRIEDMAN, D.G. 1984. Natural hazard risk assessment for an insurance program. *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, vol. 9, no. 30, 57-128.
- GAGEY, F.N. 1989. *Report on macroeconomic effects of a flood control project in Bangladesh*. Document de travail dans le cadre du projet du French Engineering Consortium. Paris, 46 pages.
- GALLATI, M. et UBERTINI, L. 1989. Hydrological problems of dam and levee rupture. Dans STAROSOLSZKY, O. et MELDER, O.M. (sous la direction de). *Hydrology of disasters*. Londres: James and James & Organisation Météorologique Mondiale, 178-191.
- GARDNER, R.H. et O'NEILL, R.V. 1983. Parameter uncertainty and model predictions: a review of Monte-Carlo results. Dans BECK, M.B. et van STRATEN, G. (sous la direction de). *Uncertainty and forecasting of water quality*. New-York: Springer-Verlag, 245-257.
- GAROLA-GIUGLARIS, P. 1984. *Problématique du risque et de l'incertitude à propos de l'évaluation socio-économique des dommages dus aux inondations*. Thèse de Troisième Cycle. Créteil et Paris: Université Paris-Val-de-Marne et ENPC, 319 pages.
- GAUTIER, J.N. 1991. *Inondabilité: cartographie de synthèse*. Rapport intermédiaire de formation doctorale "Sciences et Techniques de l'Eau" de l'Université Louis-Pasteur-Strasbourg I. Lyon, France: CEMAGREF / Division Hydrologie-Hydraulique, 86 pages, annexes.
- GEIPEL, R. 1990. *The river Danube flood of 27 march 1988*. Communication au Workshop "Prediction and Perception of Natural Hazards" (Perugia, Italie, 22-26/10/90). Genève: Organisation des Nations Unies / IDNDR, 12 pages.
- GENESLAY, E. 1971. *La Loire: crues et embâcles*. Paris: Nouvelles Editions Latines, 110 pages.
- GRAIE (GROUPE DE RECHERCHE RHÔNE-ALPES SUR LES INFRASTRUCTURES ET L'EAU). 1991. *Cahiers techniques du GRAIE pour la gestion et l'aménagement des cours d'eau - volume B3: approches économiques et sociologiques*. Villeurbanne, France: GRAIE, 70 pages.

- GREELEY-POLHEMUS GROUP. 1991. *National economic development procedures manual - Overview manual for conducting national economic development analysis*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Water Resources Support Center / Institute for Water Resources, 84 pages.
- GREEN, C.H. 1986-a. *Reason choice and risk*. Papier présenté au Colloque "Evaluer et maîtriser les risques" (Chantilly, France, 20-22/01/86). Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 7 pages.
- GREEN, C.H. 1986-b. *Social choice and benefit-cost analysis*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 26 pages.
- GREEN, C.H. 1988. *The relationships between the magnitude of flooding, stress and health*. Papier présenté au Annual Meeting of the British Psychology Society (Londres). Enfield, Royaume-Uni : Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 23 pages.
- GREEN, C.H. et PENNING-ROUSELL, E.C. 1986. Evaluating the intangible benefits and costs of a flood alleviation proposal. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, vol. 40, no. 3, 229-248.
- GREEN, C.H. et PENNING-ROUSELL, E.C. 1989. Flooding and the quantification of intangibles. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, vol. 3, no. 1, 27-30.
- GREEN, C.H. et TUNSTALL, S.M. 1990. *Is the economic evaluation of environmental goods possible ?*. Papier présenté aux Journées du Diplôme d'Etudes Approfondies Sciences et Techniques de l'Environnement "Risque et Gestion de l'Environnement" (Créteil et Paris, 31/05 et 01/06/90, Université Paris XII, ENPC, ENGREF). Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 15 pages, annexes.
- GREEN, C.H., PARKER, D.J. et PENNING-ROUSELL, E.C. 1993. *Designing for failure*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 14 pages.
- GREEN, C.H., TUNSTALL, S.M. et FORDHAM, M. 1990. *Perceptions of the risks of flooding*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 27 pages.
- GREEN, C.H., TUNSTALL, S.M. et HOUSE, M.A. 1988. *Evaluating the benefits of river water quality improvements*. Papier présenté à la First Conference of the International Association for Impact Assessment (Leiden, Pays-Bas, juin 1988). Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 11 pages.
- GRIGG, N.S. et HELWEG, O.J. 1975. State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas. *Water Resources Bulletin*, vol. 11, no. 2, 279-390.
- GRUNTFEST, E. et HUBER, C. 1989. Status report on flood warning systems in the United States. *Environmental Management*, vol. 13, no. 3, 297-286.
- GUILBOT, A., HEMAIN, J.C., RAOUS, P. et TREVISIOL, Y. 1982. *Etude et estimation du risque de simultanéité des crues de la Loire et de la Vienne au niveau de leur confluence*. Rapport pour le Service Hydrologique Centralisateur du Loiret. Montpellier, France: Laboratoire d'Hydrologie Mathématique (Université des Sciences et Techniques du Languedoc), 123 pages.
- GUILBOT, A., HEMAIN, J.C., RAOUS, P., TESSIER, G., KRYN, J.P. et GASOWSKI, Z. 1984. Protection des vals de Loire en aval de la confluence avec la Vienne. *La Houille Blanche*, no. 1/2, 121-131.
- GÜNTHER, W. et NIEKAMP, O. (non daté). *HOWAS - Hochwasserschadensdaten - Datenverwaltung und Auswertung*. Munich, République Fédérale d'Allemagne: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft & Institut für Angewandte Wasserwirtschaft, 48 pages.
- GÜNTHER, W. et SCHMIDTKE, R.F. 1988. Hochwasserschadenanalysen: Pilotuntersuchung über das Inn-Hochwasser im August 1985. *Wasserwirtschaft*, vol. 78, no. 2, 61-68.

- HAGERTY, D.J. 1991. Piping / sapping erosion: basic considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 117, no. 8, 991-1008.
- HAIMES, Y.Y., LAMBERT, J.H. et LI, D. 1992. Risk of extreme events in a multiobjective framework. *Water Resources Bulletin*, vol. 28, no. 1, 201-209.
- HANDMER, J.H. 1986. *Anuflood in New Zealand - part 2: background to flood loss measurement*. CRES Working Paper 1986/3. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 45 pages.
- HANDMER, J.W. 1991. Can we have too much warning time?: a study of Rockhampton (Australia). Dans "Inspiration: come to the headwaters" *Proceedings of the fifteenth Annual Conference of the Association of State Floodplain Managers* (Denver, Etats-Unis d'Amérique, 10-14/06/91). Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 155-159.
- HANDMER, J.W. et ORD, K.D. 1986. Flood warning and response. Dans SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. (sous la direction de). *Flood warning in Australia*. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 235-257.
- HANDMER, J.W., SMITH, D.I. et LUSTIG, T.L. 1988. The Sydney floods of 1986: warnings, damages, policy, and the future. Dans *Hydrology and Water Resources Symposium 1988*. Canberra, Australie: Australian National University, 206-210.
- HANSEN, C. 1989. Et si la rumeur disait vrai ?. *Aménagement et Nature*, no. 95, 16-17.
- HANSSON, R.O., NOULLES, D. et BELLOVICH, S.J. 1982. Knowledge, warning and stress: comparative roles in an urban floodplain. *Environment and Behaviour*, vol. 14, no. 2, 171-185.
- HEC (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER). 1980. *National economic development benefits for nonstructural measures*. Davis (Calif.), Etats-Unis-d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / HEC, 81 pages.
- HENRY, C. 1984. La microéconomie comme langage et enjeu de négociations. *Revue Economique*, vol. 35, no. 1, 177-197.
- HENRY, C. 1989. Investment projects and natural resources: economic rationality in Janus' role. *Ecological Economics*, vol. 1, 117-135.
- HOLMES, R.C. 1961. Composition and size of flood losses. Dans WHITE, G.F. (sous la direction de). *Papers on flood problems*. Department of Geography Research Paper no. 70, Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 7-20.
- HORN, D.R. 1987. Prioritizing flood control planning needs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 113, no. 2, 283-292.
- HORNBERGER, G.M. et SPEAR, R.C. 1980. Eutrophication in Peel Inlet - I: the problem-defining behaviour and a mathematical model for the phosphorus scenario. *Water Research*, vol. 14, no. 1, 29-42.
- HORNBERGER, G.M. et SPEAR, R.C. 1981. An approach to the preliminary analysis of environmental systems. *Journal of Environmental Management*, vol. 12, no. 1, 7-18.
- HOWARD, R.A. 1983. The evolution of decision analysis. Dans HOWARD, R.A. et MATHESON, J.E. (sous la direction de). *Readings on the principles and applications of decision analysis*. Menlo Park (Cal.), Etats-Unis d'Amérique: Strategic Decisions Group, 7-16.
- HOWE, C.W. 1971. *Benefit-cost analysis for water system planning*. Water Resources Monograph 2. Washington: American Geophysical Union, 144 pages.

- HOWE, C.W., COCHRANE, H.C., BUNIN, J.E. et KLING, R.W. 1991. *Natural hazard damage handbook (a guide to the uniform definition, identification and measurement of economic and ecological damages from natural hazard events)*. Washington: National Sciences Foundation, 163 pages.
- HUBERT, P. 1984. *Eaupuscule: une introduction à la gestion de l'eau*. Paris: Edition Marketing, 192 pages.
- HYDRATEC. 1988-a. *Etude des écoulements de la Loire entre Villerest et le Bec d'Allier: état sur modèle mathématique des écoulements de crue*. Rapport no. 7709.2. Orléans, France: Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents, 38 pages, annexes.
- HYDRATEC. 1988-b. *Etude des écoulements de la Loire entre Villerest et le Bec d'Allier: état des lieux hydraulique - étude de morphologie fluviale et proposition d'aménagement*. Rapport no. 7709.3. Orléans, France: Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents, 83 pages, annexes.
- IIBRBS (INSTITUTION INTERDEPARTEMENTALE DES BARRAGES-RESERVOIRS DU BASSIN DE LA SEINE). 1992. *Analyse empirique de l'apparition des désordres et des dommages résultant des différentes crues dans l'agglomération continue d'Ile-de-France: cahier des clauses techniques particulières*. Paris: IIBRBS, 12 pages, annexes.
- IWR (INSTITUTE FOR WATER RESOURCES). 1980. *Human costs of flooding and implementability of non-structural damage reduction in the Tug Fork Valley of West Virginia and Kentucky*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S Army Corps of Engineers / Institute for Water Resources, 446 pages.
- JACQ, A. 1987. La protection contre les inondations. Dans LORIFERNE, H. (sous la direction de). *Quarante ans de politique de l'eau en France*. Paris: Economica & D.A.E.I (Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports), 319-334.
- JAMES, L.D. 1972. Role of economics in planning flood plain land use. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 98, no. HY6, 981-992.
- JAMES, L.D. et HALL, B. 1986. Risk information for floodplain management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 112, no. 4, 485-499.
- JOHNSON, W.K. 1985. Significance of location in computing flood damage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 111, no. 1, 65-81.
- JONES-LEE, M.W. 1984. Natural disasters: a comparison of alternative methods for evaluating preventive measures. *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, vol. 9, no. 31, 188-205.
- KARLINGER, M.R. et ATTANASI, E.D. 1980. Flood risks and the willingness to purchase flood insurance. *Water Resources Research*, vol. 16, no. 4, 617-622.
- KARLSSON, P.O. et HAIMES, Y.Y. 1988-a. Risk-based analysis of extreme events. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 1, 9-20.
- KARLSSON, P.O. et HAIMES, Y.Y. 1988-b. Probability distributions and their partitioning. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 1, 21-29.
- KATES, R.W. 1965. *Industrial flood losses: damage estimation in the Lehigh Valley*. Department of Geography Research Paper no. 98. Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 76 pages.
- KATES, R.W. 1971. Natural hazards in human ecological perspective: hypotheses and models. *Economic Geography*, vol. 47, 438-451.
- KAUARK-LEITE, L.A. 1990. *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole*. Thèse de Doctorat en Sciences et Techniques de l'Environnement. Paris: ENPC, 451 pages.

- KHAN, A.A. 1987. Improved efficiency in the management of natural hazards: floods. *Interregional Symposium on Improved Efficiency in the Management of Water Resources*. New-York: Organisation des Nations Unies, 58 pages.
- KIEFER, W. 1976. Ermittlung von Hochwasserschäden. *Wasser und Boden*, no. 10, 255-258.
- KIRBY, A. 1991. Hazards research redux. *Natural Hazards Observer*, vol. XV, no. 3, 1-2.
- KITE, G.W. 1977. *Frequency and risk analysis in hydrology*. Fort Collins, Etats-Unis d'Amérique: Water Resources Publications, 224 pages.
- KLEMES, V. 1989. The improbable probabilities of extreme floods and droughts. Dans STAROSOLSZKY, O. et MELDER, O.M. (sous la direction de). *Hydrology of disasters*. Londres: James and James & Organisation Météorologique Mondiale, 43-51.
- KONIECZNY, R. 1992. Estimation of the subjective probability of levee damage. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 10 pages.
- KREIMER, A. et MUNASINGHE, M. 1991. Managing natural disasters and the environment: an overview. Dans KREIMER, A. et MUNASINGHE, M. (sous la direction de). *Managing natural disasters and the environment*. Washington: IBRD - The World Bank, 3-6.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. et DAVIS, D.R. 1983-a. A methodology for evaluation of flood forecast-response systems - 1: analyses and concepts. *Water Resources Research*, vol. 19, no. 6, 1423-1429.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. et DAVIS, D.R. 1983-b. A methodology for evaluation of flood forecast-response systems - 2: theory. *Water Resources Research*, vol. 19, no. 6, 1431-1440.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. et DAVIS, D.R. 1983-c. A methodology for evaluation of flood forecast-response systems - 3: case studies. *Water Resources Research*, vol. 19, no. 6, 1441-1454.
- KUNREUTHER, H. 1984. Causes of underinsurance against natural disasters. *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, vol. 9, no. 31, 206-220.
- LAGADEC, P. 1981. *La civilisation du risque: catastrophes technologiques et responsabilité sociale*. Paris: Editions du Seuil, 227 pages.
- LALO, A. 1992. Dire le risque: élaboration d'une stratégie d'information. Dans *Actes du séminaire sur les aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels* (Paris, 1-3/10/91, coordination PENEL M. et MARCO O.). Etudes du CEMAGREF - Montagne no. 2. Antony, France: CEMAGREF, 117-134.
- LEBLANC, D. et OUELLETTE, P. 1988. A probabilistic benefit-cost analysis of a zoning program for flood plains. *Water Resources Bulletin*, vol. 24, no. 2, 341-345.
- LEE, J.T. et HAN, K.Y. 1989. A dynamic levee breach model and its applications to hypothetical and actual flood. Dans *XXIII Congress of the International Association for Hydraulic Research (Ottawa, 21-25/08/89) - Proceedings of Technical Session B*. Ottawa: National Research Council Canada, 441-448.
- LEE, H.L. et MAYS, L.W. 1983. Improved risk and reliability model for hydraulic structures. *Water Resources Research*, vol. 19, no. 6, 1415-1422.
- LLIBOUTRY, L. 1985. Modèles et révolution en sciences de la terre. *La Recherche*, vol. 16, no. 163, 272-278.
- LOUCKS, D.P. 1992. Water resources systems models: their role in planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 118, no. 3, 214-223.
- LUND, J.R. 1991. Random variables versus uncertain values: stochastic modeling and design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 117, no. 2, 179-194.

- MACCHIONE, F. et SIRANGELO, B. 1989. Study of earth dam erosion due to overtopping. Dans STAROSOLSZKY, O. et MELDER, O.M. (sous la direction de). *Hydrology of disasters*. Londres: James and James & Organisation Météorologique Mondiale, 212-219.
- MACGILCHRIST, R. 1985. *Vers une meilleure évaluation et planification des projets de lutte contre les inondations*. Rapport pour le Groupe de Prospective (Ministère de l'Urbanisme et du Logement, Ministère de l'Environnement). Noisy-le-Grand: CERGRENE (ENPC), 2 tomes, 68 et 24 pages, annexes.
- MACGILCHRIST, R. 1988. Choix des critères de décision en situation de risque et d'incertitude: le cas du risque hydrologique. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 323-345.
- MAISTRE, P. et SIMEON, P. 1968. Bilan économique des ouvrages de protection contre les crues. *Comptes-rendus des Xèmes Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France*. Paris: Société Hydrotechnique de France, 8 pages.
- MARCHE, C., LESSARD, G. et EL-GHARBI, B. 1990. Le krigeage dual: une technique pour la cartographie automatisée des zones d'inondation. *Journal de Recherches Hydrauliques*, vol. 28, no. 5, 629-643.
- MARCHE, C., LESSARD, G. et THIEMONGE, N. 1991. *Evaluation automatisée des dommages: réalités et prospectives*. Communication au Colloque International "La Simulation des Ondes de Submersion". Montréal, Canada: Ecole Polytechnique de Montréal, 27 pages.
- MARSTON, S.A. 1983. Natural hazards research: towards a political economy perspective. *Political Geography Quarterly*, vol. 2, no. 4, 339-348.
- MASSON, J.M., GHIO, M., LALLEMENT, C., PARSY, C. et PHILIPPE, J.P. 1987. Débitmètrie: précision des stations de jaugeage. *La Houille Blanche*, no. 4/5, 333-338.
- MATHESON, J.E. et HOWARD, R.A. 1983. An introduction to decision analysis. Dans HOWARD, R.A. et MATHESON, J.E. (sous la direction de). *Readings on the principles and applications of decision analysis*. Menlo Park (Cal.), Etats-Unis d'Amérique: Strategic Decisions Group, 19-55.
- MAURICE, J. et SCHUBERT, K. 1989-a. *Protection contre les inondations au Bangladesh et aversion pour le risque*. Document de travail. Paris: Caisse Centrale de Coopération Economique, 19 pages.
- MAURICE, J. et SCHUBERT, K. 1989-b. *Protection contre les inondations au Bangladesh: amélioration du sentier de croissance*. Document de travail. Paris: Caisse Centrale de Coopération Economique, 21 pages.
- McALLISTER, D.M. 1980. *Evaluation in environmental planning: assessing environmental, social, economic and political trade-offs*. Cambridge (Mass.), Etats-Unis d'Amérique: MIT Press, 308 pages.
- McBEAN, E.A., FORTIN, M. et GORRIE, J. 1986. A critical analyses of residential flood damage estimation curves. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, 86-94.
- McBEAN, E.A., GORRIE, J., FORTIN, M., DING, J. et MOULTON, R. 1988-a. Flood depth-damage curves by interview survey. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 114, no. 6, 613-634.
- McBEAN, E.A., GORRIE, J., FORTIN, M., DING, J. et MOULTON, R. 1988-b. Adjustment factors for flood damage curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 114, no. 6, 635-646.
- MERANI, N.S. 1991. The International Decade for Natural Disaster Reduction. Dans KREIMER, A. et MUNASINGHE, M. (sous la direction de). *Managing natural disasters and the environment*. Washington: IBRD - The World Bank, 36-39.

- MERMET, L. et GRANDJEAN, A. 1987. L'environnement face aux évaluations "coûts-avantages" de projets: un guide pratique. Dans *L'environnement dans l'analyse et la négociation des projets*. Cahier du GERMES no. 12. Paris: Association GERMES, 59-81.
- MICHEL, C. 1976. *Approche économique du choix de la fréquence de la crue de projet*. Note FO.01.09.76. Antony, France: CEMAGRÉF / Division Hydrologie-Hydraulique, 11 pages.
- MILETI, D.S. 1992. Public response to flood warnings. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 15 pages.
- MILLS, A.S., DAVIS, S.A. et HANSEN, W.J. 1991. *National economic development procedures manual - Urban flood damage: volume II (Primer for surveying flood damage for residential structures and contents)*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Water Resources Support Center / Institute for Water Resources, 166 pages.
- MIQUEL, J. 1984. *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues*. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Paris: Eyrolles, 160 pages.
- MITCHELL, J.K. 1990. *Natural hazard predictions and responses in very large cities*. Communication au Workshop "Prediction and Perception of Natural Hazards" (Perugia, Italie, 22-26/10/90). Genève: Organisation des Nations-Unies / IDNDR, 15 pages.
- MOATTI, J.P. 1989. *Economie de la sécurité: de l'évaluation à la prévention des risques technologiques*. Paris: Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, 302 pages.
- MONTZ, B.E. 1992. *The impact of hazard area disclosure on property values in three New Zealand communities*. Working paper no. 76. Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 76 pages.
- MONTZ, B.E. et TOBIN, G. 1986. *Spatial and temporal variability in residential land values following catastrophic flooding*. Quick Response Research Report no. 17. Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 15 pages.
- MOSER, D.A. 1992-a. Assessment of the economic effects of flooding. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 13 pages.
- MOSER, D.A. 1992-b. Economics of selection of flood mitigation measures. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 12 pages.
- MUNIER, B. 1989-a. New models of decision under uncertainty: an interpretative essay. *European Journal of Operational Research*, vol. 38, no. 3, 307-317.
- MUNIER, B. 1989-b. *Expected utility versus anticipated utility: where do we stand*. Papier présenté à la vingt-et-unième Conférence annuelle de l'Institut de Mathématiques Economiques (Dijon, France, 24/11/89), 23 pages.
- MUNIER, B. 1992. L'évaluation économique des risques naturels. Dans *Actes du séminaire sur les aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels* (Paris, 1-3/10/91, coordination PENEL M. et MARCO O.). Etudes du CEMAGREF - Montagne no. 2. Antony, France: CEMAGREF, 59-68.
- NAGY, L., FEHER, A., SZEPESSY, J. et ZABO, T. 1992. Exploration and stability calculation method for subsoil of flood dikes. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 18 pages.
- NEAL, J., PARKER, D.J. et TUNSTALL, S.M. 1989. *Flood warnings in the Severn-Trent Water Authority area: an investigation of standards of service, effectiveness and customer satisfaction*. Geography and Planning Paper no. 23. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University, 68 pages, annexes.

- NUNES-CORREIA, F., SARAIVA, M.G., SOCSKA, L. et SOEIRO, C. 1990. Public perceptions and public participation in water projects. *Actes du Colloque Européen "H2O la Gestion de l'Eau"* (4-6/12/90, Ministère délégué à l'Environnement et à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs). Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 13 pages.
- OBERLIN, G. et LAMBERT, P. 1991. Inondabilité: occupation du sol et besoins de protection. *Courants*, no. 8, 45-52.
- OCDE (ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES). 1985. *Gestion des projets d'aménagement des eaux: prise de décision et évaluation des investissements*. Paris: OCDE, 269 pages.
- OCDE (ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES). 1991. *L'état de l'environnement*. Paris: OCDE, 391 pages.
- OMM (ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE). 1990. *Cost-benefit assessment techniques and user requirements for hydrological data*. Operational Hydrology Report No. 32. Genève: OMM, 152 pages.
- ONU (ORGANISATION DES NATIONS UNIES). 1976. *Prévention et atténuation des catastrophes: le point des connaissances actuelles - volume 2: aspects hydrologiques*. Genève: ONU / Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les Secours en cas de Catastrophes, 106 pages.
- ONU (ORGANISATION DES NATIONS UNIES). 1978. *Prévention et atténuation des catastrophes: le point des connaissances actuelles - volume 5: aspects relatifs à l'occupation du sol*. Genève: ONU / Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les Secours en cas de Catastrophes, 104 pages.
- ONU (ORGANISATION DES NATIONS UNIES). 1979. *Prévention et atténuation des catastrophes: le point des connaissances actuelles - volume 7: aspects économiques*. Genève: ONU / Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les Secours en cas de Catastrophes, 78 pages.
- OTU (OMNIUM TECHNIQUE D'ETUDES URBAINES). 1965. *Crues de la Loire: pertes économiques dues à une crue éventuelle*. Orléans, France: Service Hydrologique Centralisateur du Bassin de la Loire, 2 volumes, 99 pages, annexes.
- OUELLETTE, P., EL-JABI, N. et ROUSSELLE, J. 1986. *Analyse de séries chronologiques des dommages d'inondation*. Etude no. 146 - série scientifique. Sainte-Foy, Canada: Environnement Canada / Direction Générale des Eaux Intérieures de la Région du Québec / Direction de la Planification et de la Gestion, 32 pages.
- OUELLETTE, P., LEBLANC, D., EL-JABI, N. et ROUSSELLE, J. 1988. Cost-benefit analysis of flood-plain zoning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 114, no. 3, 326-334.
- OWEN, H.J. et WENDELL, M. 1981. *Effectiveness of flood warning and preparedness alternatives*. Fort Belvoir (Virginia), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Water Resources Support Center / Institute for Water Resources, 95 pages.
- PARK, W.M. et MILLER, W.L. 1982. Flood risk perceptions and overdevelopment in the floodplain. *Water Resources Bulletin*, vol. 18, no. 1, 89-94.
- PARKER, D.J. et NEAL, J. 1990. Evaluating the performance of flood warning systems. Dans HANDMER, J.W. et PENNING-ROWSELL, E.C. (sous la direction de). *Hazards and the communication of risk*. Aldershot, Royaume-Uni: Gower Technical Press, 137-156.
- PARKER, D.J. et PENNING-ROWSELL, E.C. 1972. *Problems and methods of flood damage assessment*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 28 pages.
- PARKER, D.J. et TUNSTALL, S.M. 1991. *Managing flood warning systems: the United Kingdom experience*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 6 pages.

- PARKER, D.J., GREEN, C.H. et THOMPSON, P.M. 1987. *Urban flood protection benefits: a project appraisal guide*. Aldershot, Royaume-Uni: Gower Technical Press, 150 pages, annexes.
- PEARCE D.W. (sous la direction de). 1978. *The valuation of social cost*. Londres: George Allen and Unwin, 199 pages.
- PEARCE, D.W. et MARKANDYA, A. 1989. *L'évaluation monétaire des avantages des politiques de l'environnement*. Paris: Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 71 pages, annexes.
- PEERBOLTE, E.B. 1993. *Sea-level rise and safety: a consideration of safety impacts in low-lying coastal areas with particular reference to the Netherlands*. PhD Thesis. Enschede, Pays-Bas: Universiteit Twente, 316 pages.
- PENNING-ROUSELL, E.C. 1981. Non-structural approaches to flood control: flood plain land use regulation and flood warning schemes in England and Wales. Dans *Comptes-rendus du Onzième Congrès de la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage*, 193-211.
- PENNING-ROUSELL, E.C. 1986. The development of integrated flood warning systems. Dans SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. (sous la direction de). *Flood warning in Australia*. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 15-36.
- PENNING-ROUSELL, E.C. 1991. *The hazards of policy analysis*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 27 pages.
- PENNING-ROUSELL, E.C. et CHATTERTON, J.B. 1977. *The benefits of flood alleviation: a manual of assessment techniques*. Aldershot, Royaume-Uni: Gower Technical Press, 133 pages, annexes.
- PENNING-ROUSELL, E.C. et GREEN, C.H. 1990. *Benefit-cost analysis of flood alleviation: a changing art*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 10 pages.
- PENNING-ROUSELL, E.C. et HANDMER, J.W. 1986. *Evaluating flood warning effectiveness: the conceptual, methodological and practical research problems*. CRES Working Paper 1986/6. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 33 pages.
- PENNING-ROUSELL, E.C., PARKER, D.J., THOMPSON, P.M. et GREEN, C.H. 1988. *Flood loss data and models for appraising flood alleviation investment: explanation and critical evaluation*. Papier présenté au 39ème Congrès de la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage (Dubrovnik, Yougoslavie, 25/09 au 2/10 1988), 13 pages.
- PENNING-ROUSELL, E.C., CHATTERTON, J.B., DAY, H.J., FORD, D.T., GREENAWAY, M.A., SMITH, D.I., WOOD, T.R. et WITTS, R.C. 1987. Comparative aspects of computerized floodplain data management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 113, no. 6, 725-744.
- PENNING-ROUSELL, E.C., PEERBOLTE, E.B., NUNES-CORREIA, F., FORDHAM, M., GREEN, C.H., PFLÜGNER, W., ROCHA, J., SARAIVA, M. (da Graça), SCHMIDTKE, R.F., TORTEROTOT, J.P. et van der VEEN, A. 1992. Flood vulnerability analysis and climatic change: towards a European methodology. Dans SAUL, A.J. (sous la direction de). *Floods and flood management* (Third International Conference, Florence, Italie, 24-26/11/92). Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers, 343-361.
- PFLÜGNER, W. 1984. Multiple Objective Planning: umfassendes Planungskonzept mit mehrdimensionalem Bewertungsansatz. Dans KLAUS, J. (sous la direction de). *Entscheidungshilfen für die Infrastrukturplanung*. Baden-Baden, République Fédérale d'Allemagne: Nomos Verlagsgesellschaft, 335-366.
- PLAZAK, D.J. 1986. Flood control benefits revisited. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 112, no. 2, 265-276.

- POTTER, K.W. et WALKER, J.F. 1985. An empirical study of flood measurement error. *Water Resources Research*, vol. 21, no. 3, 403-406.
- QUENEAU, R. 1943. *Fendre les flots*. Cité dans Adour-Garonne, no. 52 (1992).
- RAMIREZ, G., ADAMOWICZ, W.L., EASTER, K.W. et GRAHAM-TOMASI, T. 1988. Ex-post analysis of flood control: benefit-cost analysis and the value of information. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 8, 1397-1405.
- RAY, A. 1984. *Cost-benefit analysis: issues and methodologies*. Baltimore (Maryland), Etats-Unis d'Amérique: John Hopkins University Press & The World Bank, 158 pages.
- REITANO, B. et ROSSI, G. 1992. Evaluation and multicriterion ranking of alternative flood mitigation actions. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 13 pages.
- RENSHAW, E.F. 1961. The relationship between flood losses and flood-control benefits. Dans WHITE, G.F. (sous la direction de). *Papers on flood problems*. Department of Geography Research Paper no. 70, Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 21-45.
- RIEBSAME, W.E. 1991. Climate hazards, climate change and development planning. Dans KREIMER, A. et MUNASINGHE, M. (sous la direction de). *Managing natural hazards and the environment*. Washington: IBRD - The World Bank, 9-16.
- ROCHE, M.F. 1963. *Hydrologie de surface*. Paris: Gauthier-Villars, 430 pages.
- ROCHE, P.A. (sous la direction de). 1988. *Guide de prévision des crues*. Paris: Société Hydrotechnique de France & Ministère chargé de l'Environnement, 2 volumes, 751 pages.
- ROCHE, P.A. 1989-a. Les inondations: l'exemple de Nîmes. *La Recherche*, no. 212 (supplément spécial), 17-21.
- ROCHE, P.A. 1989-b. The french policy for prevention of flood damage. Dans STAROSOLSZKY, O. et MELDER, O.M. (sous la direction de). *Hydrology of disasters*. Londres: James and James & Organisation Météorologique Mondiale, 69-83.
- ROCHE, P.A. 1990. Economic benefits of flood forecasting and control. Dans *Economic and social benefits of meteorological and hydrological services - Proceedings of the technical conference*. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 280-287.
- RODER, W. et BERRY, B.J.L. 1961. Associations between expected flood damages and the characteristics of urban flood plains: a factorial analysis. Dans WHITE, G.F. (sous la direction de). *Papers on flood problems*. Department of Geography Research Paper no. 70, Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 46-61.
- ROSEN, H. et REUSS, M. 1988. *The flood control challenge: past present and future*. Chicago, Etats-Unis d'Amérique: Public Works Historical Society, 166 pages.
- ROSSI, P.H., WRIGHT, J.D. et WEBER-BURDIN, E. 1982. *Natural hazards and public choice: the state and local politics of hazard mitigation*. New-York: Academic Press, 274 pages, annexes.
- ROSSMILLER, R. 1991. If there's water in my living room I must be in a floodplain. Dans *"Inspiration: come to the headwaters" Proceedings of the fifteenth Annual Conference of the Association of State Floodplain Managers* (Denver, 10-14/06/91). Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 72-74.
- ROUSSELLE, J. et EL-JABI, N. 1977. Représentation stochastique des dommages dans les plaines inondables. *Revue Canadienne de Génie Civil*, vol. 4, no. 2, 170-177.

- ROUSSELLE, J., WATT, W.E., LATHEM, K.W., NEILL, C.R. et RICHARDS, T.L. 1990. *Hydrologie des crues au Canada - guide de planification et de conception*. Ottawa: Conseil National de Recherches Canada, 277 pages.
- SAGERI. 1988. *Evaluation de la vulnérabilité*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère chargé de l'Environnement / DEPPR / DRM, 38 pages, annexes.
- SCHAAKE, J.C. et FIERING, M.B. 1967. Simulation of a national flood insurance fund. *Water Resources Research*, vol. 3, no. 4, 913-929.
- SEKI, K. 1990. Comprehensive floodplain management in Japan. Dans *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Storm Drainage* (Osaka, Japon), 1405-1410.
- SHABMAN, L. 1988. The benefits and costs of flood control: reflections on the Flood Control Act of 1936. Dans ROSEN, H. et REUSS, M. (sous la direction de). *The flood control challenge: past present and future*. Chicago, Etats-Unis d'Amérique: Public Works Historical Society, 109-123.
- SHABMAN, L. et STEPHENSON, K. 1992. The possibility of community-wide flood control benefits: evidence from voting behaviour in a bond referendum. *Water Resources Research*, vol. 28, no. 4, 959-964.
- SHIELDS Jr, F.D. et GRAY, D.H. 1992. Effects of woody vegetation on sandy levee integrity. *Water Resources Bulletin*, vol. 28, no. 5, 917-931.
- SICCARDI, F. 1992. A full scale experiment for a non-structural policy for mitigation of the flood effects: the Arno project. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 14 pages.
- SIMEON, P. 1981. *Tendances récentes des procédés français de réduction des nuisances dues aux inondations*. Communication au séminaire "l'évaluation des risques et les processus de décision" (Institut Curie, Orsay, 17-19/12/80). Paris: BCEOM, 15 pages.
- SLOVIC, P. 1987. Perception of risk. *Science*, vol. 236, 280-285.
- SMITH, D.I. 1986-a. *Anuflood in New Zealand - part 3: Anuflood development and application*. CRES Working Paper 1986/4. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 52 pages.
- SMITH, D.I. 1986-b. Cost-effectiveness of flood warnings. Dans SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. (sous la direction de). *Flood warning in Australia*. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 203-219.
- SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. 1986. Flooding in Australia: the background to flood warnings. Dans SMITH, D.I. et HANDMER, J.W. (sous la direction de). *Flood warning in Australia*. Canberra, Australie: Australian National University / Centre for Resource and Environmental Studies, 3-13.
- SMITH, D.K. 1989. *Role des services météorologiques et hydrologiques dans la prévention des catastrophes naturelles*. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 46 pages.
- SNIEDOVICH, M. et DAVIS, D.R. 1977. Evaluation of flood forecasting-response systems. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, vol. 103, no. WR1, 83-97.
- SOMLYÓDY, L. et VARIS, O. 1992. *Water quality modeling of rivers and lakes*. Working paper WP-92-041. Laxenburg, Autriche: International Institute for Applied System Analysis, 85 pages.
- SOYKE, P.D. 1988. Flood damage analysis reconnaissance phase studies. Dans *Proceedings of a seminar on flood damage reduction reconnaissance-phase studies* (09-11/08/88). Davis (Calif.), Etats-Unis d'Amérique: U.S. Army Corps of Engineers / Hydrologic Engineering Center, 59-67.
- SQUIRE, L. et van der TAK, H.G. 1975. *Analyse économique des projets*. Paris: Economica & la Banque Mondiale, 164 pages.

- STAROSOLSZKY, O. 1992. Flood control by levees. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 19 pages.
- SULEMAN, M.S., N'JAI, A., GREEN, C.H. et PENNING-ROWSELL, E.C. 1988. *Potential flood damage data: a major update*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 42 pages, annexes.
- TAI, K.C. 1975. *Analysis and synthesis of flood control measures*. Hydrology paper no. 76. Fort Collins (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Colorado State University, 67 pages, annexes.
- TANG, J.C.S, VONGVISESSOMJAI, S. et SAHASAKMONTRI, K. 1992. Estimation of flood damage cost for Bangkok. *Water Resources Management*, vol. 6, no. 1, 47-56.
- THAMPAPILLAI, D.J. et MUSGRAVE, W.F. 1985. Flood damage mitigation: a review of structural and nonstructural measures and alternative decision frameworks. *Water Resources Research*, vol. 21, no. 4, 411-424.
- THEYS, J. 1988. La société vulnérable. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 4-36.
- THOMPSON, M.E. et STOEVENER, H.H. 1983. Estimating residential flood control benefits using implicit price equations. *Water Resources Bulletin*, vol. 19, no. 6, 889-895.
- THUNBERG, E. et SHABMAN, L. 1991. Determinants of landowners willingness to pay for flood hazard reduction. *Water Resources Bulletin*, vol. 27, no. 4, 657-665.
- TOBIN, G.A. et NEWTON, T.G. 1986. A theoretical framework of flood induced changes in urban land values. *Water Resources Bulletin*, vol. 22, no. 1, 67-71.
- TORTEROTOT, J.P. 1988. *Organisation et réalisation d'enquêtes sur les dommages dus aux inondations*. Rapport pour le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement (SRETIE) et pour le Secrétariat d'Etat à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 49 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P. 1989. *Inondations et facteur humain: quelles orientations pour des observatoires?*. Rapport pour le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (SRETIE et DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 40 pages (version actualisée, 1990).
- TORTEROTOT, J.P. 1990-a. *Modélisation et évaluation du coût des dommages dus aux inondations à l'échelle d'un bief de cours d'eau*. Rapport pour le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (SRETIE et DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 31 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P. 1990-b. *Exploitation des données recueillies sur les inondations et les zones inondables: hypothèses et procédures de la modélisation des dommages*. Note de travail. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 14 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P. 1991. *Saisie informatique et critique des données recueillies sur les zones inondables*. Rapport pour le Ministère de l'Environnement (SRETIE et DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 31 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P. 1992. *Analyse des réponses à l'annonce de crue et impact sur les dommages dus aux inondations dans plusieurs régions de France*. Rapport interne pour le projet EUROFLOOD. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 81 pages, annexes.

- TORTEROTOT, J.P. et MARGUET, I. 1989. *Recueil de données sur les zones inondables*. Rapport pour le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 21 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P. et ROCHE, P.A. 1990. Evaluations socio-économiques pour la gestion du risque d'inondation. *Actes du Colloque Européen: "H2O la Gestion de l'Eau"* (4-6/12/90, Ministère délégué à l'Environnement et à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs). Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 481-490.
- TORTEROTOT, J.P. et THOMAS, C. 1989. *Saisie et contrôle des données d'enquêtes sur les dommages dus aux inondations*. Rapport pour le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement (SRETIE) et pour le Secrétariat d'Etat à la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs (DEPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 45 pages, annexes.
- TORTEROTOT, J.P., GREEN, C.H. et CORDEIRO-NETTO, O. 1990. *Défaillances et insuffisances de réseaux d'assainissement: peut-on évaluer le coût des dommages?*. Session no. 140 du Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France (14-15/03/90). Paris: Société Hydrotechnique de France, 9 pages.
- TORTEROTOT, J.P., KAUARK-LEITE, L.A. et ROCHE, P.A. 1992. Analysis of individual real-time responses to flooding and influence on damage to households. Dans SAUL, A.J. (sous la direction de). *Floods and flood management* (Third International Conference, Florence, Italie, 24-26/11/92). Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers, 363-387.
- TOTH, S. 1992-a. Historical development of the Hungarian flood control system and the basic principles of its further development. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 30 pages.
- TOTH, S. 1992-b. Case study on bursting of levee caused by hydraulic subsoil failure at the intersections of ancient and silted river bed in Hungary. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 12 pages.
- TOWFIGHI, P. 1991. Integrated planning for natural and technological disasters. Dans KREIMER, A. et MUNASINGHE, M. (sous la direction de). *Managing natural disasters and the environment*. Washington: IBRD - The World Bank, 106-110.
- TRIBUS, M. 1972. *Décisions rationnelles dans l'incertain*. Paris: Masson, 502 pages.
- TUNG, Y.K. et MAYS, L.W. 1981. Risk models for flood levee design. *Water Resources Research*, vol. 17, no. 4, 833-841.
- TUNSTALL, S.M. et BOSSMAN-AGGREY, P. 1988. *Waltham Abbey and Thornwood - Essex: an assessment of the effects of the floods of 29th July 1987 and the benefits of flood alleviation*. Enfield, Royaume-Uni: Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 64 pages, annexes.
- TWOHIG, J., HUNTER, W. et RECK, V. 1988. Flood damage analysis - Grandview Heights case study. Dans *Proceedings of a seminar on flood damage reduction reconnaissance-phase studies* (09-11/08/88). Davis (Calif.), Etats-Unis d'Amérique: Hydrologic Engineering Center (U.S. Army Corps of Engineers), 41-58.
- VALIRON, F. et al. 1988. *Gestion des eaux (tome 3): automatisation - informatisation - télégestion*. Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 551 pages.
- VANSSAY (de), B. 1988-a. Systèmes d'assurance et plans d'exposition aux risques: des outils efficaces de la prévention des catastrophes naturelles ?. Dans FABIANI, J.L. et THEYS, J. (sous la direction de). *La société vulnérable*. Paris: Presses de l'Ecole Normale Supérieure, 539-563.
- VANSSAY (de), B. 1988-b. L'évaluation des risques naturels. *Aménagement et Nature*, no. 90, 10-11.

- VANSSAY (de), B. 1992. *Les inondations du 22 septembre 1992 dans le Vaucluse*. Neuilly-sur-Seine, France: Ministère de l'Environnement / DPPR / DRM, 106 pages.
- VIAU, J.R. 1985. Bref aperçu de la situation socio-économique de l'inondation à travers le monde. *Sciences et Techniques de l'Eau*, vol. 18, no. 2, 153-157.
- VOLLE, M. 1985. *Analyse des données*. Paris: Economica, 324 pages.
- WADDELL, E. 1977. The hazards of scientism: a review article. *Human Ecology*, vol. 5, no. 1, 69-76.
- WARD, W.A., DEREN, B.J. et D'SILVA, E.H. 1991. *The economics of project analysis: a practitioner's guide*. Washington: EDI Technical Materials & The World Bank / Economic Development Institute, 318 pages.
- WHITE, G.F. 1964. *Choice of adjustment to floods*. Department of Geography Research Paper no. 93. Chicago, Etats-Unis d'Amérique: University of Chicago, 150 pages.
- WHITE, G.F. 1982. Le risque local: inondations. Papier présenté au Colloque Franco-Américain "Evaluation des risques et processus de décision" (1980). *Recherche - Invention - Innovation*, no. 154, 50-53.
- WHITE, G.F. et HAAS, J.H. 1975. *Assessment of research on natural hazards*. Cambridge, Etats-Unis d'Amérique: MIT Press, 487 pages.
- WIND, H.G. et PEERBOLTE, E.B. 1992. *Coastal zone management: tools for initial design*. Papier présenté à la conférence Euro-Coast 1992 (7-12/09/92, Kiel, République Fédérale d'Allemagne). Enschede, Pays-Bas: Universiteit Twente / Civil Engineering and Management, 10 pages.
- YEVJEVICH, V. 1992. Classification and description of flood mitigation measures. *Pre-proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Coping with floods"* (Erice, Italie, 3-15/11/92), 12 pages.
- YEZER, A.M. et RUBIN, C.B. 1987. *The local economic effects of natural disasters*. Working paper no. 61. Boulder (Col.), Etats-Unis d'Amérique: Natural Hazards Research and Applications Information Center (University of Colorado), 75 pages.
- YOSHIMOTO, T. et KINOUCI, T. 1992. Graphic design procedure for flood control facilities with two-step economical analysis. Dans *"Re-découvrir l'eau: une priorité" - Novatech 92 - Conférence Internationale sur les Nouvelles Technologies en Assainissement Pluvial* (Lyon, France, 3-5/11/92), 484-494.
- ZAMIATINE, E. 1988. *L'inondation*. Paris: Solin (Editions du Seuil), 89 pages (traduction de l'édition originale en russe, 1929).
- ZARATE-SAAB, L.F. 1981. *Précision des relations hauteur-débit: rapport de synthèse*. Nanterre, France: Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, 59 pages.
- ZECH, M., HUBERT, G. et TORTEROTOT, J.P. 1992. *Etude de faisabilité d'un observatoire des effets du plan d'exposition aux risques d'inondation sur l'habitat et l'urbanisme à Saintes*. Rapport pour le Ministère de l'Environnement (DPPR/DRM). Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 55 pages, annexes.
- ZIEGLER, J.O. 1991. *Analyse d'une modélisation simplifiée des submersions pour l'évaluation du coût des dommages dus aux inondations*. Stage de fin d'études de la Technische Universität München. Noisy-le-Grand, France: CERGRENE (ENPC-ENGREF), 82 pages, annexes.

